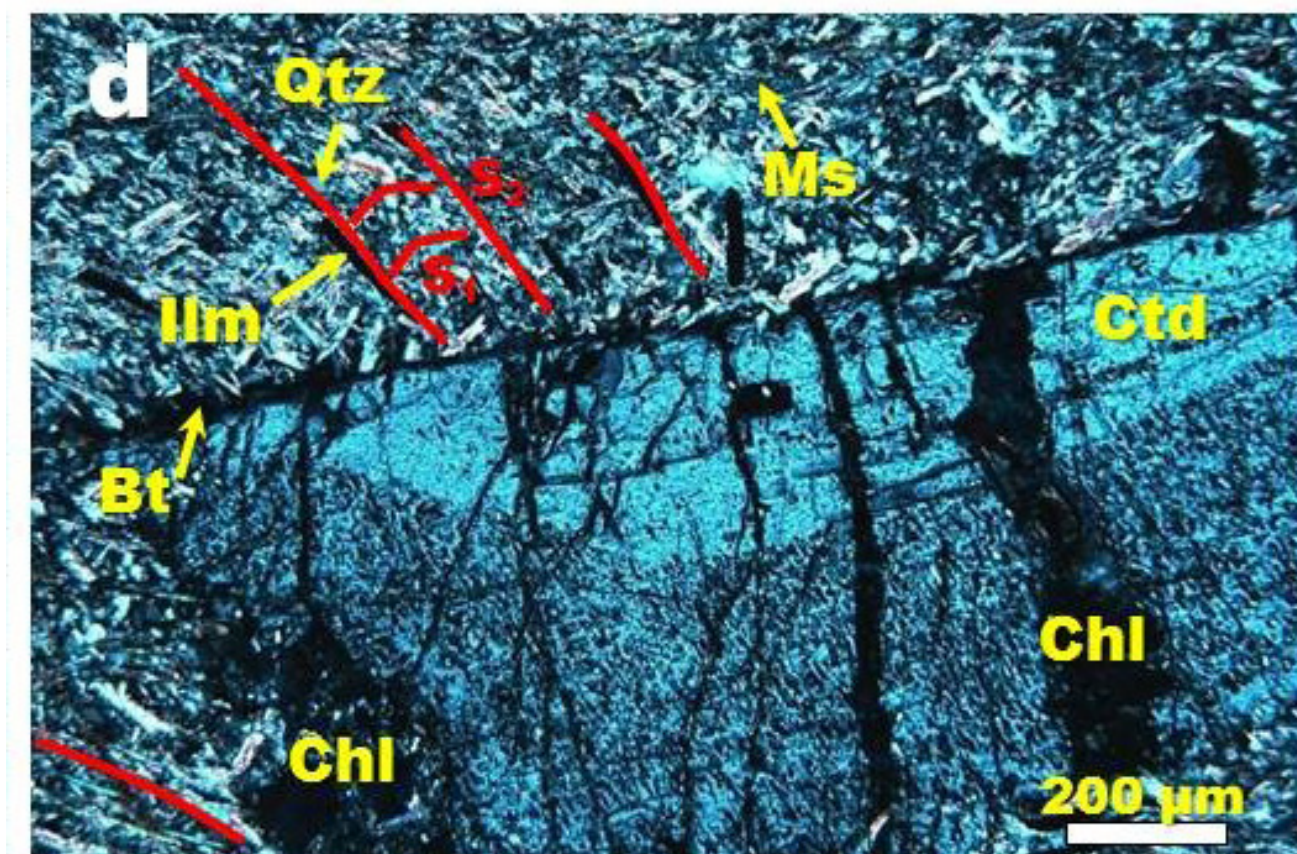


BOLETÍN DE CIENCIAS DE LA TIERRA

No. 40, Julio de 2016

ISSN 0120 - 3630



Ocurrencia de rocas metapelíticas con presencia de cloritoide y su significado en el metamorfismo de la Formación Silgará en la región central del Macizo de Santander
Oscar Mauricio Castellanos-Alarcón, Carlos Alberto Ríos-Reyes & Carlos Alberto García-Ramírez

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 40, Julio 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 7.

Artículo: Ocurrencia de rocas metapelíticas con presencia de cloritoide y su significado en el metamorfismo de la Formación Silgará en la región central del Macizo de Santander

Autores: Oscar Mauricio Castellanos-Alarcón, Carlos Alberto Ríos-Reyes & Carlos Alberto García-Ramírez

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/rbet>

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

Occurrence of chloritoid-bearing metapelitic rocks and their significance in the metamorphism of the Silgará Formation at the Central Santander Massif Oscar Mauricio Castellanos-Alarcón, Carlos Alberto Ríos-Reyes & Carlos Alberto García-Ramírez.	5
Geology, lithostratigraphy, determination of the quality and classification of carbones of Espino-Boyacá, Colombia Jenny Esmeralda Velandia-Tarazona, María Esther Rivera, Jesús Ramón Delgado-Rodríguez & Jorge Mario Monroy-Gallo.	16
Stratigraphic analysis and calculation of reserves in the Colorado field, MMV, Colombia Ricardo Mier-Umaña, Tania Sarith Palmera-Henao, Juan Sebastian Luna-Osorio & Leidy Alexandra Delgado-Blanco.	24
Drilling grid blasting upgrading based on Geological Strength Index (GSI), case “La Maruja” mine, Colombia Camilo Andrés Ortega-Ramos, Andrés Felipe Jaramillo-Gil & Jorge Martín Molina-Escobar.	32
Failure potential index for slopes conditioned by landforms Sebastián Camacho-Orozco & Alfonso Mariano Ramos-Cañón.	39
Review of fossiliferous localities at Antioquia department, Colombia Yenny Paola Valencia-Giraldo, Luis Carlos Escobar-Arenas, Juliana Mendoza-Ramírez, Daniel Delgado-Sierra, Andrés Leonardo Cárdenas-Rozo.	46
Biological and physicochemical evaluation of mortar as substrate for manufacturing artificial reef Monica Andrea Bedoya-Gutiérrez, Jorge Iván Tobón, Tatiana Correa-Herrera & Juan Diego Correa-Rendón.	55
Efecto del glicerol en la inhibición de la combustión espontánea de carbón sub-bituminoso Esteban Alberto Taborda-Acevedo, William J. Jurado & Farid B. Cortés-Correa.	64
Toma de decisiones mediante el uso de un algoritmo para analizar los sistemas de producción de hidrocarburos Robinson Stevens Salazar-Rúa, Johan Darío Caicedo-Reyes & Jovani Alberto Jiménez-Builes.	75

Our cover

Occurrence of chloritoid-bearing metapelitic rocks and their significance in the metamorphism of the Silgará Formation at the Central Santander Massif

Authors:

Oscar Mauricio Castellanos-Alarcón,
Carlos Alberto Ríos-Reyes & Carlos Alberto García-Ramírez





UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

CONTENIDO

Ocurrencia de rocas metapelíticas con presencia de cloritoide y su significado en el metamorfismo de la Formación Silgará en la región central del Macizo de Santander Oscar Mauricio Castellanos-Alarcón, Carlos Alberto Ríos-Reyes & Carlos Alberto García-Ramírez.	5
Geología, litoestratigrafía, determinación de la calidad y clasificación de carbones de El Espino-Boyacá, Colombia Jenny Esmeralda Velandia-Tarazona, María Esther Rivera, Jesús Ramón Delgado-Rodríguez & Jorge Mario Monroy-Gallo.	16
Análisis estratigráfico y cálculo de reservas del Campo Escuela Colorado, VMM, Colombia Ricardo Mier-Umaña, Tania Sarith Palmera-Henao, Juan Sebastian Luna-Osorio & Leidy Alexandra Delgado-Blanco.	24
Modificación de las mallas de perforación de voladuras a partir del índice de esfuerzo geológico (GSI), caso mina “La Maruja”, Colombia Camilo Andrés Ortega-Ramos, Andrés Felipe Jaramillo-Gil & Jorge Martin Molina-Escobar.	32
Indicador potencial de falla para taludes condicionados por las geoformas Sebastián Camacho-Orozco & Alfonso Mariano Ramos-Cañón.	39
Revisión de las localidades fosilíferas del departamento de Antioquia, Colombia Yenny Paola Valencia-Giraldo, Luis Carlos Escobar-Arenas, Juliana Mendoza-Ramírez, Daniel Delgado-Sierra, Andrés Leonardo Cárdenas-Rozo.	46
Evaluación biológica y fisicoquímica de un mortero como sustrato para la fabricación de arrecifes artificiales Monica Andrea Bedoya-Gutiérrez, Jorge Iván Tobón, Tatiana Correa-Herrera & Juan Diego Correa-Rendón.	55
Glycerol effect on the inhibition of spontaneous combustion of sub-bituminous coal Esteban Alberto Taborda-Acevedo, William J. Jurado & Farid B. Cortés-Correa.	64
Decision making by using a computer algorithm to analyze hydrocarbon production systems Robinson Stevens Salazar-Rúa, Johan Darío Caicedo-Reyes & Jovani Alberto Jiménez-Builes.	75

Nuestra carátula

Imagen alusiva al artículo:

Ocurrencia de rocas metapelíticas con presencia de cloritoide y su significado en el metamorfismo de la Formación Silgará en la región central del Macizo de Santander

Autores:

Oscar Mauricio Castellanos-Alarcón,
Carlos Alberto Ríos-Reyes & Carlos Alberto García-Ramírez





UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

Occurrence of chloritoid-bearing metapelitic rocks and their significance in the metamorphism of the Silgará Formation at the Central Santander Massif

Oscar Mauricio Castellanos-Alarcón ^a, Carlos Alberto Ríos-Reyes ^b & Carlos Alberto García-Ramírez ^b

^a Programa de Geología, Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia. oscarmca@yahoo.es

^b Escuela de Geología, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. carlos@uis.edu.co

^b Escuela de Geología, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. cgarcia@uis.edu.co

Received: January 19th, 2015. Received in revised form: November 1th, 2015. Accepted: April 7th, 2016.

Abstract

We report here for the first time the occurrence of chloritoid in Mg-Al-rich metapelitic rocks of the Silgará Formation at the Central Santander Massif, which was metamorphosed up to the amphibolite facies. These rocks contain an unusual mineral assemblage such as quartz + biotite + muscovite + garnet + staurolite ± kyanite ± chloritoid, with minor plagioclase and K-feldspar, and Fe-Ti oxides as the main accessory phases. Associated carbonate rocks containing the mineral assemblage tremolite + calcite. Chloritoid occurs as porphyroblastic tablets in graphite-bearing metapelitic schists highly tectonized that can be associated to the influence of the major tectonic structures in the study area. The occurrence of chloritoid as an index mineral in metapelitic rocks of the Silgará Formation is attributed to a thermal event (associated to the emplacement of small granitic masses) overimposed on the regional metamorphism.

Key words: Chloritoid, Metapelitic rocks, Silgará Formation, Central Santander Massif, Colombian Andes.

Ocurrencia de rocas metapelíticas con presencia de cloritoide y su significado en el metamorfismo de la Formación Silgará en la región central del Macizo de Santander

Resumen

En el presente estudio se reporta por primera vez la aparición de cloritoide en metapelitas ricas en Mg-Al de la Formación Silgará en la región central del Macizo de Santander, las cuales fueron afectadas por un metamorfismo hasta en facies anfíbolita. Estas rocas contienen una asociación mineral inusual, tal como cuarzo + biotita + moscovita + granate + estauroлита ± cianita ± cloritoide, con menor plagioclase y feldespato potásico, y óxidos de Fe-Ti como las principales fases accesorias. Rocas carbonatadas asociadas contienen la asociación mineral tremolita + calcita. El cloritoide ocurre como porfiroblastos tabulares en esquistos metapelíticos con grafito fuertemente tectonizados que pueden asociarse a la influencia de las principales estructuras tectónicas en el área de estudio. La ocurrencia de cloritoide como un mineral índice en las rocas metapelíticas de la Formación Silgará se atribuye a un evento térmico (asociado al emplazamiento de pequeñas masas graníticas) sobreimpuesto al metamorfismo regional.

Palabras clave: Cloritoide, Rocas metapelíticas, Formación Silgará, Región Central del Macizo de Santander, Andes Colombianos.

1. Introduction

The Santander Massif (Fig. 1) in the Colombian Andes context represents a key for interpreting the geologic and tectonic evolution of the northwestern continental margin of

South America (Ríos et al., 2003). It comprises a northwest trending pre-Middle Devonian crystalline basement, which is composed by deformed and metamorphosed rocks of the Bucaramanga Gneiss Complex, Silgará Formation and Orthogneiss (Ward et al., 1973; Clavijo, 1994), all of which

How to cite: Castellanos-Alarcón, O.M., Ríos-Reyes, C.A. y García-Ramírez, C.A., Occurrence of chloritoid-bearing metapelitic rocks and their significance in the metamorphism of the Silgará Formation at the Central Santander Massif. Boletín de Ciencias de la Tierra, (40), 5-15, 2016.

are cut by Paleozoic–Jurassic intrusive bodies of granite to diorite composition (Goldsmith et al., 1971; Banks et al., 1985; Boinet et al., 1985; Dörr et al., 1995; Restrepo-Pace, 1995; Ordóñez, 2003; Ordóñez and Mantilla, 2004) and smaller Cretaceous intrusive bodies. Metamorphism in the Santander Massif has been studied intensively during the last fifteen years (e.g., Schäfer et al., 1998; Ríos, 1999, 2001, 2005; Ríos and Takasu, 1999; Campos, 1999; Montenegro y Barragán, 1999; García y Campos, 2000; Ríos and García, 2001; Castellanos, 2001; Mantilla et al., 2001, 2002, 2003; Gélvez and Márquez, 2002; Ríos et al. 2003, 2008a, 2008b; Cardona, 2003; Castellanos et al., 2004, 2008, 2010; García et al., 2005; Gómez y Avila, 2006), which has contributed to modify the classic scheme of metamorphic zones and isograds proposed by Ward et al. (1969, 1970, 1973). However, the Central Santander Massif (CSM) is probably the most important region in this ancient massif. This region was chosen for detailed metamorphic study because it contains chloritoid-bearing metapelitic rocks in the low-grade Silgará Formation. Chloritoid is a nesosilicate mineral represented by the general formula $(\text{Fe,Mg,Mn})_2\text{Al}_4\text{Si}_2\text{O}_{10}(\text{OH})_4$. It is a widely distributed mineral, which has been described from several areas of regional metamorphism (e.g., Williamson, 1953; Atkinson, 1956; Halferdahl, 1961; Chinner, 1967; Cabanis, 1974, 1982; Baltatzis and Wood, 1977; Holdaway, 1978; Liou and Chen, 1978; Atherton and Smith, 1979; Lal and Ackermann, 1979; Labotka, 1981; Deer et al., 1982; Evirgen and Ashworth, 1984; Dickenson, 1988; Javkhlan et al., 2013) and from scarce areas of contact metamorphism (e.g., Atherton, 1980; Phillips, 1987; Kaneko and Miyano, 1990; Pattison and Tracy, 1991; Okuyama-Kusunose, 1994; Flinn et al., 1996; Likhanov et al., 2001). It has also been reported in hydrothermal environments (Ochoa et al., 2007). Chloritoid is not abundant in contact aureoles due to a narrow temperature interval at low pressures of contact metamorphism (Ganguly, 1969) and severe constraints imposed by specific bulk rock composition (e.g., Wang and Spear, 1991). The occurrence of chloritoid in this geological context has been focus of attention in previous studies (e.g., Atherton, 1980; Phillips, 1987; Kaneko and Miyano, 1990; Flinn et al., 1996), which discusses on the equilibrium relations of chloritoid with respect to the coexisting natural assemblages, providing valuable information on the chemistry, mineralogy and natural occurrence of chloritoid-bearing rocks to understanding the reactions controlling the appearance and disappearance of chloritoid-bearing assemblages during contact metamorphism. On the other hand, Likhanov et al. (2001) performed a detailed study on the mineral chemistry of chloritoid-bearing assemblages across contact-metamorphic isograds have been made. However, they consider that the chloritoid+biotite paragenesis has always been problematic in the construction of petrogenetic grids for pelites, in which this assemblage has markedly different stability limits. In this study, we report for the first time and discuss data concerning the occurrence of chloritoid and its significance in the metamorphism of the low-grade Silgará Formation metapelitic rocks at the CSM.

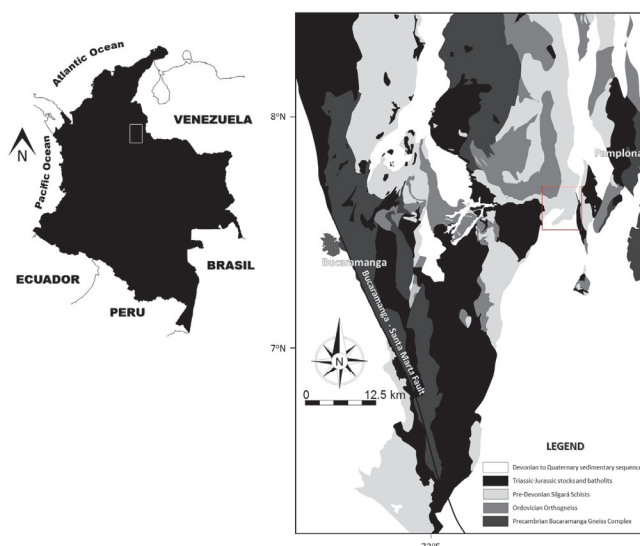


Figure 1. Regional geologic map of the Santander Massif. The rectangle marks the location of the study area at the CSM region. Source: Modified from Goldsmith et al., 1971

2. Geological setting

The study area is located in the southern part of the CSM within a compressive tectonic zone between the Bucaramanga-Santa Marta and Chitagá fault systems, and corresponds to the Silos - El Cúcano sector (Fig. 2). The Silgará Formation crops out into several N-S trending strips, locally interrupted by the presence of dykes and sills of orthoamphibolites with banded to gabbroic structures. The metamorphic rocks of this metamorphic unit generally strike NE–SW and dip to the NW. These rocks been affected by multiple deformations, resulting in interference patterns. It is mainly composed of metapelitic rocks with minor intercalated psammitic, semipelitic, metabasic and, locally, metacarbonate rocks, which were affected by a metamorphism up to the amphibolite facies regional grade during the Caledonian orogeny and reveals a very complex tectonic and metamorphic history. These ancient rocks that make up the CSM were covered by a Upper Paleozoic to Mesozoic sedimentation developed (Julivert et al., 1970), and constitute the limit between the Magdalena Middle Valley and Maracaibo Lake basins (Ward et al., 1973) with a strong structural control and large Quaternary deposits. Ward et al. (1973) makes reference to the Silgará Formation as a cyclic megasequence of metamorphic rocks. Metapelitic rocks, displaying a well-developed schistosity, are the major constituents of the Silgará Formation, with minor intercalations of metamafic and metacarbonate rocks. However, in the study area, it is mainly composed by metapelitic schists with garnet, staurolite, kyanite and chloritoid, with minor layers of quartzites, metaconglomerates, calc-silicate-bearing metacarbonate rocks and marbles. Ríos et al. (2008b) also report metacarbonate and related rocks of the Silgará Formation close to the study area in the Mutiscua surroundings. Ward et al. (1970) based on our field observations defined the biotite

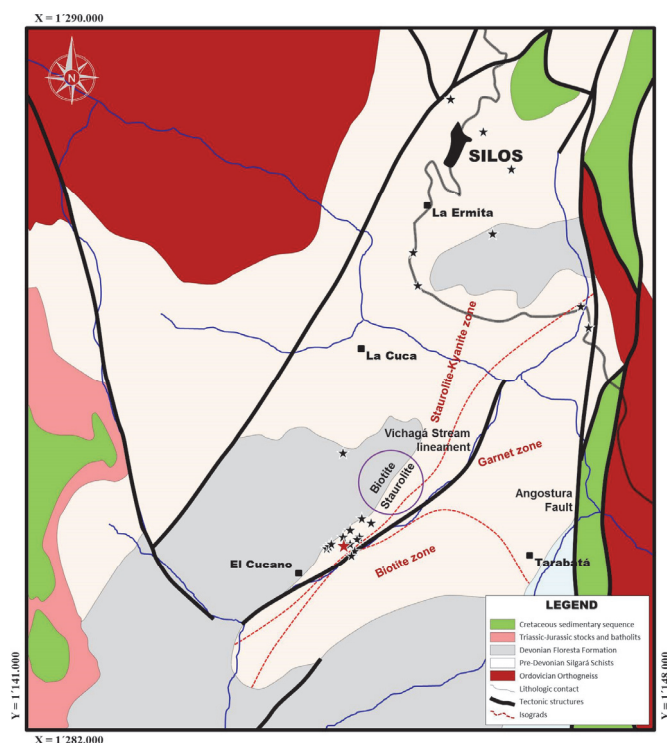


Figure 2. Geologic map of the study area at the CSM region, showing the distribution of the metamorphic zones; the sampling localities are indicated in black stars (the red star indicates the location of the chloritoid-bearing schists). The purple circle indicates the metamorphic zonal scheme proposed by Ward et al. (1970).

Source: Modified from Ward et al., 1970

and staurolite metamorphic zones in the area of interest, which were also recognized in the present study. However, our field observations and petrographic analysis reveal that this metamorphic sequence can be modified.

3. Field sampling and analytical methods

A research group of geoscientists from the Universidad de Pamplona y Universidad Industrial de Santander performed several fieldworks on the CSM, particularly in the Silos – La Cuca – El Cúcano sector, visiting several localities, taking into account the discovery of chloritoid-bearing schists. The sampling strategy consisted of collecting samples of chloritoid-bearing schists and associated rocks from several outcrops. The chloritoid-bearing schists object of the present study were collected in one outcrop on the way Silos – El Cúcano and close to the Vichagá Stream, and belongs to the staurolite-kyanite metamorphic zone. Mineralogical and petrographic analysis were performed in a trinocular Olympus BX-51 transmitted light microscope to establish the modal percentage of mineral constituents and mineral assemblages, with emphasis on textural relationships between mineral phases, and the photographs were taken using a NIKON NIS-elements BR microphotographic system of the Research Group in Geofísica y Geología (PANGEA), de la Universidad de Pamplona. Mineral abbreviations are after Whitney and Evans (2010). SEM-BSE/EDS imaging

and analysis were carried out by environmental scanning electron microscopy (FEI Quanta 650 FEG) to examine the mineral phases' textures and cross-cutting relationships in the chloritoid-bearing schists, under the following analytical conditions: magnification = 130-350x, WD = 10.1 mm, HV = 20 kV, signal = Z CONT, detector = BSED.

4. Field occurrence

Metamorphic rocks of the Lower Paleozoic Silgará Formation at the CSM crops out as a NE trending strip. It is mainly composed of metapelitic rocks with minor intercalated psammitic, semipelitic and metacarbonate rocks, which include quartzites, metaconglomerates, calc-silicate-bearing metacarbonate rocks and marbles, which occur as scarce intercalations of centimeter up to meter scale of thickness and variable morphology (with sharp contacts) and thickness, developing discontinuous bands and lenticular bodies, within the metapelitic sequence of the Silgará Formation (FIG. 3). The rocks of interest in this study are referred as chloritoid-bearing schists. These rocks were affected by a Caledonian regional metamorphism that produced a metamorphic zonation ranging from the biotite zone through the garnet up to the staurolite-kyanite zone of the typical Barrovian zonal scheme under low- to middle-T and low-P conditions. We describe a metamorphic sequence cropping out along the Vichagá Stream, making emphasis on the chloritoid-bearing schists and associated rocks. A broad spectrum of physical conditions, varying from greenschist facies to amphibolite facies, have been attributed to the investigated metamorphic sequence. In general, these rocks appear highly tectonized that can be associated to the influence of the major tectonic structures in the study area. This fact, coupled with the capture and alignment of the Vichagá Stream allows us to infer a structural lineament along this stream. The metamorphic sequence (Fig. 3) is dominated by silicate (and locally quartz-rich) rocks composed of garnet, staurolite, kyanite and chloritoid, which display a schistosity structure. Metapelitic rocks are represented by three types of rocks. Grayish-silver micaschists with a well-developed foliation, which are mainly composed of muscovite, biotite, quartz, plagioclase, garnet, staurolite and chloritoid. They show at least two dominant foliation directions. The second type corresponds to quartzites, which may be quartz-rich (minor plagioclase) or mica-rich, the last of them containing muscovite, biotite, garnet, kyanite and staurolite. The third type is represented by folded phyllites, which are characterized by a crenulated cleavage. They locally show discordant quartz veinlets. Calcareous levels of white and pink marble are interbedded within these silicate rocks. Fine-grained white marbles show a tabular geometry, with thicknesses of up to 55 cm, and a strong tectonism as demonstrated by the occurrence of numerous blocks. These rocks display a banded structure characterized by the presence of fibro-radial and lenticular tremolite aggregates of approximately 10 x 5 mm, varying in color from yellowish-white to light brown. They are arranged correspondingly with the banding. Additionally, fractures

perpendicular to the structure of these rocks occur, which are characterized by the presence of grayish-green tremolite of acicular habit. The origin of tremolite is associated with a metasomatic-hydrothermal event due to the infiltration and circulation of fluids rich in H_2O and CO_2 , as well as SiO_2 , which facilitate the mobilization of Ca, contributing to the development of a calc-silicate system. This process was favored by the strong fracturing and development of secondary porosity in marble. Fe-Ti oxides, such as rutile, ilmenite, titanite and leucosene are the main accessory mineral phases. Marble layers (Figs. 3a) are locally folded (Fig. 3b). A typical outcrop of micaschist is shown in Fig. 3c. Gradational contacts between garnet-bearing metapelitic rocks to marbles were also observed, and are especially abundant in strongly deformed rocks, where calc-silicate zones may have a very irregular shape and variable thickness. Micaschists (Fig. 3d) typically present a regional cleavage. Graphite schists show scarce intercalations of quartzites (Fig. 3e). Quartzites display net foliation planes and multiple joint surfaces as shown in Fig. 3f. On the other hand, milky-white quartz of hydrothermal origin is commonly observed developing amoeboid fashion patches and aligned bands due to tectonism, a phenomenon that also deforms the polysynthetic twinning in calcite bands.

General features of the metamorphic rocks at hand-specimen scale are shown in Fig. 4. Very fine-grained garnet-bearing schists are illustrated in Fig. 4a, with euhedral garnet porphyroblasts. Fig. 4b illustrates a net contact between a fine-grained pink marble (lower part) and an epidote-group mineral-bearing Ca-pelite (upper part), which shows a boudinage structure. Porphyroblastic tablets of chloritoid occurs in graphite-bearing metapelitic schists (Fig. 4b). Fig. 4c illustrates an example of a middle-grained garnet-staurolite bearing schist, showing subhedral garnet and large and skeletal staurolite porphyroblasts. Large and elongated staurolite porphyroblasts partially including subhedral garnet porphyroblasts in middle-grained metapelitic schist are shown in Fig. 4d. These rocks are associated with hydrothermal veins of quartz and amphibolite accumulations with not defined foliation. The sequence described here is similar to that described by Ríos et al. (2008b). Marbles shows a banded structure and granoblastic texture; they are characterized by the presence of several fan aggregates of fibrous acicular tremolite (Fig. 4e) or veinlets of acicular tremolite (Fig. 4f).

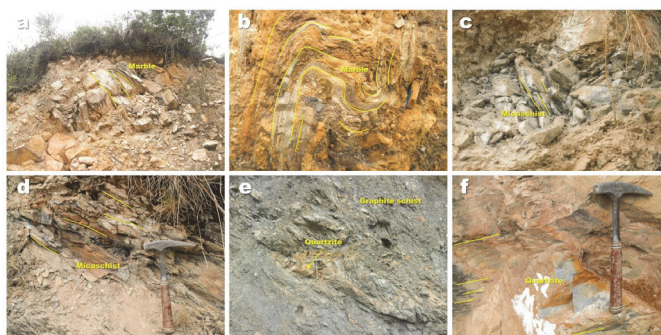


Figure 3. Field photographs of the metamorphic rocks of the Silgará Formation at the CSM.

Source: The authors.

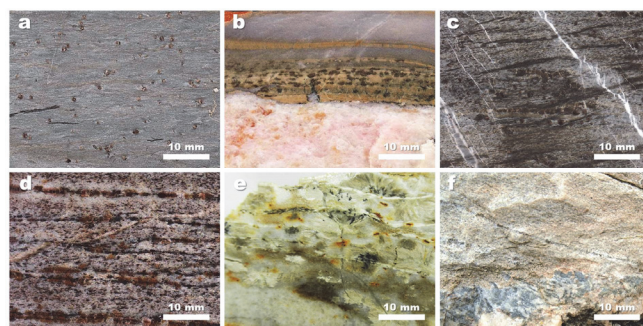


Figure 4. Hand-specimen photographs of the metamorphic rocks of the Silgará Formation at the CSM.

Source: The authors.

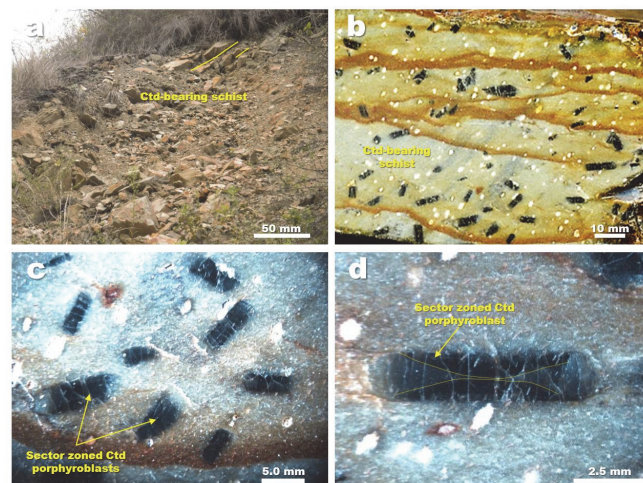


Figure 5. (a) Outcrop and (b)-(d) hand-specimen photographs of chloritoid-bearing schists of the Silgará Formation at the CSM.

Source: The authors.

The discovery of the chloritoid-bearing schists were done in an abrupt and highly tectonized area, where these rocks develop tectonic blocks surrounded by very fine-grained pelites (Fig. 5a). Numerous chloritoid porphyroblasts are easily recognizable with a naked eye. At hand-specimen scale (Figs. 5b-5d), chloritoid occurs in graphite-bearing metapelitic schists as small tabular porphyroblasts with a limited size range (long axes of 45-100 mm and widths of 5-15 mm), accompanied by porphyroblastic plagioclase (milky white ellipses), always significantly larger than the fine-grained groundmass mainly composed of quartz, chlorite and muscovite.

5. Petrography

Fig. 6 illustrates the main petrographic aspects of the chloritoid-bearing schists and associated rocks of the Silgará Formation at the CSM. A very fine-grained phyllite, displaying a crenulation cleavage, which is cross cut by a calcite vein, is shown in Figs. 6a-6b. It shows a lepidoblastic texture and is mainly composed of muscovite, biotite, chlorite and graphite. Metapelitic rocks are mainly composed of quartz, plagioclase, muscovite and biotite, and display a

granoblastic to porphyroblastic texture. They contain metamorphic minerals, such as garnet, staurolite and kyanite, show a porphyroblastic and poikiloblastic nature and reveal a syn-tectonic growth. They usually show an idioblastic to xenoblastic character, although they sometimes can show a skeletal character. Both garnet and staurolite are developing thin bands. These minerals show strong deformation and a subidioblastic to xenoblastic character. Fine-grained garnet-bearing schists showing a well-developed crenulation cleavage are illustrated in Figs. 6c-6d, with euhedral garnet porphyroblasts without mineral inclusions and with graphite as the main accessory mineral. Figs. 6e-6f illustrates another example of fine grained garnet-bearing schists with graphite as the main accessory mineral. Large staurolite porphyroblasts partially including subhedral garnet porphyroblasts in middle-grained metapelitic schist are illustrated in Figs. 6g-6h. A large staurolite porphyroblast with several ilmenite inclusions and displaying incipient alteration to chlorite is shown in Figs. 6i-6j. Marble with a nemato-granoblastic texture is characterized by the mineral assemblage calcite + quartz as shown in Figs. 6k-6l. Figs. 6m-6n illustrates a fan aggregate of fibrous acicular tremolite in marble, which display locally quartz veins with a striated appearance, due to the presence of numerous fluid inclusions which align, creating this particular aspect. A typical kyanite-bearing quartzite is illustrated in Figs. 6o-6p.

Fig. 7 illustrates the main petrographic aspects of the chloritoid, which occurs in graphite-bearing metapelitic schists that display a porphyroblastic texture. Chloritoid exhibits the typical fan tail morphology, poor cleavage, a greenish brown/blue pleochroism, and sector zoning (hourglass structure). It is usually found as isolated single crystals, although they can develop typical groups of two or more crystals. Chloritoid exhibits an interesting textural relationship with the aligned chlorite and muscovite, which define the main foliation of these rocks. Rarely, chloritoid is aligned parallel to the main cleavage and it is normally occurs as oriented with their long axes at an angle of 30-90° to the main foliation. There is evidence of chloritoid overgrowing the cleavage, because the main foliation is not deflected around the porphyroblasts

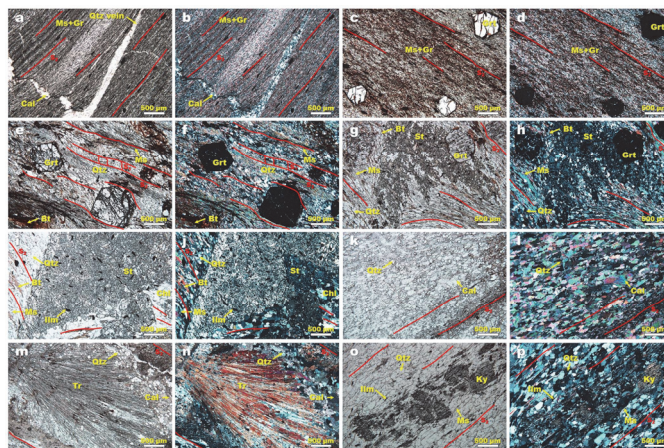


Figure 6. Photomicrographs showing representative textural relationship of chloritoid-bearing schists and associated rocks of the Silgará Formation at the CSM.

Source: The authors.

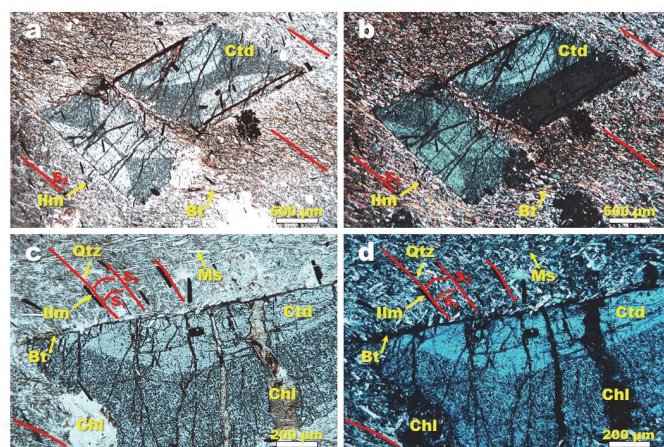


Figure 7. Photomicrographs showing representative textural relationship of minerals in chloritoid-bearing schists of the Silgará Formation at the CSM. Source: The authors.

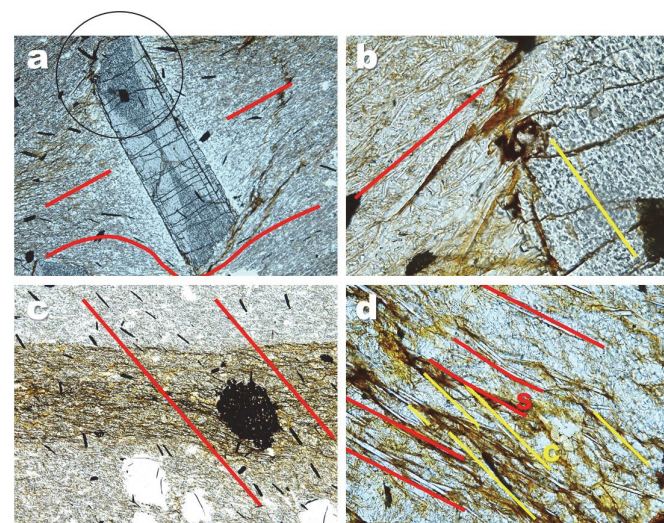


Figure 8. Microstructural features of the chloritoid-bearing schist. (a) Chloritoid rotated with respect to the main foliation of the rock. (b) Inclusions in chloritoid orthogonally oriented with respect to the main foliation of the rock. (c) Ilmenite and plagioclase overimposed on the main foliation of the rock. (d) S-C structures developed as the result of shearing in the rock.

Source: The authors.

and therefore not pressure shadows were observed on either side of the chloritoid porphyroblasts. These textural relationships suggest that the chloritoid porphyroblasts post-date the deformation event which produced the main foliation of these rocks.

Although the sampling carried out in this study was not done with exhaustive orientations of samples, their microstructural features provide valuable information on the occurrence of at least three deformational events associated to the mineralogical development of the host lithology of the chloritoid (Fig. 8): (1) Deformation event D_n that produced the main metamorphic foliation of the rock (S_n or S_2), which is responsible of the mineral assemblage $Chl+Ms+Qtz$. (2) Nucleation of chloritoid porphyroblasts within an inter-tectonic regime, with an evident orientation of quartz

inclusions in the hourglass sectors nearly orthogonally to the main foliation of the rock (S_n). As noted and in accordance with Passchier and Trouw (1991), these inclusions probably grew passively on the fabric in the absence of deformation and protecting the pattern of inclusions resulting from subsequent deformation. (3) Deformation event D_{n+1} that promoted the formation of a late foliation (S_{n+1} or S_3), which generated S-C structures (C-type shear bands) and nucleation of ilmenite and plagioclase, which are observed overimposed on the main foliation of the rock (S_n). On the other hand, this late deformation event produced rotation of chloritoid porphyroblasts. The chloritoid-matrix relationship is governed by the expression: $D_n < \text{chloritoid} < D_{n+1}$.

The SEM image in Fig. 9 shows the textural relationships between chloritoid and associated mineral phases with semiquantitative energy dispersive spectrum (EDS) analysis at different points. An overview high resolution image mosaic of the textural relationships between chloritoid and associated mineral phases (left side) shows chloritoid porphyroblasts, displaying sector-zoning (hourglass structure), which are randomly distributed with regard to rock cleavage. Note the high-density ilmenite from the backscatter electron image contrast. Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) allowed to identify what those particular elements are and their relative proportions in the mineral phases that constitute the chloritoid-bearing schist. EDS analysis of chloritoid (1) porphyroblasts reveals that this mineral phase is composed mainly of Si, Al, O and Fe elements (mass ratios of Si:Al:O:Fe = 13.40:26.05:34.41:20.68), with minor Mg (1.84 wt%). The matrix is constituted by biotite (2) and muscovite (3), which show the following mass ratios Si:Al:O:Fe:Mg = 13.33:15.53:33.68:25.04:8.09 for biotite, and Si:Al:O:K = 25.53:23.32:35.24:8.53 for muscovite, the last of them with minor Na (1.17 wt%), Mg (0.43 wt%) and Ti (0.31 wt%) elements. The EDS spectrum of quartz (4), which occurs as matrix or as inclusions in chloritoid, reveals the presence of Si and O elements (mass ratios of Si:O = 58.66:41.34). Ilmenite (5) represents the main accessory phase, occurring both as matrix or as inclusions in chloritoid, and its EDS analysis indicates the presence of Fe, Ti and O elements (mass ratios of Fe:Ti:O = 39.55:34.64:23.46). Magnetite (6) occurs as a secondary phase developing thin veinlets that penetrates chloritoid following a growth surface or fractures, and its EDS spectrum reveals that it mainly consists of Fe (63.51 wt%) and O (28.36 wt%); Al and Si are attributed to sample preparation. EDS spectra are in agreement with literature data (<http://www.sfu.ca/~marshall/sem/mineral.htm>).

X-rays generated by scanning the electron beam across the sample can be used to produce EDS mapping, which provides in addition to the BSE image a meaningful picture of the elemental distribution of a mineral phase. In Fig. 10, the different phases shown on the BSE image (Fig. 9) can be identified by elemental mapping (Figs. 10a-10d), which however will only give a qualitative image of the distribution of elements.

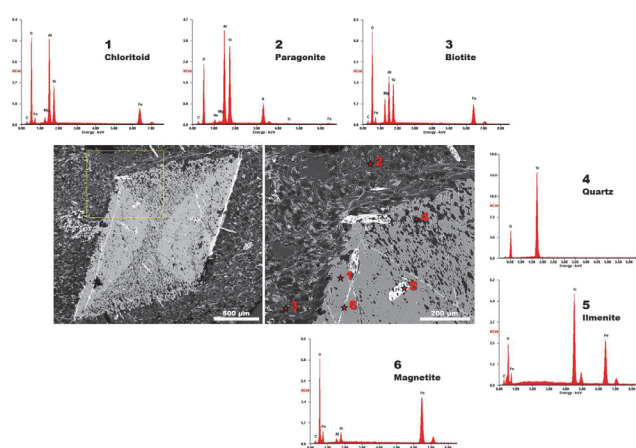


Figure 9. SEM photomicrograph and EDS spectra at the marked stars on the image of the mineral phases in the chloritoid-bearing schist. The appearance of C element is attributed to the carbon coating on the sample before SEM analysis. Source: The authors.

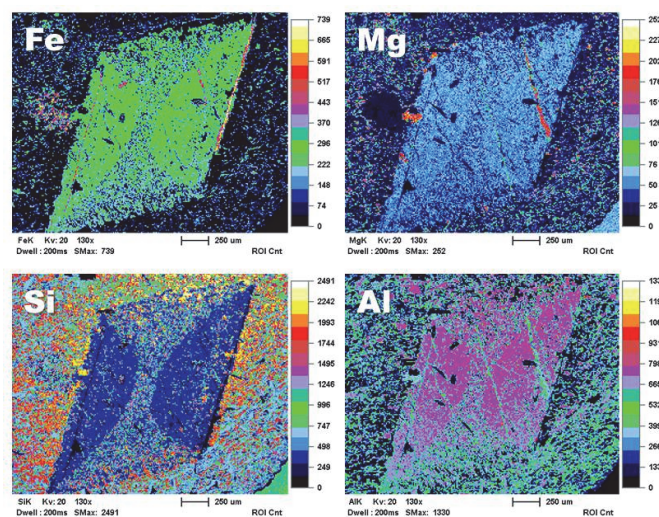


Figure 10. (a) Fe, (b) Mg, (c) Si and (d) Al compositional maps of sector-zoned (hourglass structure) chloritoid and associated mineral phases. Light colors show areas of high concentration while dark colors represent areas of low concentration (black is very low concentration). Source: The authors.

6. Metamorphism

Mineral assemblages and their relationships suggest the occurrence of a low- to middle grade metapelitic sequence with intercalations of semipelitic, psammitic and carbonate rocks. The metamorphism of the Silgará Formation at the CSM is characterized by the occurrence of typical index minerals of Barrovian type metamorphism. Based on mineral assemblages, the Silgará Formation at the study area can be divided into a Barrovian-type facies series of biotite, garnet and staurolite-kyanite zones, modifying the metamorphic isograds reported by Ward et al. (1970) and revealing a complex metamorphic and deformational history for this geologic unit. According to mineral assemblages

investigated by the authors, there are interesting petrological data that can be related from the northern to the southern parts of the CSM, with a decreasing in metamorphic zones from the core of the CSM to its peripheral parts, where an extensive staurolite-kyanite zone has been developed, with a strong structural control that produce a thinning of the garnet and biotite zone. Therefore, we don't agree with the original zonal scheme, taking into account that Ward et al. (1970) suggest a reversal distribution of the metamorphic zones with a staurolite zone to the east and a biotite zone to the west, the last of them including the Floresta Formation. We document progressive changes in mineral assemblage zones in these rocks, although the regional distribution of assemblages has not yet been mapped. However, the isograds apparently were deflected by the presence of structural features.

6.1. Biotite zone

Metapelitic rocks from the biotite zone are phyllites or fine-grained schists characterized by a penetrative cleavage, which is affected by later crenulation cleavage. The typical mineral assemblage is $\text{Chl} + \text{Ms} + \text{Bt} + \text{Qtz} + \text{Pl}$ with opaque accessory minerals. The slaty cleavage S_1 (formed during the first deformation D_1) is defined by chlorite and muscovite. S_2 (formed during D_2) represent the regional schistosity. The chemical reaction considered in semipelitic rocks is $\text{Kfs} + \text{Chl} = \text{Bt} + \text{Ms} + \text{Qtz} + \text{H}_2\text{O}$, whereas the chemical reaction considered in metapelitic rocks is $\text{Phe} + \text{Chl} = \text{Bt} + \text{Ms} + \text{Qtz} + \text{H}_2\text{O}$ (Spear, 1993).

6.2. Garnet zone

Metapelitic rocks are typically foliated, fine- to medium-grained, metapelitic schists. The typical mineral assemblage is $\text{Qtz} + \text{Ms} + \text{Grt} + \text{Gr} \pm \text{Cld}$. Garnet occurs as very small and euhedral porphyroblasts, which do not contain mineral inclusions. Sector zoned (hourglass structure) chloritoid randomly distributed overgrows the schistosity of the rock. The occurrence of chloritoid in this metamorphic zone can be also related to Al-rich pelites and probably near the biotite zone. The chemical reaction considered in metapelitic rocks is $\text{Chl} + \text{Ms} = \text{Grt} + \text{Bt} + \text{Qtz} + \text{H}_2\text{O}$ (Whitney et al., 1996).

6.3. Staurolite-kyanite zone

Metapelitic rocks are typically foliated, medium- to coarse-grained, metapelitic to semipelitic schists that contain the following mineral assemblages $\text{Qtz} + \text{Bt} + \text{Ms} + \text{Grt} + \text{St} \pm \text{Ky} \pm \text{Cld}$, with minor plagioclase and K-feldspar, and Fe-Ti oxides as the main accessory phases. Carbonate rocks contain the assemblage $\text{Tr} + \text{Cal}$. Garnet occurs as porphyroblasts partially or totally included in large, poikiloblastic and elongated staurolite porphyroblasts parallel to the main schistosity of the rock. They contain several quartz and ilmenite inclusions. Staurolite grew after garnet. Kyanite occurs as scarce subhedral porphyroblasts, which are related to mica domains. The chemical reactions considered in this metamorphic zone are described below.

In the lower part of this metamorphic zone, staurolite probably grew at the expense of chloritoid by the reaction $\text{Cld} + \text{Qtz} = \text{St} + \text{Grt} + \text{H}_2\text{O}$ (Whitney et al., 1996). On the other hand, chlorite persists and, therefore, the reaction $\text{Grt} + \text{Chl} + \text{Ms} = \text{St} + \text{Bt} + \text{Qtz} + \text{H}_2\text{O}$ (at low T) should be considered, which takes place at a fixed temperature for any given pressure, because it is discontinuous and proceeds until one of the three reactants has been consumed (Yardley, 1989). According to Yardley (1989), when this reaction ceases, additional staurolite may be produced by a continuous reaction involving the remaining phases, such as $\text{Chl} + \text{Ms} = \text{St} + \text{Bt} + \text{Qtz} + \text{H}_2\text{O}$ (at high T). Kyanite may have grown at the expense of staurolite by a reaction such as $\text{St} + \text{Chl} + \text{Ms} = \text{Ky} + \text{Bt} + \text{Qtz} + \text{H}_2\text{O}$ (Whitney et al., 1996).

Chloritoid does not occur commonly in the Silgará Formation, due to the MnO content of garnet, which produces an expansion of the $\text{Grt}-\text{Chl}$ stability field to lower temperatures or to Al poor bulk compositions that contain garnet + chlorite assemblages rather than chloritoid + biotite (Spear and Cheney, 1989).

7. Petrologic significance

The appearance of chloritoid is very difficult to understand with regard to other metamorphic index minerals and its relation to the Barrovian scheme defined at the CSM is still unclear. Chloritoid has been reported and described in many metamorphic terrains in which this mineral appears in low- and medium-P metapelites impoverished and enriched in Al and high-P metapelites with high contents of Mg. The PT conditions of chloritoid-bearing metapelites range from the sub-greenschist facies to the middle part of the amphibolite facies in the staurolite-kyanite zone. The occurrence of chloritoid in the lowest grade rocks are reported by Primmer (1985) in Upper Devonian epizone slates, and Robinson and Bevins (1986) close to the upper anchizone-epizone boundary. On the other hand, Spear (1993) reports the occurrence of the paragenesis chloritoid + pyrophyllite. At the greenschist facies, chloritoid is a common mineral associated with chlorite and muscovite in rocks enriched in Fe and with high contents of Al (Turner and Verhoogen, 1960; Cabanis, 1982; Johnson et al., 2003). The contents of Fe and Al must be greater than those recorded for the stability of chlorite and muscovite (Cabanis, 1982; Johnson et al., 2003). In this sense, it is not unusual the occurrence of chloritoid with high ottrelite component in low-grade metapelites of the greenschist facies as phyllites and schists (Kramm, 1973; Brindley and Elsdon, 1974). At the amphibolite facies, chloritoid has also been reported in rocks with andalusite, kyanite and staurolite (Cabanis, 1974; Spear, 1993). The construction of petrogenetic grids and stability diagrams of the paragenesis with chloritoid indicate that under certain conditions, a chloritoid zone analogous to the biotite zone can be considered (Spear, 1993). One is based on the KFMASH grid of Harte and Hudson (1979), in which chloritoid+biotite is stable over a narrow temperature interval at relatively low-pressure, and the other on the KFMASH grids of Spear and Cheney (1989) and Wang and

Spear (1991), in which this assemblage is stable over wide ranges of pressure and temperature conditions. The petrological study presented below provides a good opportunity to assess the validity of these alternative petrogenetic grids for pelites.

Taking into account the first occurrence of chloritoid in the Santander Massif, we propose two interpretations. (1) Chloritoid is associated with muscovite, chlorite and quartz in the staurolite-kyanite zone of the amphibolite facies in a highly deformed and sheared region. However, chloritoid porphyroblasts do not show evidence of deformation, which could be interpreted as a post-deformation growth and could correspond to the retrograde step of metapelites with low contents of Al, but somewhat enriched in Fe. (2) An almost isobaric thermal metamorphic event related to the emplacement of small granitoid masses without deformation has been superimposed on the Barrovian metamorphism previously defined at the Santander Massif, and particularly very well defined at the CSM.

The most probably origin of chloritoid, given its restricted occurrence within the Santander Massif, and more specifically within the metapelitic rocks of the Silgará Formation, can be attributed to heat fluxes associated to numerous felsic granitoid masses without deformation, many of which have not been mapped yet mainly due to their intense and advanced weathering and size (in general less than 1 km² in extension but with a distribution that covers nearly 2.000 km² in several sectors of the CSM). They occur as small bodies displaying intrusive contact with the three main metamorphic units of its crystalline basement of the Santander Massif, many of which were mapped and described by Ward et al. (1973). Compositionally, these granitoids are represented by muscovite and/or biotite quartzmonzonite and granite, with local variations in grain size and color, being important to note that they do not show evidence of deformation pre-, syn- or post-emplacement. However, the lack of thermobarometric and geochronologic data do not allow defining the PTt conditions of formation of chloritoid in the geological context of the Santander Massif.

It is argued that despite poverty and preservation of outcrops, the apparent restriction of chloritoid to a highly tectonized area at the southern part of the CSM is unusual and real. Two possible interpretations of this restriction are considered: Chloritoid occurs in graphite-bearing metapelitic schists highly tectonized that can be associated to the influence of the Vichagá Stream lineament in the study area. The occurrence of chloritoid as an index mineral in metapelitic rocks of the Silgará Formation makes it necessary to revise if chloritoid is definitively associated to a thermal event (associated to the emplacement of small granitoid masses without deformation) overimposed on the regional metamorphism or not. However, we consider the last of them as the most probably cause of the formation of chloritoid, in spite of Ríos and co-workers have reported petrologic evidences that related the emplacement of orthogneiss masses not only to the restricted appearance of textural and compositional sector-zoned garnets (Castellanos et al., 2004) and large porphyroblasts of andalusite, particularly in the

peripheral regions of the Ordovician Orthogneiss. Chloritoid-bearing assemblages have been described from numerous areas of regional metamorphism and from scarce contact aureoles. The second case is due, in part, to a narrow temperature interval at low pressures of metamorphism (Ganguly, 1969) and severe constraints imposed by specific bulk rock composition (e.g. Wang and Spear, 1991). However, we have not evidence of a contact metamorphism and, therefore, we conclude that the origin of the chloritoid-bearing assemblages in the study area can be related to heat flow associated to the emplacement of small granitoid masses without deformation.

Additional evidences of the effect of the emplacement of orthogneiss masses have been reported by Ríos et al. (2008b), who consider that H₂O required to drive prograde CO₂ loss in metacarbonate rocks probably came from regional dehydration of surrounding metapelitic rocks, although the development of a H₂O-rich diopside reaction zone in the presence or absence of scapolite probably also required an external fluid contribution derived from syn-metamorphic intrusions (orthogneiss masses) emplaced during the final stage of metamorphism of the Silgará Formation. The widespread existence of “shimmer” aggregates of sericite alteration of aluminous minerals (e.g., staurolite or kyanite) in the staurolite-kyanite zone provides evidence of potassium transfer during the retrograde metamorphism.

8. Conclusions

Chloritoid is reported for the first time in metapelitic rocks of the Silgará Formation from the staurolite-kyanite zone of the amphibolite facies at the CSM. This mineral occurs as idioblastic sector zoned (hourglass structure) porphyroblasts in a matrix of muscovite, chlorite, quartz, ilmenite and graphite as major minerals. The lithologic context would indicate an almost isobaric thermal event superimposed on the Barrovian metamorphism caused by the emplacement of small granitoid masses without deformation. We conclude that the metamorphism may be characterized as a Barrovian type, developed in conditions of medium pressure and temperatures conditions reaching the amphibolite facies. The medium pressure metamorphism could result from thermal perturbation related to the calc-alkaline granitoid intrusions at middle to upper crustal depths. The zonal sequence of biotite, garnet and staurolite-kyanite is different to that original reported in the classic work of Ward et al. (1970). The first appearance of chloritoid differs from other regions of the Santander Massif, where this index mineral not appears to be developed.

Acknowledgments

The fieldwork of this study was funded by the Universidad de Pamplona to support the development of the academic practices on subjects of Metamorphism and Field Geology. We express our thanks to its teachers and students, and the lab technician responsible for the preparation of geological samples, for their participation, effort and

dedication. The authors acknowledge to the Laboratory of Microscopy of the Universidad Industrial de Santander for the use of research facilities and its professional staff for assistance with SEM data acquisition. We are indebted to these institutions for allowing us the use of research facilities. Discussions with members of the Research Group in Basic and Applied Geology of the Universidad Industrial de Santander aided our understanding of the Silgará Formation geology. We are grateful to anonymous referees for their critical and insightful reading of the manuscript and are most grateful to the above-named people and institutions for support.

References

- [1] Atkinson, D.J., The Occurrence of chloritoid in the Hecla Hoek Formation of prince charles foreland, Spitsbergen. *Geological Magazine* 93(1), pp. 63-71, 1956. DOI: 10.1017/S0016756800063731
- [2] Atherton, M.P., The occurrence and implications of chloritoid in a contact aureole andalusite schists from Ardara, County Donegal. *Journal of Earth Science, Royal Dublin Society* 3, pp. 101-109, 1980.
- [3] Atherton, M.P. and Smith, R.A., Chloritoid-staurolite assemblages from Barrow's Zones in Central Perthshire, Scotland. *Geological Magazine* 116(6), pp. 469-476, 1979. DOI: 10.1017/S0016756800044460
- [4] Baltatzis, E. and Wood, B.J., The occurrence of paragonite in chloritoid schists from Stonehaven, Scotland. *Mineralogical Magazine* 41(318), pp. 211-216, 1977. DOI: 10.1180/minmag.1977.041.318.08
- [5] Banks, P., Vargas, R., Rodríguez, G.I. and Shagam, R., Zircon U-Pb ages from orthogneiss, Pamplona, Colombia. VI Congreso Latinoamericano de Geología, Bogotá. Resúmenes, 1985.
- [6] Boinet, T., Bourgois, J., Bellon, H. and Toussaint, J., Age et repartition du magmatisme pré-mésozoïque des Andes de Colombie. *Comptes rendus hebdomadaires des séances de L'Académie des Sciences. Serie D: Sciences Naturelles* 300, pp. 445-450, 1985.
- [7] Brindley, J.C. and Elsdon, R., Chloritoid-bearing rocks in the Leinster massif. *The Scientific Proceedings of the Royal Dublin Society* A5, pp. 123-129, 1974.
- [8] Cabanis, B., La tectogenèse hercynienne dans la région de Morlaix et sa signification à l'échelle du Nord-Ouest de la Bretagne. *Bulletin de la Société Géologique de France* 16, pp. 230-237, 1974.
- [9] Cabanis, B., Apport de la géochimie des éléments majeurs à la connaissance des schistes noirs alumineux et de leurs paragenèses en climat épizonal. Application aux schistes de la région de Morlaix (Finistère); conséquences stratigraphiques. *Bulletin du BRGM*, 1(1-2), pp. 25-38, 1982.
- [10] Campos, N., Estudio mineralógico y petrográfico de las metamorfitas al occidente del Municipio de Mutiscua (Norte de Santander). Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 1999.
- [11] Cardona, A., Correlacoes entre fragmentos do embasamento Pre-Mesozoico da terminacao setentrional dos Andes Colombianos, com base em dados isotopicos e geocronologicos. Dissertacao de Mestrado. Universidade de Sao Paulo, Sao Paulo, Brasil, 2003, 149 P.
- [12] Castellanos, O.M., Chemical composition of the rock-forming minerals in the Silgará formation and P-T conditions in the Mutiscua area, Santander Massif, Eastern Cordillera, Colombia. MSc.Thesis. Shimane University, Matsue, Japan, 2001, 146 P.
- [13] Castellanos, O.M., Ríos, C.A., and Takasu, A., Chemically sectorized garnets in the metapelitic rocks of the Silgará Formation in the central Santander Massif, Colombian Andes: Occurrence and growth history. *Boletín de Geología* 26, pp. 91-18, 2004.
- [14] Castellanos, O.M., Ríos, C.A. and Takasu, A., A new approach on the tectonometamorphic mechanisms associated with P-T paths of the Barrovian-type Silgará Formation at the Central Santander Massif, Colombian Andes. *Earth Sciences Research Journal*, 12, pp. 125-155, 2008.
- [15] Castellanos, O.M., Ríos, C.A. and Takasu, A., X-ray color maps of the zoned garnets from Silgará Formation metamorphic rocks, Santander Massif, Eastern Cordillera, Colombia. *Earth Sciences Research Journal*, 14, pp. 161-172, 2010.
- [16] Chinner, G.A., Chloritoid, and the isochemical character of Barrow's zones. *Journal of Petrology*, 8(2), pp. 268-282, 1967.
- [17] Clavijo, J., Mapa geológico generalizado del departamento de Norte de Santander, Memoria explicativa. Informe interno INGEOMINAS, 1994, 67 P.
- [18] Deer, W.A., Howie, R.A., and Zussman, J., An introduction to the rock-forming minerals, 2nd ed., Addison Wesley Longman Limited, Essex, 1992, 696 P.
- [19] Dickenson, M.P., Local and regional differences in the chemical potential of water in amphibolite facies pelitic schists. *Journal of Metamorphic Geology*, 6, pp. 365-381, 1988. DOI: 10.1111/j.1525-1314.1988.tb00426.x
- [20] Dörr, W., Grösser, J., Rodríguez, G. and Kramm, U., Zircon U-Pb age of the Páramo Rico tonalite-granodiorite, Santander Massif (Cordillera Oriental, Colombia) and its geotectonic significance. *Journal of South American Earth Science*, 8, pp. 187-194, 1975. DOI: 10.1016/0895-9811(95)00004-Y
- [21] Evirgen, M.M. and Ashworth, J.R., Andalusitic and kyanitic facies series in the central Menderes Massif, Turkey. *Neues Jahrbuch der Mineralogie Monatshefte*, 5, pp. 219-227, 1984.
- [22] Flinn, D., Key, R.M. and Khoo, T.T., The chloritoid schists of Shetland and their thermal metamorphism. *Scottish Journal of Geology* 32(1), pp. 67-82, 1996.
- [23] Ganguly, J., Chloritoid stability and related paragenesis: Theory, experiments and applications. *American Journal of Sciences* 267, pp. 910-944, 1969. DOI: 10.2475/ajs.267.8.910
- [24] García, C.A. y Campos, N.O., Composición química y mineralogía de las biotitas metamórficas del sector central del Macizo de Santander, Colombia. *Boletín de Geología* 22(37), pp. 18-27, 2000.
- [25] García, C.A., Ríos, C.A. and Castellanos, O.M., Medium-pressure metamorphism in the central Santander Massif, Eastern Cordillera, Colombian Andes: Constraints for a collision model. *Boletín de Geología* 27(2), pp. 43-68, 2005.
- [26] Gélvez, J. y Márquez, R., Caracterización textural del granate y de sus elementos de deformación asociados, y modelamiento de su historia de nucleación y crecimiento en las rocas metapelíticas de la Formación Silgará en la región suroccidental del Macizo de Santander. Tesis de Grado. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 2002.
- [27] Goldsmith, R., Marvin, R. and Mehnert, H., Radiometric ages in the Santander Massif, eastern Cordillera, Colombian Andes, U.S. Geological Survey Professional Paper, 750-D, pp. D41-D49, 1971.
- [28] Gómez, S.I. y Avila, G.A., Petrogénesis de las rocas calcosilicatadas que ocurren como bandas de reacción entre mármoles y rocas metapelíticas de la Formación Silgará, región Central del Macizo de Santander. Tesis de Grado. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 2006.
- [29] Halferdahl, L.B., Chloritoid: Its composition, X-ray and optical properties, stability and occurrence. *Journal of Petrology*, 2, pp. 49-135, 1961. DOI: 10.1093/petrology/2.1.49
- [30] Holdaway, M.J., Significance of chloritoid and staurolite bearing rocks in the Picuris Range, New Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, 89, pp. 1404-1414, 1978. DOI: 10.1130/0016-7606(1978)89<1404:SOCASR>2.0.CO;2
- [31] Javkhlan, O., Takasu, A., Bat-Ulzii, D. and Kabir, M.F., Metamorphic pressure-temperature evolution of garnet-chloritoid schists from the Lake Zone, SW Mongolia. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences* 108(5), pp. 255-266, 2013. DOI: 10.2465/jmps.120803
- [32] Johnson, T.M., Brown, M. and Solar, G.S., Low-pressure subsolidus and suprasolidus phase equilibria in the MnNCKFMASH system: Constraints on conditions of regional metamorphism in western Maine, northern Appalachians. *American Mineralogist*, 88, pp. 624-638, 2003. DOI: 10.2138/am-2003-0416

- [33] Julivert, M., Cover and basement tectonics in the Cordillera Oriental of Colombia, South America, and a comparison with some other folded chains. *Geological Society American Bulletin*, 81, pp. 3623-364, 1970. DOI: 10.1130/0016-7606(1970)81[3623:CABTIT]2.0.CO;2
- [34] Kaneko, Y. and Miyano, T., Contact metamorphism by the bushveld complex in the northeastern Transvaal, South Africa. *Journal of Mineralogy, Petrology and Economic Geology*, 85, pp. 66-81, 1990. DOI: 10.2465/ganko.85.66
- [35] Kramm, U., Chloritoid stability in manganese rich low-grade metamorphic rocks, Venn-Stavelot Massif, Ardennes. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 41, pp. 179-196, 1973. DOI: 10.1007/BF00375042
- [36] Liou, J.-G. and Chen, P.-Y., Chemistry and origin of chloritoid rocks from eastern Taiwan. *Lithos*, 11(3), pp. 175-187, 1978. DOI: 10.1016/0024-4937(78)90018-X
- [37] Labotka, T.C., Petrology of an andalusite-type regional metamorphic terrain, Panamint Mountains, California. *Journal of Petrology*, 22, pp. 261-296, 1981. DOI: 10.1093/petrology/22.2.261
- [38] Lal, R.K. and Ackermann, D., Coexisting chloritoid-staurolite from the Sillimanite (fibrolite) zone, Sini, district Singhbhum, India. *Lithos*, 12(2), pp. 133-142, 1979. DOI: 10.1016/0024-4937(79)90044-6
- [39] Likhonov, I.I., Reverdatto, V.V., Sheplev, V.S., Vershinin, A.E. and Kozlov, P.S., Contact metamorphism of Fe- and Al-rich graphitic metapelites in the Transgarian region of the Yenisei Ridge, eastern Siberia, Russia. *Lithos*, 58(1-2), pp. 55-80, 2001. DOI: 10.1016/S0024-4937(01)00048-2
- [40] Mantilla, L.C., Ordoñez, J.C., Cepeda, S. and Ríos, C.A., Study of the paleofluids in the Silgará Formation and their relationship with deformation processes, Aratoca-Pescadero area (southwestern Santander Massif). *Boletín de Geología*, 23(38), pp. 69-75, 2001.
- [41] Mantilla, L.C., Ríos, C.A. and Castellanos, O.M., Study of the rehydration process of the Silgará Formation metamorphic rocks, from the compositional analysis of chlorite, southwestern Santander Massif. *Boletín de Geología*, 24(39), pp. 7-17, 2002.
- [42] Mantilla, L.C., Ríos, C.A., Gélvez, J., Márquez, R., Ordoñez, J.C. and Cepeda, S., New evidences on the presence of a shear band in the metapelitic sequence of the Silgará Formation, Aratoca-Pescadero area (southwestern Santander Massif). *Boletín de Geología*, 25(40), pp. 81-89, 2003.
- [43] Montenegro, G. y Barragán, M., Metamorfismo y evolución metamórfica del área comprendida entre los municipios de Vetás (Santander) y Mutiscua (Norte de Santander). Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 1999.
- [44] Ochoa, M., Arribas, J., Mas, R. and Goldstein, R.H., Destruction of a fluvial reservoir by hydrothermal activity (Cameros Basin, Spain). *Sedimentary Geology*, 202(1-2), pp. 158-173, 2007. DOI: 10.1016/j.sedgeo.2007.05.017
- [45] Okuyama-Kusunose, Y., Phase relations in andalusite-silimanite type Fe-rich aluminous metapelites: Tono contact metamorphic aureole, northeast Japan. *Journal of Metamorphic Geology*, 12, pp. 153-168, 1994. DOI: 10.1111/j.1525-1314.1994.tb00011.x
- [46] Ordóñez, J., Petrology and geochemistry of the granitoids at the Santander Massif, Eastern Cordillera, Colombian Andes. MSc. Thesis, Shimane University, Matsue, Japan, 2003, 150P.
- [47] Ordóñez, J. and Mantilla, L., Significance of an early Cretaceous Rb-Sr age in the Pescadero Pluton, Santander Massif. *Boletín de Geología*, 26(43), pp. 115-126, 2004.
- [48] Passchier, C.W. and Trow, R.A.J., *Micro-tectonics*. Springer-Verlag, Berlin, Germany, 1991, 289 P.
- [49] Pattison, D.R.M., Tracy, R.J., Phase equilibria and thermobarometry of metapelites. In: Kerrick, D.M. (Ed.), *Contact Metamorphism*. *Reviews in Mineralogy* 26. Mineralogical Society of America, Chelsea, Michigan, 1991, pp. 105-206.
- [50] Phillips, G.N., The metamorphism of the Witwatersrand goldfields. *Journal of Metamorphic Geology*, 5, pp. 307-322, 1987. DOI: 10.1111/j.1525-1314.1987.tb00387.x
- [51] Primmer, T.J., A transition from diagenesis to greenschist facies within a major Variscan fold/thrust complex in south-west England. *Mineralogical Magazine*, 49, pp. 365-374, 1985. DOI: 10.1180/minmag.1985.049.352.07
- [52] Restrepo-Pace, P., Late Precambrian to Early Mesozoic tectonic evolution of the Colombian Andes, based on new geochronological, geochemical and isotopic data. PhD Thesis. University of Arizona, Arizona, USA, 1995, 195P.
- [53] Ríos, C.A., Chemical compositions of the constituent minerals and P-T conditions of the low-grade Silgará Formation metamorphic rocks in the Santander Massif, Eastern Cordillera, Colombian Andes. MSc. Thesis. Shimane University, Matsue, Japan, 1999, 207 P.
- [54] Ríos, C.A. and Takasu, A., Chemical zoning of garnet from the low-grade metamorphic rocks of the Silgará Formation, Santander Massif, Eastern Cordillera (Colombian Andes). *Geosciences Reports of Shimane University*, 18, pp. 97-107, 1999.
- [55] Ríos, C.A., Occurrence, chemical composition and genetic significance of the biotite in the Silgará Formation metamorphic rocks, southwestern Santander Massif, Eastern Cordillera, Colombian Andes. *Boletín de Geología*, 23(38), pp. 41-49, 2001.
- [56] Ríos, C.A. and García, C.A., First occurrence of the three Al_2SiO_5 polymorphs in the Silgará Formation metapelitic rocks, southwestern Santander Massif, Eastern Cordillera, Colombian Andes. *Boletín de Geología*, 23(38), pp. 51-59, 2001.
- [57] Ríos, C.A., García, C.A. and Takasu, A., Tectono-metamorphic evolution of the Silgará Formation metamorphic rocks in the southwestern Santander Massif, Colombian Andes. *Journal of South American Earth Sciences*, 16, pp. 133-154, 2003. DOI: 10.1016/S0895-9811(03)00025-7
- [58] Ríos, C.A., Cation substitutions governing the chemistry of amphibole in the Silgará Formation metabasites at the southwestern Santander Massif. *Boletín de Geología*, 27(2), pp. 13-30, 2005.
- [59] Ríos, C.A., Castellanos, O.M. and Takasu, A., A new interpretation for the garnet zoning in metapelitic rocks of the Silgará Formation, southwestern Santander Massif, Colombia. *Earth Sciences Research Journal*, 12, pp. 7-30, 2008.
- [60] Ríos, C.A., Castellanos, O.M., Gómez, S.I. and Avila, G.A., Petrogenesis of the metacarbonate and related rocks of the Silgará Formation, Central Santander Massif, Colombian Andes: An overview of a "reaction calcic exoscam". *Earth Sciences Research Journal*, 12, pp. 72-106, 2008.
- [61] Robinson, D. and Bevins, R.E., 1986. Incipient metamorphism in the Lower Palaeozoic marginal basin of Wales. *Journal of Metamorphic Geology*, 4, pp. 101-113, DOI: 10.1111/j.1525-1314.1986.tb00340.x
- [62] Schäfer, J., Grösser, J. and Rodríguez, G., Proterozoic Formación Silgará, Cordillera Oriental, Colombia: Metamorphism and geochemistry of amphibolites. *Zentralblatt für Geologie und Paläontologie, (Teil I)* (3-6), pp. 531-546, 1998.
- [63] Spear, F., *Metamorphic phase equilibria and pressure-temperature-time paths*, Monograph Series, Mineralogical Society of America, Washington, DC, USA, 1993, 799 P.
- [64] Spear, F. and Cheney, J., A petrogenetic grid for pelitic schists in the system $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-FeO-MgO-K}_2\text{O-H}_2\text{O}$. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 101, pp. 149-164, 1989. DOI: 10.1111/j.1751-8369.2010.00186.x
- [65] Turner, F.J. and Verhoogen, J., *Igneous and Metamorphic Petrology*. McGrawHill Book Co., New York, USA, 1960.
- [66] Wang, P. and Spear, F.S., A field and theoretical analysis of garnet+chlorite+chloritoid+biotite assemblages from the tri-state MA, CT, NY area, U.S.A. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 106, pp. 217-235, 1991. DOI: 10.1007/BF00306435
- [67] Ward, D.E., Goldsmith, R., Jimeno, V., Cruz, B., Restrepo, H. and Gómez, R., Mapa Geológico del Cuadrángulo H-12, Bucaramanga, Colombia. Ingeominas. 1969.
- [68] Ward, D.E., Goldsmith, R., Cruz, B.J., Jaramillo, C.L. and Vargas, L.R., Mapa Geológico del Cuadrángulo H-13, Pamplona, Colombia. Ingeominas. 1970.
- [69] Ward, D.E., Goldsmith, R., Cruz, B.J., Jaramillo, C.L. and Restrepo, H., *Geología de los Cuadrángulos H-12, Bucaramanga y H-13*,

- Pamplona, Departamento de Santander. U.S. Geological Survey e Ingeominas. Boletín Geológico, XXI(1-3), 1973, 132 P.
- [70] Whitney D.L. and Evans B.W., Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95, pp. 185-187, 2010. DOI: 10.2138/am.2010.3371
- [71] Whitney, D.L., Mechum, T.A., Kuehner, S.M. and Dilek, Y.R., Progressive metamorphism of pelitic rocks from protolith to granulite facies, Dutchess County, New York, USA: Constraints on the timing of fluid infiltration during regional metamorphism. *Journal of Metamorphic Geology*, 14(2), pp. 163-181, 1996 .DOI: 10.1046/j.1525-1314.1996.05836.x
- [72] Williamson, D.H., Petrology of chloritoid and staurolite rocks north of Stonehaven, Kincardineshire (eastern Scotland). *Geological Magazine*, [Online] 90(5), pp. 353-36, 1953. DOI: 10.1017/S0016756800064803. [Consulted on 15 April of 2014]. Available at: <http://www.sfu.ca/~marshall/sem/mineral.htm> Mineral Energy Dispersive Spectra (EDS).

O.M. Castellanos-Alarcón, received the BSc in Geology in 1999 from the Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. The Shimane University, Matsue, Japan, conferred on him the degree of MSc in Geology in 2001. He has been working as a full-time lecturer of the program of Geology in the Universidad de Pamplona, Colombia, since 2003, where he developed his professional experience at University teaching level during the last 13 years on the field of mineralogy, metamorphic petrology and fieldworks on crystalline basement complexes in different areas of Colombia. He is member of the Research Groups on Geofísica y Geología-PANGEA de la Universidad de Pamplona and Basic and Applied Geology at the School of Geology of the Universidad Industrial de Santander. He is specialist in mineralogy, experimental geology, petrology and geochemistry of metamorphic rocks and has extensive research experience in geological mapping, experimental and environmental mineralogy and metamorphic petrology. Currently, he is completing his PhD studies in Geology at the Universidad Nacional de Colombia.
ORCID: 0000-0003-0620-0540

C.A. Ríos-Reyes, received the BSc in Geology in 1989 and the Post-graduate Diploma in University Teaching in 1995 from the Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. The Shimane University, Matsue, Japan, conferred on him the degree of MSc in Geology in 1999. The University of Wolverhampton, Wolverhampton, U.K., conferred him the degree of PhD in Applied Sciences in 2008. He has been working as a full-time lecturer of the School of Geology in the Universidad Industrial de Santander, Colombia, since 1992, where he developed his professional experience at university teaching level during the last 22 years on the field of mineralogy, metamorphic petrology and fieldworks on crystalline basement complexes in different areas of Colombia. Actually, he is the director of the Research Group in Basic and Applied Geology at the School of Geology of the Universidad Industrial de Santander and the director of the Microscopy Laboratory of the Guatiguará Technological Park. He is specialist in mineralogy, experimental geology, petrology and geochemistry of metamorphic rocks and has extensive research experience in geological mapping, experimental and environmental mineralogy and metamorphic petrology.
ORCID: 0000-0002-3508-0771

C.A. García-Ramírez, received the BSc in Geology in 1987 and PhD in Geology and Mineralogy in 1999 from the Krivoy Rog Mining Institute, Krivoy Rog, Ukraine. He has been working as a full-time Lecturer of the School of Geology in the Universidad Industrial de Santander, since 1993, where he developed his professional experience at University teaching level during the last 21 years on the field of Metamorphic Petrology and fieldworks on crystalline basement complexes in different areas of Colombia. He is member of the Research Group on Basic and Applied Geology at the School of Geology of the Universidad Industrial de Santander. He is a specialist on the petrology and geochemistry of igneous and metamorphic rocks, regional geology, mineral deposits and processing mineralogy. He has extensive research experience in geological mapping and studies of igneous and metamorphic petrology and mineral deposits.
ORCID: 0000-0002-4727-0708

Geology, lithostratigraphy, determination of the quality and classification of carbones of Espino-Boyacá, Colombia

Jenny Esmeralda Velandia-Tarazona ^a, María Esther Rivera ^b, Jesús Ramón Delgado-Rodríguez ^b
& Jorge Marco Monroy-Gallo ^c

^a Corporación Autónoma Regional de Boyacá – Corpoboyacá, Tunja Colombia. jesmeralda_89@hotmail.com

^b Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Facultad de Ingenierías y Arquitectura. Universidad de Pamplona, Colombia.
maes@unipamplona.edu.co, jramondr@hotmail.com

^c Geólogo Independiente. monroygeologo@hotmail.com

Received: May 29th, 2015. Received in revised form: November 1th, 2015. Accepted: March 25th, 2016.

Abstract

Presents information about geology, lithostratigraphy and the composition of the coal found in the stage of exploration in the area of contract FJS-112 of mine NATAGAYMAS, municipality of El Espino-Boyacá, Colombia. There was recopilation and bibliographical review for geological – mining studies for coal mining area of the municipality of El Espino, and preliminary recognition of the zone of study visits, the collection and review of geological studies - locating outcrops of coal of the Guaduas formation (Ktg). Regional and local information was collected in the field. Sampling of the robes of interest was conducted according to the norms established by ECOCARBON Ltda. Geological mapping with its geological profiles in which the trace of the robes of coal found was developed. Calculate of the resources was according to the ECOCARBON norms

Keywords: coal formation; mine; stratigraphy; polygon; manto; coal resources; NATAGAYMAS.

Geología, litoestratigrafía, determinación de la calidad y clasificación de carbones de El Espino-Boyacá, Colombia

Resumen

Se presenta información sobre la geología, litoestratigrafía y la composición de los carbones encontrados en la etapa de exploración en el área del contrato FJS-112 de la Mina NATAGAYMAS, municipio de El Espino-Boyacá, Colombia. Se realizó la recopilación y revisión bibliográfica de estudios geológico - mineros para el área carbonífera del Municipio El Espino, y visitas preliminares de reconocimiento de la zona de estudio, localizando afloramientos de carbón de la Formación Guaduas (Ktg). En el trabajo de campo se recolectó información regional y local. El muestreo de los mantos de interés se realizó de acuerdo a las normas establecidas por ECOCARBON LTDA. Se elaboró la cartografía geológica con sus perfiles geológicos en los cuales se ubicó la traza de los mantos de carbón encontrados. Se calcularon los recursos siguiendo las normas establecidas por ECOCARBON.

Palabras clave: Formación carbonífera; mina; estratigrafía; polígono; manto; recursos carboníferas; NATAGAYMAS.

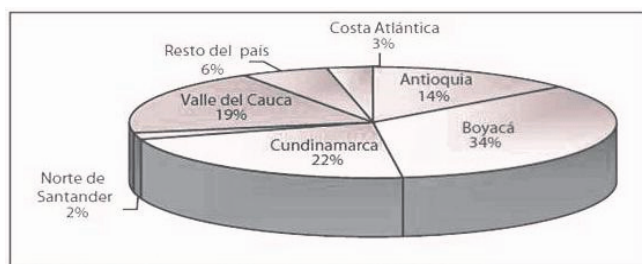
1. Introducción

El carbón, aunque un material complejo, es una roca sedimentaria organógena o biogénica acumulada como turbera conjuntamente con minerales, gases y agua. Está formado por distintos tipos de constituyentes orgánicos a nivel macro y microscópico (macerales), los cuales provienen de tejidos

vegetales y exudados que se incorporan al ambiente sedimentario donde son depositados [1,2].

El origen de los carbones es palustre o paludal; es decir, pantanos o cuerpos de agua dulce, salobre o salada de poca profundidad, acompañados de clastos finos y con una vegetación relativamente densa e importante en el proceso depositacional [3].

How to cite: Velandia-Tarazona, J.E., Rivera, M.E., Delgado-Rodríguez, J.R. & Monroy-Gallo, J.M., Geología, litoestratigrafía, determinación de la calidad y clasificación de carbones de El Espino-Boyacá, Colombia. Boletín de Ciencias de la Tierra, (40), 16-23, 2016.



Fuente: Memorias al Congreso Nacional 2004-2005. 2005*: Provisional

Figura 1. Consumo de Carbón en Colombia, 2005.
Fuente: [4].

Colombia cuenta con un potencial de recursos y reservas calculado de 16.992,8 Mt de las cuales 7.063,6 Mt son medidos, 4.571,9 Mt son indicados, 4.237,4 Mt son inferidos y 1.119,8 Mt son hipotéticos [4]. El principal mercado para el consumo mundial de carbón ha sido Alemania, Holanda, Dinamarca, Estados Unidos y el Reino Unido [5]. Colombia tiene inmensos recursos de carbón en las tres cordilleras especialmente en la Oriental. Posee minas en los departamentos de Boyacá, Antioquia, Cundinamarca, Norte de Santander y Valle.

En Barrancas (La Guajira) existe el que se considera como el mejor carbón colombiano en las minas de El Cerrejón, y tiene como factor favorable, además, las facilidades para su exportación. En la Fig. 1 se observa el porcentaje correspondiente al consumo por departamento a partir de la producción nacional de acuerdo a los datos del 2005.

En la secuencia estratigráfica, el Cretáceo inferior está representado por la Formación Aguardiente (Kia), el Cretáceo Superior por las Formaciones Chipaque (Ksc), la Luna (Ksl), los Pinos (Ksgp), Arenisca Tierna (Ksat), y por la formación Guaduas (KTg) que es transicional entre los periodos Cretáceo y Terciario. Las Formaciones de edad Terciaria que afloran en el Municipio corresponden a las Areniscas de Socha (Tpars) y a las Arcillas de Socha (Tpas). El Cuaternario se refleja en depósitos de origen variado: Abanicos, Fluvioglaciares, Coluviales, Aluviales recientes y antiguos, los últimos conforman terrazas altas con respecto al nivel actual de los cauces principales. Esta serie sedimentaria se encuentra afectada por un alto grado de tectonismo, se destacan fallas regionales, fallas de Miraflores, Chiscas y la Salina, las primeras paralelas al rumbo predominante de los mantos, y la última en sentido transversal. Igualmente fallas menores como Hoya del Alma, la Burrera, El Tobal y Palo Blanco. Adicionalmente, la serie Cretácico-Terciaria al oriente de la falla de Chiscas conforma un plegamiento de tipo anticlinal, y la secuencia Cretácica al occidente de la misma falla, una estructura sinclinal [6].

La región de El Espino está caracterizada por dos distintas provincias morfo-estructurales, separadas por la falla de Chiscas:

- -Hacia el oriente de la falla se destaca un bloque tectónico levantado en el cual se identifican las rocas cretácicas, la actividad cuaternaria intensiva predominante es la glacial, por lo cual extensas zonas de las Formaciones antiguas se encuentran cubiertas por potentes depósitos glaciáricos y fluvioglaciáricos.

- Hacia el occidente de la falla de Chiscas se encuentra la serie cretácico-terciaria afectada por la Falla El Espino y plegamientos locales siendo el más relevante el Sinclinal El Espino en cuyo eje se encuentra el área del contrato FJS-112.

2. Metodología

2.1. Recopilación de información

Para el área del polígono del contrato de concesión FJS-112 se recogió la información topográfica y geológica de la zona (cartas topográficas preliminares a escala 1:5000 del Instituto Geográfico Agustín Codazzi, mapa geológico del Cocuy, plancha 137, a escala 1:100.000 y Esquema de Ordenamiento Territorial del Municipio de El Espino.)

2.2. Trabajo de campo

Se utilizaron los criterios de cartografía del Ingeominas, se identifican las unidades litoestratigráficas presentes y las principales estructuras regionales en la que se enmarca la zona. Se ubican puntos de control donde se determinan características litológicas, estructurales; esto incluye la ubicación, continuidad y espesor de los mantos de carbón, objeto del estudio. Se realizaron levantamiento de columnas estratigráficas y se tomaron muestras de carbón para análisis en laboratorio

Regionalmente se verificó la información geológica de la plancha 137, en cuanto a unidades litoestratigráficas y principales estructuras geológicas, para determinar el ambiente de formación, modelo tectónico y modelo del yacimiento carbonífero.

2.3. Trabajo de oficina

A partir de los datos de campo, las cartas topográficas preliminares del IGAC y la topografía levantada a detalle, se ubican las principales unidades litoestratigráficas y estructuras geológicas; se definen los bloques a explotar, se ubican los puntos de control, se hace la traza del manto o los mantos. Con los análisis inmediatos se definen calidades y se clasifican los carbones, y teniendo las características estructurales del yacimiento se calculan los recursos básicos.

2.4. Área de estudio

La mina subterránea NATAGAYMAS tiene un área de concesión a 808,73 Ha y se encuentra ubicada en las Veredas Santa Ana, El Tobal y Llano Largo del Municipio de El Espino, Provincia de Gutiérrez, al norte del Departamento de Boyacá, Fig. 2.

2.5. Generalidades del área de estudio

Geomorfológicamente se tienen un paisaje de montañas con vertientes regulares e irregulares y depósitos Coluviales [8]. La temperatura varía entre los 6-16°C; la precipitación es moderada y escasa, presentando un comportamiento de tipo

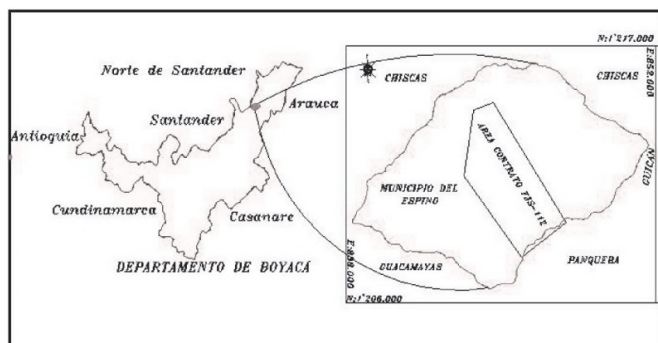


Figura 2. Localización de la mina NATAGAYMAS.
Fuente: [7].

bimodal con picos máximos en mayo y octubre (171.3 mm/mes y 186.3 mm/mes); mientras los meses secos son diciembre, enero y febrero con precipitaciones desde los 39.7 hasta los 55.8 mm/ mes, valores determinados con base en los registros multianuales del año 2000 a 2010 en la estación Chiscano del Municipio de Chiscas, Boyacá [9].

3. Resultados y discusiones

3.1. Geología

El área de estudio está compuesta en un 90 % por la Formación Guaduas (Ktg) y el restante 10% por la Formación Socha Inferior (Tsi) y depósitos coluviales (Qc), Fig. 3, estructuralmente se han determinado las fallas de Chiscas y El Tobal, plegamiento del macizo rocoso reflejados en sinclinales y anticlinales, siendo el más importante el sinclinal El Espino.

La Formación Guaduas en el área de estudio alcanza un espesor aproximado de unos 500 m, los cuales en gran parte están cubiertos por depósitos coluviales. La litología corresponde al miembro superior de la Formación Guaduas (Ktg), en la que afloran mantos de carbón, que tienen aptitudes entre N40°W a N20°W, y un buzamiento entre 25°NE y 55°SW.

3.2. Geología estructural

La tectónica observada es de complejidad moderada, en la que han ocurrido eventos tectónicos que han afectado el comportamiento estructural de las diferentes unidades litológicas, incluyendo los niveles carboníferos de la Formación Guaduas. Los esfuerzos que han actuado sobre el macizo son compresionales, originando fallas de carácter inverso o de cabalgamiento que producen un acortamiento en las estructura. También se observan fallas de rumbo que se manifiestan en desplazamientos laterales de las distintas unidades, provocando discontinuidad en los mantos de carbón.

Las fallas de mayor incidencia e importancia en la región son: la falla de Chiscas, la cual es una falla inversa y forma parte del límite oriental del área definitiva del polígono; y la falla de El Tobal, de rumbo, dirección NE-SW, la cual divide el Sinclinal El Espino en dos sub-bloques carboníferos.



Figura 3. Mapa Geológico General del área de estudio.
Fuente: [7].

3.3. Pliegues

Se identificaron estructuras plegadas, tanto sinclinales como anticlinales siendo el más relevante el Sinclinal El Espino por ser el más extenso y donde se enmarca el área de la concesión.

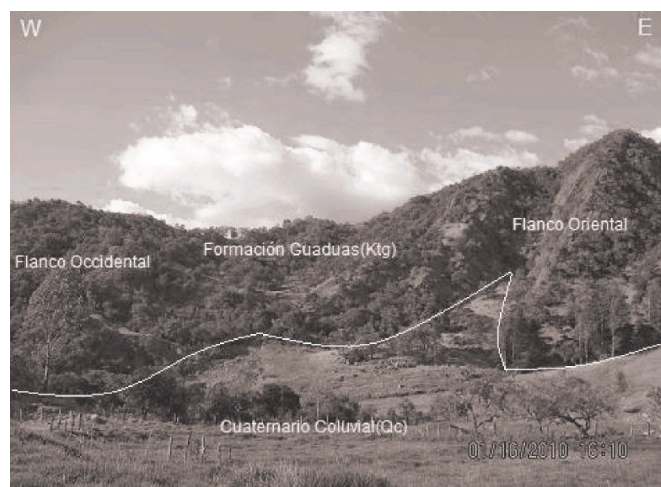
3.4. Sinclinal El Espino

Es un pliegue asimétrico, cuyo flanco oriental buza en promedio 55°SW en contraste con el flanco occidental, más suave, 25°NE; localizado al occidente de la Falla de Chiscas, deformando la serie estratigráfica Cretácico-Terciaria, fotografía 1.

El eje de esta estructura tiene un rumbo aproximado de N25°W y se encuentra dislocado por la Falla El Tobal de tipo transversal, la cual divide el sinclinal en dos bloques; uno localizado hacia el norte de la Falla El Tobal en cuyo núcleo se encuentra la Formación Socha Inferior (Tsi) y en sus flancos la Formación Guaduas (Ktg) donde se encuentran aflorando los mantos de carbón.

3.5. Bloques mineros y mantos explotables

Teniendo en cuenta la definición de bloque carbonífero dada por Renzoni G. y Reyes, I. 1995 [10], el área del contrato FJS-112 se dividió en dos bloques carboníferos, bloque Santa Ana y bloque el Tobal, los cuales se describen:



Fotografía 1. Sinclinal El Espino, en la vereda El Tobal. (E: 845.161; N: 1.210.820) Fuente: [7].

Tabla 1. Correlación estratigráfica del Bloque Santa Ana.

FLANCO OCCIDENTAL			FLANCO ORIENTAL		
Manto	Espesor (m)	Distancias estratigráfica (m)	Manto	Espesor (m)	Distancias estratigráfica (m)
M3	0,60	6,0	M3	1,10	6,0
M2	0,60	10,0	M2	1,30	35,0
M1	1,80		M1	2,50	

Fuente: Adaptado de [7].

3.5.1. Bloque Santa Ana

Se localiza hacia la parte noroeste del área definitiva de concesión; se encuentra en las Veredas Santa Ana y El Tobal.

Estratigráficamente se estableció la existencia de tres (3) mantos y algunas cintas de carbón, los cuales forman parte de la Formación Guaduas (Ktg). Es frecuente encontrar variaciones tanto en espesor como en posición estratigráfica, debido a la incidencia que tiene la tectónica compleja en el área de estudio. También influye en la variación de los rumbos y buzamientos de mantos y estratos litológicos.

En la Tabla 1 se muestra las correlaciones estratigráficas de los mantos presentes en el bloque Santa Ana, en los que se tuvo en cuenta la similitud en las características físicas como son el espesor, intercalaciones y posición estratigráfica.

En la Fig. 4, se muestran las columnas estratigráficas locales del área de estudio, para el bloque Santa Ana. En el primero, los mantos van desde el nivel de 79 m hasta el nivel de 86 m entre el manto inferior y el superior. Litológicamente la secuencia está constituida en gran parte por arcillolitas grises claras y oscuras, algunas habanas a café; se destaca su estructura laminar a lo largo de toda la secuencia, algunas se presentan bandeadas, intercaladas con estas arcillolitas aparecen limolitas síliceas color café masiva altamente resistentes y bancos de areniscas de grano y color variable, esporádicamente bandeadas.

Tabla 2. Correlación estratigráfica del Bloque El Tobal.

FLANCO OCCIDENTAL			FLANCO ORIENTAL		
Manto	Espesor (m)	Distancias estratigráfica (m)	Manto	Espesor (m)	Distancias estratigráfica (m)
M4	0,80	5,0	M4	2,90	15,0
M3	1,0	15,50	M3	1,20	10,0
M2	1,80	4,20	M2	1,80	15,0
M1	0,60		M1	1,30	

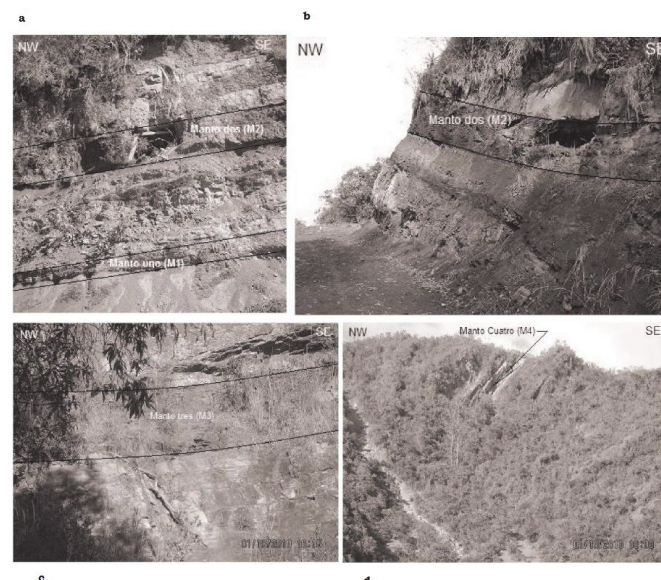
Fuente: Adaptado de [7].

3.5.2. Bloque El Tobal

Se localiza hacia la parte sureste del área definitiva de concesión. El Bloque se encuentra en las Veredas El Tobal y Llano Largo.

Estratigráficamente se estableció la existencia de cuatro (4) mantos y algunas cintas de carbón, los cuales están incluidos en la Formación Guaduas (Ktg). Se encuentra plegado por el Sinclinal El Espino, y se correlacionaron (Tabla 2) los mantos aflorantes en cada uno de los flancos por similitud en las características físicas, espesor, intercalaciones y posición estratigráfica.

En la Fotografía 2 se muestran los mantos carboníferos encontrados en el bloque el Tobal, y en la Fig. 5 se muestran las columnas estratigráficas local del área de estudio, para el bloque El Tobal. Para este bloque los segmentos levantados en campo alcanzan un espesor de 104 metros y 112 metros.



Fotografía 2. a. Afloramiento del Manto uno (M1), en la parte inferior del Bloque El Tobal; flanco Occidental. (E: 844.634; N: 1.210.550). b. Afloramiento del Manto dos (M2). Bloque El Tobal; flanco Occidental. (E: 844.693; N: 1.210.537). c. Afloramiento del Manto dos (M2). Bloque El Tobal; flanco Occidental. (E: 844.693; N: 1.210.537). d. Afloramiento del Manto cuatro (M4). Bloque El Tobal; flanco Oriental. (E: 845.207; N: 1.211.130). Fuente: [7].

Tabla 3.

Promedios de los Análisis Inmediatos Bloque El Tobal.

Muestra	Humedad Residual % HR	Cenizas %Cz	Materia Volátil %MV	Poder Calorífico PC Cal/gr	Carbón Fijo %CF	Azufre %S	Índice De Hinchamiento FSI
M1 – M4	0.85	8,65	15,09	7385,63	77.87	1.04	1.19

Fuente: [7].

Tabla 4.

Promedios de los Análisis Inmediatos Bloque Santa Ana.

Muestra	Humedad Residual % HR	Cenizas %Cz	Materia Volátil %MV	Poder Calorífico PC Cal/gr	Carbón Fijo %CF	Azufre %S	Índice De Hinchamiento FSI
M1 – M4	0.54	1,98	15.20	8356,67	81,72	1.35	2.83

Fuente: [7].

Tabla 5.

Resumen de los Resultados de la Clasificación

Bloque El Tobal, flanco occidental				
Muestra	Manto	Clase	Grupo	Carácter
m1 a m4	M1 – M4	Bituminoso	Bituminoso Bajo Volátil	Comúnmente Aglomerante
Bloque El Tobal, flanco oriental				
m1 a m2	M1 –	Bituminoso	Bituminoso	Comúnmente
m3 a m4	M3-M4	Antracita	Semi Antracita	No Aglomerante
Bloque Santa Ana				
m1 a m3	M1 a M3	Bituminoso	Bituminoso Bajo Volátil	Comúnmente Aglomerante

Fuente: Adaptado de [7].

3.6. Tipos de carbón

Los análisis realizados a las muestras se hicieron en el Instituto de Recursos Minerales y Energeticos “IRME”, Laboratorio de Carbones de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC). Los promedios de los resultados se muestran en las Tablas 3 y 4.

3.6.1. Clasificación de carbones

Para la clasificación de los carbones encontrados en el área del contrato FJS-112 se utiliza la clasificación ASTM. Del análisis de las muestras se obtuvieron datos de Carbono Fijo en Base Seca libre de materia mineral (CFslmm) y el Poder Calorífico en Base Húmeda libre de materia mineral (PChlmm), que permitieron clasificarlos, Tabla 5.

3.6.2. Usos óptimos del carbón

Un carbón Coquizante es aquel que por sí solo produce coque, cuando es sometido a métodos convencionales de

descomposición térmica en ausencia de aire; un carbón coquizable es aquel que por sí solo no produce coque, pero que en mezclas con carbones coquizantes o empleando otros procedimientos no convencionales puede producir coque [11].

Del análisis en muestras de carbón del área del contrato de concesión FJS-112 se determina que son Bituminosos, Bajo en Volátiles de carácter Comúnmente Aglomerante Y Semi-Antracitas de carácter No Aglomerante; el poder aglomerante en el caso de las semiantracitas no existe (FSI=0) y para los carbones bajos volátiles en los cuales el poder aglomerante es débil a medio (Índice de Hinchamiento entre 1 y 3), por lo tanto estos carbones son Coquizables ya que los rangos de Índice de Hinchamiento (FSI) óptimos para los carbones coquizantes está entre 4 y 6. El uso óptimo de estos carbones coquizables es la producción de coque metalúrgico.

3.7. Cuantificación de recursos de carbón

En la evaluación de los recursos carboníferos se usó la propuesta por ECOCARBON Ltda. En el “Sistema de Clasificación de Recursos y Reservas de Carbón” 1.995. Se hace el cálculo con base en el área de los cuadrados circunscritos a los círculos de influencia de cada punto de información, considerados como apoyados en la superficie de los mantos y los cuadrados van orientados con uno de los lados paralelos al rumbo de los mantos o a la dirección principal de las fallas, el otro lado es el sentido del buzamiento haciéndose una corrección mediante el coseno del ángulo de buzamiento para inclinaciones mayores de 15°.

Los recursos básicos de la mina NATAGAYMAS se resumen en

- Bloque El Tobal: Recursos medidos (Ton) 3.293.021, recursos indicados (Ton) 16.792.544, recursos inferidos (Ton) 3.716.836 y recursos básicos (Ton) 23.802.701
- Bloque Santa Ana: Recursos medidos (Ton) 1.078.614, recursos indicados (Ton) 4.662.288, recursos inferidos (Ton) 4.278.361 y recursos básicos (Ton) 10.019.263

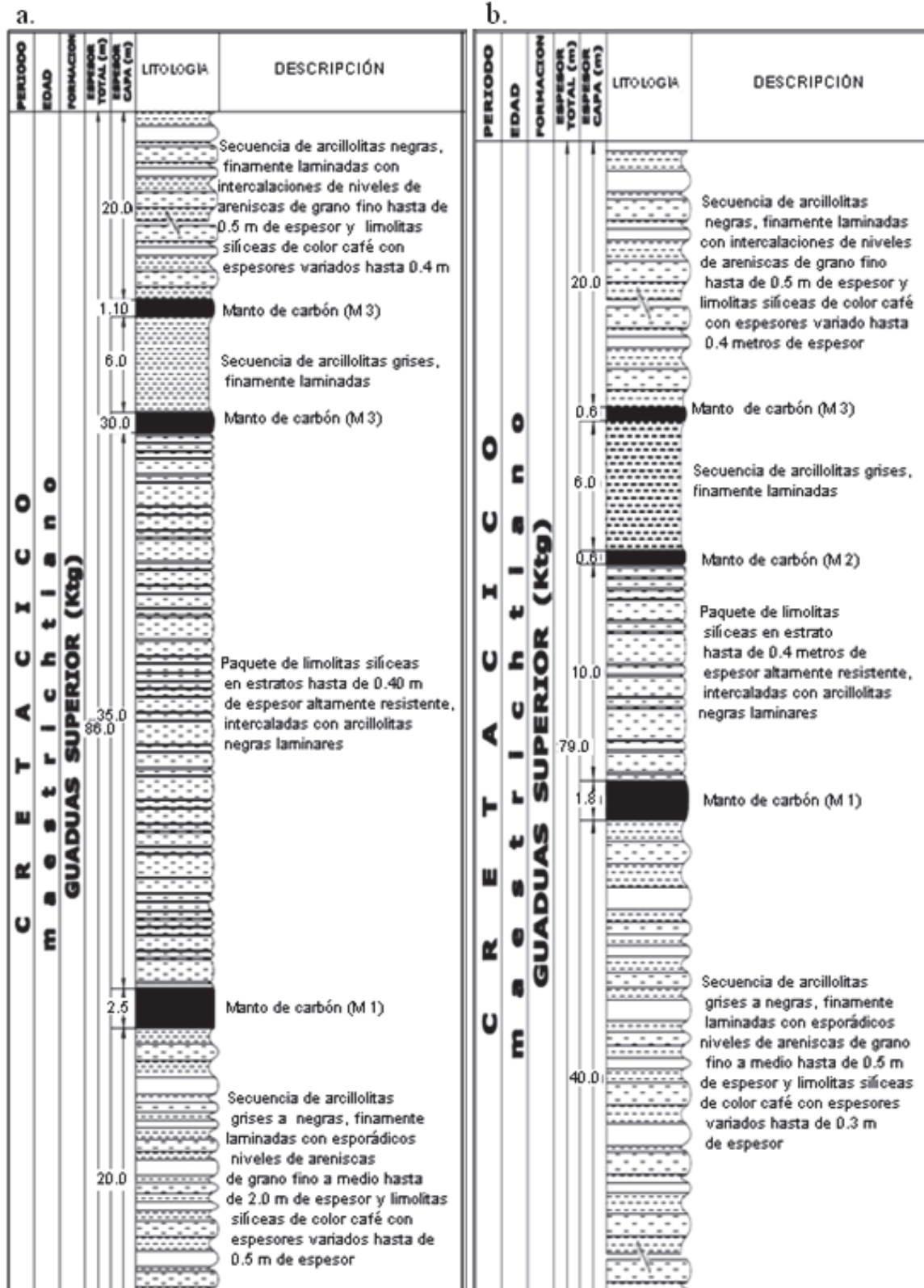


Figura 4. Columnas estratigráficas local bloque Santa Ana, mina NATAGAYMAS, Vereda Santa Ana. a. Flanco Orientan. b. Flanco Occidental. Fuente: [7].

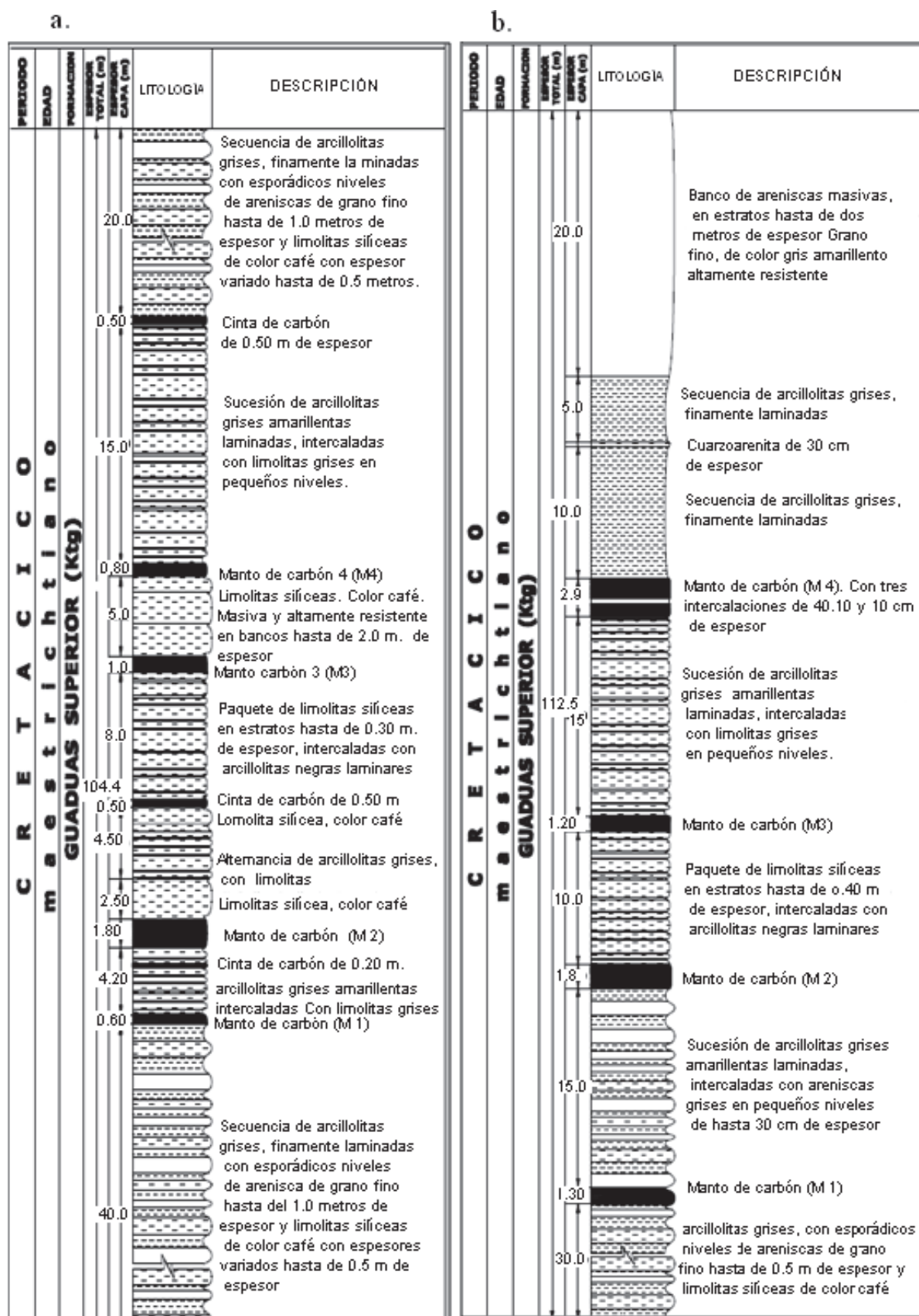


Figura 5. Columnas estratigráficas local bloque el Tobal, mina NATAGAYMAS, Vereda El Batán. a. Flanco Occidental. b. Flanco Orientan. Fuente: [7].

4. Conclusiones

El área del polígono definitivo del contrato de concesión FJS-112, se localiza en las veredas Santa Ana, El Tobal y Llano Largo del municipio de El Espino. En donde se identificaron dos bloques carboníferos, el Tobal y Santa Ana que forman parte del Miembro Superior de la Formación Guaduas (Ktg), cada uno con 4 y 3 mantos de carbón respectivamente.

El área se encuentra ubicada en el Sinclinal del Espino al noreste del casco urbano del Municipio. Los eventos tectónicos más relevantes que afectan la zona son: La Falla de Chiscas y la Falla el Tobal. De los análisis a muestras tomadas se obtuvieron carbones de Clase bituminoso, grupo bituminoso bajo en volátiles y de carácter comúnmente aglomerante; y semiantracitas.

Los resultados obtenidos para el área definitiva del contrato de concesión FJS-112 en el bloque carbonífero El Espino son 33.821.964 toneladas de recursos básicos; 23.802.701 toneladas para el bloque El Tobal y 10.019.263 para el bloque Santa Ana. De recursos básicos medidos se tienen 3.293.021 toneladas para el bloque El Tobal y 1.078.614 toneladas para el bloque Santa Ana, para un total de 4.371.635 toneladas. Como recursos básicos indicados se tienen 16.792.544 toneladas para el bloque El Tobal y 4.662.288 toneladas para el bloque Santa Ana, para un total de 21.454.832 toneladas. Recursos básicos inferidos se estimaron 3.716.836 toneladas para el bloque El Tobal y 4.278.361 toneladas para el bloque Santa Ana, para un total de 7.995.197 toneladas.

Referencias

- [1] Selley, R. An introduction to sedimentology. New York: Academic Press, 1982.
- [2] Tissot, B.P. and Welte, D.H., Petroleum formation and occurrence, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo, Springer-Verlag, 1984.
- [3] Alfonsi, P.P., Ambientes sedimentarios. Meneven, Caracas, 1983.
- [4] Ministerio de Minas y Energía. Mercado nacional e internacional del carbón colombiano. Bogotá, 2006.
- [5] Quintero, J.A., Candela, S.A., Ríos, C.A., Montes, C. and Uribe, C., Spontaneous combustion of the Upper Paleocene Cerrejon Formation coal and generation of clinker in La Guajira Peninsula (Caribbean Region of Colombia). International Journal of Coal Geology, 80, pp. 196-210, 2009. DOI: 10.1016/j.coal.2009.09.004
- [6] Salamanca, I., Geología, Esquema de ordenamiento territorial del municipio de El Espino, El Espino, 2001, pp. 23- 28.
- [7] Monroy, J. y Cepeda, L., Programa de trabajos y obras (P.T.O), para la explotación de carbón dentro del área del contrato de concesión FJS-112. Nobsa, 2010.
- [8] Salamanca, I., Geomorfología, esquema de ordenamiento territorial del municipio de El Espino, El Espino, 2001, pp. 32- 34.
- [9] Osorio, G. A., Suelos y clases agrológicas, Esquema de ordenamiento territorial del municipio de El Espino, El Espino, 2001, pp. 63- 64.
- [10] Renzoni, G. y Reyes, I., Sistema de clasificación de recursos y reservas de carbón, Biblioteca de Ecocarbón, Ingeominas, Bogotá, 1995.
- [11] Duran, M., Modelo de análisis económico, ecológico para el sector minero, Tesis Maestría, Universidad Nacional de Colombia, Colombia, 2000, 159 P.

J.E. Velandia-Tarazona, recibió el título de Ing. Ambiental en el año 2011 de la Universidad de Pamplona, Norte de Santander, Colombia. Candidata a MSc en Ingeniería Civil con énfasis en Hidroambiental de la Universidad Santo Tomas, sede Tunja, Boyacá. De 2013-2015 trabajó en la Empresa Departamental de Servicios Públicos de Boyacá en el cargo de Ingeniera de Apoyo Ambiental. Actualmente trabaja con la Corporación Autónoma Regional de Boyacá – Corpoboyacá, como profesional Especializado. ORCID: 0000-0002-1292-4599.

M.E. Rivera, es Lic. en Matemáticas y Física en 1993, de la Universidad Francisco de Paula Santander - UFPS, PhD en Hidrología en 2003, de la Universidad Estatal Hidrometeorológica San Petersburgo, Rusia. Profesor Asociado de la Universidad de Pamplona, Colombia. Integrante activo del Grupo de Investigaciones Ambientales Agua, Aire y Suelo (GIAAS). Coordinador del Semillero de Investigaciones ambientales agua, aire y suelo (SIAAS). Lidera la línea de investigación modelación y simulación del recurso hídrico. Sus áreas de interés son: manejo y conservación de cuencas hidrográficas, hidrología, diseño experimental en maestría en ciencias y tecnologías de alimentos. ORCID: 0000-0002-1289-9776.

J.R. Delgado Rodríguez, es Geólogo en 1994, de la Universidad Industrial de Santander - UIS; MaSc. en Geotecnia en 2001, de la Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, DC, Colombia. Es profesor asociado de la Facultad de Ingenierías y Arquitectura, Universidad de Pamplona, Colombia; es integrante activo del Grupo de Investigaciones Ambientales Agua, Aire y Suelo (GIAAS), Miembro de la Sociedad Colombiana de Geotecnia; Consultor en Geología, Geotecnia y cimentaciones para obras viales. ORCID: 0000-0002-3397-6099

J.M. Monroy-Gallo, es Ing. Geólogo en 1994, de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. En el año 2000 trabajó en la empresa Asociación de Ingenieros en Minas y Afines - AIMA, en el 2006 trabajo en la empresa Uniminas Ltda. y en el 2007 trabajó con la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, en las tres como ingeniero geólogo. En el año 2012 trabajó en la empresa Colombia Crean Power SAS, como geólogo senior. En los demás años y en la actualidad se desempeña en áreas de su profesión. ORCID: /0000-0003-4492-3942

Stratigraphic analysis and calculation of reserves in the Colorado field, MMV, Colombia

Ricardo Mier-Umaña, Tania Sarith Palmera-Henao, Juan Sebastian Luna-Osorio
& Leidy Alexandra Delgado-Blanco

Grupo de Investigación en Geología de Hidrocarburos y Carbones (GIGHC), Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia., gighc@uis.edu.co

Received: June 18th, 2015. Received in revised form: May 13th, 2016. Accepted: June 2th, 2016.

Abstract

Based on review of previous information and correlation of 7 lithostratigraphic sections from well data, it was possible to establish the presence of channels in fluvial environments of the Mugrosa Formation, with good lateral continuity, in the B and C zones, in the Middle Magdalena Valley Basin (VMM). The results of well log interpretation (NSP logs) indicate the presence of channel sands and proved the previous sedimentological model of the field. In the sedimentological model proposed, zones B and C (Mugrosa Formation) show a very good lateral continuity of sands. The reserve calculations of original oil in place (OOIP) and original gas in place (GOES) indicates that the largest reserves of oil and gas are located in the zone C, with reserves of 118 million bbl and 33.9 Gigas of cubic feet respectively.

Keywords: Stratigraphic model; Sands C; Colorado Field reserves; Middle Magdalena Valley Basin.

Análisis estratigráfico y cálculo de reservas del Campo Escuela Colorado, VMM, Colombia

Resumen

Con base en la revisión de la información previa y la realización de 7 correlaciones litoestratigráficas a partir de registros de pozo, se logró establecer la presencia de canales de ambientes fluviales en la Formación Mugrosa, con buena continuidad lateral en las zonas B y C, en la Cuenca Valle Medio del Magdalena (VMM).

Los resultados de la interpretación de los registros de pozo (registros SPN) indican la existencia de canales de arenas, comprobando así el modelo sedimentológico ya existente para el campo. Se evidencia que las zonas B y C (Formación Mugrosa) muestran una muy buena continuidad lateral de sus arenas.

El cálculo de reservas del petróleo original en el sitio (POES) y del gas original en el sitio (GOES) indica que las mayores reservas de hidrocarburos y gas se encuentran en la zona C, con reservas de 118 Millones de bls y 33.9 Gigas de pies cúbicos respectivamente.

Palabras Clave: Modelo estratigráfico, Arenas C, Reservas Campo Colorado, Cuenca Valle Medio del Magdalena.

1. Introducción

El Campo Colorado está localizado geográficamente en la Vereda Los Colorados, Corregimiento de Yarima, en el Municipio de San Vicente de Chucurí, Departamento de Santander. Ubicado al sudeste de la ciudad de Barrancabermeja y al sur del Campo La Cira-Infantas, en el área de la Concesión De Mares ver Fig. 1.

La importancia de tener un modelo geológico determinado para un campo en la industria del petróleo, es que permite

conocer de forma específica y detallada las áreas de interés para una explotación adecuada del hidrocarburo (líquido o gas).

En el marco del desarrollo de este trabajo se confirmó el ambiente de depositación de la formación de interés, su continuidad lateral y la presencia y dirección de canales. Estas dos últimas características se evidenciaron en los mapas isópacos elaborados para la Formación Mugrosa (Zonas B y C). Además a partir de estos mapas isópacos de arena neta petrolífera se llevó a cabo el cálculo de reservas para petróleo y gas en la anterior formación.

How to cite: Mier-Umaña, R., Palmera-Henao, T.S., Luna-Osorio, J.S. & Delgado-Blanco, L.A., Análisis estratigráfico y cálculo de reservas del Campo Escuela Colorado, VMM, Colombia. Boletín de Ciencias de la Tierra, (40), 24-31, 2016.

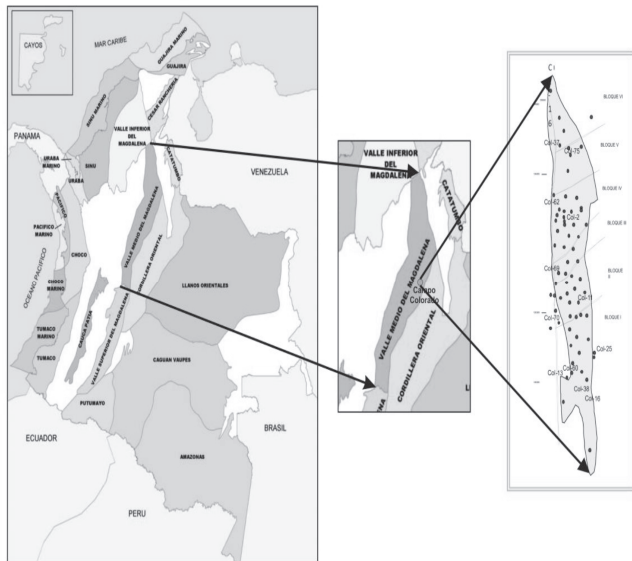


Figura 1. Localización del Campo Escuela Colorado, Cuenca Valle Medio del Magdalena, Colombia.

Fuente: Modificado de [1]

2. Geología del petróleo

Los siguientes son los principales aspectos relacionados con la geología del petróleo en el Valle Medio del Magdalena y en particular en el área del Campo Escuela Colorado.

2.1. Roca generadora

Las principales rocas generadoras presentes en el Campo Colorado son las calizas de edad Cretácico de la Formación La Luna y el Grupo Calcáreo Basal. Los valores de %TOC son altos y varían entre 1-6%, principalmente presentan Kerógeno tipo II y los valores de Reflectancia de Vitrinita (Ro) en algunas áreas se encuentran entre 0.6-1.2% ver Fig. 2.

2.2. Migración

La discordancia del Eoceno separa las rocas de los reservorios primarios con una discordancia angular de las rocas fuentes activas infrayacentes. Se han identificado tres tipos de migración: 1) Migración vertical directa de los hidrocarburos generados en la Formación La Luna hacia la discordancia del Eoceno. 2) Migración lateral a lo largo de las areniscas del Eoceno. 3) Migración vertical a través de superficies de falla en áreas donde la Formación La Luna no está en contacto con la discordancia del Eoceno.

2.3. Roca reservorio

Las formaciones Esmeraldas, Mugrosa y Colorado constituyen las principales unidades reservorios de hidrocarburos en el Campo Colorado. La Formación Esmeraldas presenta buena selección en el tamaño de los granos, buena porosidad y permeabilidad, lo cual le permite ser buena roca reservorio.

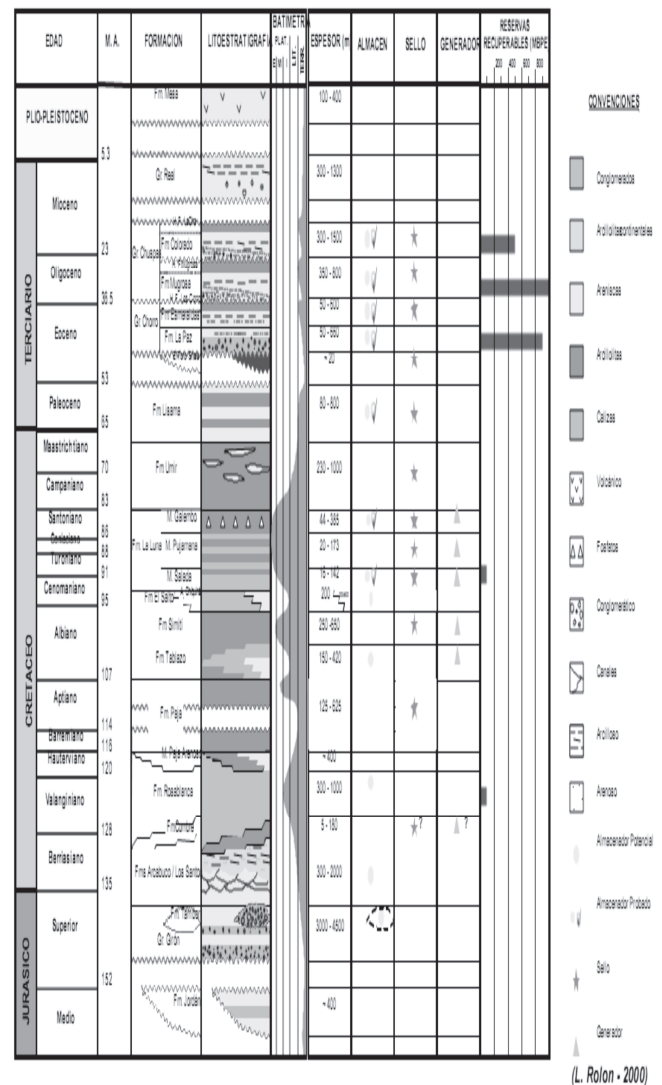


Figura 2. Columna Estratigráfica Generalizada de la Cuenca Valle Medio del Magdalena.

Fuente: [1]

Por otra parte la Formación Mugrosa presenta porosidad secundaria debido a las reacciones óxido-reducción que ocurren en las areniscas, permitiendo así que sea buena roca reservorio. También la Formación Colorado presenta rocas con buena porosidad y permeabilidad lo que la hacen ser una buena roca reservorio.

Las formaciones Esmeraldas, Mugrosa y Colorado en promedio presentan porosidades entre el 15-20% y permeabilidades que varían entre 20-600 md aproximadamente (Barrero et al., 2007).

2.4. Roca sello

Consisten principalmente en los niveles arcillosos intraformacionales de las unidades del Terciario que corresponden principalmente a las formaciones Esmeraldas, Mugrosa y Colorado.

2.5. Trampa

Se encuentran estructuras anticlinales asociadas a fallas inversas y normales reactivadas por la tectónica andina, pliegues extensos que involucran grandes espesores de roca, asociados a fallas. Las variaciones laterales de facies o la presencia de fallas en la secuencia Cenozoica, se pueden asociar con barreras de permeabilidad. La falla principal que afecta al Campo Escuela Colorado es la Falla de Colorado, la cual es una falla inversa con sentido N-S y buzamiento al Este. El campo se encuentra ubicado en el bloque colgante de la falla por lo que ésta actuaría como una trampa de tipo estructural.

3. Materiales y métodos

3.1. Análisis estratigráfico

Para desarrollar el análisis estratigráfico del campo se realizaron 7 correlaciones litoestratigráficas ver Fig. 3. Todas las correlaciones se elaboraron orientadas en lo posible con la dirección del rumbo de las estructuras principales del Campo Colorado.

El detalle de las correlaciones litoestratigráficas desarrolladas con su correspondiente formato se muestra en la Fig. 4.

4. Resultados y discusión

4.1. Interpretación de correlaciones litoestratigráficas

Todas las correlaciones litoestratigráficas involucran el tope de la Formación Mugrosa, las Zonas B y C (Formación Mugrosa) y en algunas ocasiones se encuentra el tope de la Formación Esmeraldas. Se tomó como *datum* de amarre el tope de la Formación Mugrosa para todas las correlaciones.

El tope de la Formación Mugrosa para todas las correlaciones se estableció a partir de la primera arena que se encuentra antes de una secuencia lodosa, determinada por la respuesta de los registros SP. Cabe resaltar que en algunos pozos es difícil identificar tal parámetro ya que no se observa claramente.

En todas las correlaciones se determinó el tope de la zona B en la primera arena identificada por la respuesta de los registros SP y registros resistivos, la cual se encuentra después de una secuencia lodosa que infrayace al tope de la Formación Mugrosa. La base de la zona B se determinó también en la última arena que se encuentra antes de otra secuencia lodosa presente en los registros SP de los pozos.

Para todas las correlaciones realizadas el tope de la zona C fue determinado en la primera arena con alta respuesta en los registros SP y resistivos, la cual se encuentra después de la segunda secuencia lodosa seguida de la base de la zona B; la base de la zona C se sitúa en donde se encuentra la última arena presente en los registros SP. Es de gran importancia saber que la base de la zona C no pudo establecerse en algunas correlaciones ya que el registro no continuaba en profundidad.

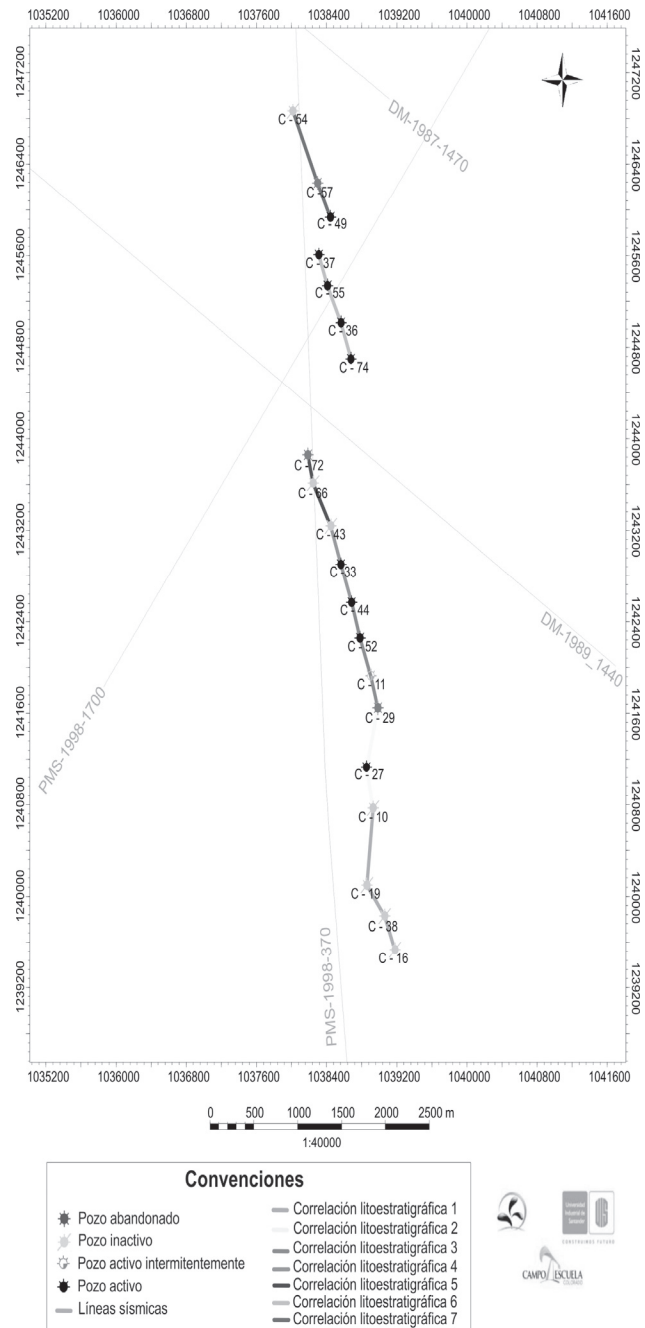


Figura 3. Mapa de localización de pozos y de correlaciones litoestratigráficas del Campo Escuela Colorado.

Fuente: Los Autores.

En algunas correlaciones litoestratigráficas puede observarse también el tope de la Formación Esmeraldas, el cual puede identificarse en la primera arena con alta respuesta en los registros resistivos inmediatamente después de un pequeño espesor lodoso posterior a la base de la zona C.

En todas las correlaciones puede observarse a la izquierda de la columna litológica los intervalos reportados como petrolíferos, gasíferos y de aceite y gas que se encuentran en cada uno de los pozos. Estos intervalos se identificaron a partir de la información de pozos actualizada a abril 2013,

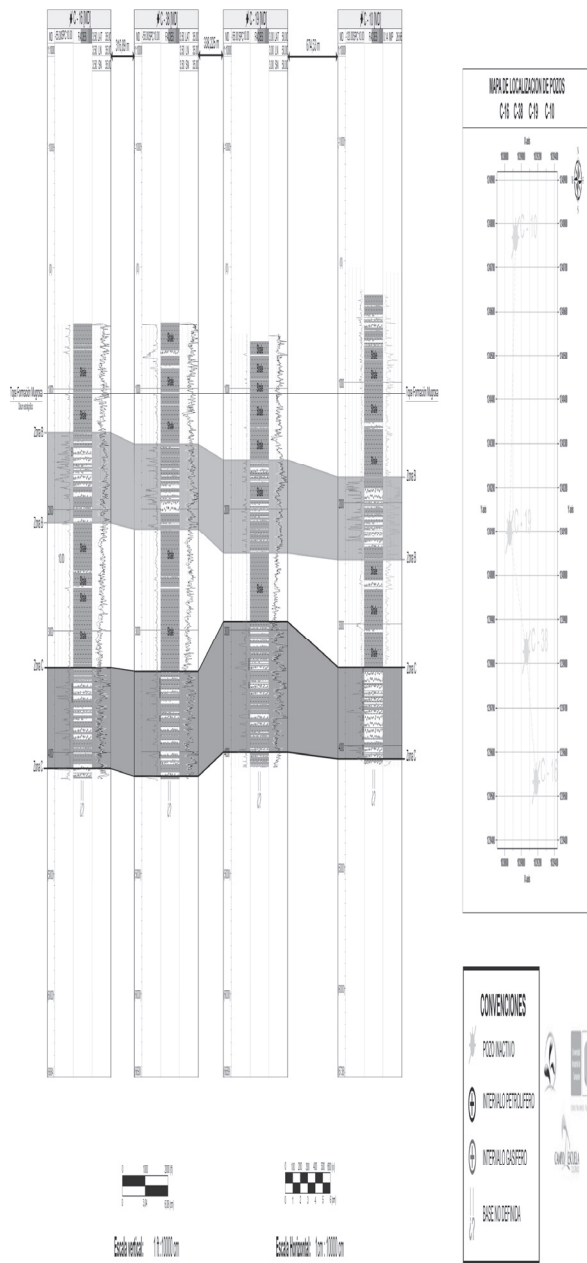


Figura 4. Correlación litoestratigráfica detallada.
Fuente: Los Autores.

brindada por Campo Escuela Colorado. Es de resaltar que en muchas de las correlaciones los espesores de las zonas B y C no son constantes, pero si continuos.

La interpretación de las correlaciones litoestratigráficas a partir de los registros de pozo indican que la variación de espesores observada muy posiblemente se deba a un amalgamamiento de canales fluviales propios del ambiente de sedimentación propuesto para estas litologías.

4.2. Modelo sedimentológico del Campo Escuela Colorado

En el presente trabajo se realizó la interpretación estratigráfica del Campo Colorado teniendo en cuenta

información previa y a su vez la interpretación de registros de pozo y correlaciones litoestratigráficas, que permitieron el desarrollo de un modelo estratigráfico para el conocimiento de la distribución y la continuidad lateral de las facies arenosas del campo.

A partir de los registros de pozo, los toques estratigráficos establecidos y la información de los intervalos probados existentes, se procedió a realizar un modelo sedimentológico y estructural basado en primera instancia en la totalidad de los pozos de Campo Escuela Colorado y finalmente un modelo detallado solo con los pozos activos, ya que son los que presentan producción y por lo tanto son de vital importancia actualmente.

En la Fig. 5. se encuentra el modelo desarrollado para las zonas B y C (Formación Mugrosa) teniendo en cuenta la totalidad de los pozos. En este modelo se pueden apreciar las litologías presentes en la Formación Mugrosa, así como los intervalos probados de petróleo y gas con su respectiva continuidad lateral; además de algunos intervalos que se denominan probables, de acuerdo con datos de resistividad tomados de los registros de pozo usados. Los pozos en color rojo están abandonados, los pozos en color negro indican pozos activos, los pozos en color gris son inactivos y los pozos en color verde son activos intermitentemente.

Estratigráficamente se observó una alternancia entre arenas gasíferas y petrolíferas con muy buena continuidad lateral, con shales actuando como sellos. Cabe mencionar que solo se contó con dos pozos al W de la Falla de Colorado; esto impidió que el software utilizado (Petrel) evidencie completamente el fallamiento.

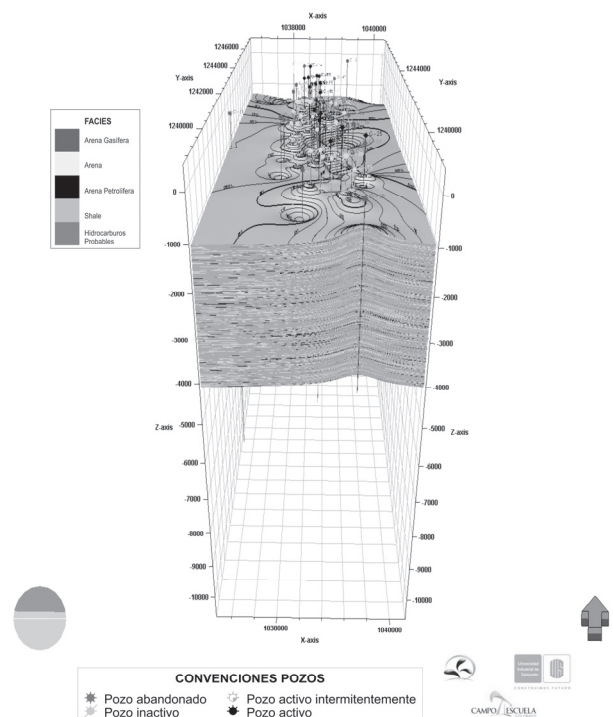


Figura 5. Modelo sedimentológico y estructural de pozos totales para las Zonas B y C (Formación Mugrosa) en el Campo Escuela Colorado. Vista lateral Sur-Norte.

Fuente: Los Autores.

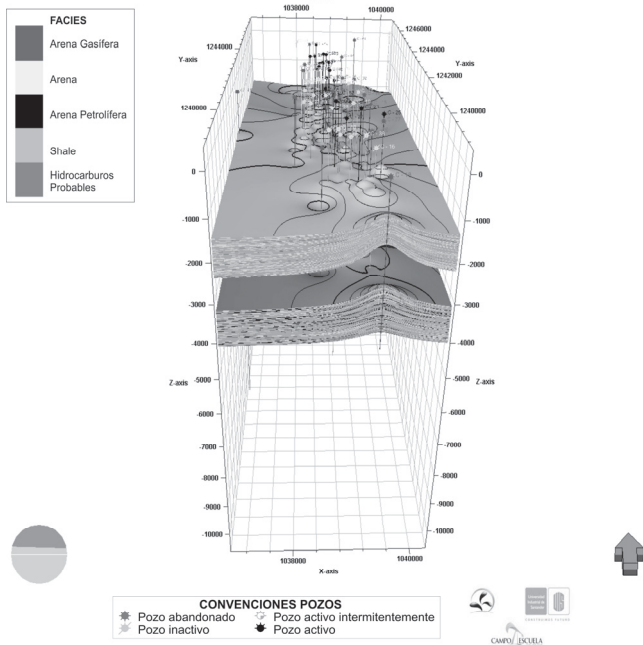


Figura 6. Modelo sedimentológico y estructural de pozos totales para las Zonas B y C (Formación Mugrosa) en el Campo Escuela Colorado. Vista lateral Sur-Norte.

Fuente: Los Autores.

En la Fig. 6. se muestra por separado las zonas B y C de la Formación Mugrosa, observándose una mayor proporción de arenas gasíferas en la zona B y una mayor cantidad de arenas petrolíferas en la zona C, lo cual confirma el interés petrolífero para la zona C.

En general los paquetes de areniscas de la Formación Mugrosa presentan un espesor pequeño aunque cabe resaltar que estas alcanzan una gran continuidad lateral, lo cual justifica que sea la formación almacenadora de hidrocarburos más importante del Valle Medio del Magdalena.

4.3. Mapas

Se elaboraron mapas isópacos con el fin de conocer la distribución y espesor de las arenas en el campo y para realizar el cálculo de volúmenes y de reservas de hidrocarburos. Estos mapas se realizaron con los datos de los pozos activos, ya que son los que cuentan con intervalos productores de hidrocarburos.

Cada mapa se desarrolló para la Formación Mugrosa, que es la formación de mayor interés, teniendo en cuenta la generación de un mapa total (Zona B y Zona C) y un mapa individual para la Zona B y para la Zona C, respectivamente.

Se elaboró un mapa isópaco para arenas netas totales (Zona B y Zona C) en el cual se observa la presencia de arenas entre 150 y 300 metros siguiendo un trazo sinuoso en dirección N – S, indicando un buen desarrollo de canales fluviales en esa dirección como se puede observar en la Fig. 7.

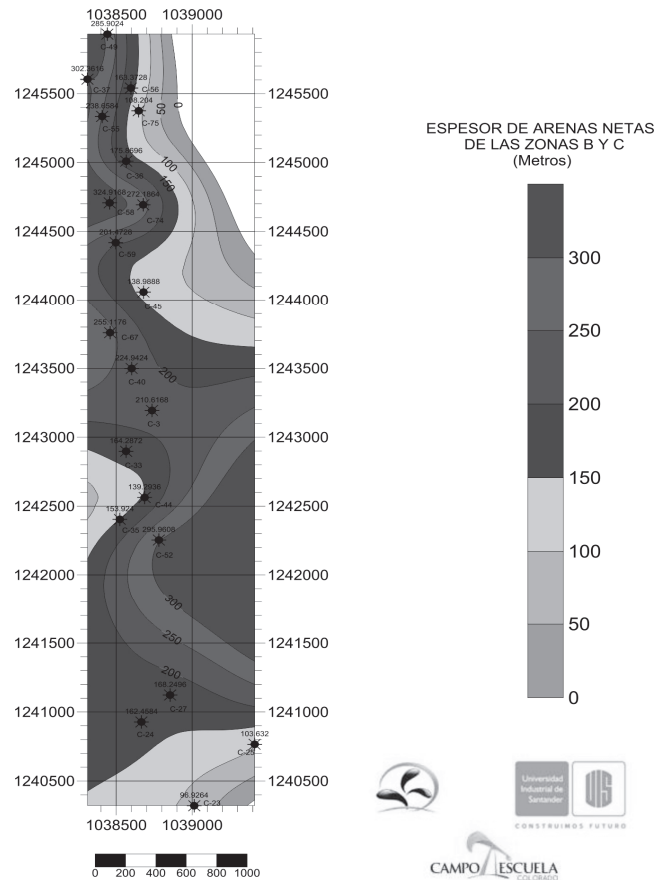


Figura 7. Mapa Isópaco de arenas netas zonas B y C de pozos activos.

Fuente: Los Autores.

4.3.1. Mapas isópacos de arenas netas petrolíferas

El desarrollo de los mapas isópacos de las arenas netas petrolíferas en las Zona B y Zona C de la Formación Mugrosa, permitió determinar la relación entre los canales y la presencia de hidrocarburos ver Fig. 8.

Comparando el mapa isópaco de arena neta de las zonas B y C y el mapa isópaco de arenas netas petrolíferas de las Zonas B y C, se logró identificar que las zonas donde se encuentra el mayor espesor de arenas netas presentan canales con espesores acumulados entre 150 a 300 metros. Mientras que las áreas en donde se encuentran las arenas de interés petrolífero, presentan espesores máximos de 40 metros, es decir que corresponden a la parte intermedia del canal. Ver Fig. 7 y Fig. 8.

4.3.2. Mapas isópacos de arenas netas gasíferas

En la elaboración del mapa isópaco de arenas netas gasíferas para las Zonas B y C de la Formación Mugrosa, se determinó cuales arenas netas gasíferas observadas presentan espesores de máximo 10 metros, los cuales son parcialmente continuas en dirección N – S ver Fig. 9.

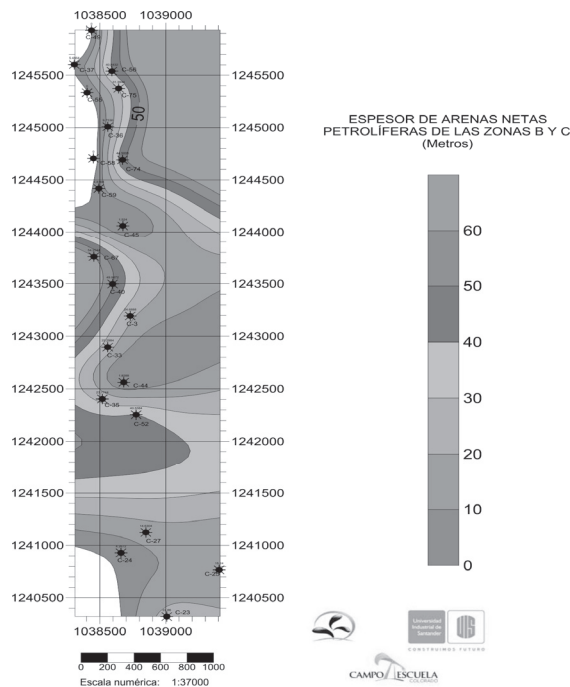


Figura 8. Mapa Isópaco de arena neta petrolífera de las zonas B y C de pozos activos.
Fuente: Los Autores.

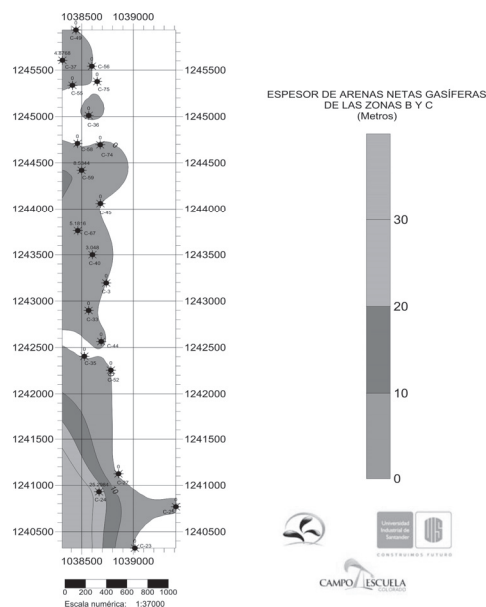


Figura 9. Mapa isópaco de arenas netas gasíferas de las Zonas B y C.
Fuente: Los Autores.

4.4. Cálculo de reservas

Para determinar el POES se usaron los promedios de porosidad y saturación de agua (Amaya *et al.*, 2003), los volúmenes fueron calculados a partir de los mapas isópacos de arenas netas petrolíferas de los pozos activos de Campo Escuela Colorado.

Para calcular el GOES se utilizaron los promedios de porosidad, saturación de agua y el volumen del mapa isópaco

de arenas netas gasíferas para los pozos activos de Campo Escuela Colorado. Los valores de porosidad y saturación de agua fueron tomados de Amaya *et al.*, 2003.

4.4.1. Hidrocarburos probados

El cálculo del Petróleo Original en el Sitio (POES) para las arenas netas petrolíferas de la Formación Mugrosa (zonas B y C) en el Campo Escuela Colorado es de 121 Millones Bls (Tabla 1), lo cual corresponde a un campo mediano. La estimación del POES solo para las arenas netas petrolíferas de la zona B en el Campo Escuela Colorado, indica un potencial de 1,7 Millones Bls (Tabla 2). Mientras, la estimación del POES para las arenas netas petrolíferas de la zona C indica un potencial de 118 Millones Bls (Tabla 3).

De esta forma el cálculo de reservas de hidrocarburos obtenido en la presente investigación es comparable con el cálculo de reservas realizado por ECOPETROL en el año 2003, en donde los cálculos del POES para el campo Colorado arrojaron un valor de 121,02 Millones Bls.

El cálculo del GOES para las arenas netas gasíferas de la Zona B en la Formación Mugrosa no se pudo estimar, ya que la Zona B del campo presenta muy poca presencia de gas en los pozos activos, lo que produce un error en el cálculo del volumen de arenas netas gasíferas. Por consiguiente el cálculo total del GOES para la Formación Mugrosa (zonas B y C en conjunto) tampoco se pudo hacer.

Sin embargo, la estimación del Gas Original en el Sitio (GOES) para la Zona C en la Formación Mugrosa del Campo Escuela Colorado es igual a 33.9 GPC (Tabla 4). Esta cantidad de gas calculada es muy pequeña, lo cual impide la clasificación de estas arenas como un yacimiento de gas pequeño.

Tabla 1.
Cálculo de POES para arenas netas petrolíferas de la Formación Mugrosa, zonas B y C en el Campo Escuela Colorado.

POES	Constante	Volumen Acre-Pie	Porosidad	So (1-Sw)	POES	MBls
Arena neta petrolífera zonas B y C	7758	165806,09	0,1364935	0,68957025	121071170	121

Fuente: Los Autores

Tabla 2.
Estimación del POES solo para las arenas netas petrolíferas de la zona B.

POES	Constante	Volumen Acre-Pie	Porosidad	So (1-Sw)	POES	MBls
Arena neta petrolífera zona B	7758	2417,2881	0,1364935	0,68957025	1765097,403	1,7

Fuente: Los Autores.

Tabla 3.
Estimación del POES de las arenas netas petrolíferas de la zona C.

POES	Constante	Volumen Acre-Pie	Porosidad	So (1-Sw)	POES	M Bls
Arena neta petrolífera zona C	7758	161921,478	0,1364935	0,68957025	1182346367	118

Fuente: Los Autores.

Tabla 4.

Datos empleados en la estimación del GOES para las arenas netas gasíferas de la Zona C.

GOES	Constante	Volumen Acre-Pie	Porosidad	SGI	GOES	GPC
Arenas netas gasíferas de la zona C	43560	7604,3	0,1364935	0,751	339546314	33,9

Fuente: Los Autores.

Los resultados obtenidos en el presente artículo pudieron validar, corroborar y mejorar el modelo estratigráfico y el cálculo de reservas del campo escuela Colorado mediante el uso de nuevas tecnologías aplicadas en la industria del petróleo.

5. Conclusiones

Las correlaciones litoestratigráficas detalladas permitieron establecer la presencia de canales fluviales en la Formación Mugrosa específicamente en las zonas B y C, y su buena continuidad lateral.

A partir de la interpretación de los registros de pozo, específicamente en los registros eléctricos SPN (Potencial espontáneo normalizado), se discriminaron electrofacies las cuales al compararlas con las descripciones litológicas de los pozos, indican la existencia de canales de arenas, comprobándose así el modelo sedimentológico ya existente para el campo.

En el modelo sedimentológico propuesto, las zonas B y C (Formación Mugrosa) muestran una muy buena continuidad lateral de sus arenas, observándose que la mayor acumulación de hidrocarburos se presenta en la Zona C.

A partir de los mapas isópacos elaborados, se comprobó la existencia y dirección de las principales acumulaciones de arena y en especial las relacionadas con la presencia de hidrocarburos.

El cálculo de reservas del petróleo original en el sitio (POES) indica que para la Formación Mugrosa en la Zona B existen 1.7 Millones de bls, mientras que para la Formación Mugrosa en la Zona C existen 118 Millones de bls.

El cálculo de reservas del gas original en el sitio (GOES) indica que para Formación Mugrosa en la Zona C existen 33.9 Gígas de pies cúbicos. Para la Formación Mugrosa en la Zona B no se logró una estimación de reservas, debido a los pocos pozos con presencia de gas.

La Formación Esmeraldas presenta reservas de petróleo y gas que no pudieron ser calculadas debido a que la mayoría de los registros de pozo no tienen continuidad en profundidad, lo que impidió la estimación del volumen de arenas netas petrolíferas y gasíferas.

Agradecimientos

Agradecemos a la Vicerrectoría de Investigaciones y Extensión de la Facultad de Fisicoquímica, por su apoyo económico para el desarrollo de este trabajo y en general a la

Universidad Industrial de Santander, por su apoyo y fomento de la investigación.

Referencias bibliográficas

- [1] ECOPETROL, Atlas of sedimentary basins and petroleum geology of Colombia, 2000.
- [2] Amaya, C., Cabrera, H., Duque, C. Guarín, F., Guerrero, J. y Ordoñez, A., Diagnóstico y estrategias de recobro Campo Colorado, Gerencia Magdalena Medio, Instituto Colombiano de Petróleo-ECOPETROL, 2003, 126 P.
- [3] Barrero, D., Pardo, A., Vargas, C. and Martínez, J., Colombian sedimentary basins: Nomenclature, boundaries and petroleum geology, a new proposal, Agencia Nacional de Hidrocarburos, 2007.
- [4] Chajín, P., Informe interpretación sísmica para Campo Escuela Colorado, Universidad Industrial de Santander, Colombia, 2012, 78 P.
- [5] García, J. y Fonseca, C., Modelo sedimentológico y estratigráfico de la Formación Mugrosa en el Campo Escuela Colorado, Trabajo de Grado, Escuela de Geología, Facultad de Fisicoquímicas, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 2009.
- [6] García, M., Mier, R., Cruz, L. y Vásquez, M., Evaluación del potencial hidrocarburífero de las cuencas colombianas, Grupo de investigación en geología de hidrocarburos y carbones, Universidad Industrial de Santander-Agencia Nacional de Hidrocarburos, 2009, 219 P.
- [7] Toloza, S., Identificación de los factores geológicos que afectan las características geoquímicas de los crudos del Campo Escuela Colorado, Trabajo de Grado de pregrado, Escuela de Geología, Facultad de Fisicoquímicas, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 2009.

R. Mier-Umaña, es Geólogo egresado de la Universidad Nacional de Colombia en 1973. Se ha desempeñado como profesor asociado a la Universidad Industrial de Santander, Colombia, adscrito a la Escuela de Geología. Hace parte del Grupo de Investigación en Geología de Hidrocarburos y Carbones de la Universidad Industrial de Santander, donde ha desarrollado diversos proyectos en el área de la geología del petróleo y a su vez, se ha desempeñado como director y evaluador de diversos proyectos de grado.

ORCID: 0000-0001-8769-8680

T. Palmera-Henao, es Geóloga egresada en 2011 de la Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia Es MSc. en Geología de la Universidad Industrial de Santander en 2015. Se ha desempeñado como profesora cátedra de la Universidad Industrial de Santander adscrita a la Escuela de Geología. Actualmente, es Coordinadora del Laboratorio de Geoquímica del Petróleo de la Universidad Industrial de Santander. Integrante del Grupo de Investigación en Geología de Hidrocarburos y Carbones de la Universidad Industrial de Santander, donde ha desempeñado diversos estudios en el área de sedimentología, estratigrafía, geofísica y geología de los hidrocarburos con énfasis en geoquímica orgánica. Además, se ha desempeñado como directora y evaluadora de tesis de pregrado de la Universidad Industrial de Santander.

ORCID: 0000-0002-7170-4393

J. Luna-Osorio, es Geólogo egresado en 2012 de la Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. Integrante del Grupo de Investigación en Geología de Hidrocarburos y Carbones de la Universidad Industrial de Santander. Trabajó como consultor de proyectos en el Instituto Colombiano de Petróleo y posteriormente trabajó como funcionario de Ecopetrol en la vicepresidencia de Exploración superintendencia Llanos Occidente – Catatumbo, en el programa de Jóvenes talento de Ecopetrol. Actualmente es estudiante de Maestría en Geociencias en la Universidad Estatal de Campinas, São Paulo, Brasil.

ORCID: 0000-0001-7367-3845

L.A. Delgado-Blanco, es Geóloga egresada en 2012 de la Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. Integrante del Grupo de Investigación en Geología de Hidrocarburos y Carbones de la Universidad Industrial de Santander. Trabajó como consultora de proyectos en el Instituto Colombiano de Petróleo y como geóloga en la empresa Antek S.A.S. Actualmente es estudiante de Maestría en Geociencias en la Universidad Estatal de Campinas, São Paulo, Brasil.

ORCID: 0000-0002-0046-955X

Drilling grid blasting upgrading based on Geological Strength Index (GSI), case “La Maruja” mine, Colombia

Camilo Andrés Ortega-Ramos, Andrés Felipe Jaramillo-Gil & Jorge Martín Molina-Escobar

Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. caaortegara@unal.edu.co, afjaram0@yahoo.es, jmmolina@unal.edu.co

Received: July 29th, 2015. Received in revised form: December 13th, 2015. Accepted: May 2th, 2016.

Abstract

Having proper rock masses characterization is of great importance in underground mining works to make the right decisions in terms of sustenance and other tasks like is the case of drilling and blasting. Here it is proposed the built of a geomechanical table based in the GSI through which to decide the drilling grid configuration applies for each rock type. This improves production cycles and explosives consumption in blasting. This table is created from experimental trials in blasting of panels with different drilling grid geometries, the ranging from 60x60cm up 80x80 cm; and the main parameter to ensure is a maximum particle size of 30 cm after the blasting with 24.6% costs reduction.

Keywords: drilling, blasting, geological stress index.

Modificación de las mallas de perforación de voladuras a partir del índice de esfuerzo geológico (GSI), caso mina “La Maruja”, Colombia

Resumen

En labores de minería subterránea es de gran importancia tener una adecuada caracterización del macizo rocoso con el fin de tomar las decisiones correctas en términos de fortificación y de otras labores, como lo es caso del arranque con perforación y voladura. Se plantea la construcción de una tabla geomecánica basada en el GSI a través de la cual se pueda tomar la decisión de que configuración de malla de perforación que aplica para cada tipo de roca. Ello permite mejorar los ciclos de producción y consumo de explosivos en las voladuras. Dicha tabla se crea a partir de ensayos experimentales en voladuras de los paneles con distintas configuraciones geométricas de mallas de perforación que oscilan entre espaciamientos de 60x60cm y 80x80 cm; y su principal parámetro a garantizar es una granulometría máxima de 30 cm tras la voladura logrando reducir los costos en un 24,6%.

Palabras clave: perforación, voladura, índice de esfuerzo geológico.

1. Introducción

Los modelos de clasificación geomecánica de macizos rocosos son una herramienta muy importante en labores de trabajos subterráneos, en especial en minería donde los continuos cambios a los cuales está sometido éste hacen que se presenten condiciones inestables en la roca; en las cuales se vuelve necesario el uso de sistemas de fortificación que eviten el colapso de los túneles. Además de la aplicación antes mencionada, los sistemas de clasificación geomecánica pueden ser utilizados para cualquier operación donde la calidad del macizo afecte la eficiencia de ésta, como lo es el caso de la perforación y voladura de roca.

Aunque el comportamiento de un macizo rocoso es muy impredecible y complejo, este puede ser simplificado con la utilización de modelos geomecánicos [1], como por ejemplo, el índice de esfuerzo geológico (GSI), que da una clasificación de la roca bastante acertada según su calidad.

Sabiendo que aproximadamente el 85% de la energía generada por una voladura no se aprovecha en la fragmentación y que una parte de esta pasa a la roca de caja, generando así problemas de estabilidad [2]. Se recalca la importancia de tener una configuración de malla de perforación para cada tipo de roca presente en una operación subterránea que mejore granulometría, reduzca sobreexcaecaciones y costos.

How to cite: Ortega-Ramos, C.A., Jaramillo-Gil, A.F. & Molina-Escobar, J.M., Modificación de las mallas de perforación de voladuras a partir del índice de esfuerzo geológico (GSI), caso mina “La Maruja”, Colombia. Boletín de Ciencias de la Tierra, (40), 32-38, 2016.

En este trabajo se utilizó la clasificación geomecánica GSI para hacer una selección de la calidad del macizo rocoso con el fin de escoger la malla de perforación adecuada para este, buscando así mejoras en rendimientos y consumo de explosivos en las voladuras de producción para el caso de la mina La Maruja, en Marmato Colombia.

La metodología se basa en una serie de ensayos en voladuras con los cuales se busca determinar qué tipo de malla de perforación se ajusta más a cada tipo de roca en diferentes paneles.

2. Marco teórico

2.1. El índice de esfuerzo geológico (GSI)

La clasificación geomecánica GSI fue propuesta por Hoek & Brown, con el fin de buscar un criterio que se pudiese aplicar de forma rápida en campo, a partir de observaciones geológicas, y se convirtió en uno de los sistemas más utilizados debido a su practicidad y confiables resultados [3].

El GSI se basa principalmente en dos parámetros para establecer una calidad de la roca, los cuales son: el Rock Quality Designation (RQD), a partir del cual se evalúa que tan fracturada esta la roca; y la resistencia a la compresión uniaxial (RCU).

Este sistema de clasificación otorga resultados más confiables cuando se trabaja con rocas de baja calidad, donde otros criterios de clasificación (como el NGI y RMR) fallan al depender en sus expresiones del valor numérico RQD (que en rocas de estas condiciones casi siempre es cero) [3]. La Fig. 1 muestra la tabla GSI propuesta por Hoek y Brown para clasificación de macizos rocosos, que compara visualmente las características del terreno; por ejemplo, si se observa una roca con una buena superficie (rugosa, ligeramente meteorizada o manchada con hierro) y una superficie fracturada (bloques formados por tres sistemas de discontinuidades), se tiene un GSI de entre 60 y 70.

El criterio de clasificación del GSI se utiliza como una herramienta de selección del tipo de malla de perforación para el arranque con voladuras adecuada para cada terreno. En el capítulo 2.3 se muestra que el principal parámetro de control en las mallas de perforación es el espaciamiento, por lo que la tabla geomecánica construida busca correlacionar el GSI con esta variable.

2.2. Geología de la zona de estudio

El proyecto minero hace parte del depósito mineral Marmato, contiene una mineralización de intrusiones de pórfidos dacíticos y andesitas porfídicas. El depósito cuenta con cinco pórfidos identificados que se diferencian sus por texturas y relaciones intersectoriales. Dichas evidencias fueron observadas a través de núcleos de perforación y a partir de la cartografía geológica [4].

El depósito ha sido descrito como un nivel profundo, un yacimiento de oro tipo epitermal con sulfuración intermedia. En las zonas con presencia de sulfuros, estos se encuentran en venas de cuarzo, calcedonia, adularia y calcita. Además se

pueden encontrar pequeñas cantidades de cobre (de 100 a 200 ppm) presentes en forma de calcopirita y en algunos casos como tetraedrita [4].

En términos geomecánicos las rocas de la formación pueden tener valores de cohesión de 280 kp/cm², alcanzando hasta 400 kp/cm² en las zonas donde se presentan calcitas menos alteradas; y valores de ángulos de fricción que oscilan entre 35 y 45°. Los valores de resistencia a la compresión simple pueden alcanzar hasta 190 MPa [5].

2.3. Mecanismos de fractura de la roca

Uno de los principales parámetros a controlar con una voladura de producción es la granulometría resultante, lo cual tiene gran influencia la configuración geométrica de la malla de perforación a utilizar [6].

Tras la detonación del explosivo la roca empieza a fracturarse por una serie de mecanismo que se van dando sucesivamente. El primero de estos es la trituración de roca que se da en los primeros instantes de la voladura, cuando la presión de la onda de choque es muchas veces mayor a la resistencia a la compresión de la roca y destruye la estructura interna de esta. Seguidamente se da un agrietamiento radial alrededor del barreno; ello se produce cuando la onda que se propaga supera la resistencia a la tracción de la roca generando una zona de grietas [7].

Cuando la onda de choque llega a una cara libre una parte se refleja contribuyendo en cierta parte al proceso global de fragmentación. Después de esto se da un proceso de extensión de las grietas radiales por parte de los gases generados en la voladura. Finalmente se da una rotura por cizallamiento, flexión y colisión de las partículas de roca [7].

Al analizar el proceso de fracturamiento de las rocas se puede decir que uno de los puntos más críticos es el agrietamiento radial generado cuando la presión de la onda vence la resistencia a la tracción de la roca. A partir de aquí es donde empiezan los mecanismos de roturas que producen la mayor parte de las fracturas.

Además en vista de que las presiones transmitidas por la onda, a medida que se ájala del barreno dependen principalmente del tipo de explosivo y el radio del barreno, es posible decir que uno de las principales variables a controlar en la configuración geométrica de las mallas es el espaciamiento de los barrenos; ya que si están muy alejados no son capaces de generar el suficiente agrietamiento radial produciendo sobretamaños.

Ahora, es posible estimar cual sería el espaciamiento máximo al cual podrían estar sometidas las mallas de perforación para voladuras de este tipo, utilizando las expresiones para mecanismos de fracturas en rocas [7]. Esta estimación parte de los cálculos de la impedancia de la roca y la presión de detonación mostradas en las ec. (1-2) respectivamente, donde se realizó el cálculo con las características del ANFO (VD=3500 m/s y $\rho_e=850$ kg/m³) que es el explosivo utilizado en las voladuras.

INDICE DE ESFUERZO GEOLOGICO PARA ROCAS UNIDAS (HOEK & MARINOS, 2000) Desde la litología, estructura y condiciones de superficie de las discontinuidades, se estima el valor promedio del GSI. No intentar ser muy preciso. Un rango de 33 a 37 es mas real que tomar un GSI de 35. Note que la tabla no aplica a fallas controladas estructuralmente. Donde planos estructurales debiles estan presentes en una direccion desfavorable con respecto a la excavacion, estos dominaran el comportamiento del macizo rocoso. Las zonas de falla son propensas a la alteracion como resultado de cambios de humedad que puede reducirse cuando el agua esta presente. Cuando trabajamos en roca regular o mala calidad cambian las condiciones por el cambio de humedad. La presion del agua es tratada por analisis de esfuerzos efectivos.		CONDICIONES DE SUPERFICIE				
ESTRUCTURA		MUY BUENA	BUENA	REGULAR	POBRE	MUY POBRE
		Superficie muy rugosas, no meteorizadas, frescas	Superficies rugosas, ligeramente meteorizadas, manchadas con hierro	Superficies lisas, moderadamente meteorizadas y alteradas	Superficie con espejos de falla, alto grado de meteorizacion y rellenos compactos.	Superficie con espejos de falla, alto grado de meteorizacion y rellenos de arcillas suave.
INTACTA O MASIVA Rocas intactas o masivas in-situ, rocas con discontinuidades amplias y espaciadas		90			N/A	N/A
FRACTURADA Macizo rocos con bloques enclavados, bloques cubicos formados tres intersecciones de sistemas de dicontinuidades		80	70			
MUY FRACTURADA Macizo perturbado con bloques entrabados y angulares formados por la interseccion de 4 o mas sistemas			60	50		
FRACTURADA/PERTURBADA/SORDIDA Macizo plegado formado por bloques angulares productos de la interseccion de varios sistemas de discontinuidades. Persistencia de los planos de estratificacion				40	30	
DISGREGADO Pobremente enclavado, macizo altamente fracturado con mezcla de fragmentos angulares y redondeados					20	
LAMINADA/FOLIADA Se carece de bloques debido al debil material en los planos de esquistocidad y cizalla		N/A	N/A			10

Figura 1. Clasificación geomecánica GSI.

Fuente: Adaptado de [3]

$$n_z = \frac{VD \times \rho_e}{VC \times \rho_r}$$

$$n_z = \frac{3500 \frac{m}{s} \times 850 \frac{kg}{m^3}}{4900 \frac{m}{s} \times 2600 \frac{kg}{m^3}} \quad (1)$$

$$n_z = 0.2335$$

$$PD = \frac{VD^2 \times \rho_e}{4}$$

$$PD = \frac{(3500 \frac{m}{s})^2 \times 850 \frac{kg}{m^3}}{4} \quad (2)$$

$$PD = 2603.125 MPa$$

Y además:

Conociendo estos dos parámetros a partir de la ec. (3) se estima la presión transmitida a la roca:

$$PT = \frac{2}{1 + n_z} PD = 4220.7134 \text{ MPa} \quad (3)$$

La presión transmitida permite hallar por medio de la ec. (4) cual es el punto máximo, al cual un barreno es capaz de fragmentar la roca. Teniendo en cuenta que el RCU promedio de la roca es de 150 MPa, entonces la tensión de fracturamiento es de aproximadamente 15 MPa (el 10% del RCU).

$$\sigma_i = \left(\frac{r_b}{DS} \right)^2 PT \quad (4)$$

Entonces:

$$\left(\frac{0.037 \text{ m}}{DS} \right)^2 * 4220.7134 \text{ MPa} = 15 \text{ MPa} \quad (5)$$

Al despejar el valor de DS, se obtiene que este corresponde a 62 cm, por lo que la malla máxima de perforación sería de 120x120cm. Aunque cabe destacar que esta malla garantiza el fracturamiento, mas no la granulometría siendo lo más probable la obtención de sobretamaños tras la voladura.

Actualmente el estándar de la mina corresponde a mallas de perforación espaciadas en 60x60 cm. Aplicando la premisa anterior, con estas se obtendrían valores de tensiones de fracturamiento de alrededor de 64.19 MPa. Con ello se garantizaría un fracturamiento en la totalidad de los paneles de producción, ya que ninguna de las rocas presentes en la mina tiene valores que superen los 640 MPa de resistencia a la compresión uniaxial.

Un punto crítico de las voladuras es la inestabilidad que pueden generar en la roca de contorno tras la ejecución de esta, ocasionada por la onda como se mencionó anteriormente. La ampliación de los espaciamentos de las mallas de perforación, al disminuir el número de barrenos, también disminuye la cantidad de estos que detonan simultáneamente, disminuyendo así la vibración total generada por la cantidad menor de ondas que se superponen [8].

3. Metodología experimental

Para la construcción de la tabla geomecánica, es necesario realizar ensayos de voladuras con distintas configuraciones de mallas de perforación y en distintas calidades de rocas.

El paso inicial al llegar al panel, es realizar la caracterización geomecánica de la roca utilizando la tabla GSI. Para el cálculo del valor del RQD y del RCU se tienen aproximaciones de campo a los valores reales mostrados en la Tabla 1.

Tabla 1.

Aproximaciones de los valores del RQD y RCU.

Medida	RCU	Medida	RQD
Se rompe con 3 o más golpes de martillo	Roca buena (RCU de 100 a 250 MPa)	Roca levemente fracturada (2-6 fracturas por metro).	100-75
Se rompe con 1 o 2 golpes de martillo	Roca regular (RCU de 50 a 100 MPa)	Roca moderadamente fracturada (6-12 fracturas por metro).	75-50
El martillo se inserta superficialmente	Roca pobre (RCU de 50 a 100 MPa)	Roca muy fracturada (12-20 fracturas por metro).	50-25
El martillo se inserta superficialmente más de 5mm o se disgrega	Roca muy pobre (RCU de 5 a 25 MPa)	Roca intensamente fracturada (12-20 fracturas por metro).	25-0

Fuente: Autores

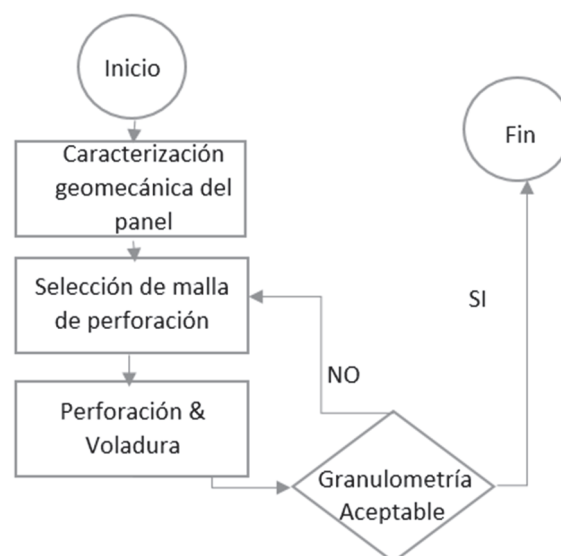


Figura 2. Diagrama de flujo de la metodología experimental.

Fuente: Autores

Una vez caracterizada la roca, se procede a proponer un espaciamiento para la malla de perforación a realizar, se realiza la voladura y se evalúan los resultados. Esta elección se hace con base en los cálculos mostrados en el capítulo 2.3, sabiendo que no se puede exceder de mallas espaciadas de 120x120 cm.

El principal factor que determina si la malla de perforación es la indicada es la granulometría, la cual debe ser 30 cm como máximo. Otros criterios son la cantidad de sobretamaños y la forma en la cual quedó el techo y los respaldos del panel. La Fig. 2 resume la metodología utilizada para el trabajo.

4. Resultados y discusión

La metodología planteada en el capítulo 3 se aplicó en voladuras de nueve paneles de producción con distintas calidades del macizo rocoso.

Tabla 2.

Ejemplo de granulometría con sobretamaños y granulometría adecuada.

Panel Fig. 3a tras voladura (sobretamaños)		Panel Fig. 3b tras voladura (granulometría adecuada)	
Tamaño	Porcentaje	Tamaño	Porcentaje
80cm <	10 %	10cm <	10 %
80 m – 60 cm	20%	10 cm – 5 cm	30 %
< 60 cm	70%	< 5 cm	60 %

Fuente: Autores

Tabla 3.

Paneles de producción con las configuraciones utilizadas en cada uno.

Panel	Malla de Perforación
Panel Microscop	80x80 cm
Panel intermedia Norte Flanco E	70x70 cm
Panel intermedia Norte Flanco W	80x80 cm
Panel Veta 1	80x80 cm
Panel Mellizos Norte Flanco E	80x80 cm
Panel 570 Flanco E	80x80 cm
Panel 570 Flanco W	80x80 cm
Panel 1 Este Tensional Ovejo Flanco E	80 x 80 cm
Panel 1 Este Tensional Ovejo Flanco W	80 x 80 cm

Fuente: Autores

Para los ensayos se utilizaron tres distintas configuraciones de mallas de perforación: Espaciamientos de 60x60 cm, espaciamientos de 70x70 cm y espaciamientos de 80x80 cm, con barrenos de longitudes de 1.80 m. Luego de cada voladura se verifica el principal parámetro de control que es la granulometría, la cual debe ser máximo de 30cm para que pueda pasar por las parrillas que conducen a las tolvas de los paneles.

A modo de comparación la Fig. 3a muestra un panel con roca de calidad media en el cual tras la voladura se obtuvieron alrededor de un 40% de sobretamaños que oscilaban los 50 cm. La Fig. 3b por el contrario muestra un panel donde se obtuvo una granulometría que cumple con las condiciones anteriormente dichas, donde se puede observar que más del 60% del material está alrededor de 5 cm. La Tabla 2 muestra los resultados de granulometría obtenidos de estos dos casos.

La Tabla 3 muestra las configuraciones utilizadas para cada panel donde se realizaron ensayos, estos paneles fueron ubicados en la tabla geomecánica del GSI previamente para conocer su calidad, y tras varios ensayos se encontró cual es la configuración que mejor actúa en ellos.

Con base en estos resultados se creó la tabla GSI modificada para perforación y voladura mostrado en la Fig. 5, el cual consta de 3 zonas. La zona A, son las rocas de mejor calidad que pueden encontrarse en los paneles de la mina, son rocas duras y poco fracturadas; en esta zona la malla sigue igual que la estándar de la mina que es la espaciada de 60x60 cm, ya que los resultados con mallas más amplias fueron con gran cantidad de sobretamaños. La zona B, corresponde a los paneles con rocas de calidad media, normalmente de observa roca dura pero levemente fracturada; en estos casos las voladuras de 80x80cm trabajaron bien, pero la granulometría obtenida era levemente mayor a la requerida (fue de 40cm en promedio), por lo cual se fijó la malla en 70x70 cm para los

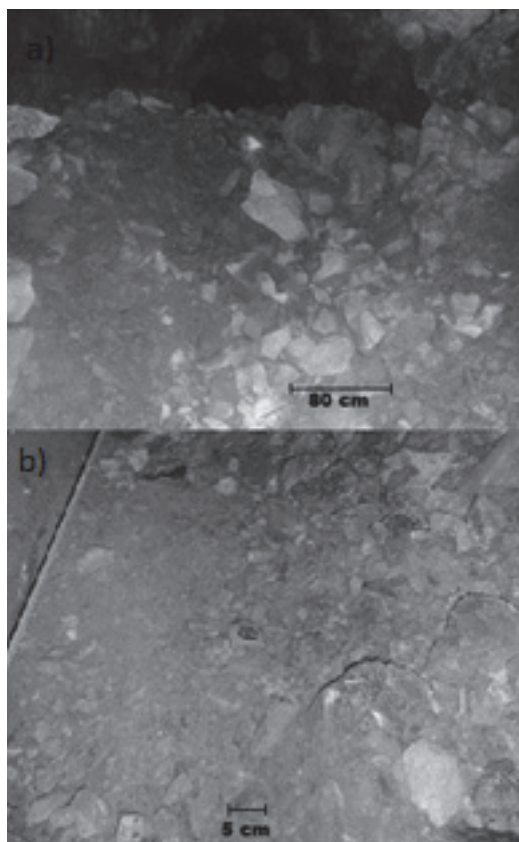


Figura 3. a) Panel luego de voladura con sobretamaños. b) Panel luego de voladura con granulometría adecuada.

paneles de este tipo. Finalmente la Zona C, corresponde a los paneles con rocas de baja calidad, en estos las mallas espaciadas a 80x80 cm fueron bastante efectivas, dejando granulometrías bastante finas, como las observadas en la Figura3b.

En la mayoría de los paneles de producción, cuando son estrechos (menos de 1.50 m de espesor) se perforan 3 barrenos por filas. Allí se utiliza las tres zonas de la tabla geomecánica. En los resultados de los ensayos experimentales se observó que las mallas espaciadas de 80x80 cm funcionan de forma efectiva, entregando buenas granulometrías, en todos los tipos de roca siempre y cuando el ancho del panel de producción sea mayor a 1.50 m. Ello se debe a que en estos paneles se perforan más de 3 barrenos por fila y la superposición de ondas de los que detonan simultáneamente favorece al fracturamiento.

La modificación del estándar de perforación a espaciamientos de 70x70cm y 80x80cm en la mayoría de los paneles disminuye en gran medida el consumo de explosivos, debido a la disminución en la cantidad de barrenos a perforar. Ello mismo también repercute en una disminución en los tiempos de perforación y otros consumibles como brocas y barrenas.

El consumo específico de explosivos (Q), es una medición que lleva el costo de todos los agentes de voladuras y accesorios a un solo parámetro, que en este caso son los kilogramos con base en Indugel por cada tonelada de mineral

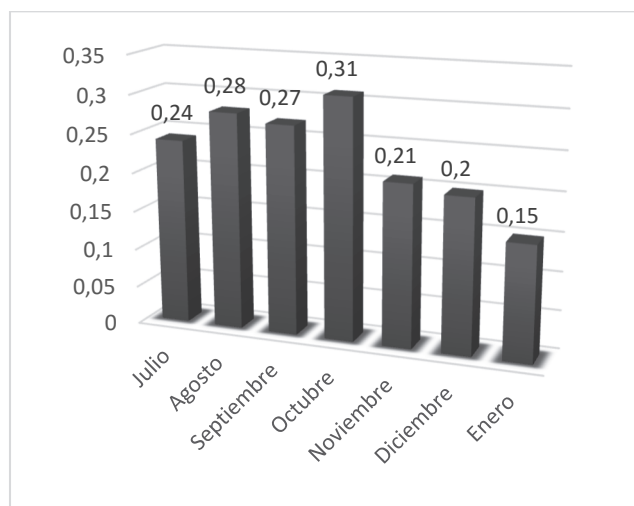


Figura 4. Consumo de explosivos Q (Kg explosivo / tonelada arrancada) histórico en Producción 2 Mina La Maruja. Final del 2014 e inicio del 2015
Fuente: Autores

arrancada; este factor puede medirse incluyendo el costo de los accesorios de voladura (detonadores, cordón, etc.) así como sin estos.

Inicialmente los ensayos se realizaron en el departamento de Producción 2, por lo cual es el único que actualmente utiliza la tabla GSI modificada. La Fig. 4 muestra cómo ha sido el comportamiento del Q sin accesorios a partir de la implementación de ésta (Noviembre de 2014).

En términos de costos netos por voladura también se encontró una reducción notable, habiendo una diferencia de 24,6% entre las mallas de 60x60cm y las de 80x80cm, como se observa en la Tabla 4.

Los costos de la Tabla 4 se refieren a una voladura de producción en el techo de un panel estándar de dimensiones de 35m x 1.5m de largo y ancho respectivamente. Allí se incluyen los costos de explosivos, accesorios de voladura, barrenas, aire comprimido y mano de obra empleada.

MINEROS NACIONALES S.A.S - MINA MARMATO CALDAS					
Malla de perforación según tabla GSI Modificado para Marmato en paneles de producción					
A Malla de perforación de 60x60 para anchos menores a 1.50 m y de 80 x80 para anchos de paneles mayores a 1.50 m B Malla de perforación de 70x70 para anchos menores a 1.50 m y de 80 x80 para anchos de paneles mayores a 1.50 m C Malla de perforación de 80x80					
ESTRUCTURA	CONDICIONES				
Levemente fracturada Tres a menos sistemas de discontinuidades muy espaciadas entre sí. (RQD 75 - 90 Jn) (2 a 6 Fracturas por metro) (RQD = 115 - 3.3 Jn)	Buena (Muy resistente, Fresca)	Superficie de las discontinuidades muy rugosas e inalteradas, cerradas.	Regular (Resistente, Levemente alterada)	Discontinuidades lisas, moderadamente alterada, ligeramente abierta	Discontinuidades lisas, moderadamente alterada, ligeramente abierta
Moderadamente fracturada Muy bien trabada, No disturbada, Bloques cubicos formados por tres sistemas de discontinuidades ortogonales. (RQD 50 - 75 Jn) (6 a 12 Fracturas por metro)	Superficie de las discontinuidades muy rugosas e inalteradas, cerradas.	(Rc 100 a 250 Mpa)	(Se rompe con tres o mas golpes de la barra)	(Se inserta superficialmente con un golpe de la barra)	(Se inserta superficialmente con un golpe de la barra)
Muy fracturada Moderadamente trabada, parcialmente disturbada, bloques angulosos formados por cuatro o mas sistemas de discontinuidades. (RQD 25 - 50 Jn) (12 a 20 Fracturas por metro)	Regular (Resistente, Levemente alterada)	Discontinuidades rugosas, levemente alterada, manchas de oxidación, ligeramente abierta.	(Rc 50 a 100 Mpa)	(Se rompe con uno o dos golpes de la barra)	(Se rompe con uno o dos golpes de la barra)
Intensamente fracturada Plegamiento y fallamiento, con muchas discontinuidades interceptadas formando bloques angulosos o irregulares. (RQD 0 - 25 Jn) (Mas de 20 Fracturas por metro)	Pobre (Moderadamente resistente, Leve a moderadamente alterada)	Discontinuidades lisas, moderadamente alterada, ligeramente abierta	(Rc 50 a 100 Mpa)	(Se inserta superficialmente con un golpe de la barra)	(Se inserta superficialmente con un golpe de la barra)
	Muy Pobre (Blanda, Muy alterada)	Superficie pulida o con estrías, muy alterada, relleno compacto o con fragmentos de roca.	(Rc 5 a 25 Mpa)		
	(Se inserta mas de 5 mm o se desgrega con un golpe de la barra)				

Figura 5. GSI modificado para perforación y voladura en la Mina La Maruja.
Fuente: Autores

Tabla 4.
Costo neto por voladuras.

Malla de perforación	Costo por voladura
60x60cm	\$ 1.861.902,93
70x70cm	\$ 1.601.125,20
80x80cm	\$ 1.402.934,12

Fuente: Autores

5. Conclusiones

- Se pueden utilizar las mallas de perforación con espaciamentos máximos de 80x80cm. No obstante al analizar la tabla geomecánica es muy probable que los paneles con rocas de la más baja calidad puedan trabajar con espaciamentos mayores, ya que como se observó en estos el tamaño promedio de la roca tras la voladura es por lo menos cinco veces menor que el requerido.
- Con mallas de 80x80cm se tiene un ahorro en costos de más del 30% que cuando se usaban mallas de 60x60cm.
- Además del espaciamiento existen ciertos factores que pueden favorecer la eficiencia de las voladuras, como lo son la variación en la cantidad de explosivo en los barrenos y las secuencias de detonación de estos (por ejemplo detonaciones en “V”). Estos parámetros también pueden traer beneficios en la granulometría, a menores afectaciones a la roca encajante y costos entre otros, por lo cual sería recomendable estudiar.

Agradecimientos

Los autores expresan su profundo agradecimiento a la empresa Mineros Nacionales S.A.S, en especial a su presidente Dr. Gabriel Gaviria, por permitir y promover estas investigaciones.

Referencias

- [1] Hoek, E. and Brown, E., Underground Excavations in Rock. London: Institution of Mining and Metallurgy, 1980, 527 P.
- [2] Mohammadi, M., Hossaini, M.F., Mirzapour, B. and Hajiantilaki, N., Use of fuzzy set theory for minimizing overbreak in underground blasting operations – A case study of Alborz Tunnel, Iran. International Journal of Mining Science and Technology, 25(3), pp. 439-445, 2015. DOI: 10.1016/j.ijmst.2015.03.018
- [3] Marinos, V., Marinos, P. and Hoek, E., The geological strength index: Applications and limitations. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 64(1), pp. 55-65. 2005. DOI: 10.1007/s10064-004-0270-5
- [4] Medoro Resources LTD., Mineral resource estimate of Marmato project, Colombia. SRK Consulting Engineers and Scientist, Toronto, Canadá, 2011, 158 P.
- [5] de Vallejo, L.G., Ferrer, M., Ortuño, L. y Oteo, C. Ingeniería Geológica, Ed. Pearson Educación, Madrid, España, 2002, 744 P.
- [6] Wyllie, D. and Mah, C. Rock Slope Engineering: Civil & Mining, 4th ed., New York, 2004, 431 P.
- [7] Lopez, C. y Lopez, E. Manual de perforación y voladuras en roca, IGME, España, 2003, 541 P.
- [8] Chen, M. and Lu, W., Blasting vibration criterion for a rock-anchored beam in an underground powerhouse, Tunneling and Underground

Space Technology, 22, pp. 69-79, 2007. DOI: 10.1016/j.tust.2006.03.005

CA. Ortega-Ramos, es Ing. de Minas y Metalurgia en 2015 de la Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. Actualmente trabaja en Mineros Nacionales S.A.S. en minería aurífera subterránea. ORCID: 0000-0003-4047-2195

A.F. Jaramillo-Gil, es de Ing. de Minas y Metalurgia en 2006 de la Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia y Esp. en Gerencia de Proyectos en el 2010, de la Universidad del Tolima, Colombia. Actualmente trabaja en Mineros Nacionales S.A.S. en minería aurífera subterránea. ORCID: 0000-0001-7653-1586

J.M. Molina-Escobar, es Dr. en Recursos Naturales y Medio Ambiente en 2008 de la Universidad Politécnica de Cataluña, España, MSc. en Ingeniería de Geosistemas en 1997 de la Universidad de Tokio, Japón, Inge. de Minas y Metalurgia en 1989 de la Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. Laboró en minas de oro, de carbón; consultor investigador. Actualmente profesor de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Colombia. ORCID: 0000-0002-6068-2571

Failure potential index for slopes conditioned by landforms

Sebastián Camacho-Orozco & Alfonso Mariano Ramos-Cañón

Facultad de Ingeniería, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. Sebastian.camacho@javeriana.edu.co, a-ramos@javeriana.edu.co

Received: October 19th, 2015. Received in revised form: April 8th, 2016. Accepted: May 13th, 2016.

Abstract

The paper contributes to the understanding of the effect of three-dimensional landforms in the slope stability through to the analysis of nine models, which result from the combination of three different landforms in plant and profile view (straight, convex and concave). The analysis is based on the calculation of a failure potential index which represent a unified way a stability value for each model. The procedure was performed by mean of finite element numerical simulations with a Mohr-Coulomb elastoplastic model applied to each geometry in homogeneous soils. We take into account permanent flow and partial saturation above of the flow surface within the slope. Finally, it is quantified the failure susceptibility of the nine models by mean of the assignation of a failure potential index. With this assignation, it is possible to establish an order of priority of the susceptibility of the slopes in function of geomorphology of each model.

Keywords: Geomorphology, finite element method, slopes stability, elastoplasticity, susceptibility, Failure potential index, flow lines.

Indicador potencial de falla para taludes condicionados por las geoformas

Resumen

El trabajo contribuye al entendimiento del efecto de la geoforma en la estabilidad de taludes en un análisis tridimensional por medio de nueve modelos conformados por la combinación en planta y perfil de la forma recta, convexa y cóncava. El análisis se basa en el cálculo de indicadores potenciales de falla que representan de manera unificada un valor de estabilidad en cada modelo. El procedimiento se realizó a través de simulaciones numéricas en elementos finitos con un modelo elastoplástico tipo Mohr-Coulomb para suelos homogéneos. Se tuvo en cuenta condiciones de flujo permanente y parcial saturación arriba de la superficie de flujo superior en el interior del talud. Finalmente se cuantifica la susceptibilidad a la falla de diferentes geometrías de taludes por medio de la asignación del indicador de estabilidad con lo que se establece un orden de susceptibilidad a la falla de los modelos analizados en función de las características geomorfológicas. El indicador logra cuantificar de una manera unificada la influencia de la trayectoria del flujo en el estado de esfuerzos localizando zonas inestables e identificando los modelos más susceptibles a la falla.

Palabras clave: Geomorfología, elementos finitos, estabilidad de taludes, elastoplasticidad, susceptibilidad, líneas de flujo.

1. Introducción

Las trayectorias de flujo sub superficial en taludes están condicionados por la forma del terreno que a su vez es un reflejo del origen, evolución y composición de los materiales constituyentes. Adicionalmente son factores que predominan en el estudio y evaluación de procesos de remoción en masa [1-6].

[3,4,7] han desarrollado estudios en el análisis cuantitativo de la interacción entre la topografía y la respuesta hidrológica en taludes por medio de metodologías numéricas donde han evaluado la incidencia del factor geomorfológico en la magnitud y dirección de las líneas de flujo. La misma problemática se ha

analizado por [2] en términos de estabilidad, donde se cuestiona la variabilidad del estado de esfuerzos efectivos en modelos bidimensionales. [2] evalúan la estabilidad de cuatro modelos geométricos en dos dimensiones implementando el criterio de falla de Mohr Coulomb para calcular un indicador potencial de falla en el que se relaciona el esfuerzo cortante máximo (τ_{max}) y el esfuerzo efectivo medio (σ'_m) con lo que logra representar las zonas inestables a lo largo del cuerpo del talud.

En un análisis tridimensional de la problemática planteada, [8] han estudiado el comportamiento divergente y convergente del flujo sub superficial, localizando zonas de cargas y descargas a través de ecuaciones diferenciales que están en

How to cite: Camacho-Orozco, S. & Ramos-Cañón, A.M., Indicador potencial de falla para taludes condicionados por las geoformas. Boletín de Ciencias de la Tierra, (40), 39-45, 2016.

función de parámetros establecidos para conformar la geometría del talud. A diferencia de un análisis bidimensional el cual esconde aspectos relevantes en el gradiente y magnitud del flujo, la combinación de la forma del terreno en planta y perfil produce dos importantes efectos en la trayectoria del flujo: por un lado, el efecto de la forma en perfil genera una aceleración y desaceleración del flujo produciendo una variabilidad en la magnitud en diferentes puntos del talud. Por otro lado, el efecto de la forma en planta controla el comportamiento convergente y divergente del flujo [9].

Se observan trabajos que se enfocan principalmente en el estudio de procesos geomorfológicos e hidrológicos por medio de análisis cualitativos [10-13]. En términos cuantitativos, los estudios con modelación tridimensional se han desarrollado a través de análisis de la respuesta hidrológica y la trayectoria de las líneas de flujo [14,3,4] sin hacer referencia directa a la incidencia en la potencialidad a la falla. En contraste, se ha evaluado la estabilidad por medio de un indicador potencial de falla propuesto por [2] con modelos bidimensionales, por lo que poseen deficiencias intrínsecas dado su carácter plano.

En este punto es importante mencionar, que a pesar de los trabajos desarrollados, se desconoce de un estudio en el que se cuantifique la estabilidad del talud por causa de la influencia de la forma del terreno y la trayectoria de las líneas de flujo en un análisis numérico tridimensional con elementos finitos.

El presente trabajo desarrolla un procedimiento y propone un único indicador potencial de falla para 9 modelos de taludes tridimensionales los cuales es producto de la combinación en planta y perfil de tres geoformas (recto, convexo, cóncavo) tomando como herramienta de solución el método de elementos finitos con un modelo constitutivo del tipo elastoplástico con flujo permanente en la zona saturada y parcial saturación arriba de la superficie superior de flujo. El indicador logra cuantificar de una manera unificada la influencia de la trayectoria del flujo en el estado de esfuerzos localizando zonas inestables e identificando los modelos más susceptibles a la falla.

2. Simulación numérica en elementos finitos

2.1. Morfología

Los nueve modelos de taludes mostrados en la Fig. 1 representan de una forma general la morfología de terrenos montañosos producto de procesos hidrológicos y geomorfológicos.

Cada geometría del talud se parametrizó en función de la altura del talud, tal como se muestra en la Fig. 2. Los factores de parametrización y las características geométricas se muestran en la Tabla 1.

Las distancias F_c y F_p de la Fig. 2 se determinaron por medio de un análisis de sensibilidad mostrado en la Fig. 3. El parámetro z es la distancia de la corona del talud, β es el ángulo de inclinación del talud y el parámetro a es la distancia que forma la concavidad en la parte superior del talud.

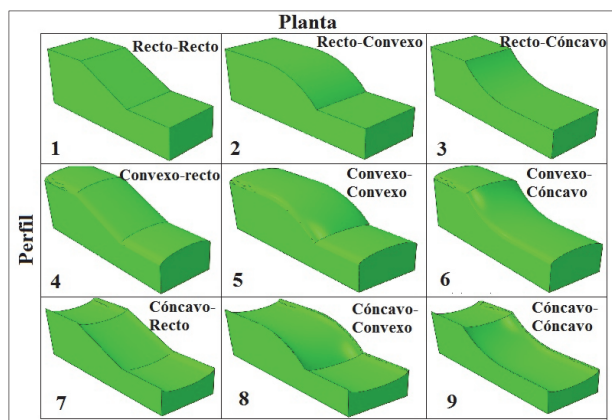


Figura 1. Vista en planta y perfil de los nueve modelos tridimensionales de taludes.

Fuente: Los autores

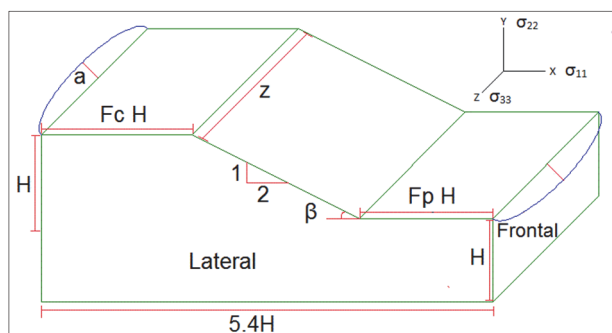


Figura 2. Parametrización geométrica de los 9 modelos

Fuente: Los autores

Tabla 1.
Dimensiones definidas en el presente estudio

H (m)	a (m)	z (m)	β°	F_c	F_p
25	6.75	45	26.56	1.8	1.6

Fuente: Los autores

Se estudia la distancia en la que el efecto que genera la restricción de los desplazamientos en los nodos (dirección x) en la distribución de esfuerzos es insignificante. Se cuidó que las condiciones de contorno de los desplazamientos en los límites del modelo no afectaran los resultados en términos de esfuerzos de corte tanto en la corona como en la pata del talud. La Fig. 3a y 3b muestran a variación de los esfuerzos de corte (τ_{12}) en una sección en la corona y en la pata del talud, respectivamente en función de la altura H del talud (Fig. 2). La altura H del talud se fijó en 25 metros.

Se observa que para distancias cercanas a la pata y a la corona del talud (de 15 a 40 metros) se presenta una variación significativa en los esfuerzos de corte (τ_{12}) con la profundidad. Para valores superiores a $F_c=1.8$ (45 metros) de la frontera izquierda a la corona de los taludes no se observa cambio representativo de los esfuerzos de corte (τ_{12}) (Fig. 3a). Comportamiento similar se presenta para la pata del talud con distancias mayores a la frontera derecha de $F_p=1.6$ (40 metros) (Fig. 3a y 3b).

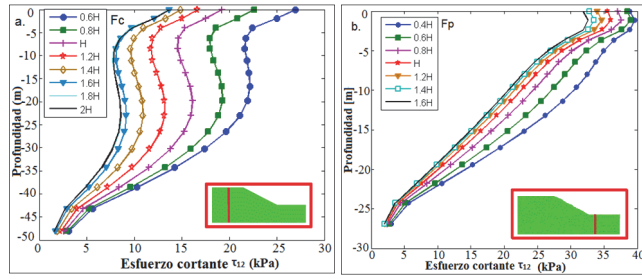


Figura 3. a. Variación de los esfuerzos de corte en la sección de análisis. a. Para diferentes distancias (Fc) de la frontera izquierda del modelo en la corona del talud. b. Para diferentes distancias de la frontera derecha del modelo en la pata del talud (Fp).
Fuente: Los autores

2.2. Modelo constitutivo

En la relación de esfuerzos y deformaciones se utilizó el modelo constitutivo elastoplástico tipo Mohr Coulomb implementado en el software ABAQUS. El modelo constitutivo contiene los siguientes componentes que caracterizan el comportamiento elastoplástico.

- Función de fluencia: es gobernada por la ecuación (1) y se define por el estado y parámetros del material a través de invariantes de esfuerzos.

$$F = Rmc \cdot q - p \cdot \tan \phi - c \quad (1)$$

Donde F es la función de fluencia, Rmc (ecuación 2) es una medida de la forma de la superficie de fluencia en función del ángulo de fricción (ϕ) y el ángulo de Lode (θ), (p) es la primera invariante de esfuerzos, (q) es la segunda invariante de esfuerzos y (c) es la cohesión del material.

$$Rmc = \frac{1}{\sqrt{3 \cos \phi}} \cdot \sin \left(\theta + \frac{\pi}{3} \right) + \frac{1}{3} \cos \left(\theta + \frac{\pi}{3} \right) \cdot \tan \phi \quad (2)$$

- Ley de flujo plástico: establece la magnitud y dirección de las deformaciones plásticas por medio de una regla de flujo no asociada (ecuación 3).

$$G = \sqrt{(E \cdot c \cdot \tan \psi)^2 + (Rmw \cdot q)} - p \cdot \tan \psi \quad (3)$$

En la ecuación 3, (G) es el potencial plástico y (E) es la excentricidad meridional que controla la forma de la función (G) en el plano meridional. El plano meridional representa un corte de la superficie del potencial plástico, donde la dirección de las deformaciones plásticas están perpendicular a la superficie de potencial plástico [15]. (ψ) es el ángulo de dilatación y (Rmw) es la función elíptica propuesta por [16] (ecuación 4) que suaviza las esquinas en la superficie del potencial plástico en el espacio principal de esfuerzos. El parámetro (e) está en función del ángulo de fricción (ϕ) (ecuación 5).

$$Rmw = \frac{4 \cdot (1 - e^2) \cdot (\cos[\theta])^2 + (2e - 1)^2}{2 \cdot (1 - e^2) \cdot \cos \theta + (2e - 1) \cdot \sqrt{4 \cdot (1 - e^2) \cdot (\cos[\theta])^2 + 5e^2 - 4e}} \quad (4)$$

$$e = \frac{3 - \sin \phi}{3 + \sin \phi} \quad (5)$$

- Ley de endurecimiento: El comportamiento de endurecimiento o ablandamiento por deformación del material depende de una cohesión equivalente para cada nivel de deformaciones plásticas. La evolución de la superficie de fluencia dada por el endurecimiento es del tipo isotrópico y es controlado directamente por el usuario ingresando la cohesión equivalente para las deformaciones plásticas en el proceso de carga.

Los parámetros del modelo constitutivo elastoplástico se definieron con base en valores típicos de arenas limosas propuestos por [17] (Tabla 2).

En la simulación del flujo en el medio poroso se representó una fase saturada y una parcialmente saturada. En la zona saturada se simuló un flujo estacionario gobernado bajo la ley de Darcy definiendo dos alturas piezométricas. En la Fig. 4 se observa las condiciones de frontera definidas en la simulación del flujo.

Las condiciones iniciales y parámetros del modelo de succión son el contenido de humedad (ω), la relación de vacíos (e), el grado de saturación inicial (S_r), el coeficiente de permeabilidad (K) y las alturas piezométricas (Z_a y Z_b). En la Tabla 3 se muestran los valores seleccionados para el análisis.

Para establecer la condición de la zona parcialmente saturada se conformó la curva de retención de humedad basados en la ecuación analítica de [18] (ecuación 6) que relaciona el grado de saturación y el esfuerzo de succión en el medio poroso. Los parámetros del modelo de saturación – succión fueron tomados del trabajo de [19] (Tabla 4).

Tabla 2.

Valores típicos de parámetros para el modelo elastoplástico de Mohr Coulomb para arenas limosas

Parámetros del modelo elastoplástico		
Ángulo de fricción (ϕ°)	Ángulo de dilatación (ψ°)	Cohesión (kPa)
34	5	25
Peso unitario (kN/m ³)	Módulo de elasticidad (kPa)	Relación de poisson
19	18000	0.33

Fuente: Los autores

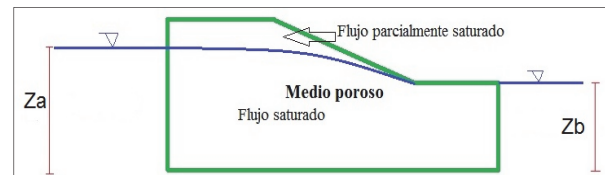


Figura 4. Condiciones de frontera del flujo en un medio poroso. Altura piezométrica costado izquierdo (m.c.a) (Z_a) – altura piezométrica costado derecho (m.c.a) (Z_b).
Fuente: Los autores

Tabla 3.

Parámetros seleccionados del modelo succión humedad

Parámetros del modelo succión humedad					
ω (%)	e	Sr (%)	k (m/s)	Za (m.c.a)	Zb (m.c.a)
20	0.85	62.8	0.0001	35	25

Fuente: Los autores

Tabla 4.

Parámetros típicos de una arena limosa para la ecuación de van Genuchten [19]

ρ (m-1)	m	n
3.1	1.27	0.213

Fuente: Los autores

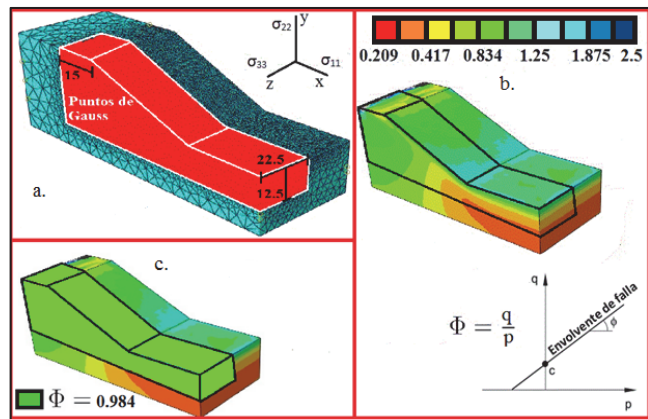


Figura 5. Metodología para el cálculo de indicadores potenciales de falla (Φ). (a): Selección de la zona de análisis. (b): Cálculo de los indicadores potenciales de falla en la zona de análisis. (c): Cálculo del indicador potencial de falla.

Fuente: Los autores

$$Sr = \left[\frac{1}{1 + (\rho\psi)^n} \right]^m \quad (6)$$

Donde (Sr) es el grado de saturación, ρ, m, n son parámetros dependientes de la gradación y clasificación textural del suelo y (ψ) es el esfuerzo de succión (kPa).

3. Indicadores potenciales de falla (Φ)

El procedimiento propuesto para calcular el indicador potencial de falla en cada uno de los modelos tiene los siguientes procesos (Fig. 5).

- Selección de la zona de análisis.
- Cálculo de los indicadores potenciales de falla en la zona de análisis.
- Cálculo del indicador representativo de falla.

3.1. Zona de análisis

La zona de análisis de los modelos de taludes representa los lugares de mayor concentración de esfuerzos y líneas de flujo. Hay zonas del modelo donde no se consideraron los indicadores en el análisis cuantitativo debido a su baja tendencia (Fig. 5a).

Se inicia el procedimiento con la selección de nodos del enmallado en la zona de refinamiento en lugares de interés donde se espera la mayor concentración de esfuerzos y flujo. La zona seleccionada abarca todos los nodos del modelo tridimensional (Fig. 5a).

Los límites de la zona de interés se definieron a través de observaciones en los contornos de los indicadores potenciales de falla (Φ). Se inicia a una distancia de 15 metros en la corona del talud en dirección x como se observa en la Fig. 5. Los valores localizados por fuera de la distancia seleccionada no son representativos. En dirección z se definió en la mitad del modelo debido a la simetría de la geometría del talud.

En la Fig. 6 se observa la relación entre la profundidad en la pata del talud y el indicador potencial de falla (Φ). Se seleccionó una profundidad en dirección y de 12.5 metros. Las profundidades mayores a 12.5 metros no presentan cambios significativos en el indicador potencial de falla, generando una baja tendencia debido al aumento del esfuerzo de confinamiento.

3.2. Cálculo de los indicadores potenciales de falla en la zona de análisis

La estabilidad de los 9 modelos de taludes se cuantificó por medio del indicador potencial de falla (Φ). El indicador propuesto en el presente trabajo es una modificación del desarrollado por [2]. El indicador propuesto por [2] está en términos del máximo esfuerzo cortante (τ_{max}) y el esfuerzo medio (σ'_m) de los esfuerzos principales, en tanto que el propuesto está en función de las invariantes de esfuerzo por lo que está en capacidad de tener en cuenta estados de esfuerzos generales en condiciones multiaxiales. El indicador tiene la potencialidad de tener en cuenta en términos de invariantes esfuerzos, que la propensión a la falla de un talud utilizando un modelo constitutivo con envolvente de falla del tipo Mohr Coulomb, es proporcional al cortante máximo o la segunda invariante de esfuerzos (q), e inversamente proporcional al esfuerzo de confinamiento o primera invariante de esfuerzos (p). Es decir, cuando la primera invariante de esfuerzos de

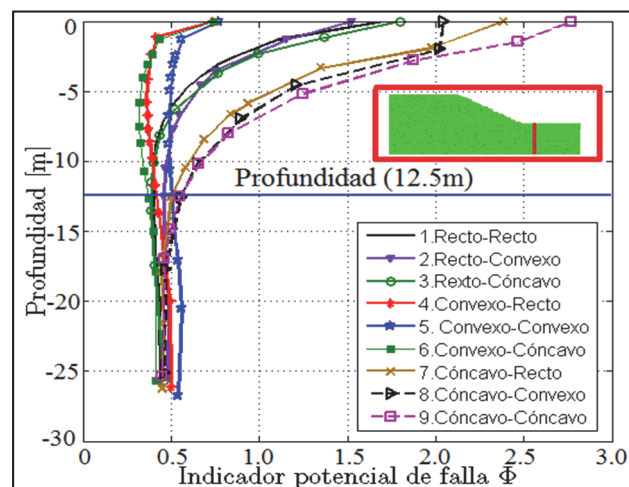


Figura 6. Selección de la profundidad adecuada de la sección de análisis.

Fuente: Los autores

los puntos de Gauss es baja, indica que la contribución del esfuerzo de confinamiento para desarrollar mayor resistencia al corte es baja. Por otro lado, si se están desarrollando esfuerzos de corte muy altos, quiere decir que el estado de esfuerzos estará muy cerca a la envolvente de falla del material (Fig. 5b).

Las dos invariantes de esfuerzos (p, q) tiene en cuenta los seis componentes del tensor de esfuerzos, a diferencia del indicador presentado por [2] que lo desarrollan en un análisis de deformación plana donde no se considera la influencia del esfuerzo intermedio del tensor de esfuerzos.

$$\Phi = \frac{q}{p} \quad (7)$$

La primera invariante de esfuerzos (p) está en función de los tres componentes principales del tensor de esfuerzos ($\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}$) (ecuación 8), y la segunda invariante (q) está en función del esfuerzo desviador (s_{ij}) (ecuaciones 9 y 10). El esfuerzo desviador es igual al tensor de esfuerzos (σ_{ij}) menos la primera invariante de esfuerzos (p).

$$p = -\frac{\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}}{3} \quad (8)$$

$$q = \sqrt{\frac{3}{2} (s_{ij} : s_{ij})} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} s_{11} & s_{21} & s_{31} \\ s_{12} & s_{22} & s_{32} \\ s_{13} & s_{23} & s_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{21} & \sigma_{31} \\ \sigma_{12} & \sigma_{22} & \sigma_{32} \\ \sigma_{13} & \sigma_{23} & \sigma_{33} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} p & 0 & 0 \\ 0 & p & 0 \\ 0 & 0 & p \end{bmatrix} \quad (10)$$

3.3. Cálculo del indicador representativo de falla

Una vez definida la zona de análisis y después de haber calculado los indicadores potenciales de falla (Φ) en cada punto de Gauss del enmallado, se procede a interpretar los resultados calculando medidas de tendencia central y dispersión de los datos. De esta forma se analizan los modelos más susceptibles frente algún proceso de remoción en masa y se establece un valor que represente de una manera unificada la estabilidad de cada modelo.

El procedimiento del cálculo de los indicadores potenciales de falla permite que los resultados obtenidos sean considerados como una iniciativa en el entendimiento del factor geomorfológico enfocado al estudio de grados susceptibilidad frente a procesos de remoción en masa.

4. Medidas de tendencia central y dispersión de los indicadores potencial de falla (Φ)

La interpretación de los resultados obtenidos se realizó a través de medidas descriptivas del conjunto de datos de la zona seleccionada empleando el procedimiento propuesto. Se calcularon medidas de tendencia central (media, mediana, moda) y dispersión de los datos (desviación estándar, coeficiente de variación y cuartiles), de esta manera se cuantifica la incidencia de la geoforma y la trayectoria del flujo en los nueve modelos de taludes.

La influencia de la trayectoria del flujo fue analizada mediante comparaciones entre modelaciones sin presencia de nivel freático (esfuerzos totales) y con flujo en términos de esfuerzos efectivos. Los análisis en términos de esfuerzos totales y efectivos fueron representados por diagramas de cajas que definen rangos intercuartiles (Fig. 7) (Fig. 8).

En un análisis en términos de esfuerzos totales existe una leve variación entre los modelos donde tienden a rangos intercuartiles muy similares. A diferencia del análisis en términos de esfuerzos efectivos donde prevalece la existencia del nivel freático, afectando la estabilidad del talud. La convergencia de las líneas de flujo en modelos con concavidad vista en planta (modelos 7, 8 y 9) se ve reflejada en la distribución del tamaño y localización de los diagramas de cajas (Figs. 7 y 8). El tamaño y la localización de los diagramas de cajas que representa cada modelo permiten definir las geoformas más susceptibles a la falla, donde son identificadas por los diagramas de cajas más largos y localizados a una mayor altura de la gráfica (Figs. 7 y 8).

En modelos con presencia de nivel freático se observa que el 75% de la distribución de los datos se concentran con indicadores menores a 1.6 y 1.9 (Fig. 7), en cambio, en modelos secos el 75 % se concentran aproximadamente con indicadores menores de 1.5 (Fig. 7b).

El comportamiento convergente y divergente de las líneas de flujo es reflejado en las medidas de tendencia central y dispersión de la distribución de los indicadores potenciales de falla. La divergencia de las líneas de flujo en geoformas convexas vista en planta (modelos 4, 5 y 6) tiende a generar bajos indicadores potenciales de falla, tanto en medidas de tendencia central (media, mediana, y moda) como de dispersión (cuartiles). Por otro lado, las altas concentraciones de líneas de flujo debido a la geoforma cóncava (7, 8,9) generan un aumento en el indicador por causa al incremento de la presión de poros logrando disminuir el esfuerzo de confinamiento hasta el punto de presentar esfuerzos a tensión en cada punto del material. En la Fig. 9 en los modelos 1, 2, 3, 7, 8, 9 se observa las zonas a tensión representadas por indicadores negativos.

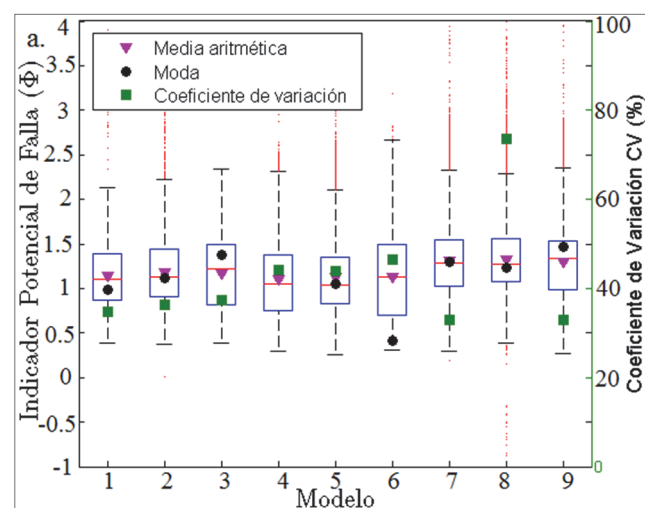


Figura 7. Diagramas de cajas de la estabilidad de cada geoforma en términos de esfuerzos totales

Fuente: Los autores

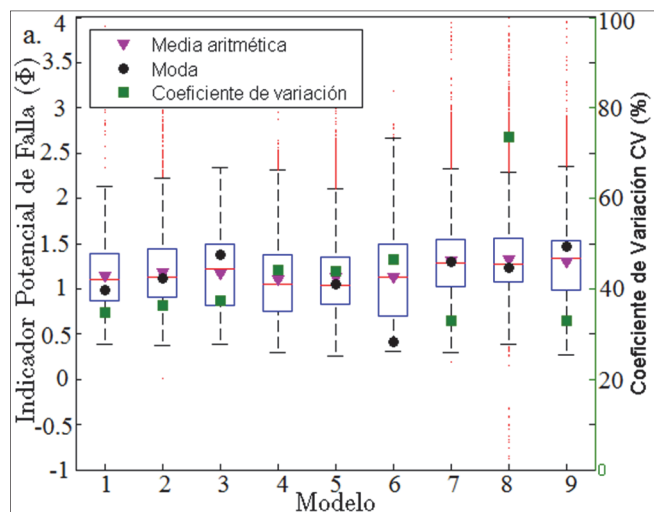


Figura 8. Diagramas de cajas de la estabilidad de cada geoforma en términos de esfuerzos efectivos.

Fuente: Los autores

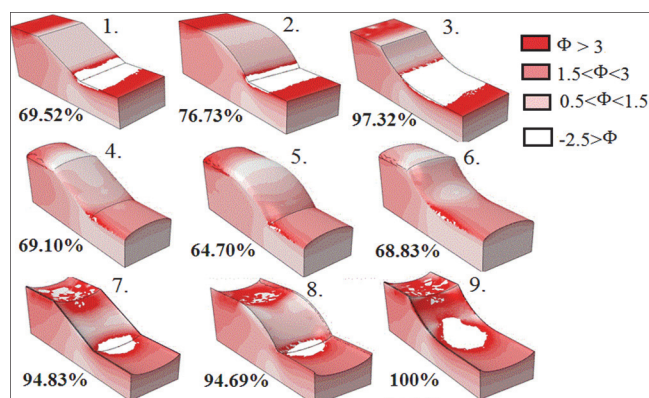


Figura 9. Contornos en elementos finitos de los indicadores potenciales de falla en cada modelo

Fuente: Los autores

La dispersión de los datos también es controlada por la trayectoria del flujo. En trayectorias uniformes y convergentes se presenta un alto coeficiente de variación de los datos. Este comportamiento se manifiesta debido a que existen zonas susceptibles a deslizarse localizadas en la pata y corona del talud donde se concentra el flujo (Fig. 9.1, 9.2, 9.3) y zonas con indicadores relativamente bajos localizadas a profundidades mayores a cinco metros aproximadamente (Fig. 9.1, 9.2, 9.3). El alto grado de dispersión de los datos coincide con la diferencia entre los máximos y mínimos indicadores, este comportamiento se presenta en geoformas rectas y cóncavas en planta (modelos 1, 2 y 3) (modelos 7, 8 y 9). Lo contrario ocurre en geoformas convexas en planta (modelos 4, 5 y 6) obteniendo coeficientes de variación menores al 50 % de la distribución de los datos. Aunque presentan zonas susceptibles a la falla debido a la alta concentración de esfuerzos cortantes en la pata del talud propagándose en la corona. (Fig. 8).

Por medio de las medidas descriptivas de la distribución de los indicadores potenciales de falla (Φ), se seleccionó la moda como indicador representativo en la estabilidad de cada geoforma definiendo una relación entre el valor del modelo, sobre el máximo valor que representa el 100% de los nueve valores (Fig. 9). Se concluye que los modelos de formas cóncavas tanto en planta y perfil son considerados más susceptibles de presentar algún tipo de movimiento en comparación de los modelos con forma recta y convexa.

5. Discusión

Los trabajos enfocados con modelos bidimensionales concluyen que las geoformas convexas son consideradas las formas más susceptibles frente a procesos de remoción en masa de tipo rotacional o fallas progresivas debido a la concentración de esfuerzos cortantes en la pata del talud [10,20,2]. Cabe resaltar que los análisis bidimensionales esconden aspectos relevantes en el análisis del factor geomorfológico en la estabilidad de taludes, a diferencia de un análisis con un modelo tridimensional que tiene en cuenta todos los componentes del tensor de esfuerzos y el gradiente del flujo en las tres direcciones.

Los resultados obtenidos en el presente trabajo concluyen que las geoformas cóncavas y la combinación tanto en planta y perfil de las tres formas (modelos 3, 6, 7, 8, 9) presentan mayores zonas inestables como se observa en la Fig. 9. La concentración de líneas de flujo genera zonas saturadas en donde según [10-12] en sus análisis cualitativos concluyen que las geoformas con forma cóncava pueden ocasionar mecanismos de falla del tipo traslacional o flujos debido al alto grado de saturación en las zonas de concentración de flujo. En cambio, las geoformas convexas en planta presentan bajos indicadores causados por dos factores significativos en la estabilidad. Por un lado, la contribución de los esfuerzos de succión en las zonas parcialmente saturadas y el comportamiento divergente de las líneas de flujo ocasionando bajos grados de saturación del material.

Una de las formas de evaluación de la amenaza por deslizamientos es del tipo semicuantitativo. En esa aproximación, se ponderan los factores que contribuyen, detonan y condicionan la estabilidad de los taludes a través de pesos o valores de estabilidad que usualmente son asignados con base en la experticia de los profesionales que la proponen. El estudio de amenaza por deslizamiento realizado en la ciudad de Bogotá implementó dicho modelo bajo una combinación lineal de factores geotécnicos, geológicos, geomorfológicos, hidrológicos, sísmicos y antrópicos. La suma ponderada de los factores anteriormente mencionados es el grado de susceptibilidad del terreno frente a procesos de remoción en masa. En términos geomorfológicos, el estudio de amenaza evaluó el parámetro relieve teniendo en cuenta la inclinación y forma del terreno en un análisis bidimensional. La suma de los dos factores logra evaluar de una forma cuantitativa la susceptibilidad del terreno, obteniendo valores de estabilidad de 9 puntos para geoformas convexas, 12 para rectas y 14 para cóncavas. El resultado de la ponderación de cada parámetro evaluado,

incluyendo el factor geomorfológico (relieve), es un primer acercamiento cuantitativo para lograr identificar zonas de amenaza por deslizamientos.

Los resultados del presente trabajo muestran una forma alternativa y objetiva de obtener factores de ponderación de las diferentes geoformas a través del cálculo de indicadores potenciales de falla (Fig. 9). Los pesos asignados en el estudio de amenaza por deslizamiento en Bogotá [20] son concordantes con los resultados obtenidos en el presente trabajo cuando se consideran los modelos cóncavos con una mayor susceptibilidad en el parámetro de relieve debido a sus condiciones hidrológicas y geomorfológicas [20].

Dado que los materiales usados para las simulaciones presentadas en el presente trabajo son característicos de taludes homogéneos, la aplicación de los resultados está limitada en ambientes de formación donde no se presenten diferencias fuertes en las características geomecánicas de los horizontes. Por lo anterior, su aplicabilidad a suelos residuales es limitada. Trabajo futuro está enmarcado en la influencia de las condiciones pluviométricas sobre la estabilidad de taludes con diferentes geoformas [21].

6. Conclusiones

- Las geoformas cóncavas en planta y perfil (modelo 9) son aproximadamente 1.5 veces más susceptibles que las geoformas rectas y convexas (modelo 5).
- La convergencia de la trayectoria del flujo en geoformas cóncavas crea zonas saturadas que pueden generar mecanismos de falla del tipo traslacional, flujos o mecanismos complejos detonados por deslizamientos antecedentes.
- La geoforma convexa presenta altos indicadores potenciales de falla en la pata del talud y en las zonas de curvatura debido a la alta concentración esfuerzos cortantes. Esta geoforma podría presentar mecanismos de falla rotacionales del tipo progresivo, propagándose desde la pata del talud hasta la corona.
- El cálculo del indicador potencial de falla que representa de una manera unificada la estabilidad de las 9 geoformas, contribuye en una nueva asignación de valores de estabilidad basada en una metodología objetiva para realizar estudios de grados susceptibilidad en procesos de remoción en masa enfocados en el factor geomorfológico.

Referencias

- [1] Ruiz, A. y Calderon, Y., Proyecto compilación y levantamiento de la información geomecánica. Zonificación geomecánica de la Sabana de Bogotá. Hidrología y clima de la Sabana, 4, 2004.
- [2] Reid, M.E. y Iverson, R.M., Gravity-driven ground water flow and slope failure potential: 2. Effects of slope morphology, material properties, and hydraulic heterogeneity. Water Resources Research, 28(3), pp. 939-950, 1992. DOI: 10.1029/91WR02695
- [3] Forster, C. y Smith, L., Ground water flow systems in mountainous terrain: 2. Controlling factors. Water Resources Research, 24(7), pp. 1011-1023, 1988. DOI: 10.1029/WR024i007p01011, 10.1029/WR024i007p00999
- [4] Foster, C. y Smith, L., Ground water flow systems in mountainous terrain: 1. Numerical modelling technique. Water Resources Research,

- 24(7), pp. 999-1010, 1988. DOI: 10.1029/WR024i007p00999
- [5] Ramos, A., Andrade, J. y Lizcano, A., Modelling diffuse instabilities in sands under drained conditions. Geotechnique, 62(6), pp. 471-478, 2012. DOI: 10.1680/geot.10.P.109
- [6] Ramos, A., Andrade, J. y Lizcano, A., Numerical simulation of the instability line based on laws of physics. DYNA, 78(170), pp. 23-30, 2012.
- [7] Forster, C. y Smith, L., The influence of ground water flow on thermal regimes in mountainous terrain: a model study. J. Geophys. Res, 94(7), 9439-9451, 1989. DOI: 10.1029/JB094iB07p09439
- [8] Troch, P., Van Loon, E., y Hilberts, A. Analytical solutions to a hill slope-storage kinematic wave equation for sub surface flow. Advances in Water Resources, 25(6), pp. 637-649, 2002. DOI: 10.1016/S0309-1708(02)00017-9
- [9] Zevenbergen, L.W. y Thorne, C.R., Quantitative analysis of land surface topography. Earth surface processes and landforms, 12(1), pp. 47-56, 1987. DOI: 10.1002/esp.3290120107
- [10] Wysocki, D y Schoeneberger, A., Geomorphology of soil landscapes. Handbook of soil science, 2000.
- [11] Akerman, J., Fluvial aspects on slope processes and slope land-forms, Lond University, [Online], [date of reference September 20th of 2015], Available at: <http://www.nateko.lu.se/files/fluvial.pdf>, 2014.
- [12] Dunne, T., Hydrology, mechanics, and geomorphic implications of erosion by subsurface flow. Special Paper-Geological Society of America, (252), pp. 1-28, 1990.
- [13] Dietrich, W.E. y Perron, J.T., 2006. The search for a topographic signature of life. Nature, 439(7075), pp. 411-418, 2006. DOI: 10.1038/nature04452
- [14] Gleeson, T. y Manning, A.H., Regional groundwater flow in mountainous terrain: Three-dimensional simulations of topographic and hydrogeologic controls. Water Resources Research, 44(10), 2008. DOI: 10.1029/2008WR006848
- [15] Hibbit, K., Analysis of geotechnical problems with ABAQUS, [online] [date of reference January 30th of 2015], Available at: <http://people.seas.harvard.edu/~viesca/articles/ABAQUSGeotechnicalProblemsv5.pdf>, 1996.
- [16] Menetrey, P. and Willam, P., Triaxial failure criterion for concrete and its generalization, ACI Structural Journal, 92, 1995.
- [17] Bowles, L.E., Foundation analysis and design. Quinta ed., 1988.
- [18] Genuchten, V., A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of America Journal, 44(5), pp. 892-898, 1980. DOI: 10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x
- [19] Yang, X. and You, X., Estimating parameters of van Genuchten model for soil water retention curve by intelligent algorithms. Appl. Math, 7(5), pp. 1977-1983, 2013. DOI: 10.12785/ams/070537
- [20] INGEOCIM. Zonificación por inestabilidad del terreno para diferentes localidades de la ciudad de Santafé de Bogotá D.C. Technical Report, FOPAE, 1998.
- [21] Ramos, A., Prada-Sarmiento L., Trujillo-Vela, M., Macías, J., Santos, A., Linear discriminant analysis to describe the relationship between rainfall and landslides in Bogotá, Colombia. Landslides. DOI: 10.1007/s10346-015-0593-2. DOI: 10.1007/s10346-015-0593-2

A.M. Ramos-Cañón, es profesor asociado de la Facultad de Ingeniería, Instituto Geofísico de la Pontificia Universidad Javeriana. Es líder del Grupo de Investigación Riesgo en Sistemas Naturales y Antrópicos. ORCID .0000-0003-2306-4333

S. Camacho-Orozco, es Ing. Civil de la Pontificia Universidad Javeriana. Miembro del Grupo de Investigación Riesgo en Sistemas Naturales y Antrópicos. Ingeniero auxiliar del departamento de Geotecnia y Obras Subterráneas de la empresa E.D.L S.A.S. Ingenieros Consultores. ORCID: 0000-0002-3493-0164

Revisión de las localidades fosilíferas del departamento de Antioquia, Colombia

Yenny Paola Valencia-Giraldo, Luis Carlos Escobar-Arenas, Juliana Mendoza-Ramírez, Daniel Delgado-Sierra & Andrés Leonardo Cárdenas-Rozo*

*Escuela de Ciencias, Universidad EAFIT, Medellín, Colombia. yvalenc1@eafit.edu.co, lescob15@eafit.edu.co, jmendoz1@eafit.edu.co, ddelgad8@eafit.edu.co, *correspondencia: acarde17@eafit.edu.co*

Received: September 22th, 2015. Received in revised form: February 11th, 2016. Accepted: May 13th, 2016.

Resumen

Aunque solamente el 11.5% del área de Antioquia tiene afloramientos de rocas sedimentarias, la revisión bibliográfica y elaboración de un mapa digital de las localidades fosilíferas (27), permite concluir que esta región tiene un gran potencial paleontológico. Los datos muestran que las ocurrencias fósiles antioqueñas datan desde el período Ordovícico (~ 485.4 a ~443.8 Ma) hasta el Cuaternario (~ 2.6 Ma al Presente). Además, se encuentran macro-fósiles pertenecientes a diferentes phyla (i.e. Arthropoda, Chordata, Hemichordata, Echinodermata, Mollusca y Tracheophyta). La paleofauna más antigua está conformada por graptolites y trilobites en metasedimentos del Paleozoico, mientras que moluscos marinos y equinodermos conforman las principales localidades fosilíferas del período Cretácico. La paleoflora (i.e. hojas fósiles y xilópalos) de la zona está asociada a la Formación Amagá (Oligoceno - Mioceno). Finalmente, fósiles de vertebrados terrestres (i.e. mastodontes y equinos) se encuentran en depósitos Cuaternarios.

Palabras clave: macro-fósiles; Fanerozoico; paleontología.

Review of fossiliferous localities at Antioquia department, Colombia

Abstract

Even though only 11.5% of Antioquia's area has outcrops of sedimentary rocks, a review of the literature and the development of a digital map of fossil localities (27), allows us to conclude that the region has a great palaeontological potential. The data show that Antioquia's fossil occurrences date from Ordovician (~ 485.4 to ~ 443.8Ma) to Quaternary (~ 2.6Ma to the Present). Moreover, there are macro-fossils belonging to different phyla (i.e. Chordata, Echinodermata, Hemichordata, Mollusca and Tracheophyta). The oldest paleofauna in the area, consists of graptolites and trilobites recorded in Paleozoic metasedimentary rocks, whereas marine mollusks and echinoderms compose the major fossil assemblages of the Cretaceous. The paleoflora (i.e. fossil leaves and petrified wood) in the area is associated with to the Amagá Formation (Oligocene - Miocene). Finally, fossils of terrestrial vertebrates (i.e. mastodons and horses) are recorded in Quaternary deposits.

Keywords: macro-fossils, Phanerozoic, paleontology.

1. Introducción

Las localidades fosilíferas en el departamento de Antioquia se empezaron a reportar desde el trabajo de Grosse (1926), quien identificó ocurrencias fósiles de (i) faunas del Cretácico, asociadas a intercalaciones de rocas ígneas con rocas sedimentarias del Complejo Quebradagrande [15] y (ii) algunos restos fósiles vegetales en la Formación Amagá. Posteriormente, los trabajos de Botero (1937) y González (2001) hacen un recuento espacial y

temporal de las mismas. Botero (1937), con su tesis “Bosquejo de Paleontología Colombiana” destaca 6 localidades para el departamento de Antioquia que van desde el Ordovícico (~ 485.4 a ~443.8 Ma) hasta el Cenozoico (~ 66 a ~2.6 Ma). Sobre este primer periodo, Botero (1940) en una nota sobre el Ordovícico de Antioquia reporta la fauna más antigua. Posteriormente, González (2001) en la memoria del mapa geológico de Antioquia, ubica algunas localidades fosilíferas del Cretácico y señala que el uso de la información paleontológica en este período es fundamental para

How to cite: Valencia-Giraldo, Y.P., Escobar-Arenas, L.C., Mendoza-Ramírez, J., Delgado-Sierra, D. & Cárdenas-Rozo, A.L., Revisión de las localidades fosilíferas del departamento de Antioquia, Colombia. Boletín de Ciencias de la Tierra, (40), 46-54, 2016.



establecer las relaciones estratigráficas de las formaciones Barroso, Quebradagrande y el miembro Urrao de la Formación Penderisco debido a las complejidades tectónicas.

El objetivo principal de éste artículo es compilar los trabajos paleontológicos del departamento a lo largo del eón Fanerozoico, tanto espacial como temporalmente, de modo que sirva como base de futuros trabajos bioestratigráficos, geológicos y paleontológicos, que aportarán en el conocimiento paleontológico y de la geología regional.

2. Métodos

La recopilación y revisión de las localidades fosilíferas comprendió la búsqueda y registro de todas las publicaciones de macro-fósiles (i.e. fósil que por su tamaño no requieren de instrumentos ópticos para su observación) reportadas en el departamento de Antioquia. Estos se organizaron con base en coordenadas geográficas, tipo de fauna y flora preservada, y la edad de la formación geológica donde se encuentran (Tabla 1).

Cuando la localización geográfica de ocurrencias fósiles no estaba clara en la referencia original, esta fue determinada con base en aproximaciones geográficas mediante *Google Earth* (www.google.com/earth) y *ArcGIS* (www.esri.com, versión 10.3.1) (Tabla 1). Posteriormente, las localidades fosilíferas fueron ubicadas sobre el mapa geológico de Antioquia ([15]; Escala 1:2.000.000) usando *ArcGIS* (Fig. 1). Finalmente, con base en el mapa de las localidades fosilíferas (Fig. 1) se determinó el área en superficie (km²) de cada una de las formaciones con potencial de recobro fósil (Tabla 1).

Además de mostrar la distribución de los grupos fósiles en relación a su edad (Fig. 3), también se realizó de forma gráfica una correlación que muestra la distribución de los taxa con relación al área de la formación geológica (Fig. 4).

3. Resultados

Por medio de la compilación bibliográfica realizada se estableció que en el departamento de Antioquia existen al menos 27 localidades fosilíferas de macro-fósiles (Fig. 1, Tabla 1). Además, se determinó que los fósiles hallados en todas las áreas de estudio paleontológico para la zona se pueden distribuir en 4 grupos: 65% de invertebrados marinos (i.e. amonitas, bivalvos, gasterópodos y equinodermos), 16% de plantas (i.e. hojas fósiles), vertebrados (15%) e icnofósiles (4%) (Tabla 1).

Esta compilación permite sintetizar la descripción general (geográfica y geológica) de las localidades encontradas cronológicamente (de la más antigua a la más reciente) de la siguiente manera:

3.1. Paleozoico

Para ésta era se encuentran faunas asociadas al Paleozoico temprano, algunas definidas entre el Ordovícico y Silúrico [2,3]. Se reportan tres localidades fosilíferas, una ubicada cerca de la antigua estación de tren La Cristalina localizada a 164 km al este de Medellín [3] que parece ser la misma de una segunda localidad descrita previamente [2], localizada en el Kilómetro 13 del Ferrocarril de Antioquia, en la sección

del Nus. La tercera localidad se encuentra al sur de Aquitania, cerca al río Samaná (Fig. 1, Tabla 1).

En la sección del Nus, se reportan graptolites de los géneros *Diplograptus* y *Monograptus* en pizarras arcillosas [2] (Fig. 1, localidad 9). El tipo de fosilización al parecer se dio por recristalización, “los organismos están preservados en limonita y debido a esto resaltan sobre el color oscuro de la roca” [2]. Esta paleofauna data del Ordovícico - Silúrico inferior [2,3]. La sección de la Cristalina (Fig. 1, localidad 9), reportada por Botero (1940), y mencionada en Moreno-Sánchez et al. (2008), contiene graptolites del género *Didymograptus*, conformados por un material fragmentario y deformado por metamorfismo. Se encuentran en una litología de calizas concordantes con filitas fosilíferas. Al igual que en la localidad anterior, el tipo de fosilización se da por recristalización, y los organismos están preservados en limonita [3]. Estos fósiles son asignados al Ordovícico (Arenigiano) [3]. Finalmente, la sección del Río Samaná, discutida en Moreno-Sánchez et al. (2008), contiene graptolites y trilobites (Fig. 1, localidad 10) igualmente asignados al Ordovícico [15], sin embargo, no se menciona ni el autor de las descripciones, ni su diagnóstico, ni detalles de la fosilización.

3.2. Mesozoico

Los registros más antiguos de la era Mesozoica corresponden al Cretácico (Hauteriviano a Maastrichtiano); siendo el Albiano donde se presenta el mayor número de ocurrencias fósiles (33%). El Cretácico inferior está caracterizado, hacia el sector del río Samaná y río Claro (Tabla 1, localidad 23), por una fauna asociada a Los Sedimentos de San Luis [15, 21]. Se registra allí una asociación faunística de amonitas y bivalvos en lodolitas laminadas asignadas al Hauteriviano-Aptiano, lo que coincide con dataciones radiométricas del Batolito de Ovejas [21]. Además las localidades de los ríos Pocuné, Tigüí, El Bagre y la quebrada Las Palmas (Tabla 1, localidad 24), contienen asociaciones de amonitas en lodolitas intercaladas con niveles piroclásticos pertenecientes a la unidad Vulcanitas de Segovia [15]. Hacia el sector del alto El Español se encuentran amonitas y gasterópodos (Fig. 1, localidad 26) del Hauteriviano-Albiano en la unidad Sedimentos de Amalfi (Feininger et al., 1972 en [15]).

Botero (1971) reporta una localidad que se encuentra a 10 km del corregimiento de La Pintada (margen izquierdo del Río Arma), en dirección al municipio de Arma en el departamento de Caldas, en el lugar conocido como paraje Quitasueño (Fig. 1, localidad 11). La asociación faunística está compuesta por bivalvos de las especies *Cucullea* (*Idonearca*) *brevis*, *Cardita*, sp., *Trigonia* (*Buchotrigonia*) *abrupta*, *Tr.* (*Quadratortrigonia*) *hondeana*, *Tr.* (*Notoscabrotrigonia*) *tocaimaana*, gasterópodos como *Pseudoglauconia* aff. *strombiformis*, y espinas de equinoideos. Los fósiles de equinoideos están preservados en arcillolitas. La sedimentita fosilífera está intercalada con basaltos y diabasas del Complejo Quebradagrande [6] (Tabla 1).

Tabla 1.

Ubicación geográfica y ocurrencias fósiles de 27 localidades fosilíferas reportadas en el departamento de Antioquia, además de la edad y área de cada una de las formaciones en las que se presentan.*Unidades pertenecientes al Cuaternario. **En algunos casos, el área no es cartografiable en la escala del trabajo, por lo que aparece como "0".

Localidad	Latitud (°)	Longitud (°)	Formación	Edad	Área superficial (km²)**	Taxa	Grupo
1	5,718962	-75,525184	Quebradagrande	Cretácico	324	<i>Idonearca brevis</i> <i>Ceratostreon boussingaulti</i> <i>Yaardia gondaana</i> <i>Pterotrigonia tocaimaana</i> <i>Buchotrigonia abrupta</i> <i>Ludbrookia dietrichi</i> <i>Protocardia peregrinorsum</i> <i>Ptychomya robinaldina</i> <i>Pseudamara</i> aff. <i>bulbiformis</i> <i>Turritella colombiana</i> <i>Glauconia posadal</i> <i>Acteon</i> aff. <i>vibrayeana</i> <i>Prolyelliceras prorsocurvatum</i> <i>Colombiceras obliquum</i> <i>Hypacathohoplites</i> aff. <i>burckhardti</i>	Bivalvos Gasterópodos Amonitas
2	6,69205	-75,905869	Barroso	Cretácico	1510	<i>Ptychoceras</i> <i>Metahamites</i>	Amonitas
3	6,873074	-76,145653	Penderisco (Miembro Urrao)	Cretácico	4537	<i>Zoophycos</i> <i>Chondrites</i>	icnofósiles
4	7,022481	-75,907758	Barroso	Cretácico	1510	<i>Nostoceras stantoni</i> <i>Nostoceras hyatti</i> <i>Nostoceras pauper</i>	Amonitas
5	6,338353	-75,745385	Quebradagrande	Cretácico	33	Bivalvos indeterminados	Bivalvos
6	5,938754	-75,662489	Amagá (Miembro Superior)	Paleógeno – Neógeno	102	<i>Crocodylia</i>	Crocodylia
7	5,968819	-75,679153	Amagá (Miembro Medio)	Paleógeno – Neógeno	7	Gasterópodos indeterminados Hojas fósiles indeterminados Madera fósil indeterminados	Gasterópodos Plantas vasculares
8	7,171473	-75,766928	Aluviones recientes*	Cuaternario	0	<i>Melastomaceophyllum danielis</i>	Melastomataceae
9	6,393280	-74,556720	La Cristalina	Ordovícico	59	<i>Didymograptus</i> sp. <i>Diplograptus monograptus</i>	Graptolites
10	5,742675	-74,997844	Metasedimentos de Aquitania	Ordovícico	117	<i>Hemichordata</i> indeterminado	Graptolites
11	5,711882	-75,542351	Quebradagrande	Cretácico	324	<i>Cucullea brevis</i> <i>Cardita</i> sp. <i>Inoceramus</i> indet. <i>Trigonia abrupta</i> <i>Trigonia hondeaba</i> <i>Trigonia tocaimaana</i> <i>Pseudoglauconia</i> sp. <i>Pseudoglauconia</i> aff. <i>Strombiformis</i> Echinodermata indeterminado	Bivalvos Gasterópodos Equinodermos
12	5,791257	-75,468265	Abejorral	Cretácico	40	<i>Oxytropidoceras carbonarium</i> <i>Oxytropidoceras</i> cf. <i>peruvianum</i> <i>Venezoliceras karsteni</i> <i>Dipoceras</i> indet.	Amonitas
13	6,969707	-76,242549	Guineales	Neógeno	15	<i>Ostrea</i> indet.	Bivalvos

14	6,214938	-75,577873	Aluviones recientes*	Cuaternario	145	<i>Mammutidae</i>	Mastodonte
15	6,704658	-74,794739	Aluviones recientes*	Cuaternario	3	<i>Gomphoheriidae</i> <i>Stegomastodon</i> sp.	Mastodonte
16	5,828931	-75,591619	Amagá (Miembro Inferior)	Paleógeno – Neógeno	10	<i>Hemisinus</i> indet. <i>Plantae</i> indet.	Gasterópodos Plantas vasculares
17	6,29951	-75,332749	Aluviones recientes*	Cuaternario	0	<i>Equidae</i>	Equinos
18	6,782986	-76,129783	Aluviones recientes*	Cuaternario	11	<i>Mammutidae</i>	Mastodonte
19	6,507388	-75,814016	Amagá (Miembro Inferior)	Paleógeno – Neógeno	7	<i>Plantae</i> indet.	Plantas vasculares
20	6,363272	-75,708618	Quebradagrande	Cretácico	324	<i>Pulchellia</i> cf. <i>didayi</i> <i>Desmoceras</i> cf. <i>charrierianum</i> , <i>Lytoceras subfrimbriatum</i>	Amonitas
21	6,315443	-75,729991	Quebradagrande	Cretácico	324	<i>Arcopagia</i> cf. <i>subconcentrica</i> <i>Solen</i> cf. <i>robinaldinus</i> <i>Exogyra boussingaulti</i> <i>Cucullea</i> cf. <i>raullini</i> <i>Trigonia hondaana</i> <i>Protocardium</i> cf. <i>forbeti</i> <i>Pseudoglauconia studeri</i> <i>Pseudoglauconia helvetica</i>	Bivalvos Gasterópodos
22	6,514699	-75,802557	Amagá (Miembro Medio)	Paleógeno – Neógeno	0	<i>Plantae</i> indet.	Plantas vasculares
23	6,002323	-74,953297	Sedimentos de San Luis	Cretácico	204	Amonitas indeterminadas Bivalvos indeterminados	Amonitas Bivalvos
24	7,457125	-74,744717	Vulcanitas de Segovia	Cretácico	43	Amonitas indeterminadas	Amonitas
25	7,145878	-74,612339	Sedimentos de Segovia	Cretácico	103	Bivalvos indeterminados Gasterópodos indeterminados Amonitas indeterminadas <i>Plantae</i> indet.	Bivalvos Gasterópodos Amonitas Plantas
26	6,89967	-75,062172	Sedimentos de Amalfi	Cretácico	3	Amonitas indeterminadas Gasterópodos indeterminados	Amonitas Gasterópodos
27	7,063771	-75,181455	La Soledad	Cretácico	36	Bivalvos indeterminados Amonitas indeterminadas	Bivalvos Amonitas

Fuente: Los Autores

Grosse (1926) reporta varias localidades fosilíferas, principalmente con moluscos marinos mal conservados. En Loma Hermosa, 300 m hacia el norte en la Quebrada Tinajitas, en el cruce con el camino San Jerónimo-Ebéjico (Fig. 1, localidad 20). Esta asociación fosilífera se destaca por contener moldes de bivalvos y amonitas de las especies *Pulchellia* cf. *didayi*, *Desmoceras charrierianum* y *Lytoceras subfrimbriatum*, que se encuentran en pizarras margosas bituminosas. Esa asociación corresponde probablemente al Barremiano [16] (Tabla 1). A 4 km al sureste de Ebéjico (Fig. 1, localidad 21), se reportan moluscos en areniscas calcáreo-dolomíticas, entre ellos gasterópodos asignados al Aptiano y

clasificados como *Pseudoglauconia studeri* y *Pseudoglauconia helvetica*, contenidos en capas expuestas en el corte de carretera, principalmente en moldes [16] (Tabla 1). Para este intervalo de tiempo también se registran bivalvos mal conservados, clasificados como *Arcopagia subconcentrica*, *Solen robinaldinus* en areniscas ferruginosas calcáreas, en Ebéjico y a 5.5 km al sureste de la zona [15,16] (Fig. 1, localidades 5 y 21).

Hacia el Aptiano-Albiano, se reportan amonitas en la Quebrada el Oso (3.5 km al sur de Buriticá al oeste de Medellín) (Fig. 1, localidad 2) asociados a una litología ígnea y a chert interestratificado con shale (10). Las amonitas de

posible edad Albiano incluyen los géneros *Ptychoceras* y *Metahamites*; la preservación del primer género es incompleta en comparación con la del segundo [10] (Tabla 1). Este intervalo de tiempo también comprende fósiles reportados en las quebradas El Infierno, Corrales y El Salado, correspondientes a plantas, amonitas, bivalvos y gasterópodos, que se encuentran mal preservados y deformados en lodolitas de la unidad Sedimentos de Segovia (Feininger et al., 1972 en [15]) (Fig. 1, localidad 25).

Para el Albiano, Botero (1983) también reporta fósiles encontrados en la Quebrada Campanas, Santa Bárbara (afluente del río Arma), sobre el Complejo Quebradagrande, en relación con rocas ofiolíticas (Fig. 1, localidad 1). Se describen los bivalvos *Idonearca brevis*, *Ceratostreon boussingaulti*, *Yaadia gondaana*, *Pterotrigonia tocaimaana*, *Buchotrigonia abrupta*, *Ludbrookia dietrichi*, *Protocardia peregrinorsum* y *Ptychomya robinaldina*. Estos presentan

buena preservación, aunque para algunas localidades se encuentran deformados. Por otro lado, se encuentran gasterópodos identificados como *Pseudamara aff. bulbiformis*, *Turritella colombiana*, *Glauconia posadal*, *Acteon aff. vibrayeana* (Botero, 1983). Aunque Botero (1983) no menciona la preservación de los fósiles, la caracterización taxonómica de estos sugiere que es buena (Tabla 1). También en este trabajo se reportan amonitas fragmentadas identificadas como *Prolyelliceras prorsocurvatum*, *Colombiceras obliquum*, *Hypacathohoplites aff. burckhardtii*. En algunos casos las impresiones están lo suficientemente preservadas para determinar su edad (Albiano) [7].

Bivalvos y amonitas del Albiano inferior son reportados hacia el sector de la Cañada Honda, en la facie conglomerática de la Formación La Soledad (Hall et al., 1972 en [15]) (Fig. 1, localidad 27).

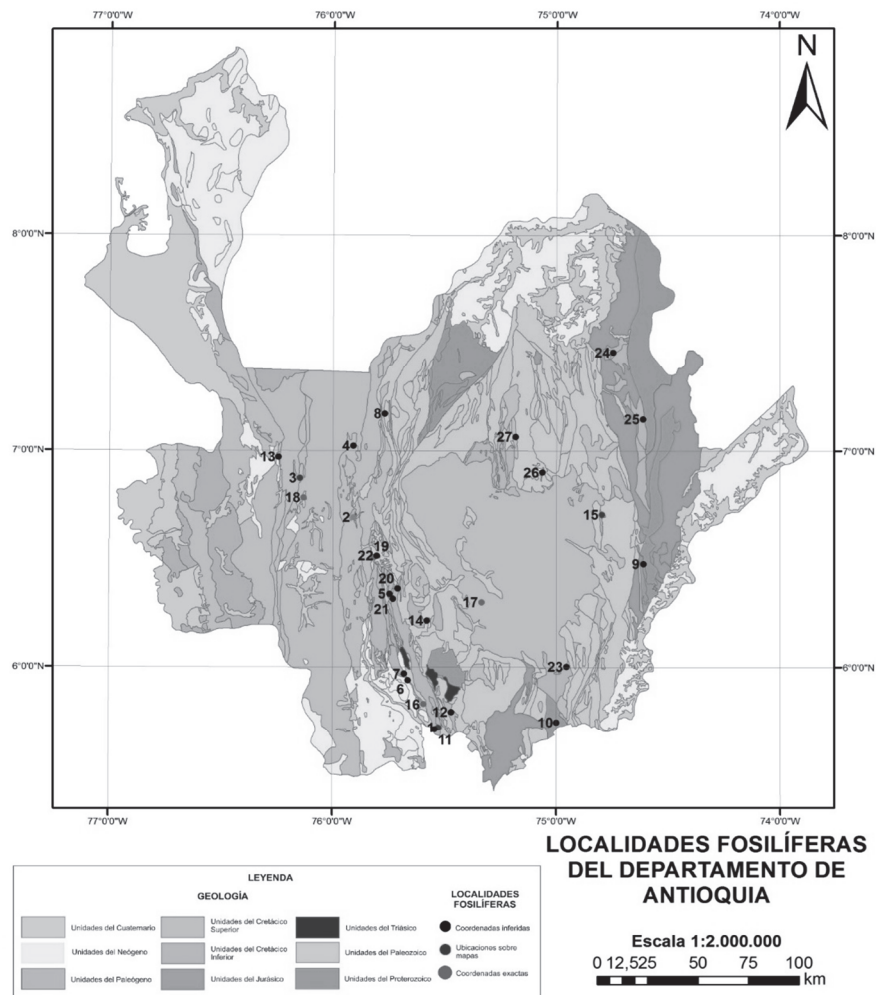


Figura 1. Mapa de localidades fosilíferas del Departamento de Antioquia y sus principales unidades geológicas. Fuente: Modificado de [15].

Bürgl y Radelli (1962) reportan una localidad (Fig. 1, localidad 12) de edad Albiano medio-superior que se encuentra al oeste de Abejorral en la carretera a Pantanillo antes del cruce con la carretera a Santa Bárbara. Se presentan allí, bivalvos inocerámidos y las amonitas *Oxytropidoceras carbonarium*, *Oxytropidoceras* cf. *peruvianum* y *Venezoliceras karsteni* en arcillolitas micáceas estratificadas con conglomerados del horizonte Abejorral de la Formación Abejorral. La preservación de estos especímenes no es descrita.

También se hallan trazas fósiles de las icnofacies *Zoophycos* y *Chondrites* del Cretácico en la carretera Dabeiba - Buriticá y presentan buena preservación (Tabla 1) (Fig. 1, localidad 3), producidas probablemente por un sipuncúlido (“gusano cacahuete”) en sedimentos finogranulares, i.e. limolitas y calizas delgadamente estratificadas [11].

En el intervalo Campaniano-Maastrichtiano se encuentran bivalvos *Inoceramus helveticus*, *Nucula castrensis*, *Arcila* (*Trucacila*) *bivirgata*, *Nucula* (*Acila*) *bivirgata* y amonitas de las especies *Nostoceras stantoni*, *Nostoceras hyatti* y *Nostoceras pauper*, en areniscas y grauvacas pobres en cuarzo en cercanías al municipio de Peque (Fig. 1, localidad 4). Estos fósiles se encuentran bien preservados [12] (Tabla 1).

3.3. Cenozoico

Las localidades más antiguas que se reportan de la era Cenozoica están asociadas a la Formación Amagá de edad Oligoceno-Mioceno (Fig. 1, localidades 7, 19 y 22), aflorante en el borde izquierdo de la carretera que conduce desde Medellín a Santa Fe de Antioquia, antes del puente sobre el río Cauca en el municipio de Sopetrán, Vereda Guaimaral, paraje Los Almendros. Se hallaron allí impresiones de hojas, fragmentos de troncos silicificados y raíces mal preservadas en areniscas intercaladas con lodolitas [23] (Tabla 1).

Igualmente para la Formación Amagá, en el municipio de Ituango (Fig. 1, localidad 8), Huertas (1977) reporta el hallazgo de una *Melastomatacea*. A pesar que en el espécimen “se aprecian características suficientes para realizar una clasificación taxonómica hasta nivel de familia, la hoja está incompleta, no tiene ni ápice ni peciolo, y se observan nervaduras” [17].

En la Vereda El Plan, al este de Fredonia junto al camino a Uvital, 125 m antes de la partida del camino para Caldas, en el lado norte de un corte, Grosse (1926) reporta dientes y huesos de cocodrilos mal conservados (Fig. 1, localidad 6) que se encuentran en dos cintas de areniscas, separadas por areniscas sin fósiles del Miembro Superior de la Formación Amagá (Tabla 1). En Amagá (Fig. 1, localidad 21), Grosse (1926) también reporta fósiles mal conservados de gasterópodos, madera fósil carbonosa mineralizada con siderita e impresiones de hojas en el Miembro Medio de la Formación Amagá que datan del intervalo Oligoceno-Mioceno.

Para el Cenozoico superior (hace 23 Ma) Botero (1937) reporta bivalvos de los géneros *Pecten*, *Ostrea* y *Solen* hallados en las regiones de Murri y Dabeiba (Fig. 1, localidad

13), contenidos en conglomerados fosilíferos de gran extensión (Tabla 1). No se menciona su preservación.

Jiménez et al. (2012) reportan una nueva localidad de moluscos y restos vegetales en la Formación Amagá (Fig. 1, localidad 16); los moluscos son gasterópodos asignados preliminarmente al género *Hemisinus* y ocurren al noreste del municipio de Damasco y al norte del municipio de la Pintada, 200 m aguas arriba del puente que cruza la Quebrada Sabaleticas en la vía que conduce de la Pintada a Santa Bárbara; a pesar que los fósiles se encuentran fragmentados, algunas partes están bien preservadas (Tabla 1).

Cerca del caserío de Belén en Medellín, se encontraron restos de mastodonte en depósitos del Cuaternario contenidos en capas de arcillas (Fig. 1, localidad 14). No existe una descripción taxonómica y tafonómica [20]. Mastodontes también se describen en el río San Bartolomé en Yalí, en la mina la Marmolera (Fig. 1, localidad 15), donde se hallaron molares posiblemente pertenecientes a la familia Gomphoheriidae y al género *Stegomastodon*. El molar presenta buenas condiciones de preservación, con desgaste medio [15] (Tabla 1). El espécimen es asignado al Pleistoceno temprano.

Por último, en Hojas Anchas, Municipio de San Vicente, Antioquia, se encontró un molar de caballo *Equus* sp. (Correa, s.f) (Fig. 1, localidad 17) y en las Minas Frontino, Antioquia, dientes de mastodonte (White-Urbe, s.f) (Fig. 1, localidad 18).

4. Discusión

De acuerdo a los resultados presentados, las localidades fosilíferas de Antioquia se distribuyen en forma discontinua en intervalos discretos a lo largo del Fanerozoico, siendo el período Cretácico el que posee el mayor registro (52%), comparado con el período Ordovícico que posee menor registro (7%) (Fig. 3). Este patrón podría explicarse por el sesgo en el muestreo llamado ‘*pull of the Recent*’, i.e. intervalos próximos al Reciente han sido muestreados preferencialmente debido a la mayor extensión superficial de sus formaciones y al mayor potencial de preservación de su contenido fósil [13]. Adicionalmente, debido al mayor potencial de preservación del registro fósil marino con respecto al terrestre y a la mayor cantidad de área expuesta en superficie; el intervalo Cretácico ofrece un mayor recobro de taxa que los intervalos Paleógeno - Neógeno y Cuaternario (Fig. 3 y 4). Sin embargo, al examinar solamente el intervalo Cretácico con relación al área y potencial de preservación estas relaciones no son tan claras (Fig. 4), lo que puede sugerir una mayor diversidad de taxa en los ambientes sedimentarios depositados en la Formación Quebradagrande. Desafortunadamente, no hay datos cuantitativos de las ocurrencias taxonómicas en las rocas del Cretácico antioqueño, por lo tanto esta hipótesis aun no puede ser probada. Adicionalmente, esta revisión muestra que aproximadamente el 11.5% de la superficie total del Departamento de Antioquia (Fig. 2), tiene potencial paleontológico en un registro comprendido por formaciones que varían desde metasedimentos del Paleozoico hasta depósitos

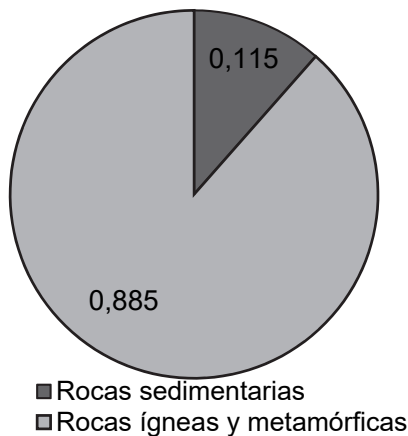


Figura 2. Relación entre el área estimada de rocas fosilíferas y no fosilíferas para el departamento de Antioquia.
Fuente: Los Autores.

aluviales recientes (Tabla 1), con una concentración mayor en unidades del Cretácico localizadas hacia el flanco oriental de la Cordillera Occidental y hacia el flanco occidental de la Cordillera Central, en el Valle del Río Cauca.

Aunque el estudio del registro fósil en esta área durante el último siglo es muy bajo (solo 18 publicaciones), las investigaciones han proveído interpretaciones geológicas, tectónicas y paleoambientales. Moreno-Sánchez et al. (2008) sugieren que el metamorfismo sufrido por las metapelitas, que afloran al oeste de la Falla Otú-Pericos, pudo sobreimprimir cualquier rastro fósil. Sin embargo, estos fósiles son de gran interés en el análisis y entendimiento de la geología estructural de la zona como lo demuestran estudios realizados en fósiles deformados en otras regiones [1,9]. Otro ejemplo se encuentra en fósiles del Cretácico, como los reportados en los Sedimentos de San Luis (Feininger et al., 1972; [21]), ya que estos presentan una correspondencia con cuerpos ígneos adyacentes, permitiendo realizar una calibración del registro fósil, lo que ayudaría a establecer un marco cronoestratigráfico más robusto.

De igual forma, los fósiles han permitido reconstrucciones paleoambientales (i.e. [2,7,11,15,16,20]). La presencia de fósiles en cercanías al valle del Río Cauca, tales como moluscos, permite que se interpreten paleoambientes marinos someros, sugiriendo incursiones marinas hacia el Cretácico [2]; o bien ambientes de agua dulce [16]. Por su parte, las icnofacies de *Zoophycos-Chondrites* indican la presencia de aguas subóxicas en un mar epicontinental [11]. Estudios recientes sugieren que tanto la Formación Barroso como el Complejo Quebradagrande posiblemente se generaron en el mismo arco magmático y fueron posteriormente desmembrados por el Sistema de Fallas de Romeral [22]. Investigaciones bioestratigráficas (i.e. biozonaciones y biofacies) serían críticas para sugerir hipótesis respecto a los tiempos y ambientes de depositación y relaciones estratigráficas de ambas formaciones como lo sugiere González (2001).

Finalmente, hacia el Neógeno el registro de mastodontes, al este del Departamento de Antioquia, permitió hacer

inferencias paleogeográficas y posibles rutas migratorias [15]. Específicamente, los registros de mastodontes representantes de la familia Gomphotheriidae están relacionados con poblaciones del continente Americano, lo cual podría indicar que su migración se vio favorecida por el levantamiento del istmo de Panamá [14].

5. Conclusiones

La presente compilación bibliográfica evidencia:

Mayor ocurrencia de fósiles a lo largo del Valle del Río Cauca, en unidades geológicas de edad Cretácica como la Formación Barroso en el flanco oriental de la Cordillera Occidental y el Complejo Quebradagrande en el flanco occidental de la Cordillera Central. La fauna fósil está constituida principalmente por amonitas, bivalvos y gasterópodos, además de espinas de equinoideos, y está asociada a intercalaciones de rocas ígneas y sedimentarias.

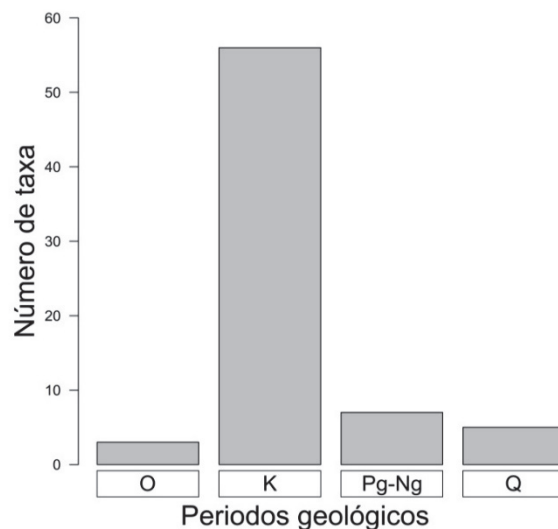


Figura 3. Distribución de los grupos fósiles en relación a su edad.
Fuente: Los Autores.

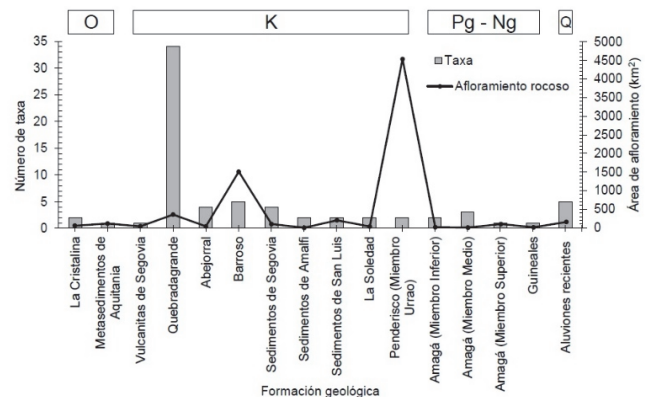


Figura 4. Distribución de los taxa y grupos fósiles reportados en el departamento de Antioquia en relación al área de la formación geológica donde se encuentran.

Fuente: Los Autores.

Las formaciones Vulcanitas de Segovia, Abejorral, Barroso, Sedimentos de Segovia, Sedimentos de Amalfi, Sedimentos de San Luis, La Soledad y Penderisco tienen un gran potencial fosilífero que debe ser objeto de un muestreo más intenso.

La localidad más antigua del Departamento, compuesta principalmente por lodolitas y areniscas ligeramente metamorfoseadas, se encuentra al oeste de la Falla Otú Pericos, y la constituyen los graptolites de la Formación La Cristalina [2,3,15]. El bajo grado de metamorfismo y origen de otras rocas pelíticas que afloran al oeste de la Falla Otú – Pericos las hace potencialmente fosilíferas a lo largo de toda una franja norte-sur [16].

Las unidades del Cretácico inferior (Sedimentos de Segovia, Amalfi, San Luis y la Formación La Soledad), localizadas al este del Departamento de Antioquia se relacionan cronológica y faunísticamente, lo que devela su relevancia estratigráfica en la construcción de un esquema regional de correlación. En el caso de los sedimentos de San Luis, por ejemplo, que contienen amonitas y bivalvos, se les atribuye una edad que concuerda con la edad radiométrica establecida para el Batolito de Ovejas, descartando así edades más antiguas para los plutones Cretácicos [15,21].

El amplio registro de paleoflora en el Departamento, constituido por impresiones de hojas y fragmentos de material leñoso, junto con moluscos y dientes de cocodrilo de los depósitos fluvio-lacustres de la Formación Amagá, de edad Oligoceno-Mioceno amerita estudios paleobotánicos y paleontológicos.

La fauna marina más reciente de la vertiente oriental de la Cordillera Occidental, hacia el norte del departamento, sobre la Formación Guineales, está constituida por conglomerados y areniscas con restos del género *Ostrea* [2]. Solo hay una única publicación que reporta y bosqueja el hallazgo.

Los registros de vertebrados ayudarán al entendimiento de las distribuciones paleogeográficas y posibles rutas migratorias para el Cenozoico (Mioceno - Plioceno). El análisis de estos fósiles, permitiría comprender eventos como el Gran Intercambio Biótico Americano (GABI) donde Antioquia, que se encuentra al norte de Suramérica, constituye un punto de especial interés para comprender la paleogeografía de la megafauna en el neotrópico.

Agradecimientos

Los autores de esta revisión agradecen al Semillero de Paleontología de la Universidad EAFIT. Al profesor Marco Gamboa por su disposición al momento de resolver inquietudes respecto al manejo de los datos en Sistemas de Información Geográfica y al profesor José Ignacio Martínez por sus amables correcciones.

Referencias

- [1] Bambach, R.K., Tectonic deformation of composite-mold fossil bivalvia (Mollusca). *American Journal of Science* [Online]. 273A, 1973. [date of reference July 11th of 2015]. Available at: http://earth.geology.yale.edu/~ajs/1973/ajs_273A_11.pdf/409.pdf
- [2] Botero, G., Bosquejo de Paleontología Colombiana, Tesis pregrado en Ingeniería Civil y de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Escuela de Minas, Medellín, Colombia, 1937, 84 P.
- [3] Botero, G., Geología sobre el Ordoviciano de Antioquia. *Revista Minera* [biblioteca digital] [En línea]. 17(99), 1940. [fecha de consulta abril 19 de 2015]. Disponible en: http://www.accefyn.org.co/cientificos/pdf/gerardoBotero/03.Sobre_Ordoviciano_Antioquia.pdf
- [4] Botero, G., Formaciones geológicas de Antioquia. *Minería* [biblioteca digital] [En línea]. 19(111-112), 1941. [fecha de consulta abril 19 de 2015]. Disponible en: http://www.accefyn.org.co/cientificos/pdf/gerardoBotero/04.Formaciones_Geologicas_Antioquia.pdf
- [5] Botero, G., Contribución al conocimiento de la geología de la zona central de Antioquia. *Anales Facultad de Minas* [biblioteca digital] [En línea]. 57, 1963. [fecha de consulta 19 de abril de 2015]. Disponible en: http://www.accefyn.org.co/cientificos/pdf/gerardoBotero/07.Contribucion_Conocimiento.pdf
- [6] Botero, G., Yacimiento fosilífero de Anna. *Publicación especial Geología* [biblioteca digital] [En línea]. 11(1), 1971. [fecha de consulta 19 de abril de 2015]. Disponible en: http://www.accefyn.org.co/cientificos/pdf/gerardoBotero/11.Yacimiento_fosilifero_Anna.pdf
- [7] Botero, G. y González, H., Algunas localidades fosilíferas Cretáceas de la Cordillera Central, Antioquia y Caldas, Colombia. *Geología Norandina* [biblioteca digital] [En línea]. 7, 1983. [fecha de consulta 19 de abril de 2015]. Disponible en: http://www.accefyn.org.co/cientificos/pdf/gerardoBotero/20.Algunas_Localidades_Fosiliferas_cretaceas_cordillera_Central_Antioquia_Caldas_Colombia.pdf
- [8] Bürgel, H. y Radelli, L., Nuevas localidades fosilíferas en la Cordillera Central de Colombia (S.A.) *Geología Colombiana* [en línea]. 3, 1962. [fecha de consulta 23 de abril de 2015]. Disponible en: <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/geocol/article/view/30364/30520>
- [9] Cooper, R.A., Interpretation of tectonically deformed fossils. *Journal of Geology and Geophysics*, 33(2), pp. 321-332, 2012. DOI: 10.1080/00288306.1990.10425690
- [10] Etayo-Serna, F., González, H. and Álvarez, E., Mid-Albian ammonites from Northern Western Cordillera. *Geología Norandina* [Online]. 2, 1980. [Date of reference May 1st of 2015]. Available at: <http://www.sociedadcolombianadegeologia.org/pdf/geonorandina02.pdf>
- [11] Etayo-Serna, F., La icnofacies Zoophycos-Chondrites del Cretácico de la Cordillera Occidental de Colombia y su posible significación paleoambiental, *Caldas* [en línea]. 15(71-75), 1986. [fecha de consulta 1 de mayo de 2015]. Disponible en: <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/cal/article/view/35069/35327>
- [12] Etayo-Serna, F., Campanian to Maastrichtian fossils in the Northeastern Western Cordillera Colombia. *Geología Norandina* [On line]. 11, 1989. [Date of reference April 27th of 2015]. Available at: http://www.sociedadcolombianadegeologia.org/publicaciones/geologia_norandina/geonorandina11.pdf
- [13] Foote, M. and Miller, A., *Principles of Paleontology*, 3^a ed., USA, Freeman & C, 2007, pp. 213-218.
- [14] Gómez, M., Revisión del registro fósil y distribución de los mastodontes (Proboscidea Gomphotheriidae) del Cuaternario en Colombia, Tesis pregrado en Biología, Colombia, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Instituto de Biología, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia, 2006, 84 P.
- [15] González H., Mapa geológico del Departamento de Antioquia; geología, recursos minerales y amenazas potenciales, Escala 1:400.000, Memoria explicativa y mapa, Bogotá, Ingeominas, 2001, 240 P.
- [16] Grosse, E., Terciario Carbonífero de Antioquia, fósiles y sedimentos, libro, [en línea], 1^a ed., Colombia, Gobierno del Departamento de Antioquia, 1926 [fecha de consulta 10 de abril de 2015]. Disponible en: <http://www.accefyn.org.co/cientificos/pdf/emilGrosse/EmilGrosse.pdf>
- [17] Huertas, G., Una Melastomatacea fósil del Terciario Carbonífero de Antioquia (Eoceno). *Caldas* [en línea]. 12, 1977. [fecha de consulta 10 de mayo de 2015]. Disponible en: <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/cal/article/view/34378/34592>
- [18] Jiménez H.F., Pulido, D.F., Franco, J.P. y Patarroyo, G.D., Nueva localidad fosilífera de moluscos de la Formación Amagá. *Geología Colombiana* [en

- línea]. 37(1), 2012 [fecha de consulta 15 de abril de 2015]. Disponible en: <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/geocol/article/view/33931/33999>
- [19] Moreno, M., Gómez, A. y Castillo, H., Ocurrencias de fósiles Paleozoicos al este de la parte norte de la Cordillera Central y discusión sobre su significado geológico. Boletín de Ciencias de la Tierra [en línea]. 22, 2008 [fecha de consulta 15 de mayo de 2015]. Disponible en: <http://revistas.unal.edu.co/index.php/rbct/article/view/1809/2452>
- [20] Posada, J. de la C., Bosquejo Geológico de Antioquia. Anales de la Facultad de Minas [en línea]. 38, 1936 [fecha de consulta 23 de abril de 2015]. Disponible en: http://www.accefyn.org.co/cientificos/pdf/JuanCruz/1936_bosquejoGeologicoAntioquia_analesEscNacionalMinas.pdf
- [21] Restrepo, J.J., Obducción y metamorfismo de ofiolitas Triásicas en el flanco occidental del terreno Tahamí, Cordillera Central de Colombia. Boletín Ciencias de la Tierra [en línea]. 22, 2008 [fecha de consulta 13 de abril de 2015]. Disponible en: <http://revistas.unal.edu.co/index.php/rbct/article/view/1810/11255>
- [22] Rodríguez, G. y Zapata, G., Análisis comparativo entre la Formación Barroso y el Complejo Quebradagrande: ¿Un arco volcánico toleítico-calcoalcalino, segmentado por el sistema de fallas Romeral en los Andes del Norte?, Boletín de Ciencias de la Tierra [en línea]. 33, 2013 [fecha de consulta 12 de junio de 2015]. Disponible en: <http://revistas.unal.edu.co/index.php/rbct/article/view/38686/41111>
- [23] Sucerquia, P.A., Uso de la materia orgánica sedimentaria como herramienta para la interpretación de ambientes sedimentarios en la Formación Amagá, sección Los Almendros, Municipio de Sopetrán, Antioquia, Tesis pregrado en Geología, Colombia, Departamento de Geología, Universidad EAFIT, Medellín, Colombia, 2004, 94 P.

Y.P. Valencia-Giraldo, estudiante de noveno semestre de Geología en la Universidad EAFIT, Medellín, Colombia; es miembro del Semillero de Investigación en Paleontología. Pasante en 2016 en el Centro de Paleoeología y Arqueología Tropical del Instituto Smithsonian de Investigaciones Tropicales, Panamá.
ORCID: 0000-0002-6440-7518.

L.C. Escobar-Arenas, actualmente cursa el séptimo semestre del pregrado en Geología de la Universidad EAFIT, Medellín, Colombia. Fue monitor del curso Rocas Sedimentarias. Desde el segundo semestre del 2015, coordina el Semillero de Investigación en Paleontología.
ORCID: 0000-0003-2408-5582.

J. Mendoza-Ramírez, actualmente está cursando el noveno semestre de Geología en la Universidad EAFIT, Medellín, Colombia; fue monitorea de la materia Rocas Metamórficas, es miembro del Semillero de Investigación en Paleontología y antiguamente del Grupo de Cosmoquímica - Astrogeología NUIT.
ORCID: 0000-0002-9232-9713.

D. Delgado-Sierra, es Biólogo en 2012 de la Universidad CES y Escuela de Ingeniería de Antioquia, Medellín, Colombia y MSc. en Ciencias de la Tierra en 2015 en la Universidad EAFIT, Medellín, Colombia. Fue coordinador del Semillero de Investigación en Paleontología de la Universidad EAFIT desde el 2013 al 2015. Desde el 2012 coordina el Semillero de Paradigmas de la Biología, Universidad CES.
ORCID: 0000-0001-9041-4132.

A.L. Cárdenas-Rozo, es Geólogo de la Universidad Nacional de Colombia en el 2004, Dr. en Geología de la Universidad del Sur de Florida, USA en 2012 y PhD. en Paleobiología del Instituto Smithsonian de Investigaciones tropicales en el 2013. Actualmente desarrolla actividades de docencia en el departamento de Ciencias de la Tierra de la Universidad EAFIT.
ORCID: 0000-0003-3849-1514.

Biological and physicochemical evaluation of mortar as substrate for manufacturing artificial reef

Monica Andrea Bedoya-Gutiérrez^a, Jorge Iván Tobón^a, Tatiana Correa-Herrera^b
& Juan Diego Correa-Rendón^b

^a Grupo del Cemento y Materiales de Construcción CEMATCO. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. mabedoya@unal.edu.co, jitobon@unal.edu.co

^b Grupo de Estudios Oceánicos, Universidad de Antioquia, Turbo, Colombia. tatianacorrea@udea.edu.co, jdiego.correa@udea.edu.co

Received: February 19th, 2016. Received in revised form: April 22th, 2016. Accepted: June 3th, 2016

Abstract

Due to several deterioration of coral reefs around the world, has increased the need to rehabilitate marine environments. Artificial reefs have been proposed as a tool for conservation of these ecosystems. As part of an initiative to develop modules forming artificial reefs made of ecological concrete for the conservation of the biodiversity in the Colombian Caribbean; this work constitutes a starting point. During eleven months two trapezoidal plates were submerged near to Isla Palma, Colombian Caribbean; plates were fabricated in concrete with portland cement and the aggregates were replaced by ceramic waste. After biological and physicochemical evaluations of the material exposed to marine environment was concluded that this is a favorable substrate for the coral reefs, and the plates were colonized by more than 30% of its surface by marine organisms, their structure found internally stable, and there were no adverse effects on marine biota near the test site.

Keywords: Ecological mortars; artificial reefs; waste resource; use of waste; conservation.

Evaluación biológica y fisicoquímica de un mortero como sustrato para la fabricación de arrecifes artificiales

Resumen

Debido al deterioro de los arrecifes de coral en todo el mundo ha aumentado la necesidad de rehabilitar los entornos marinos. Los arrecifes artificiales se han propuesto como una herramienta para la conservación de estos ecosistemas. Durante once meses se sumergieron dos placas en forma trapezoidal, en Bajo Grande (Isla Palma), Caribe Colombiano. Esto se realizó como parte de una iniciativa para desarrollar módulos formadores de arrecifes artificiales. Se fabricó un mortero ecológico donde se reemplaza el uso de agregados naturales por residuos cerámicos. Las placas expuestas al medio marino fueron colonizadas por organismos en un 30% de su superficie aproximadamente, la estructura interna de las muestras se mantuvo estable y no se apreciaron efectos adversos sobre la biota marina cercana al lugar de prueba. Después de hacer evaluaciones biológicas y fisicoquímicas del material expuesto se concluyó que éste constituye un sustrato favorable para el desarrollo de los arrecifes artificiales.

Palabras clave: Mortero ecológico; arrecifes artificiales; aprovechamiento de residuos; conservación.

1. Introducción

Los arrecifes de coral son el hábitat de una cuarta parte de todas las especies marinas y son uno de los ecosistemas más diversos de todo el mundo, [1,2]. Son esenciales para proteger las costas de la acción erosiva de las olas y tormentas, además son cruciales para la preservación de otros ecosistemas como las praderas marinas y los manglares, [3]. Son el suministro de

aproximadamente el 5% de las pesquerías mundiales, y son la fuente de alimentación, subsistencia e ingresos de muchas poblaciones en desarrollo [4,5].

Estos ecosistemas se ven afectados por el calentamiento de las aguas superficiales que conducen al blanqueamiento del arrecife [6,7]. En algunas regiones como el Caribe, las pérdidas de coral se han estimado hasta en un 80% y además de los factores climáticos, se suma a su deterioro los

How to cite: Bedoya-Gutiérrez, M.A., Tobón, J.I., Correa-Herrera, T. & Correa-Rendón, J.D., Evaluación biológica y fisicoquímica de un mortero como sustrato para la fabricación de arrecifes artificiales. Boletín de Ciencias de la Tierra, (40), 55-63, 2016.

impactos causados por otros tipos de estrés como la pesca excesiva, la sedimentación y la contaminación que aumenta la acidificación del agua de mar [8].

Los Arrecifes Artificiales (AA) son estructuras creadas por el hombre principalmente para incrementar la producción natural de los recursos biológicos, con el fin de proporcionar refugio adicional para peces, cambiar su abundancia local, mejorar la pesca, disminuir la presión sobre los arrecifes existentes y restaurar el sustrato buscando el asentamiento y colonización de comunidades de invertebrados y algas en estos sustratos [9,10].

Existen diferentes técnicas para la creación de AA, desde cascos de botes sumergidos hasta estructuras hechas en llantas, todas estas estructuras se instalan buscando mejorar la protección costera y la conservación de los recursos vivos.

Los AA para la conservación, los cuales en su mayoría son fabricados en concreto, tienen menor volumen en comparación a el de los arrecifes de protección y por lo tanto no están provistos de refuerzo, evitando los daños causados por la degradación del acero con la penetración ion cloruro, de esta forma se asegura que la superficie y la estructura proporcione refugio a las especies marinas y sirva como sustrato artificial para el nuevo hábitat, [9].

En general, una gran parte de las investigaciones sobre AA coinciden en sus apreciaciones acerca de la eficiencia de estos para crear nuevos hábitats con fines pesqueros, áreas de reserva, mitigación ambiental e investigación. Sin embargo, la polémica acerca de la función y beneficio de los arrecifes sigue existiendo debido al poco tiempo que se estudian estos hábitats, lo que no permite conocer su desarrollo e impacto en el medio [6,10-12]. Así las cosas es posible que por estas mismas razones no se haya abordado en profundidad cómo los materiales utilizados para la construcción de AA pueden influir en el desarrollo del hábitat de formación de organismos bentónicos.

Diferentes tipos de materiales han sido utilizados en el reclutamiento coralino y el desarrollo temprano de la comunidad bentónica en arrecifes artificiales, su selección varía de acuerdo con el propósito final de creación del AA, en varios casos el concreto es el material predominante por su durabilidad, disponibilidad y características que permiten dar forma y estabilidad a las estructuras formadoras de arrecifes [16].

La durabilidad es el requisito principal para la calidad del concreto y otros materiales asociados como los morteros, y más aún, si estos están expuestos a ambientes marinos agresivos. En este sentido se busca refinar la permeabilidad y la porosidad de la matriz, lo que a su vez mejora su resistencia a la penetración de sulfatos y otras sustancias químicas agresivas provenientes del agua de mar. Para este propósito, se utilizan en los concretos y morteros agregados no convencionales de tipos industriales resistentes y estables con diferentes gradaciones buscando materiales más compactos. [17,18].

Buscando mejorar la durabilidad de un mortero para fabricar arrecifes artificiales, el desarrollo de este trabajo ha contemplado el uso de un agregado no convencional subproducto de la industria cerámica, el cual es químicamente estable y de baja porosidad, promoviendo al mismo tiempo un mortero más sostenible en comparación con los morteros tradicionales [19,20,21]. La selección de un mortero con agregados de tamaño inferior a los usados

comúnmente, permite proyectar estructuras esbeltas de menor peso mejorando su trabajabilidad al momento de la instalación; así mismo, la textura que confieren este tipo de agregados a la superficie del material mejora la rugosidad del mismo, condición clave para una adecuada relación área expuesta versus colonización [22].

1.1. Área de estudio

La inmersión de los módulos de AA se realizó en un área de bajos coralinos de las Islas de San Bernardo cerca del Corregimiento de Berrugas (Municipio de San Onofre) ubicado en la parte norte del Golfo de Morrosquillo.

Se eligió este lugar para la realización de la prueba ya que el Golfo de Morrosquillo tiene una ubicación estratégica que le ha dado con el tiempo condiciones ideales para actividades portuarias, turísticas y pesqueras e importancia en términos económicos y servicios territoriales, ya que esta zona fue confirmada como el principal puerto petrolero de Colombia para las próximas décadas. [23].

El Golfo se encuentra rodeado de manglares, sistemas estuarinos y ciénagas, y en las áreas adyacentes existen arrecifes coralinos y pastos marinos [24,25]. En esta zona las actividades de pesca tradicionalmente se realizan sin ningún tipo de control, conformando una de las principales amenazas sobre este recurso, utilizando métodos de pesca ilegales y perjudiciales para el ambiente, que generalmente no discriminan los peces por su tamaño e importancia económica, [26]. Debido a las afectaciones que el ecosistema marino de esta zona ha experimentado, proyectar el desarrollo de una propuesta de arrecifes artificiales es pertinente.

2. Materiales

Se utilizó cemento portland gris tipo I procedente de la cementera Argos S.A ya que está ampliamente disponible en la zona, lo cual es un factor clave al momento de implementación de una propuesta de Arrecifes Artificiales donde intervengan comunidades del área.

Los agregados utilizados fueron residuos de cerámica de platos (tipo biscocho) procedente de Locería Colombiana Corona S.A., los cuales tienen una microestructura estable debido al proceso de cocción a alta temperatura, además de su composición a partir de arcillas caoliniticas y feldespatos.

3. Métodos

3.1. Fabricación de las muestras

Se fabricaron dos placas trapezoidales de mortero con rotura de loza denominadas A y B teniendo en cuenta los procedimientos descritos en la norma ASTM C109 para la elaboración de morteros, la formulación se presenta en la Tabla 1. Los agregados fueron reemplazados en su totalidad por residuos cerámicos para evitar el uso de agregados naturales y demostrar la eficiencia del uso de materiales alternos [27].

Tabla 1.
Composición de los morteros para las placas A y B.

	Materias Primas	Masa %
Mortero de placas	Cemento UG	30
	Rotura de loza	70
	Rel. a/c	0,5

Fuente: Propia

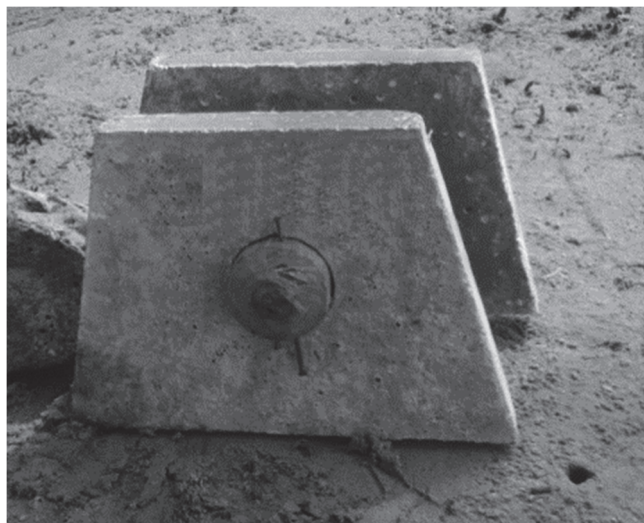


Figura 1. Montaje inicial de las placas A y B
Fuente: Propia

Las placas fueron fabricadas con una perforación central, que se utilizó posteriormente para brindarle estabilidad vertical al montaje en el fondo marino a través de un accesorio de madera (Fig. 1).

3.2. Reducción del tamaño de los agregados y granulometría

Se variaron los tamaños de grano de la loza cerámica en cada placa para observar la influencia de las diferentes distribuciones en las texturas finales de las muestras, ésta condición podría afectar la posterior colonización en el medio marino, adicional una distribución granulométrica con diferentes tamaños de grano en la fabricación de morteros determina el uso de cantidades menores de cemento portland ya que mejora la relación de pasta agregados generando una matriz visiblemente más compacta.

La Fig. 2 presenta la distribución granulométrica de los áridos usados para las dos placas. Se observa que la granulometría de la Placa B contempla el uso de 7 tamaños de grano distribuidos desde 4,76 mm (malla 4) hasta tamaños de 0,149 mm (malla 200), mientras que la distribución de granos para la Placa A se compone por 4 tamaños de partícula desde 4,76 mm (malla 4) hasta 0,6 mm (malla 30).

En general diferentes autores han reportado que la distribución granulométrica realizada con agregados alternativos no siempre se encuentra inscrita dentro de los rangos convencionales correspondientes para agregado natural debido

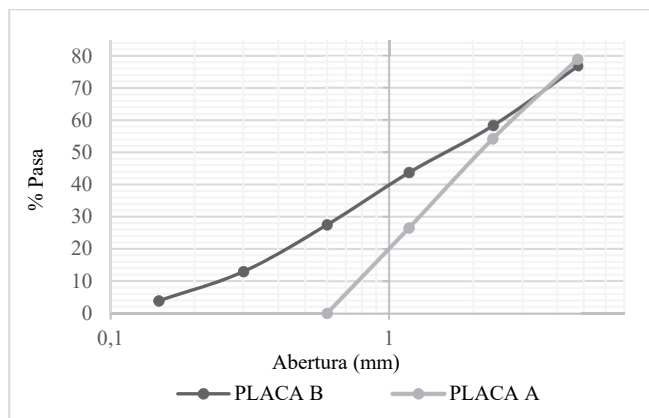


Figura 2. Distribución granulométrica de los agregados usados para las placas A y B.
Fuente: Propia

Tabla 2.
Porcentajes de absorción

Propiedad	Materias Primas
Densidad nominal	1,82
Densidad aparente seca	1,76
Densidad aparente Saturada	1,79
% Absorción	1,87

Fuente: Propia

al origen de ambos, pero es posible el desarrollo de aplicaciones para elementos específicos [28,29], en este caso con los diferentes tipos de tamaño de grano obtenidos a partir de la trituración se espera que los aspectos de colonización y resistencia se vean afectados para cada placa.

3.3. Absorción

Debido a que los agregados de rotura de loza son más porosos, y normalmente menos densos, que los agregados convencionales por su composición y procesamiento, se realizó el ensayo de absorción para estos según la NTC 1776 y se evaluó su densidad, los resultados se presentan en la Tabla 2.

Con el porcentaje de absorción obtenido de 1,87% se realizó una pre saturación del agregado de rotura de loza para mejorar su manejabilidad en la mezcla y evitar modificar el agua de amasado del cemento.

3.4. Inmersión y extracción de las muestras

Las placas se sumergieron durante 11 meses sobre un bajo de arena rodeado por corales. El sitio de inmersión fue el Bajo Grande entre la isla Boquerón y la Isla de Palma, en las coordenadas geográficas 9° 44' 14,63" N y 75° 43' 44,53" W.

3.5. Evaluación fisicoquímica de las placas

3.5.1. Cambios dimensionales y observación directa

Una vez retirados los epibiontes (Figura 3), se hicieron mediciones de las muestras para evaluar posibles cambios de

volumen del material. Por medio de un pie de rey se tomaron las dimensiones longitudinales y de espesor de cada placa. Luego se fragmentó cada placa en cuatro partes usando una cortadora de disco diamantado, se examinó su estructura interna por medio de inspección binocular y se realizó registro fotográfico para establecer diferencias entre éstas y las superficies expuestas al medio marino.

3.5.2. Cambios internos en el material

Para definir las afectaciones causadas por el agua de mar sobre las placas expuestas, se extrajeron secciones para analizar su pH y la lixiviación de los componentes hidratados. La fenolftaleína es un indicador colorimétrico del cambio del pH, al teñir la superficie de las muestras con esta sustancia es posible identificar variaciones en los pH superiores a 7 a través del aumento de intensidad del color violeta exhibido por la muestra tras la aplicación de dicho reactivo.

Para obtener esta medida, se extrajeron 3 secciones de cada placa y se aplicó fenolftaleína en dichas superficies para identificar los cambios de pH con escalas indicadoras de color las cuales contienen valores numéricos de pH (RILEM CPC-18).

3.5.3. Resistencia a la compresión según la NTC 220 (modificado)

Este ensayo se realizó como medida del desempeño mecánico del mortero con el que se elaboraron las placas expuestas. Para obtener muestras de las placas de mortero de rotura expuesto al medio marino se extrajeron con cortadora de disco secciones cúbicas de cada placa, estas secciones fueron falladas en una máquina de ensayos de compresión marca controls 50-C7022 Sercomp 7.

3.6. Evaluación de la colonización biológica

Se midió el área cubierta por organismos sésiles mediante la superposición de láminas de acetato donde se delinearon grillas con celdas de 1 cm². Algunos elementos de la epibiota se retiraron mediante el uso de bisturí y fueron fijados para su posterior análisis taxonómico mediante la ayuda de guías especializadas. Con la ayuda del programa BioDiversity Pro se calcularon algunos índices de diversidad de las comunidades de epibiontes que colonizó las placas, para analizar variaciones entre ellas.

4. Resultados

4.1. Aspectos fisicoquímicos de las muestras de mortero

4.1.1. Observación a simple vista

De esta manera se identificaron diferencias en la estructura interna de poros para cada placa. En las secciones analizadas de la placa A, se evidenció la aparición de conjuntos milimétricos de poros no interconectados, ubicados alrededor de los áridos de mayor tamaño. Respecto

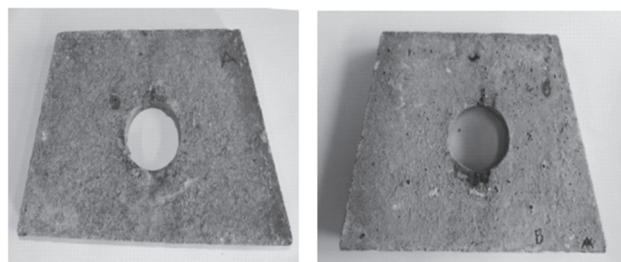


Figura 3. Placa A y B después de retirar los microorganismos de colonización

Fuente: Propia

a la placa B, se observaron distribuciones uniformes de poros más finos entre la pasta y los agregados y una adecuada adherencia entre estos componentes, esto se podría asociar a la presencia de agregados más finos. No se observan conjuntos de poros sectorizados a diferencia de las secciones observadas de la placa A, de hecho los poros existentes se localizan individualmente y presentan diámetros inferiores a un milímetro.

4.1.2. Cambios dimensionales

Después de tomar las medidas correspondientes de ambas placas, se registraron cambios dimensionales volumétricos debido a la colonización de especies.

Como se observa en la Tabla 3, la placa A presenta una diferencia de 0,12 cm de disminución en la base mayor debido a la manipulación en su inmersión y emersión, por otra parte se encuentran expansiones por colonización en la base menor y en la altura de 0,28 y 0,42 cm respectivamente. En total se presentó una expansión volumétrica de la placa del 2,8% después de su colonización. En la placa B se observaron expansiones en la base mayor, menor y la altura de la muestra con valores de 0,01; 0,13 y 0,20 cm respectivamente. En total para esta placa se presentó una expansión volumétrica de la placa del 1,4% después de su exposición al medio marino.

En este caso el fenómeno de expansión para ambas placas se ha desarrollado debido a la colonización de microorganismos marinos, los cuales se ven atraídos por la presencia de carbonato e hidróxido de calcio disponibles en las placas de mortero, los cuales utilizan para sus procesos metabólicos como lo ha expuesto Burt, 2006 [16].

Por otra parte se ha reportado que los fenómenos de expansión en los morteros expuestos a ambientes agresivos

Tabla 3.
Cambios dimensionales en las placas A y B.

Muestra	Placa	Base mayor	Base menor	Alto	Ancho	Volumen
Sin colonizar	A	29,27	20,82	18,2	2,9	1261,81
	B	27,25	15,8	19,8	3,2	1379,11
Colonizada	A	29,15	21,1	18,6	2,9	1297,11
	B	27,26	18,63	20	3,2	1398,42
Expansión (%)	A			2,8		
	B			1,4		

Fuente: Propia

como el agua de mar pueden estar relacionados con ataques por sulfatos [30], sin embargo después de la evaluación del pH interno y la resistencia mecánica de los morteros expuestos es posible atribuir dicho fenómeno en mayor medida a la colonización de los microorganismos marinos como se explicara en los siguientes capítulos.

4.1.3. Lixiviación de Ca

Después de la aplicación de la fenolftaleína en las secciones internas de las placas A y B, se observó una coloración uniforme en tono violeta al interior de las mismas, lo que indica que el pH del mortero se mantuvo básico, con valores convencionales entre doce y catorce, evidenciando que no se presenta el fenómeno de lixiviación de los productos hidratados de la pasta (Figura 4-a).

En cambio, las áreas superficiales expuestas directamente al medio marino, no presentaron cambios de tono tras la aplicación del reactivo (Figura 4-b). Esto sugiere una tendencia de disminución del pH hacia un rango neutro, con valores alrededor de siete, además se observa la presencia de una capa delgada de colonización que protege el interior del mortero.

El cambio de pH no superó el milímetro de profundidad, por lo tanto las placas se mantuvieron con un nivel altamente alcalino en su interior, lo que indica que los componentes internos del material se conservan estables, y no hay una disolución de los productos cementantes responsables de la unión de la pasta.

4.1.4. Resistencia a la compresión

Para evaluar la resistencia a compresión de los morteros expuestos al medio marino, se extrajeron cubos de 30*30 mm de cada placa con la ayuda de una cortadora de disco, en la Fig. 5 y Tabla 4, se observa el resultado de las resistencias de cuatro muestras extraídas de cada placa. En promedio se presenta un valor de 40,2 MPa para la placa B y 32,5 MPa para la placa A con una desviación estándar de 3,6 y 3,7 respectivamente.

El productor local de cemento portland destinado para uso general informa que las resistencias a 28 días para un mortero convencional fabricado con este tipo de cemento deben estar alrededor de los 26,1 MPa, sin embargo los morteros con los que se fabricaron las placas presentan una diferencia superior especialmente para la placa B con un valor de 40,02 MPa, dichas diferencias en la resistencia pueden ser atribuibles a los agregados usados.

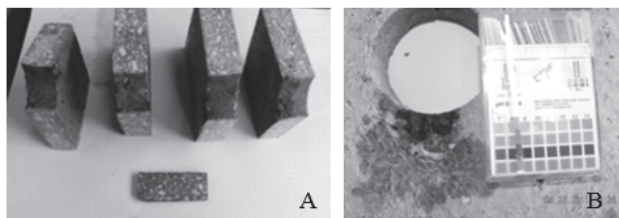


Figura 4. Variación del color tras aplicación de fenolftaleína.
Fuente: Propia

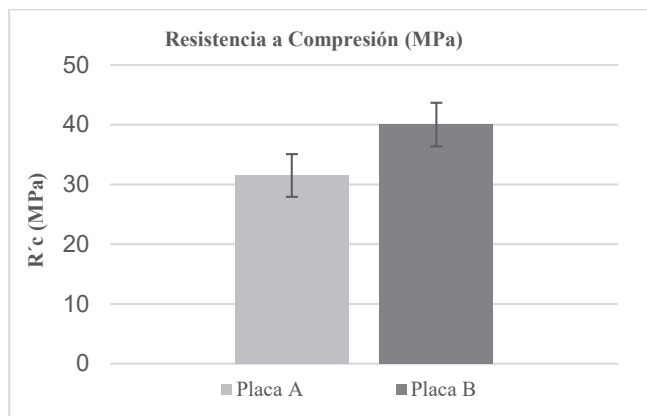


Figura 5. Resistencia a compresión. Pacas A y B después de 11 meses de exposición.
Fuente: Propia

Adicional a esto, es posible que en las muestras fabricadas con residuos de loza se de una interacción química mucho mayor entre los agregados y la pasta cementante, ya que estos presentan mayores porosidades respecto a los agregados convencionales lo que podría estar generando una mayor área de contacto con la pasta favoreciendo y mejorando la interface matriz - agregado como se ha informado por otros autores [21,31]. También se observaron diferencias entre las resistencias a compresión de ambas placas debido principalmente a la granulometría de los elementos, ya que la placa B contenía una mayor distribución de agregado y por ende una menor porosidad en comparación a la placa A.

4.2. Colonización biológica

Se encontraron organismos pertenecientes a 25 taxones marinos, 21 de ellos corresponden a epibiota de tipo sésil. Los organismos sésiles estuvieron compuestos principalmente por algas de Chlorophyta y Rodophyta (Fig. 6). Entre los animales se destacaron los Annelida (Polychaeta). Otros organismos hallados sobre las placas fueron esponjas (Porifera) y anémonas (Cnidaria). Entre los organismos móviles se hallaron cuatro taxones, siendo más abundantes los cangrejos grápsidos (Tabla 6).

Tabla 6.
Organismos móviles hallados sobre las placas.

Organismo	Cangrejo	Pez
Phyllum	Arthropoda	Chordata
Clase	Malacostraca	Osteictios
Orden	Decapoda	Actinoptergios
Familia	Grapsidae	Indeterminada
Individuos	4	1
Organismo	Estrella de mar	Microcrustaceo
Phyllum	Echinodermata	Arthropoda
Clase	Ophiuroidea	Malacostraca
Orden	Indeterminado	Amphipoda
Familia	Indeterminada	Gammaridae
Individuos	1	1

Fuente: Propia

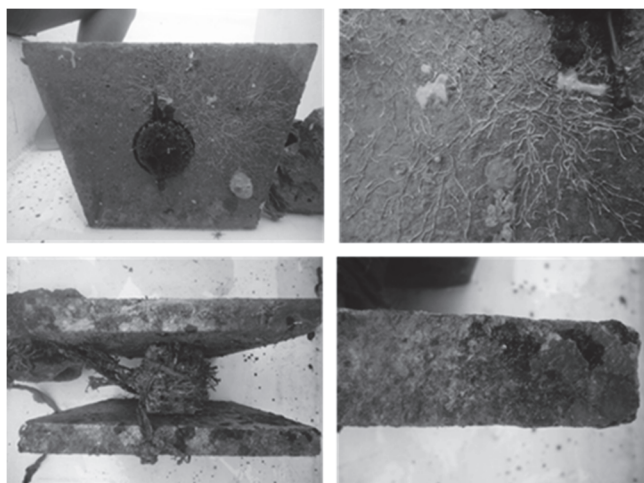


Figura 6. Estado de colonización biológica de las placas al momento de la emersión.

Fuente: Propia

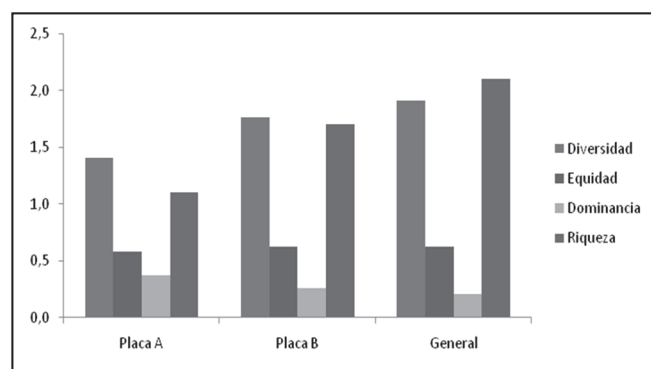


Figura 7. Características de la diversidad de la epibiota que colonizó las placas A y B.

Fuente: Propia

Tabla 7.

Área total (cm²) de las placas de prueba, área colonizada y porcentaje de colonización.

Placa	Área Total (cm)	Área Colonizada (cm)	Colonización (%)
A	1201,5	450	37,5
B	1134,2	411,5	36,6
Total	2335,7	861,5	74,1

Fuente: Propia

Se encontró una diversidad total de 1,9 aunque la placa B (1,8) fue más diversa que la A (1,4) lo que está acorde con la distribución de la riqueza de especies, mientras que esta última presentó mayor dominancia. (Fig. 7).

Toda la estructura presentó un 71,1% de su superficie colonizada, la placa A presentó mayor área colonizada con 450 cm² en comparación con la placa B con 411,5 cm² (Tabla 7).

Los organismos sésiles que cubrieron la mayor extensión de las placas fueron algas de Chlorophyta y Rodophyta aportando más del 80% de la superficie cubierta sobre las placas, como se especifica por los autores, [18].

5. Discusión de resultados

La riqueza de organismos que colonizaron las placas de mortero fué alta, se hallaron siete especies en común entre estos sustratos artificiales. Se encontraron organismos pertenecientes a 25 taxones marinos, 21 de ellos corresponden a epibiota de tipo sésil. Los organismos sésiles que cubrieron la mayor extensión de las placas fueron algas Chlorophyta y Rodophyta aportando más del 80% de la superficie cubierta sobre las placas.

Entre los animales colonizadores se destacaron los anélidos (Polychaeta), las esponjas (Porifera), las anémonas (Cnidaria) y los cangrejos de la familia Grapsidae; la mayoría de estos organismos requieren Ca para sus procesos metabólicos y formación de esqueletos calcáreos y toman este nutriente de la lixiviación de la pasta de mortero.

Lo anterior está en concordancia con lo descrito por Anderson y Burt (2009), quienes encuentran que la naturaleza física y química de la superficie de un sustrato, incluyendo la presencia de compuestos disueltos de calcio puede inducir al establecimiento de microorganismos marinos. Explican además, que el cambio de alcalinidad en la superficie de los morteros se da debido a la solubilidad y migración de hidróxido de calcio, lo cual mejora el establecimiento de organismos ya que estos requieren Ca para sus procesos metabólicos.

En particular la placa A presentó mayor diversidad y riqueza de especie en comparación con la placa B lo que podría atribuirse en principio a una mayor porosidad en la placa A responsable de una mayor expansión y colonización, estas diferencias se dieron a pesar de que la distancia entre ambas placas fué de 15 cm y ambas estuvieran bajo las mismas condiciones ambientales.

A pesar de lo anterior en el modelo de biofouling propuesto por Wahl (1989) se discute que las primeras fases de colonización son similares en los sustratos duros, debido a que las condiciones físico-químicas del ambiente marino son estables para las especies pioneras, por lo tanto se requeriría más tiempo de monitoreo para establecer diferencias contundentes.

Respecto a las resistencias mecánicas de las muestras expuestas en medio marino, las cuales se registraron entre 30 y 40 MPa aún cuando las muestras fueron sometidas a las condiciones agresivas del medio, estos son valores de resistencia muy buenos comparados con los que se pueden alcanzar con un cemento Portland tipo I y agregados convencionales.

Así mismo, la relación agua cemento desempeñó un papel fundamental en la generación de una matriz consolidada para la pasta de ambas placas, lo que permitió que el mortero conservara condiciones alcalinas y estables ya que después de 11 meses de exposición, el interior de las muestras conservó un pH alcalino con valores de 12 y 13, lo que asegura la estabilidad del material durante un tiempo de servicio mayor.

En este sentido y después de medir los cambios de pH en el interior y el exterior del mortero, se observó una tendencia a la disminución del pH superficial de las placas para alcanzar

un equilibrio con el pH marino, dicho cambio también se puede estar dando debido a la disolución de los productos hidratados causado por la acción de microorganismos que aprovechan el calcio para sus procesos metabólicos [17,32,33].

El cambio del pH en la superficie está directamente relacionado con la pérdida de iones Ca^{2+} , esto es atribuible no solo a la lixiviación del Ca^{2+} sino también a la formación de carbonatos de calcio, oxalatos y citratos de calcio según lo informado por diferentes autores (Monteny et al., 2000; Bertron, Duchesne, & Escadeillas, 2005).

Al poner lo anterior en contexto, varios autores han establecido una relación entre la resistencia y la durabilidad por lo que se podría afirmar que el material propuesto cumpliría ambas condiciones para la aplicación requerida en arrecifes artificiales, sin embargo hasta este punto no se han evaluado a profundidad factores como el avance del biodeterioro y la degradación de la estructura por la colonización de los microorganismos y cómo esto afectaría la microestructura del mortero.

Un posible escenario se daría tras finalizar la fase de establecimiento coralino; el deterioro se estabilizaría debido a la abundancia de organismos que cubrirían el área expuesta susceptible de ser colonizada, lo que a su vez protegería la estructura e impediría el avance del biodeterioro, sumado a esto la formación y precipitación de nuevas fases más estables podrían evitar dicho fenómeno, ya que la formación de citratos, oxalatos de calcio, yeso, etringita entre otros se dan debido a que el material requiere regresar a su estado más estable o de mínima energía, lo que podría aportar al sellado de la estructura [34].

A pesar de las diferencias de distribución granulométrica en la placa A y B, y teniendo en cuenta que en los resultados de colonización no se presentaron diferencias notorias o una tendencia significativa en este fenómeno, se concluye que el mortero sirve como sustrato artificial para la colonización de microorganismos marinos, sin embargo es necesario estudiar los fenómenos biológicos como la sucesión en las primeras etapas de inmersión de este tipo de sustratos y los fenómenos de durabilidad que puedan afectar a este material.

6. Conclusiones y recomendaciones

Las placas ubicadas sobre el lecho marino fueron colonizadas en más de un 30% en su superficie y durante 11 meses no se apreciaron efectos adversos sobre la biota marina cercana al lugar de prueba por lo tanto el mortero empleado constituye un sustrato favorable para la colonización de organismos marinos. Desde este punto de vista es posible sugerir morteros fabricados con agregados alternativos como los residuos de loza con la mayor cantidad de tamaños de grano posible para aumentar la resistencia a compresión como se demostró con el mortero fabricado para la placa B.

Las muestras colonizadas están conformadas por una mezcla de agua/material cementante y agregados de rotura que promueven un mortero de buena resistencia, debido a su adherencia entre partículas y comportamiento estable frente a los agentes agresores del agua de mar, lo cual permite proyectar que aún cuando el ataque continúe por un periodo

mayor de tiempo este tipo de morteros tendrían la capacidad de atender este requerimiento, factor determinante para la estabilidad de estructuras como los arrecifes artificiales.

Respecto al tipo de estructura para evaluar este tipo de mezclas en campo se recomienda fabricar módulos articulados estables que permitan la implementación de otros materiales y dosificaciones alternativas para evaluar su comportamiento en diferentes edades de exposición.

Cabe resaltar que el uso de este tipo de espesores permite proyectar estructuras más esbeltas, con mayor área superficial fabricadas con secciones delgadas y articuladas donde el acero de refuerzo no es fundamental para la estructura interna, por lo tanto factores como la corrosión o la penetración ion cloruro no se han abordado en esta investigación la cual se ha enfocado en el desempeño de un mortero alternativo fabricado con roturas de loza.

Respecto a las condiciones previas para la preparación de mezclas que contienen agregados no convencionales como la rotura de loza, es necesario prehumedecer estos con el agua que corresponde a su absorción para evitar incluir agua adicional en el sistema que podría afectar propiedades como la resistencia y durabilidad de los morteros fabricados.

Los agregados alternativos como la rotura de loza propuestos para la fabricación de mortero para su uso en la construcción de arrecifes artificiales cumplen con las condiciones de durabilidad y resistencia requeridas, y se ha revisado a lo largo de esta investigación que la influencia de la porosidad de los agregados de rotura de loza es clave para mejorar el desempeño mecánico y de durabilidad de la matriz cementante debido a su interacción con los productos de hidratación del cemento, y que este proceso favorece el establecimiento coralino.

Es posible que el proceso de colonización se concluya finalmente, dando como resultado un cubrimiento total del área susceptible de establecimiento y por lo tanto la estructura quede sellada y protegida a futuros ataques, en este sentido se recomienda el estudio de los mecanismos de deterioro y biodeterioro afecten después de este plazo el rendimiento de los morteros evaluados.

Este trabajo sirve como punto de partida para el estudio de la colonización de microorganismos en sustratos artificiales fabricados con materiales residuales, por lo tanto se recomienda para futuras investigaciones evaluar fenómenos como el deterioro resultante de la interacción con el agua de mar y el biodeterioro producto de la influencia de microorganismos, ambos en condiciones controladas de laboratorio donde sea posible mantener un control abiótico para definir tanto el efecto del medio como de los microorganismos.

En el mismo sentido, es recomendable realizar ensayos de durabilidad exponiendo las muestras de mortero a sulfatos para identificar los compuestos solubles que se pueden formar en el interior del mortero y que dan origen al crecimiento de cristales expansivos que pueden afectar la durabilidad de este tipo de materiales en el medio marino.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la comunidad de la Isla de Boquerón por su hospitalidad, a los compañeros del grupo

Amoralamar por su acompañamiento en esta iniciativa y especialmente al Ingeniero Jairo Aguilar por su colaboración durante la realización de esta investigación. A los laboratorios de Construcción y de Química del Cemento de la Universidad Nacional de Colombia por permitirnos la realización de diferentes ensayos en sus instalaciones.

Bibliografía

- [1] Buddemeier, R., Kleypas, R.W. and Aronson, J.A., Coral reefs and global climate change: Potential contributions of climate change to stresses on coral reef ecosystems., *Pew Cent. Glob. Clim. Chang. Arlengt.*, 2004, 33 P.
- [2] Roberts, C.M., McClean, C.J., Veron, J.E., Hawkins, J.P., Allen, G.R., McAllister, D.E., Mittermeier, C.G., Schueler, F.W., Spalding, M., Wells, F., Vynne, C., Werner, T.B., Marine biodiversity hotspots and conservation priorities for tropical reefs., *Science*, 295(5558), pp. 1280-1284, 2002. DOI: 10.1126/science.1067728.
- [3] Hughes, T.P., Baird, A.H., Bellwood, D.R., Card, M., Connolly, S.R., Folke, C., Grosberg, R., Hoegh-Guldberg, O., Jackson, J.B., Kleypas, J., Lough, J.M., Marshall, P., Nystrom, M., Palumbi, S.R., Pandolfi, J.M., Rosen, B., Roughgarden, J., Climate change, human impacts, and the resilience of coral reefs, *Science*, 301(5635), pp. 929-933, 2003. DOI: 10.1126/science.1085046.
- [4] Whittingham, E., Campbell, J. and Townsley, P., Poverty and reefs: Volume 1: A global overview., *Intergov. Oceanogr. Comm. UNESCO, Paris, Fr.* [Online], 2003. Available at: <http://www.unesco.org/new/en/natural-sciences/resources/publications/>
- [5] Cesar, L.P.S. and Burke H.L., The economics of worldwide coral reef degradation., [Online], 2003. Available at: <http://pdf.wri.org/cesardegradationreport100203.pdf>
- [6] Ben, D.J.B., McNeil, I. and Matear, R.J., Coral reef calcification and climate change: The effect of ocean warming, *Geophys. Res. Lett.*, 31, 2004.
- [7] Hoegh-Guldberg, O., Mumby, P.J., Hooten, A.J., Steneck, R.S., Greenfield, P., Gomez, E., Harvell, C.D., Sale, P.F., Edwards, A.J., Caldeira, K., Knowlton, N., Eakin, C.M., Iglesias-Prieto, R., Muthiga, N., Bradbury, R.H., Dubi, A. and Hatzioles, M.E., Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification, *Science* 318, pp. 1737-1742., 2007. DOI: 10.1126/science.1152509
- [8] Hughes, P., Fairhurst, D., Sherrington, I., Renevier, N., Morton, L. H.G., Robery, P.C. and Cunningham, L., Microscopic examination of a new mechanism for accelerated degradation of synthetic fibre reinforced marine concrete, *Constr. Build. Mater.*, 41, pp. 498-504, 2013. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.12.022
- [9] Seaman, W., Artificial habitats and the restoration of degraded marine ecosystems and fisheries, *Hydrobiologia*, 580(1), pp. 143-155, 2007. DOI: 10.1007/s10750-006-0457-9
- [10] Pears R.J. and Williams, D.M., Potential effects of artificial reefs on the Great Barrier Reef: Background paper, 60, pp. 1-33, 2005.
- [11] Whitmarsh, D., Santos, M.N., Ramos, J. and Monteiro, C.C., Marine habitat modification through artificial reefs off the Algarve (southern Portugal): An economic analysis of the fisheries and the prospects for management, *Ocean Coast. Manag.*, 51(6), pp. 463-468, 2008. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2008.04.004
- [12] Sutton, S.G. and Bushnell, S.L., Socio-economic aspects of artificial reefs: Considerations for the Great Barrier Reef Marine Park, *Ocean Coast. Manag.*, 50(10), pp. 829-846, 2007. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2007.01.003
- [13] Kaiser, M.J., The Louisiana artificial reef program, *Mar. Policy*, 30(6), pp. 605-623, 2006. DOI: 10.1016/j.marpol.2005.04.005
- [14] Lan, C.H. and Hsui, C.Y., The deployment of artificial reef ecosystem: Modelling, simulation and application, *Simul. Model. Pract. Theory*, 14(5), pp. 663-675, 2006. DOI: 10.1016/j.simpat.2005.10.011
- [15] Baine, M., Artificial reefs: A review of their design, application, management and performance, *Ocean Coast. Manag.*, 44(3-4), pp. 241-259, 2001. DOI: 10.1016/S0964-5691(01)00048-5
- [16] Burt, J., Bartholomew, A. and Bauman, A., Saif, A. and Sale, P.F., Coral recruitment and early benthic community development on several materials used in the construction of artificial reefs and breakwaters, *J. Exp. Mar. Bio. Ecol.*, 373(1), pp. 72-78, 2009. DOI: 10.1016/j.jembe.2009.03.009
- [17] Verdier, T., Coutand, M., Bertron, A. and Roques, C., A review of indoor microbial growth across building materials and sampling and analysis methods, *Build. Environ.*, 80, pp. 136-149, 2014. DOI: 10.1016/j.buildenv.2014.05.030
- [18] Bedoya, M.A., Tobón, J.I., Correa-Herrera, T. and Correa-Rendón, J.D., An opportunity for environmental conservation: evaluation of test material for construction of artificial reefs modules trainers made of ecological concrete, *Key Eng. Mater.*, 600, pp. 606-614, 2014. DOI: 10.4028
- [19] Corinaldesi, V. and Moriconi, G., Influence of mineral additions on the performance of 100% recycled aggregate concrete, *Constr. Build. Mater.*, 23(8), pp. 2869-2876, 2009. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2009.02.004
- [20] Evangelista, L. and De Brito, J., Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates, *Cem. Concr. Compos.*, 32(1), pp. 9-4, 2010. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2009.09.005
- [21] Yang, J., Du, Q. and Bao, Y., Concrete with recycled concrete aggregate and crushed clay bricks, *Constr. Build. Mater.*, 25(4), pp. 1935-1945, 2011. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.11.063
- [22] Bertron, A., Understanding interactions between cementitious materials and microorganisms: A key to sustainable and safe concrete structures in various contexts, *Mater. Struct.*, pp. 1787-1806, 2014. DOI: 10.1617/s11527-014-0433-1
- [23] CIOH. Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrológicas. Cartagena. Colombia, Caracterización oceanográfica y meteorológica del Golfo de Morrosquillo., 2000.
- [24] SEA, Monitoreo de biología pesquera en el Golfo de Morrosquillo. Empresa Colombiana de Petróleos, ECOPETROL. Distrito Caño Limón-Coveñas, Sucre, Colombia., 2000.
- [25] Flórez, C. and Etter, A., Caracterización ecológica de las Islas Múcura y Tintipán, Archipiélago de San Bernardo, Colombia., *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, 27(104), pp. 343-356, 2003.
- [26] L.S. and Mejia, A.A., Libro rojo de peces marinos de Colombia, 2002. Libr. Bogotá, Colombia., 2002.
- [27] Evangelista, L., Guedes, M., De Brito, J., Ferro, C. and Pereira, M. F., Physical, chemical and mineralogical properties of fine recycled aggregates made from concrete waste, *Constr. Build. Mater.*, 86, pp. 178-188, 2015. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.03.112
- [28] Moini, M., Flores I.V., Amirjanov, A. and Sobolev, K., The optimization of aggregate blends for sustainable low cement concrete, *Constr. Build. Mater.*, 93, pp. 627-634, 2015. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.06.019
- [29] Shin, M., Kim, K., Gwon, S. and Cha, S., Durability of sustainable sulfur concrete with fly ash and recycled aggregate against chemical and weathering environments, *Constr. Build. Mater.*, 69, pp. 167-176, 2014. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.07.061
- [30] Collepardi, M., A state-of-the-art review on delayed ettringite attack on concrete, *Cem. Concr. Compos.*, 25(4-5) SPEC, pp. 401-407, 2003. DOI: 10.1016/S0958-9465(02)00080-X
- [31] Xiao, J., Li, W., Fan, Y. and Huang, X., An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996-2011), *Constr. Build. Mater.*, 31, pp. 364-383, 2012. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.12.074
- [32] Hughes, P., Fairhurst, D., Sherrington, I., Renevier, N., Morton, L. H.G., Robery, P.C. and Cunningham, L., Microscopic study into biodeterioration of marine concrete, *Int. Biodeterior. Biodegrad.*, 79, pp. 14-19, 2013. DOI: 10.1016/j.ibiod.2013.01.007
- [33] Yuan, H., Dangla, P., Chatellier, P. and Chaussadent, T., Degradation modelling of concrete submitted to sulfuric acid attack, *Cem. Concr. Res.*, 53, pp. 267-277, 2013. DOI: 10.1016/j.cemconres.2013.08.002
- [34] Monteny, J., Vincke, E., Beeldens, A., De Belie, N., Taerwe, L., Van Gemert, D. and Verstraete, W., Chemical, microbiological, and in situ test methods for biogenic sulfuric acid corrosion of concrete, *Cem. Concr. Res.*, 30, pp. 623-634, 2000.

M.A. Bedoya-Gutiérrez, recibió su título de Arquitecta Constructora en 2011 y como MSc. en Ingeniería de Materiales y Procesos en 2016, ambos de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Colombia. Ha trabajado en proyectos de fabricación de materiales alternativos a partir de residuos urbanos, industriales y agroindustriales con énfasis en el desarrollo

de materiales sostenibles más amigables con el medio ambiente y que aporten a la conservación.

ORCID: 0000-0002-5604-776X

J.I. Tobón, recibió su título como Ing. Geólogo en 1992, como Esp. en Sistemas en 1996, como MSc. en Recursos Hidráulicos en 2003 y como Dr. en Ciencias y Tecnología de los Materiales en 2011; títulos otorgados por la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Colombia. Se desempeña como profesor titular Universidad Nacional de Colombia. Es director del grupo de investigación del cemento y materiales de construcción y asesor de empresas cementeras de la región. Sus contribuciones se han enfocado en química y mineralogía del cemento, cementos alternativos, nanotecnología y tecnología del concreto.

ORCID: 0000-0002-1451-1309:

T. Correa-Herrera, recibió su título como Ecóloga de Zonas Costeras en 2006 y como MSc. en Biología en 2012, actualmente desarrolla su Doctorado en Ciencias del Mar; todos estos estudios han sido realizados en la Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia. Se desempeña como docente de biología en la seccional de Urabá de la misma Universidad. Sus aportes se han enfocado a la ictiología estuarina y marina.

ORCID: 0000-0001-8718-5818.

J.D. Correa-Rendón, recibió su título en Ecología de Zonas Costeras en 2006 y como MSc. en Biología en 2012, ambos título de la Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia. Se desempeña como docente en la misma Universidad en la Sede de Ciencias del Mar (Turbo) en asignaturas como limniología, oceanografía biológica, Biología, Hidrobiología y zoología de invertebrados. Se ha enfocado en proyectos de investigación relacionados con ecosistemas loticos, Ictiología, ecología marina y conservación.

ORCID: 0000-0002-4232-0438

Glycerol effect on the inhibition of spontaneous combustion of sub-bituminous coal

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

^a Grupo de Fenómenos de Superficie – Michael Polanyi, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.
fbcortes@unal.edu.co

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

Received: March 01 th, 2016. Received in revised form: May 8th, 2015. Accepted: May 25th, 2016.

Abstract

Factors favoring the phenomenon of spontaneous combustion in coal mainly depend on the intrinsic properties such as coal particle size, moisture content, among others; the medium in which it is located and how it is stored. Consistent with this, the objective of this work is to evaluate the effect of glycerol on the inhibition of self-combustion as water re-adsorption reducer through the addition of glycerol in different amounts (4, 8, 18 and 28% wt). The coal sample was extracted from the Córdoba department, Colombia. Incipient impregnation method was used to perform the addition of glycerol to the desired quantities. Characterizing the coal samples was performed by: TGA-DTG, nitrogen adsorption at -196 °C, C-H-N-O, FTIR, and SEM. The TGA of the coals evaluated in an air atmosphere, show changes in combustion properties of each sample. D_i ignition index is reduced as the coal is impregnated with glycerol, obtaining its lowest value for 8wt% of glycerol. The effect of glycerol in inhibiting the spontaneous combustion of coal is exposed in the adsorption equilibrium; the sample with 8wt% glycerol shows the highest reduction of water adsorption in coal validating the proposed technology as inhibitor agent spontaneous combustion phenomenon found in Colombian coal.

Keywords: Adsorption; Coal; Isotherm; Water

Efecto del glicerol en la inhibición de la combustión espontánea de carbón sub-bituminoso

Resumen

Factores que favorecen el fenómeno de auto-combustión del carbón depende principalmente de las propiedades intrínsecas, tales como tamaño de partícula, contenido de humedad, entre otros; el medio en el que se encuentra y cómo se almacena. De acuerdo con esto, el objetivo de este trabajo es evaluar el efecto del glicerol en la inhibición de auto-combustión del carbón como reductor de re-adsorción de agua, mediante la adición de glicerol en diferentes cantidades (4, 8, 18 y 28% en peso). El método de impregnación incipiente se utilizó para adicionar el glicerol a las cantidades deseadas. La caracterización de las muestras se realizó mediante: TGA-DTG, adsorción de nitrógeno a -196 ° C, C-H-N-O, FTIR, y SEM. El TGA de los carbones refleja cambios en las propiedades de combustión de cada muestra. El índice de ignición D_i presenta su valor más bajo para la muestra con 8% en peso. El efecto del glicerol en la inhibición de la combustión espontánea del carbón está expuesto en el equilibrio de adsorción; la muestra con 8% en peso de glicerol presenta la mayor reducción de la adsorción de agua en el carbón validando la tecnología propuesta como agente inhibidor del fenómeno de auto-combustión en carbones colombianos.

Palabras clave: Adsorción; Carbón; Isoterma; Agua

1. Introducción

El carbón es el combustible fósil más abundante en la naturaleza, con 750.000 millones de toneladas en reservas globales medidas a finales de 2014 [1,2]. Las mayores reservas por país se encuentran en los Estados Unidos con el 27,6% la Federación de Rusia 18,2%, China 13,3%, Australia

8,9% y la India 7,0%, mientras que Colombia se encuentra en el undécimo lugar con 6,593.4 millones de toneladas equivalente al 0,8% [1-3]. De estas reservas, se puede ver que la mayor región de concentración es Europa y Euro Asia, seguida de Asia Pacífico, América del Norte, África y América del Sur y Central.

How to cite: Taborda-Acevedo, E.A., Jurado, W.J. & Cortés-Correa, F.B., Efecto del Glicerol en la Inhibición de la Combustión Espontánea de Carbón Sub-Bituminoso. Boletín de Ciencias de la Tierra, (40), 64-74, 2016.



Colombia tiene las mayores reservas de carbón en América del Sur y ocupa el puesto undécimo en todo el mundo [1,3]. Uno de los principales problemas para los productores de carbón y los consumidores industriales en general está relacionado con la combustión espontánea del carbón [4]. La auto-combustión del carbón es la causa más importante de los incendios en las pilas de carbón en todo el mundo [4], estos incendios pueden tener efectos perjudiciales significativos sobre la salud, el medio ambiente y la economía [5].

El carbón tiene sitios activos con un alto contenido de agua, debido a su alta afinidad por las moléculas polares [6,7]. Existen riesgos asociados con altos contenidos de agua en carbones: el sobre costo de la energía excesiva utilizada en el proceso de secado de carbón, sobre costos en los procesos de almacenamiento y transporte y los problemas ambientales relacionados con la auto-combustión de carbón, debido a la oxidación del material carbonoso a una cierta temperatura. Esto ocurre cuando el carbón se expone al aire y se somete a quimisorción exotérmica de oxígeno. Las pilas de carbón grandes, especialmente aquellas almacenadas durante largos períodos, pueden desarrollar puntos calientes debido a un calentamiento espontáneo [8-10]. Varios estudios se han reportado en la literatura sobre la combustión espontánea del carbón y las formas de evitarlos. [4,11-14]. Fei et al. [15] compararon la combustión espontánea de dos muestras de carbón con diferentes contenidos de humedad. Se determinó la temperatura crítica de encendido a partir de dos métodos, el método de punto de cruce y el método de liberación de calor. Para ambos métodos, los autores encontraron que las tendencias de la temperatura crítica, principalmente se pueden explicar en términos de los efectos del contenido de humedad de las muestras, a menos contenido de humedad, se reduce su propensión a la combustión espontánea. Fierro et al. [16] estudiaron la combustión espontánea de cinco pilas de carbón de prueba y la medida para evitar la pérdida del calor producido, desarrollaron un método directo para determinar el coeficiente de pérdidas totales y determinar los coeficientes de pérdidas de calor. Para evitar la combustión espontánea, las reservas se estaban protegiendo para evitar al máximo el flujo de aire con una barrera artificial o eran cubiertas con una suspensión de cenizas húmedas de la misma planta de energía. Los resultados sugieren que los métodos de protección aplicados a las pilas experimentales han demostrado ser muy eficiente. La pila se cubre con una capa húmeda de las cenizas volantes de la misma central térmica ha demostrado ser la medida más eficaz con el menor coeficiente de pérdidas totales del 3%. Pone et al. [17] estudió la combustión espontánea de las vetas de carbón en las minas de Witbank y Sasolburg con el fin de determinar si los elementos químicos tóxicos y compuestos están siendo movilizados en el medio ambiente, los minerales de gas de carbón al fuego (CFGM) identificados incluyen compuestos de azufre y sal amoniacal. Mediante difracción de rayos X (XRD) los estudios de los subproductos CFGM confirmaron la presencia de mascagnita ((NH₄)₂SO₄), illita ((Al, Si)₄O₁₀[(OH)₂, H₂O]) letovicita ((NH₄)₃(SO₄)₂), flogopita (KMG), dióxido de titanio (TiO₂), barita (BaSO₄), sulfato de hierro (FeSO₄), yeso (CaSO₄ · 2H₂O) y silicato. Este estudio identificó que durante la combustión espontánea del carbón en los yacimientos de carbón Witbank y Sasolburg, la quema de carbón liberado altas concentraciones de

gases tóxicos, incluyendo benceno, tolueno, xileno, etilbenceno, metano y óxidos de carbono. Se detectaron treinta y dos compuestos alifáticos y otros compuestos halogenados. La naturaleza de los riesgos para la salud humana y el medio ambiente de la mayoría de los compuestos de gas y los subproductos CFGM producidos de la combustión espontánea en las minas de carbón y Witbank Sasolburg son aún desconocidos y merecen ser investigados. Arisoy [18] utilizó la prueba R para evaluar el riesgo de combustión espontánea y la propensión de combustión espontánea del carbón. Esta prueba también se ha utilizado para investigar los efectos de diferentes propiedades del carbón sobre la tasa de auto-calentamiento. Estos efectos se pueden dividir en dos grupos. El primer grupo está relacionado con las propiedades del carbón, tales como el rango, materia mineral, contenido de pirita y el tipo de carbón. En segundo grupo está relacionado con las condiciones de la pila, como la temperatura de la pila, el envejecimiento de carbón, tamaño de partícula, contenido de humedad, la profundidad de la pila de carbón almacenado y la cantidad de flujo de aire que pasa a través de la masa de carbón. El autor encontró que el factor de riesgo más importante para la combustión espontánea es el contenido de humedad y tamaño de partícula de la muestra. Bath y Agarwal [19] identificaron el efecto de condensación de humedad en la combustión espontánea del carbón a través de un modelo matemático desarrollado para investigar la influencia de la migración de la humedad en la combustión espontánea del carbón. Se muestra que la humectación parcial de carbón o de condensación de la humedad ejerce dos influencias que compiten en la tasa global de oxidación. Por un lado, una parte del carbón se llena de agua líquida; en esta región, la velocidad de oxidación se convierte en insignificante, ya que el oxígeno tiene que disolverse en el agua antes de que pueda acceder a un sitio activo en la superficie del carbón y la solubilidad del oxígeno en el agua es baja. Por otra parte, la condensación conduce también a la liberación del calor latente de vaporización. Este efecto de calor eleva la temperatura de la partícula y aumenta la velocidad de oxidación. Los autores también encontraron que tipo de carbón y rango, como se caracteriza por el comportamiento de adsorción de humedad, juegan un papel muy importante. Carbones de bajo rango, cuya isoterma de adsorción de humedad muestra una mayor desviación del comportamiento de tipo III, tienen una mayor tendencia a la auto-ignición. Cuanto más grande esta desviación, mayor será el potencial para la combustión espontánea. Ávila et al. [4] utilizaron el análisis termogravimétrico para estimar el potencial de la combustión espontánea del carbón, utilizando dos métodos termogravimétricos no isotérmicos. La prueba de "adsorción de oxígeno" consistió en la exposición de muestras de carbón para reducir las tasas de calentamiento en el aire mientras se mide el aumento de peso producido por la adsorción de oxígeno, con frecuencia dando a los más altos niveles de adsorción. Se realizó una segunda prueba termogravimétrica para el cálculo del potencial de ignición espontánea (TG_{spi}), que se centró en el segmento lineal de la curva derivada de peso entre 150 y 350 °C a diferentes velocidades de calentamiento en aire (3, 5, 7, 10, y 20 °C min⁻¹). A partir de estos resultados, se obtuvo una relación entre la tasa de pérdida de masa y la temperatura (TG_{index}), donde los valores altos fueron producidos por carbones altamente reactivos.

Como se evidencia en esta serie de trabajos, existe una relación directa entre la capacidad de adsorción de agua en los carbones y su potencial riesgo de combustión espontánea. En ese sentido, este trabajo evalúa el riesgo de combustión espontánea en carbones impregnados con glicerol a través de una serie de análisis como termogravimetría, análisis diferencial termogravimétrico, y espectroscopía infrarroja y su relación con la capacidad de adsorción de agua. El comportamiento de la combustión del carbón se describe con el cálculo de los parámetros relacionados con el proceso térmico de carbones. El índice de ignición Di y el índice de la combustión final Df que se presentan por Jun-Lin et al. [20]. Además, se calculó el índice de combustión espontánea TGspi y la energía de activación de combustión para cada muestra evaluada.

2. Experimentos

2.1. Preparación y modificación del carbón

Una muestra de carbón obtenida de la región de Córdoba en el noroeste de Colombia fue 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. El glicerol (86%, Merck KGaA, Alemania) se utilizó como el material de impregnación. La superficie del carbón fue modificada por el método de impregnación incipiente [21-24]. El glicerol se diluyó en agua destilada, fue añadido gota a gota al carbón y se coloca en un vidrio de reloj. Durante la adición de la solución de glicerol, la muestra de carbón se agitó continuamente de forma manual para asegurar el máximo contacto. A continuación, la muestra se lavó con agua y se seca a 120 °C durante 12 h para eliminar el solvente usado. El porcentaje de impregnación se calculó por la diferencia de peso antes y después del secado y corroborado por mediciones termogravimétricas. Cuatro muestras de carbón fueron impregnadas con concentraciones de glicerol de 4, 8, 18 y 28% en peso, respectivamente. Las muestras impregnadas se denominan por el nombre del carbón seguido por el porcentaje en peso de glicerol. Por ejemplo, C4 denota el carbón con un 4% en peso de glicerol.

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) [25,26]. 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) [5,27] 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. Los efluentes gaseosos productos de la oxidación del carbón se analizaron por espectroscopía infrarroja de transformada de Fourier para determinar su composición química.

2.3. Isotermas de adsorción

El método termogravimétrico estático fue utilizado para la construcción de las isotermas de adsorción a 21°C. Este método involucra la determinación del peso ganado por una muestra de carbón sometida a varios 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) a 21°C 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 isotermas. 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 [6-12,28]. 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.

3. Resultados y Discusión

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 muestra que el área superficial (BET) del carbón disminuyó a medida que el contenido de glicerol en la superficie aumenta, y los valores bajos de S_{BET} apoyan de nuevo que los materiales son no porosos. La reducción del área superficial de las muestras sugiere que el glicerol ha bloqueado los sitios polares del carbón virgen. La Fig. 2 muestra imágenes de microscopía electrónica de barrido (SEM) de las muestras de carbón en diferentes cargas de glicerol. Por consiguiente, parece que los carbones vírgenes y funcionalizados con glicerol son un material no poroso.

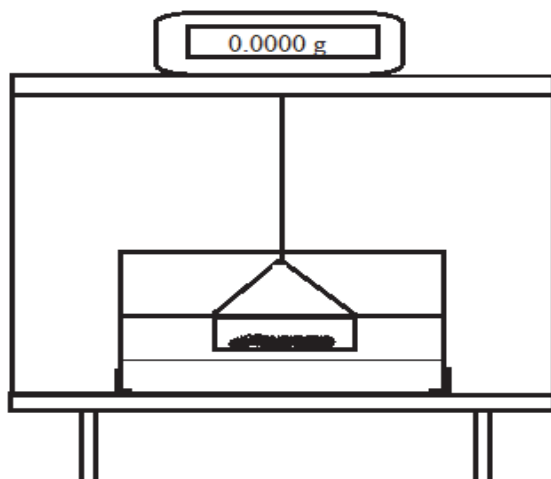


Figura 1. Representación esquemática del procedimiento experimental para la construcción de las isotermas de adsorción.

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.

La Tabla 2 también presenta el análisis elemental de las muestras de carbón. Como se ve, ya que el contenido de glicerol en el carbón aumenta, las proporciones de O/C y H/C aumentó, debido a que el glicerol tiene una mayor relación O/C y H/C en comparación con el carbón seco vírgen. A medida que la relación O/C aumenta, se espera que aumenten los grupos de aromaticidad y carbonilo [27]. En consecuencia, la afinidad entre la superficie del carbón y el agua disminuiría.

3.2. Análisis termogravimétricos

Hay muchos métodos para estudiar el comportamiento de la combustión de carbones. Para obtener la temperatura de ignición en las pruebas de combustión de carbón, se utilizó el método TG-DTG. Una línea vertical se extrae del pico de la curva DTG y se cruza con las curvas de TG, y luego desde el punto de cruce se dibuja una tangente de la curva de TG. El punto de cruce entre la tangente y las líneas paralelas de la pérdida de masa se define la temperatura de ignición. La Fig. 3 muestra el proceso de fijación de la temperatura de ignición.

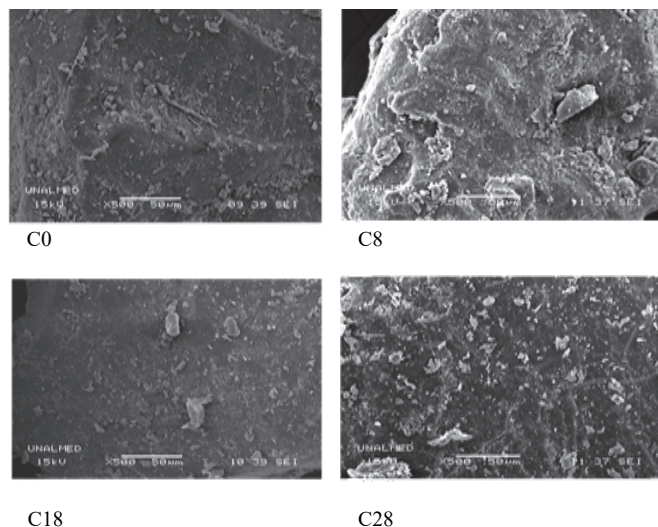


Figura 2. Imagen SEM de las muestras evaluadas

Fuente: Autores.

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

Muestra	%C	%H	%N	%O	S_{BET} (m ² /g)
C0	64.79	5.15	1.96	28.11	4.94
C4	63.17	6.67	1.88	28.29	3.29
C8	61.55	8.19	1.80	28.45	2.67
C18	57.50	12.01	1.61	28.88	2.28
C28	53.45	15.81	1.41	29.32	1.19
Glicerol	24.32	43.24	0.0	32.43	N.A

Fuente: Autores.

Los parámetros característicos de la combustión de TG y DTG curvas incluyen: la temperatura inicial T_i al tiempo correspondiente t_o , la tasa máxima de combustión $(dm/dt)_{max}$ al tiempo correspondiente t_m , la temperatura final de combustión T_f y el tiempo correspondiente t_f y $\Delta t_{1/2}$ que es la diferencia de tiempo entre dos temperaturas cuando $(dm/dt)/(dm/dt)_{max} = 1/2$ se denomina como un pico medio, que representa el grado de combustión de un producto. Según estos parámetros, el índice de ignición D_i y combustión final D_f , que son presentados por Jun-Lin, et al. [20].

$$D_i = \frac{\left(\frac{dm}{dt}\right)_{max}}{t_o t_m} \quad (1)$$

$$D_f = \frac{\left(\frac{dm}{dt}\right)_{max}}{t_{1/2} t_m t_f} \quad (2)$$

El valor más alto del índice de D_i y D_f presenta una mejor combustión.

El índice de indición D_i presenta una tendencia a decreciente a medida que el contenido de glicerol se aumenta en la superficie de carbono, a excepción de la muestra con

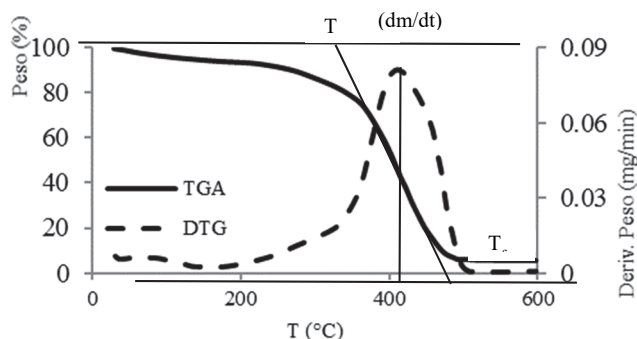


Figura 3. Curva TG-DTG para C8
Fuente: Autores.

Tabla 3.

Parámetros característicos de combustión para las muestras evaluadas.

Parámetro	C0	C4	C8	C18	C28
T_i (°C)	344	348	350	348	300
T_m (°C)	408	416	420	418	387
T_f (°C)	472	480	490	488	474
$(dm/dt)_{max}$ (mg/s)	0.0014	0.0015	0.0013	0.00158	0.0012
t_o (s)	3768	3864	3840	3936	3240
t_m (s)	4536	4632	4680	4716	4284
t_f (s)	5304	5400	5520	5496	5328
$\Delta t_{1/2}$ (s)	768	768	840	780	1044
D_i (10^{-11}) (mg/s ³)	8.659	8.381	7.512	8.512	8.645
D_f (10^{-14}) (mg/s ⁴)	8.010	7.809	6.221	7.815	5.036

Fuente: Autores.

28wt%. Sugiriendo una disminución en el riesgo de ignición a medida que aumenta el contenido de glicerol en el carbón, los valores más bajos se obtienen en para la muestra C8, lo que sugiere una mayor dificultad para que ocurra la auto-ignición. La Tabla 3 presenta los parámetros de combustión donde que se pueden ver diferencias entre cada muestra evaluada.

3.3. Análisis FT-IR

Los efluentes gaseosos productos de la combustión de las muestras de carbón, se analizaron por espectroscopia de infrarrojo con transformada de Fourier (FT-IR) con el fin de determinar los gases que se producen a medida que la combustión avanza. La Fig. 4 presenta la pérdida de masa de gas asociado para C0 y C8 en comparación con el análisis gravimétrico diferencial.

El comportamiento que se encuentra en la Fig. 4 es similar para todos los carbones tratados, muestra que el producto principal es el CO₂ y se obtiene una mayor producción a temperaturas donde se produce el cambio de masa más grande, siendo coherente con las curvas de termogravimétricas presentadas anteriormente.

Para estar completamente seguros de esta hipótesis, a continuación, se calcula el índice de combustión espontánea mediante un procedimiento compuesto por pruebas termogravimétricas al menos a dos velocidades de calentamiento diferentes.

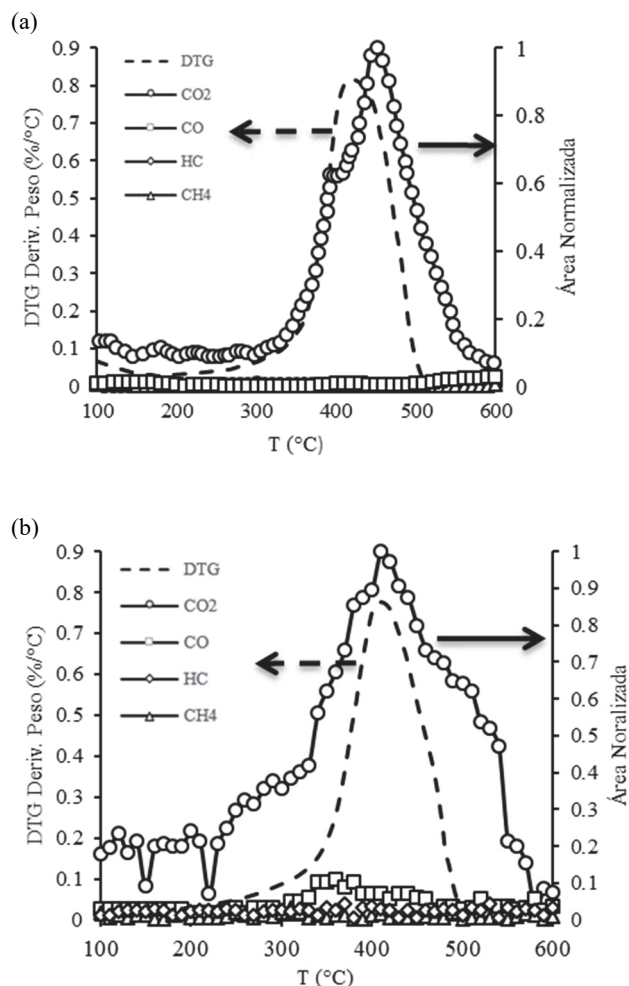


Figura 4. Gases producidos durante la combustión del carbón. (a) C0 y (b) C8. Fuente: Autores.

3.4. Índice de Combustión Espontánea

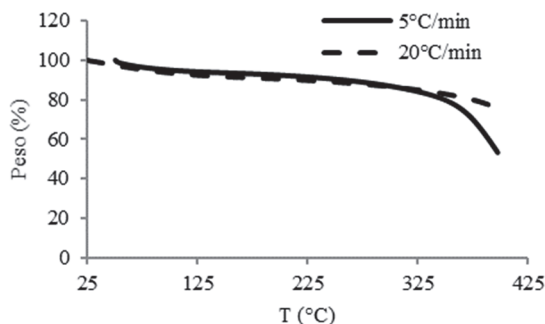
Para comprender mejor el efecto del contenido de glicerol en la superficie de carbón, en el riesgo de combustión espontánea, se realizó un análisis termogravimétrico para calcular el potencial de combustión espontánea. La Fig. 5 muestra los perfiles de termogravimetría para muestras en dos rampas en atmósfera de aire.

Se obtuvieron perfiles termogravimétricos derivados para todas las muestras de carbón utilizando dos velocidades de calentamiento en atmósfera de aire. (5 a 20 °C / min), en la Fig. 6 se presentan dos ejemplos C0 y C8.

La Fig. 5 revela una pérdida de peso lineal que comienza inmediatamente después de la liberación de la humedad (~ 110 °C) y termina con un aumento brusco de la velocidad de volatilización producido por la etapa de combustión completa (después de la ignición, que varían desde 300 hasta 400 °C, depende de cada tipo de muestra). La forma de la derivada del perfil termogravimétrico a bajas temperaturas (Fig. 6) depende de las propiedades reactivas de la muestra. En cada velocidad de calentamiento, una pendiente se produce en el "segmento" inicial de la curva derivada. El análisis de una

muestra en un número de diferentes rampas de calentamiento (como se muestra en la Fig. 6 para cada carbón) produce un conjunto de pendientes asociadas con el conjunto de condiciones de calentamiento. Al representar esta información, la relación encontrada tiende a ser también lineal, con un coeficiente de regresión cerca de 1 para todas las muestras. La pendiente de la segunda derivada, se definió como el índice de combustión espontánea TG_{spi} , y su magnitud representa la reactividad intrínseca de cada carbón en particular, y se calcula así (Ver fig. 5):

(a)



(b)

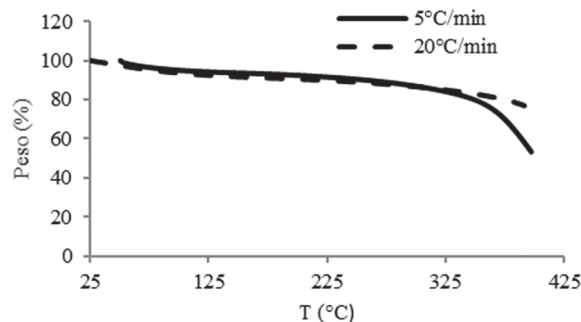
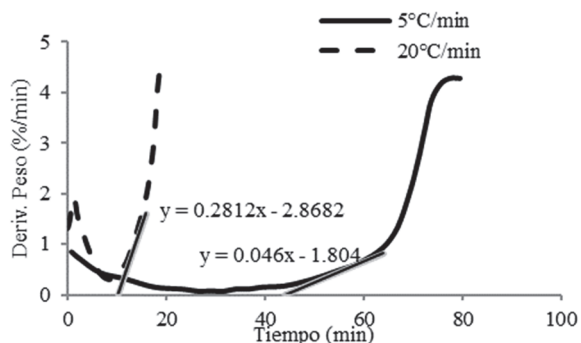


Figura 5. Perfiles termogravimétricos obtenidos a dos rampas de calentamiento. (a) C0 y (b) C8.
Fuente: Autores

$$TG_{spi} = \frac{\Delta \text{Velocidad de la pérdida de Peso}}{\Delta \text{Temperatura}}$$

(a)



(b)

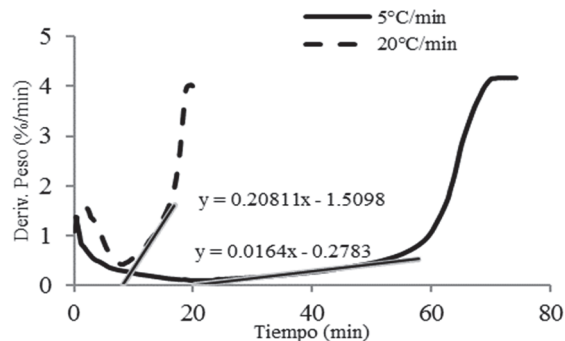


Figura 6. Perfiles derivativos de las curvas termogravimétricas obtenidos a dos rampas de calentamiento. (a) C0 y (b) C8.
Fuente: Autores.

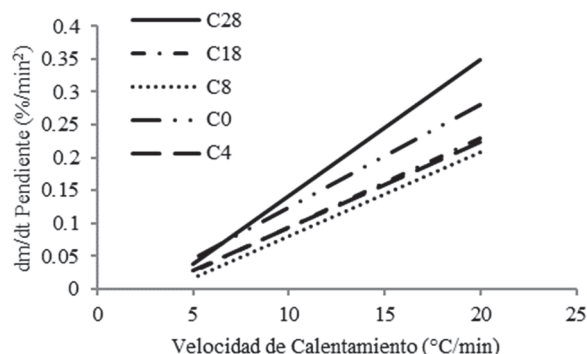


Figura 7. Comparación de las derivadas de segundo orden de las curvas TG para todas las muestras de carbón.
Fuente: Autores.

Se encontraron altos valores de TG cuando las tasas de pérdida de peso tienden a ser en gran medida influenciada por un cambio de temperatura preestablecida, lo que significa que la reacción química se desarrolló más rápido debido a la alta reactividad de la muestra.

Con la Fig. 7 es posible determinar la reactividad de cada muestra de carbón, y por lo tanto definir el riesgo de combustión espontánea. La muestra con mayor pendiente representa un carbón más reactivo debido a que su índice de combustión espontánea es mayor, por esta razón será más probable para promover la combustión espontánea. Del mismo modo, la pendiente más baja dada para C8 representa un carbón menos reactivo y menos propenso a producir combustión espontánea.

La Tabla 4 presenta los resultados de las pruebas de combustión espontánea. Los resultados sugieren que la C8 muestra tiene la reactividad más baja.

3.5. Cinética de Combustión

En el proceso del estudio cinético, la combustión es considerada como una reacción simple, y no existe ningún obstáculo difuso en las condiciones de este experimento. La ecuación de Arrhenius se usa para describir la velocidad aparente de reacción:

Tabla 4.

Índice de combustión espontánea TG_{spi} para cada muestra calculado a partir de análisis termogravimétricos.

Muestra a	Pendiente 5°Cxmin	Pendiente 20°Cxmin	TG_{spi}
C0	0.046	0.2812	0.015 7
C4	0.0282	0.2245	0.013 1
C8	0.0164	0.2081	0.012 8
C18	0.0258	0.2297	0.013 8
C28	0.0381	0.3491	0.020 7

Fuente: Autores

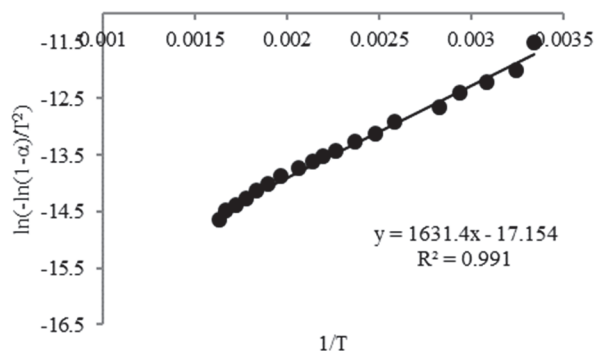


Figura 8. Gráfica de $\ln\left(-\frac{\ln(1-\alpha)}{T^2}\right)$ vs $1/T$ para C0.

Fuente: Autores.

$$k = Ae^{-E/RT} \quad (4)$$

El método de Freeman y Carroll [29] se utiliza para obtener los parámetros cinéticos con datos termogravimétrico

$$\frac{d\alpha}{dT} = \frac{A}{\phi} e^{-E/RT} (1-\alpha)^n \quad (5)$$

Donde k es la velocidad de reacción aparente, A el factor pre-exponencial, E la energía de activación, R la constante de los gases, T es la temperatura, α el porcentaje restante, ϕ la velocidad de calentamiento lineal y n el orden de reacción. Basado en la experiencia, $n = 1$, e integrando

$$\ln\left(-\frac{\ln(1-\alpha)}{T^2}\right) = \ln\left(\frac{AR}{\phi E}\left(1 - \frac{2RT}{E}\right)\right) - \frac{E}{RT} \quad (6)$$

Se puede obtener un gráfico de línea recta de $\ln[-(\ln(1-\alpha))/T^2]$ vs. $1/T$ (se muestra en la Fig 8), en la que $-E/R$ es la pendiente de la línea y a es la intersección [30, 31].

Los parámetros cinéticos obtenidos de la combustión se enumeran en la Tabla 5.

Tabla 5.

Parámetros de la Cinética de combustión.

Muestra	Energía de Activación (KJ/mol)	R^2
C0	13.56	99.1
C4	16.84	98.6
C8	20.10	98.1
C18	15.89	99
C28	13.26	98.5

Fuente: Autores

La energía de activación de la combustión es diferente para cada muestra impregnada con glicerol. A medida que el contenido de glicerol en la superficie aumenta, también aumenta la energía de activación de la combustión, lo que retrasa la combustión normal de carbón sin glicerol. La muestra C8 nuevamente es la que presenta un mejor resultado en la búsqueda para inhibir la combustión espontánea del carbón.

3.6. Isotermas de Adsorción

La Fig. 9 presenta las isotermas de adsorción de agua sobre el carbón a 21 °C a lo largo de diferentes concentraciones de glicerol para una actividad de agua entre 0,10 a 0,90. La adsorción aumentó con el aumento de la actividad del agua. Estos resultados están en de acuerdo con los estudios de adsorción de carbón/agua disponibles [32-38]. La cantidad de vapor de agua en el recipiente de adsorción aumenta debido al aumento de presión de vapor (actividad de agua). Las colisiones con la superficie de la muestra son favorecidas, lo que lleva a una mayor cantidad adsorbida. Las isotermas de adsorción exhiben comportamiento Tipo III, según la clasificación IUPAC [6, 39]. La forma resultante de la isoterma de sorción de agua indica una baja afinidad entre el adsorbato y adsorbente, que se produjo principalmente a una humedad relativa baja (actividad de agua). El comportamiento de la isoterma muestra diferentes interacciones, incluyendo la interacción de agua sobre los sitios activos, junto con varias capas humedad adsorbida en la superficie de carbón.

La reducción de la superficie después del proceso de impregnación de glicerol se refleja principalmente en las regiones de alta actividad de agua, mientras que es mínima en la región de baja actividad de agua (la ley de Henry). De hecho, los datos de isotermas con desviación estándar correspondiente son menores que 5%.

Los resultados de la Tabla 2 también muestran que para todas las muestras de glicerol, la relación O/C aumenta. Sin embargo, el material funcionalizado exhibió baja afinidad entre el agua y la superficie debido al bloqueo de los sitios activos en la superficie del carbón por la adición de glicerol en el intervalo de 4-8% en peso. Para las muestras C18 y C28, la afinidad por el agua aumentó, probablemente debido a la formación de grupos a través de enlaces de hidrógeno de adsorbato que son adsorbidos sobre carbón modificado con glicerol.

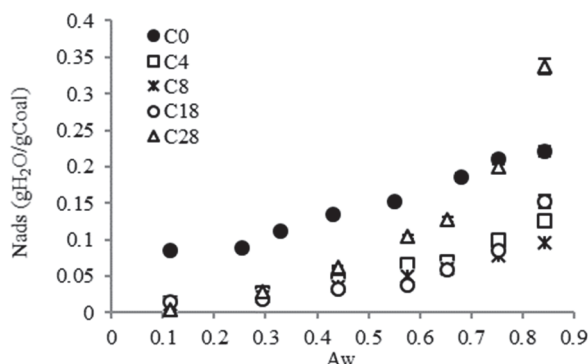


Figura 9. Isotermas de adsorción de agua en carbón a diferentes concentraciones de glicerol, a 21°C

Fuente: Autores.

La reducción en la re-adsorción de agua sobre el carbón modificado con glicerol es mayor para C4, C8 y C18 en toda la gama de A_w . En el caso de C28, la reducción fue significativa a bajas actividades. Para C4, C8 y C18, a una baja actividad de agua (menos de 0,40), la reducción de la cantidad adsorbida de agua fue de aproximadamente 70% en comparación con el carbón virgen. Por el contrario, en las actividades superiores, tales como 0,75, la reducción fue de aproximadamente 6, 53, 59 y 63% para las muestras C28, C4, C18 y C8, respectivamente. Los resultados muestran que el punto de impregnación óptima de glicerol sobre la superficie del carbón estaba en 8% en peso. Cuando la concentración de glicerol aumentada por encima de 8% en peso, se observó re-adsorción de agua significativo, lo que se hizo más notable en una actividad más alta que 0,7. Esto se puede explicar por la estructura de glicerol. Cuando los grupos funcionales OH están expuestos a contacto directo con el agua, la probabilidad de la formación de nuevos enlaces de hidrógeno se incrementa, aumentando así la cantidad de agua en la estructura. Esto parece ocurrir principalmente para C28. Para un contenido de glicerol inferior a 8% en peso, la cantidad de agua adsorbida disminuyó debido a la obstrucción o el relleno de los sitios polares de carbón con el grupo hidroxilo de glicerol en la superficie de carbón, generando así una superficie con más afinidad por los compuestos no polares. Al contenido de glicerol mayor que 8% en peso en la superficie del carbón, los sitios polares de carbón se llenan inicialmente con OH- grupos de la glicerina. El glicerol está anclado al glicerol impregnado en la superficie del carbón a través de interacciones no polares, que se basan en el tipo de múltiples capas de impregnación. Por lo tanto, los carbones modificados muestran una alta afinidad por las moléculas polares debido a la reorganización del glicerol sobre su superficie.

La isoterma de adsorción fue modelada utilizando el modelo propuesto por Talu y Meunier [39]. 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 isotermas Tipo I a

Tipo V, incluyendo isotermas tipo III características de adsorbentes no porosos, como es el caso de este trabajo. Los datos de las isotermas 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”. El modelo es descrito a continuación:

$$P = \frac{H\psi}{(1 + K\psi)} \exp\left(\frac{\psi}{Nm}\right) \quad (7)$$

$$\psi = \frac{-1 + \sqrt{1 + 4K\varepsilon}}{2K} \quad (8)$$

$$\varepsilon = \frac{N_m N}{(N_m - N)} \quad (9)$$

Donde, N (g/g) es la cantidad adsorbida, N_m (g/g) es la cantidad de saturación adsorbida por el monómero, K (g/g) es la constante de reacción relacionada con la agregación de las moléculas autoasociativas, P (kPa) es la presión de equilibrio del sistema, y H (kPa) es el inverso de la constante de la ley de Henry.

La Fig. 10 muestra la comparación entre los datos experimentales y el modelo de Talu y Meunier [39]. La Tabla 5 muestra los valores de los parámetros obtenidos del modelo Talu y Meunier. Los valores de los parámetros están de acuerdo con las características de los carbones en la que el valor K es alta. Esto indica una rápida asociación de moléculas de agua una vez que los sitios primarios están ocupados y es similar al comportamiento descrito por las isotermas de adsorción. Por otro lado, los valores de H son también altos (el inverso de la constante de la ley de Henry común). Los valores más altos del parámetro H indican menor afinidad de las moléculas de agua por estar en la fase adsorbida. Los sitios activos se encuentran en lugares que no son de fácil acceso al agua.

Los parámetros del modelo Talu y Meunier muestran una tendencia consistente con isotermas de sorción. Está claro que la pendiente de las isotermas en la región de Henry es mayor a medida que la cantidad adsorbida se incrementa; es por esto que los parámetros H aumenta (es decir, disminuye la afinidad) en el orden $C28 < C0 < C18 < C4 < C8$, lo que indica que la afinidad adsorbato-adsorbente se reduce en gran medida con la muestra C8. El parámetro N_m está relacionada con la capacidad de adsorción de la monocapa, esto de acuerdo con las isotermas, como el carbón adsorbe más agua, este parámetro es mayor. Por lo tanto, muestra que el parámetro N_m para C8 es menor que para otras muestras

Tabla 6.

Parámetros del Modelo Talu y Meunier para todas las muestras a 21°C.

Material	H (kPa)	K (g/g)	N_m (g/g)	MSRE (%)
C0	18.5	16.9	0.18	7.45
C4	40.5	15.7	0.11	8.82
C8	42	12.7	0.10	5.25
C18	28.5	13.4	0.21	6.75
C28	17.3	18.9	0.32	7.25

Fuente: Autores

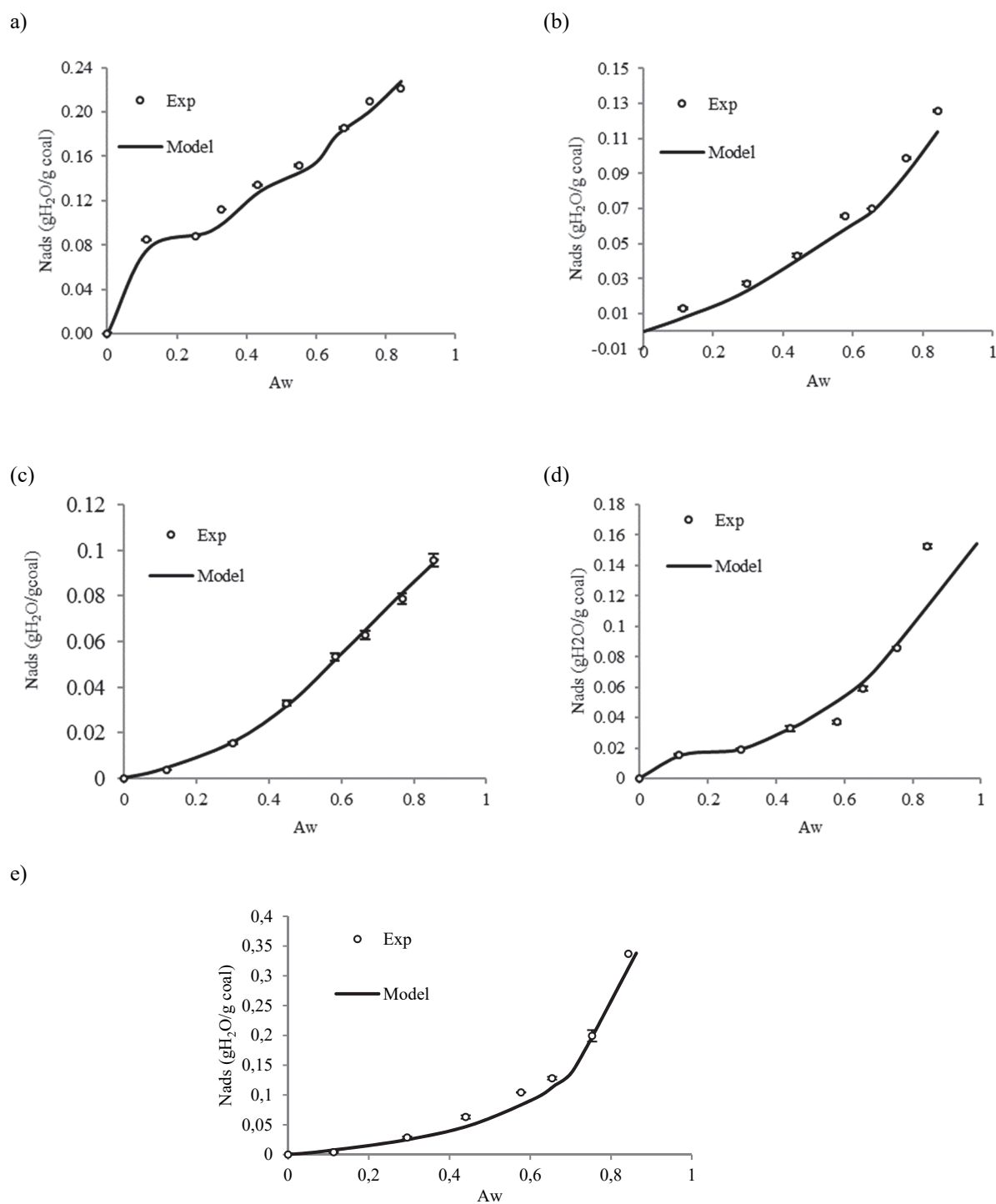


Figura 10. Comparación de los datos experimentales con el modelo Talu y Meunier para el carbón a diferentes concentraciones de glicerol (a) C0, (b) C4, (c) C8, (d) C18, y (e) C28

Fuente: Autores

4. Conclusiones

La reactividad en carbones con la superficie modificada con glicerol se estudió a partir de ensayos termogravimétricos para determinar su riesgo de combustión

espontánea mediante el cálculo del índice de ignición, el índice de combustión espontánea y la energía de activación de la combustión. Un punto de impregnación óptimo se encontró (C8), con una reducción de la re-adsorción era más del 70% en comparación con el carbón no tratado. En el caso

de la impregnación con 8% en peso de glicerol, un porcentaje más alto (aproximadamente 40%) de la reducción de la humedad absorbida fue encontrado. La adición de glicerol a la superficie de carbón reduce la afinidad de los sitios activos altamente polares para el agua, reduciendo así el área de la superficie de las muestras tratadas y la adsorción de humedad. El aumento de la cantidad de glicerol en el carbón resultó en la capacidad de los grupos OH para formar enlaces de hidrógeno con moléculas de agua presentes en la atmósfera. Si la cantidad de agua en la atmósfera era alta, entonces la adsorción de agua se incrementó.

Estos resultados muestran que la adición de glicerol a carbones disminuye la humedad, lo que resulta en la disminución de la re-adsorción de agua en comparación con el carbón seco. Estos dos hechos implican un aumento en las propiedades del carbón en los procesos térmicos. Los resultados también implican que la auto-combustión de carbón se inhibe, esto fue demostrado mediante el cálculo de la velocidad de combustión espontánea, obteniendo el valor más bajo de la reactividad de las muestras analizadas. Existe una relación directa entre la capacidad de adsorción de agua y el riesgo potencial de la combustión espontánea.

Agradecimientos

Los autores agradecen a La Universidad Nacional de Colombia y a ARGOS S.A. por su apoyo logístico y financiero

Bibliografía

- [1] 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). Website: <http://rutledge.caltech.edu>, 2007.
- [2] 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
- [3] Castro, J., Perspectivas de la demanda energética global, *Petrotecnia*, pp. 54-70, 2011.
- [4] Avila, C., Wu, T. and Lester, E., Estimating the spontaneous combustion potential of coals using thermogravimetric analysis, *Energy & Fuels*, 28, pp. 1765-1773, 2014. DOI: 10.1021/ef402119f
- [5] Stracher, G.B. and Taylor, T.P., Coal fires burning out of control around the world: Thermodynamic recipe for environmental catastrophe, *International Journal of Coal Geology*, 59, pp. 7-17, 2004. DOI: 10.1016/J.COAL.2003.03.002
- [6] Dubinin, M., Inhomogeneous microporous structures of carbonaceous adsorbents, *Carbon*, 19, pp. 321-324, 1981.
- [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] Carras, J.N. and Young, B.C., 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] Krishnaswamy, S., Agarwal, P. K. and Gunn, R.D., Low-temperature oxidation of coal. 3. Modelling spontaneous combustion in coal stockpiles, *Fuel*, 75, pp. 353-362, 1996. DOI: 10.1016/0016-2361(95)00249-9
- [12] Küçük, A., Kadioğlu, Y. and Gülaboğlu, M., A study of spontaneous combustion characteristics of a Turkish lignite: Particle size, moisture of coal, humidity of air, *Combustion and Flame*, 133, pp. 255-261, 2003. DOI: 10.1016/S0010-2180(02)00553-9
- [13] Ray, S. and Bhowmick, B., Indian coals vis-a-vis spontaneous heating problems, *Journal of Mines, Metals & Fuels*, 49, pp. 123-128, 2001.
- [14] Sujanti W. and Zhang, D.K., A laboratory study of spontaneous combustion of coal: The influence of inorganic matter and reactor size, *Fuel*, 78, pp. 549-556, 1999. DOI: 10.1016/S0016-2361(98)00188-4
- [15] Fei, Y., Aziz, A.A., Nasir, S., Jackson, W., Marshall, M.J. and Hulston, J., The spontaneous combustion behavior of some low rank coals and a range of dried products, *Fuel*, 88, pp. 1650-1655, 2009. DOI: 10.1016/J.FUEL.2009.03.017
- [16] Fierro, V., Miranda, J., Romero, C., Andres, J., Arriaga, A. and Schmal, D., Model predictions and experimental results on self-heating prevention of stockpiled coals, *Fuel*, 80, pp. 125-134, 2001. DOI: 10.1016/S0016-2361(00)00062-4
- [17] Pone, J.D.N., Hein, K.A., Stracher, G.B., Annegarn, H.J. and Finkleman, R.D. and Blake, D.R., The spontaneous combustion of coal and its by-products in the Witbank and Sasolburg coalfields of South Africa, *International Journal of Coal Geology*, 72, pp. 124-140, 2007. DOI: 10.1016/J.COAL.2007.01.001
- [18] Arisoy, A., Coal mine safety and preventing self-combustion of coal. In: Conference: Inerma, At Istanbul, Turkey, 2010.
- [19] Bhat, S. and Agarwal, P.K., The effect of moisture condensation on the spontaneous combustibility of coal, *Fuel*, 75, pp. 1523-1532, 1996. DOI: 10.1016/0016-2361(96)00121-4
- [20] Jun-Ling, X., Feng, H. and Run-Zhang, Y., Relationship between coal powder and its combustibility, *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 17, pp. 72-75, 2002. DOI: 10.1007/BF02852641
- [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., Patiño, E., Benjumea, P., Ruiz, M.A. and Cortés, F., Kinetic and thermodynamic equilibrium of asphaltene sorption onto nanoparticles of nickel oxide supported on nanoparticulated alumina, *Fuel*, 105, pp. 408-414, 2013. DOI: 10.1016/J.FUEL.2012.06.022
- [23] Franco, C., Montoya, T., Nassar, N.N., Pereira-Almao, P. and Cortés, F., 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
- [24] Franco, C., Nassar, N.N. and Cortés, F., 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
- [25] 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.
- [26] Cortés, F., Rojano, B. and Chejne-Janna, F., Advantages and thermodynamic limitations of the experimental sorption isosteric method, *DYNA*, 80(182), pp. 155-162, 2013.
- [27] Parshetti, G.K., Quek, A., Betha, R. and Balasubramanian, R., TGA-FTIR investigation of co-combustion characteristics of blends of hydrothermally carbonized oil palm biomass (EFB) and coal, *Fuel Processing Technology*, 118, pp. 228-234, 2014. DOI: 10.1016/J.FUPROC.2013.09.010

- [28] Kaymakci, E. and Didari, V., Relations between coal properties and spontaneous combustion parameters, *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 26, pp. 59-64, 2002.
- [29] Freeman, E.S. and Carroll, B., The application of thermoanalytical techniques to reaction kinetics: the thermogravimetric evaluation of the kinetics of the decomposition of calcium oxalate monohydrate, *The Journal of Physical Chemistry*, 62, pp. 394-397, 1958. DOI: 10.1021/j150562a003
- [30] Arias, B., Pevida, C., Rubiera, F. and Pis, J., Changes in coal char reactivity and texture during combustion in an entrained flow reactor, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 90, pp. 859-863, 2007. DOI: 10.1007/s10973-006-8265-z
- [31] Sis, H., Evaluation of combustion characteristics of different size elbistan lignite by using TG/DTG and DTA, *Journal of thermal analysis and calorimetry*, 88, pp. 863-870, 2006. DOI: 10.1007/s10973-005-7447-4
- [32] 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.
- [33] 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
- [34] 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
- [35] Karthikeyan, M., Minimization of moisture readsorption in dried coal samples, *Drying Technology*, 26, pp. 948-955, 2008. DOI: 10.1080/07373930802142846
- [36] 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
- [37] McCain, W.D., *The properties of petroleum fluids*: PennWell Books, 1990.
- [38] 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
- [39] 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

E.A. Taborda-Acevedo, es Ing. Químico en 2007 de la Universidad Nacional de Colombia. MaSc. en Ingeniería Química en 2014, de la Universidad Nacional de Colombia. 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.
ORCID: 0000-0001-5920-0830

W.J. Jurado, es Ing. Químico de la Universidad Nacional de Colombia. MS. en Ingeniería Química en 2014, de la Universidad Nacional de Colombia. 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 de la Universidad Nacional de Colombia. Dr. en Ingeniería: Sistemas Energéticos de la Universidad Nacional de Colombia. Profesor asociado del Departamento de Química y Petróleos, Facultad de Minas, de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. Director del Grupo de Investigación en Fenómenos de Superficie – Michael Polanyi 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

Decision making by using a computer algorithm to analyze hydrocarbon production systems

Robinson Stevens Salazar-Rúa, Johan Darío Caicedo-Reyes & Jovani Alberto Jiménez-Builes

Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. rssalazarr@unal.edu.co, jodcaicedore@unal.edu.co, jajimen1@unal.edu.co

Received: March 16th, 2016. Received in revised form: June 11th, 2016. Accepted: July 07th, 2016

Abstract

This paper shows an algorithm that allows to automate the procedures of nodal analysis and flow optimization in a hydrocarbon production system. The procedure of nodal analysis is highly useful in flow wells, intermittent wells or in wells with artificial production systems. The nodal analysis evaluates a production system divided into two basic components: flow through vertical piping or production piping, and flow through horizontal piping or discharge line. For the prediction of each component's behavior, the pressure drop in each component is obtained. In order to obtain the pressure drops, nodes in different important points within the production system must be assigned; therefore, production expenses can vary and, by using a suitable calculation method, the pressure drop between two nodes is calculated. Then, a node is selected and the pressure drops are added to or subtracted from the initial pressure point or departure node, until obtaining the solution node. The results obtained when using the algorithm have allowed to update both procedures, obtaining advantages such as improvement in response time, among others. This analysis is a crucial point when making decisions related to production costs in any oil company.

Keywords: Decision Making, Nodal Analysis, Hydrocarbon Production System, Computer Algorithm.

Toma de decisiones mediante el uso de un algoritmo para analizar los sistemas de producción de hidrocarburos

Resumen

Este artículo presenta un algoritmo que permite automatizar los procedimientos de análisis nodal y optimización del flujo en un sistema de producción de hidrocarburos. El procedimiento de análisis nodal tiene gran utilidad en pozos fluyentes, intermitentes o con sistemas artificiales de producción. El análisis nodal, evalúa un sistema de producción dividido en dos componentes básicos, a saber: el flujo a través de tubería vertical o de producción y el flujo a través de la tubería horizontal o línea de descarga. Para la predicción del comportamiento en cada uno de los componentes, se obtiene la caída de presión en cada uno de ellos. Para la obtención de las caídas de presión, se deben de asignar nodos en diversos puntos importantes dentro del sistema de producción por lo tanto, se varían los gastos de producción y empleando un método de cálculo adecuado, se calcula la caída de presión entre dos nodos. Después, se selecciona un nodo y las caídas de presión son adicionadas o sustraídas al punto de presión inicial o nodo de partida, hasta alcanzar el nodo de solución. Los resultados obtenidos al utilizar el algoritmo han permitido actualizar ambos procedimientos obteniendo ventajas como mejoras en los tiempos de respuesta. Este análisis es crucial para tomar decisiones relacionadas con los costos de producción en cualquier compañía petrolífera.

Palabras clave: Toma de decisiones; Análisis Nodal; Sistema de Producción de Hidrocarburos; Algoritmo Computacional.

1. Introducción

Todas las operaciones en la industria del petróleo referidas al diseño, diagnóstico y optimización de sistemas para transporte de los fluidos producidos, demandan conocer las características fundamentales del flujo multifásico en

tuberías. Aunque se han publicado distintos modelos de solución, varios estudios han mostrado que, hasta el presente, una sola teoría o correlación no alcanza a predecir en forma satisfactoria las características del flujo gas - líquido en tuberías dado el amplio rango de condiciones encontradas en los campos [1,2].

How to cite: Salazar-Rúa, R.S., Caicedo-Reyes, J.D. & Jiménez-Builes, J.A., Toma de decisiones mediante el uso de un algoritmo para analizar los sistemas de producción de hidrocarburos. Boletín de Ciencias de la Tierra, (40), 75-83, 2016.

Definir cómo se explotará un yacimiento de petróleo, a partir de la localización de pozos y su diseño, para obtener una óptima producción de estos, hace necesario el uso de la técnica de análisis nodal en la cual a determinados componentes de un sistema de producción, definidos como nodos, se le aplican balances para evaluar su desempeño y optimizar el funcionamiento del sistema en su totalidad [3]. Este procedimiento permite comparar la capacidad de transporte de un sistema de producción con la capacidad de influjo de la formación para determinar el caudal al cual puede producir un pozo.

En este artículo se presenta el diseño de un algoritmo que permite integrar los procedimientos descritos por Hagedorn & Brown [4] y Duckler [5]. El artículo está distribuido de la siguiente manera: a continuación se presentan los materiales y métodos, luego, en el capítulo tres se exterioriza la metodología para después mostrar en el capítulo cuatro, los resultados y la discusión.

2. Materiales y métodos

2.1. Proceso de producción

El Sistema de Análisis Nodal, es usado para analizar problemas de producción en pozos de petróleo y gas [6]. El procedimiento puede ser aplicado en pozos con distintos sistemas de levantamiento artificial, expresando la presión como una función de la tasa de flujo. El procedimiento se puede aplicar para analizar el rendimiento en pozos inyectoros, considerando una apropiada modificación de las ecuaciones de entrada (*inflow*) y salida (*outflow*) de flujo [7]. A continuación se presenta una lista aplicaciones del sistema de análisis nodal [8]:

- Selección del diámetro de la tubería.
- Selección del diámetro de la línea de flujo.
- Diámetro del choque en superficie.
- Diámetro de la válvula de seguridad en subsuelo.
- Evaluación y simulación de pozos.
- Diseño del sistema de levantamiento artificial.
- Análisis los sistemas de producción multi-pozos.
- Determinación del caudal que produce un pozo.
- Diagnostico de la pérdida de capacidad de flujo de las líneas o tuberías.
- Selección y diseño de los controladores de flujo superficiales.
- Evaluación del efecto sobre el caudal de producción de un proceso de estimulación.
- Evaluación del efecto sobre el caudal de producción de un sistema de levantamiento artificial.
- Hallar alternativas para aumentar o controlar el caudal de producción de un pozo.

Todo lo mencionado anteriormente le concede vital importancia al análisis nodal en el estudio de procesos productivos de un pozo petrolífero y determina el comportamiento del pozo a corto, mediano y largo plazo ya que representa una herramienta de diagnóstico de las condiciones de flujo del sistema de producción en su totalidad.

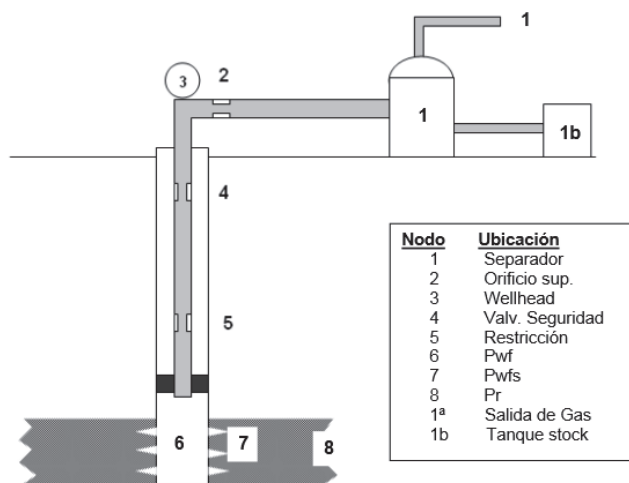


Figura 1. Sistema de producción petrolífera.

Fuente: Hirschfeldt [10]

La aplicación del análisis nodal a los sistemas de producción petrolíferos fue propuesta por Gilbert en 1954 y discutida por Nind & Brown en 1964 y 1978 respectivamente [9].

El procedimiento consiste en seleccionar un punto de división o nodo en el pozo y dividir el sistema en ese punto. Las ubicaciones más comunes usadas para los nodos se muestran a continuación en la Fig. 1.

Todos los componentes aguas arriba del nodo (*upstream*) comprenden la sección de entrada (*inflow section*), mientras que la sección de salida (*outflow section*) consiste en todos los componentes que se encuentran aguas abajo del nodo (*downstream*).

Una relación entre el caudal y la caída de presión debe estar disponible para cada componente del sistema. El flujo a través del sistema puede ser determinado una vez que los siguientes requerimientos son satisfechos:

- El flujo a la entrada del nodo es igual al flujo a la salida del mismo.
- Una sola presión existe en el nodo.

En un momento particular de la vida del pozo, hay siempre dos presiones que permanecen fijas y no son función del caudal. Una de esas presiones es la presión promedio del reservorio (P_r) y la otra es la presión de salida del sistema. La presión de salida es generalmente la presión del separador (P_{sep}), pero si la presión del pozo es controlada con un orificio en la superficie, la presión fija a la salida del sistema será P_{wh} .

Una vez que el nodo es seleccionado, la presión en el nodo es calculada en ambas direcciones, comenzando desde las fijas.

Entrada al Nodo (*inflow*)

$$P_r - \Delta p (\text{upstream componentes}) = p_{\text{nodo}}$$

Salida del Nodo (*outflow*)

$$P_{sep} + \Delta p (\text{downstream componentes}) = p_{\text{nodo}}$$

La caída de presión Δp , en cualquier componente varía con el caudal, q . Por lo tanto, un gráfico de la presión en el nodo versus el caudal producirá dos curvas, las cuales se interceptaran satisfaciendo las condiciones 1 y 2 antes mencionadas. El procedimiento es ilustrado en la Fig. 2.

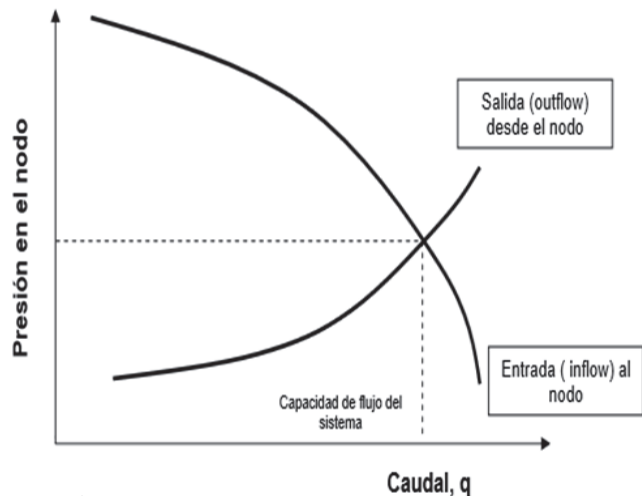


Figura 2. Intercepción de la curva de inflow con outflow.
Fuente: Hirschfeldt [10]

2.2. Flujo multifásico

El concepto de flujo multifásico involucra el flujo simultáneo de gas y líquido en tubería, donde este último puede ser una mezcla de agua, aceite y emulsión. Se puede presentar a través de todos los componentes de un sistema de producción: fondo del pozo, tubería de producción, estranguladores, válvulas, líneas de superficie, entre otros.

- Clasificación de Flujo Multifásico. Para su estudio se acostumbra dividir en: Flujo Vertical, Flujo Horizontal, Flujo Inclinado, Flujo Direccional
- Objetivo del Estudio de Flujo Multifásico. La finalidad del análisis del flujo multifásico se orienta en predecir la relación entre caudal (q_L) y caída de presión, ΔP para un sistema de producción específico.
- Aplicaciones del Estudio de Flujo Multifásico. Se pueden seleccionar y enumerar algunas aplicaciones del amplio rango de posibilidades encontradas en las operaciones de campo:
 - Predicción de las condiciones de presión de llegada de los fluidos a superficie con base en las condiciones de flujo en el fondo del pozo y viceversa.
 - Selección óptima y análisis del efecto de cada uno de los componentes de un sistema de producción utilizando la técnica conocida como análisis nodal.
 - Diseño métodos de levantamiento artificial.
 - Diseño de líneas de recolección y transporte.

Las diferentes correlaciones propuestas para resolver la ecuación de flujo general y hallar la relación entre caída de presión y caudal, para una situación particular dada, se suelen dividir en:

- Correlaciones Empíricas Generalizadas. Se caracterizan porque la fase gaseosa debido a su mayor movilidad y menor viscosidad presenta mayor velocidad que la líquida y en forma adicional el gas resbala y se desliza en el líquido. Consideran además las diferentes distribuciones geométricas de las fases en la tubería en función de

presión y temperatura. Tienen una fuerte componente empírico en la forma final de su modelo. Entre las más importantes están: Hagedorn & Brown; Orkiszewski, Beggs & Brill [11].

- Correlación de Hagedorn and Brown. Representa uno de los principales métodos empleados en el modelamiento de flujo multifásico vertical en tuberías y que se constituye en uno de los preferidos desde el punto de vista del tratamiento académico no solo porque conlleva un alto desarrollo analítico sino porque a partir de él se han planteado modelos más recientes y se conoce como la correlación de flujo generalizada de Hagedorn y Brown. No conviene con lograr llevar el fluido de producción hasta el cabezal del pozo, se requiere transportarlo por tubería hasta los centros de recolección y tratamiento. El diseño de las líneas superficiales afecta el funcionamiento completo de un sistema de producción y se hace despectivo un conocimiento de las teorías asociadas al flujo multifásico horizontal para un buen manejo del sistema.
- Correlaciones Generalizadas en Flujo Multifásico Horizontal. Varios trabajos como modelos de solución, entre ellos: Correlación de Duckler, Eaton Beggs and Brill
- Correlación de Duckler. Se caracteriza por utilizar una adaptación de la conocida ecuación de Fanning en flujo monofásico para encontrar el efecto de fricción. No considera regímenes de flujo. Desprecia el efecto aceleración; considerando el efecto de deslizamiento entre las fases. Presenta una correlación para encontrar el término de HoldUp en función el número de Reynolds de la mezcla y el factor de fricción bifásico.

3. Metodología

3.1. Hagedorn & Brown

Se requiere una presión conocida, la cual puede ser la del fondo del pozo (P_{wf}) o la existente en la cabeza del pozo P_{wh} , según la dirección del cálculo. Los cálculos se pueden realizar en la dirección de flujo o en contracorriente hacia el fondo del pozo.

$$-\frac{\Delta P_T}{\rho_m \Delta H} = 1 + \frac{V_m^2}{2g_c \Delta H} + \frac{f_m q^2 M^2}{c \rho_m^2 d^5} \quad (1)$$

Esta ecuación (1) se conoce como la ecuación de Hagedorn & Brown para flujo multifásico vertical. Donde

$C = 2.9652 \times 10^{11}$

ΔH = longitud, pies

ΔP = caída de Presión, Lbf / pie²

g_c = aceleración de la gravedad 32,2

ρ_m = densidad de Mezcla, lbm/pies³

M = masa asociada a un barril líquido, lbm/Bbl

q_L = caudal Líquido, en Bbl/d

d = diámetro en pies

f_m = factor fricción de mezcla

Para utilizar la expresión (1) se requiere tener la forma de hallar cada una de las variables contenidas, permite dos procedimientos alternos análogos:

Fijar un tramo de tubería de longitud ΔH y calcular ΔP_T o en forma alterna fijar ΔP_T y hallar el tramo ΔH correspondiente. Se presenta a continuación una propuesta de procedimiento partiendo del fondo del pozo y fijando un tramo ΔH .

Información necesaria. Presión de Fondo (Pwf), Profundidad Total (H_T), diámetro (dt), Caudal Líquido (ql), Gravedad del Agua (γ_w), Gravedad del gas (γ_g), Gravedad del Aceite (γ_o), Relación Agua - Petróleo (RAP), Relación Gas, Líquido (RGL), Tensión Superficial del Agua (σ_w), Tensión Superficial Aceite (σ_o), Gradiente Geotérmico (G_T), Temperatura Fluido en Superficie (T_{CN}), correlaciones P.V.T para hallar las propiedades físicas de los fluidos.

A continuación se enumeran los pasos propuestos:

1. Calcular la presión promedio $\bar{P}$, entre dos puntos de presión, en psi

$$\bar{P} = \frac{P_1 + P_2}{2} \quad (2)$$

2. Calcular la gravedad específica del petróleo

$$\gamma_o = \frac{141.5}{131.5 + API} \quad (3)$$

3. Calcular la masa asociada a un barril de petróleo (lbm/Bbl)

$$M(lbm/Bbl) = 350 \gamma_o f_o + 350 \gamma_w f_w + 0,0764 \gamma_g RGL \quad (4)$$

4. Calcular la densidad de la fase líquida

$$\bar{\rho}_L(lbm/Bbl^3) = \bar{\rho}_o f_o + \bar{\rho}_w f_w \quad (5)$$

5. Calcular la densidad de la fase gaseosa

$$\bar{\rho}_g(lbm/Bbl^3) = \frac{\rho_g}{B_g} \quad (6)$$

6. Calcular la viscosidad de la mezcla líquida y la tensión interracial de la mezcla líquida

$$\bar{\mu}_L = \bar{\mu}_o f_o + \bar{\mu}_w f_w \quad (7)$$

$$\sigma_L = \sigma_o f_o + \sigma_w f_w \quad (8)$$

7. Calcular la velocidad superficial líquida y gaseosa

$$\bar{V}_{sl}(Pie/seg) = 8,27 \times 10^{-5} \frac{q_L}{d^2} [\bar{B}_o f_o + \bar{B}_g f_g] \quad (9)$$

Donde d (pies) y q (Bbl/día)

$$\bar{V}_{sg}(Pie/seg) = 4,167 \times 10^{-7} \frac{q_g}{d^2} [RGL - \bar{R}_s f_o] \frac{\bar{Z}T}{\bar{P}} \quad (10)$$

8. Calcular la velocidad de la mezcla

$$\bar{V}_m = \bar{V}_{sl} + \bar{V}_{sg} \quad (11)$$

9. Calcular la densidad de mezcla

$$\rho_m = \bar{\rho}_L H_L + \bar{\rho}_g (1 - H_L) \quad (12)$$

10. Obtener el Holdup (H_L)

- Numero de velocidad líquida (N_{LV})

$$N_{LV} = 1,938 * \bar{V}_{sl}^4 \sqrt{\frac{\bar{\rho}_L}{\sigma_L}} \quad (13)$$

- Número de la velocidad del gas (N_{GV})

$$N_{GV} = 1,938 * \bar{V}_{sg}^4 \sqrt{\frac{\bar{\rho}_L}{\sigma_L}} \quad (14)$$

- Numero de Viscosidad Liquididad (N_L)

$$N_L = 0,15726 * \bar{\mu}_L^4 \sqrt{\frac{\bar{\rho}_L}{\sigma_L \sigma_L^3}} \quad (15)$$

- Número del diámetro (N_d)

$$N_d = 120,872 * d^2 \sqrt{\frac{\bar{\rho}_L}{\sigma_L}} \quad (16)$$

Para la combinación de grupos o correlaciones del Holdup se tiene en cuenta:

- Con el número de viscosidad liquididad (N_L) calculado se lee C_{NL} (Fig. 3).

$$\text{Grupo 1} = \frac{N_{LV} * N_L^{0,28}}{N_d^{2,14}} \quad (17)$$

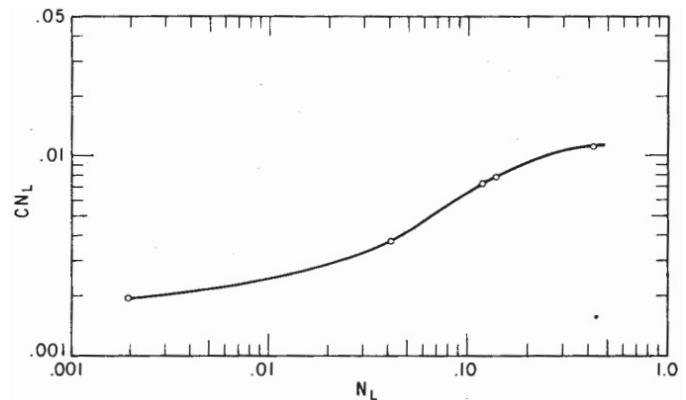


Figura 3. Correlación coeficiente índice de viscosidad. Fuente Hagedorn & Brown [4]

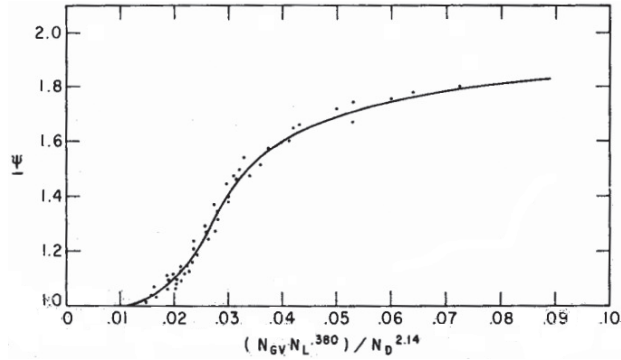


Figura 4. Correlación factor de corrección secundaria
Fuente Hagedorn & Brown [4]

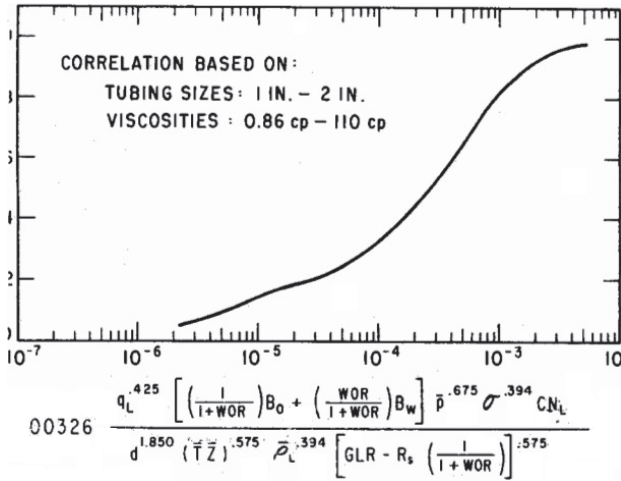


Figura 5. Factor de correlación.
Fuente Hagedorn & Brown [4]

- Con el valor calculado anteriormente, se lee ψ (Fig. 4).

$$\text{Grupo 2} = \frac{N_{LV}}{N_{GV}^{0.676}} \left(\frac{\bar{P}}{14.7} \right)^{0.10} * \frac{C_{NL}}{N_D} \quad (18)$$

- Con el valor calculado anteriormente, se lee el valor de $\frac{H_L}{\psi}$ (Figs. 5 y 3)

- Con los valores hallados utilizando las figuras se calcula:

$$H_L = \left(\frac{H_L}{\psi} \right) \psi \quad (19)$$

Retomando, con el valor del Holdup, se puede calcular:

ρ_m, μ_m, N_{Rem} y f_m .

Para calcular el f_m , se calcula el N_{Rem}

$$N_{Rem} = \frac{0.022 q_L M}{\mu_m d} \quad (20)$$

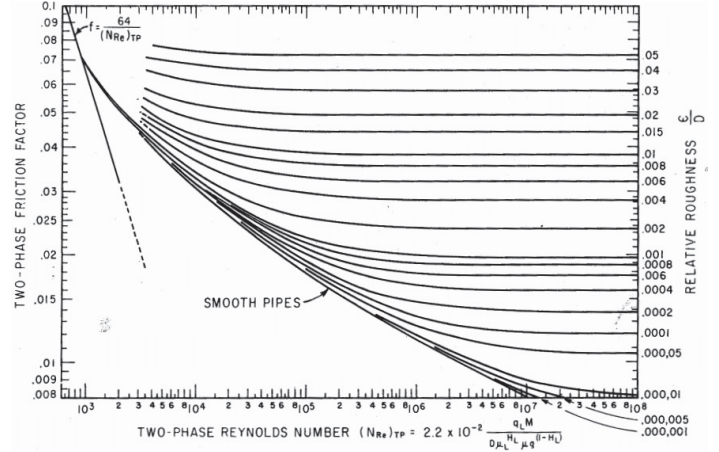


Figura 6. Correlación del factor de fricción.
Fuente Hagedorn & Brown [4]

Con el número de Reynolds y el término de rugosidad $\frac{e}{d}$, se entra a la Fig. 6 y se obtiene f_m . Luego se reemplaza en la ecuación de Hagedorn & Brown [4], las variables calculadas anteriormente.

3.2. Duckler

La forma general de la ecuación de Duckler, se escribe:

$$-\Delta P = 2 f_m V_m^2 \rho_m * L / g_c \quad (21)$$

V_m = velocidad de mezcla

ρ_m = densidad de mezcla

f_m = factor de fricción de la mezcla

1. Fijar un punto de partida, y calcular la presión promedio

$$\bar{P} = \frac{P_1 + P_2}{2} \quad (22)$$

2. Calcular los caudales de flujo volumétrico de líquido de gas en (pie^3/seg)

$$\bar{q}_L = 6.49 \times 10^{-5} (\bar{q}_L * \bar{B}_L + \bar{q}_W * \bar{B}_W) \quad (23)$$

$$\bar{q}_G = 3.27 \times 10^{-5} (\bar{q}_G * \bar{B}_G + \bar{q}_W * \bar{B}_W) \quad (24)$$

3. Calcular la fracción líquida

$$\lambda = \frac{\bar{q}_L}{\bar{q}_L + \bar{q}_G} \quad (25)$$

4. Calcular la densidad del líquido y del gas

$$\bar{\rho}_L (\text{lbm} / \text{Bbl}^3) = \bar{\rho}_o f_o + \bar{\rho}_w f_w \quad (26)$$

$$\bar{\rho}_g (\text{lbm} / \text{Bbl}^3) = \frac{\rho_g}{B_g} \quad (27)$$

5. Calcular la velocidad de la mezcla

$$v_m = \frac{Q_g + Q_l}{A} \quad (28)$$

6. Hallar la viscosidad de la mezcla

$$\mu_m = \mu_l \times \lambda + (1 - \lambda) 0.000672 \quad (29)$$

7. Estimar el valor del HoldUp H_L

8. Calcular el valor de la densidad de la mezcla.

$$\rho_m = \bar{\rho}_l \times \frac{\lambda^2}{H_L} + \bar{\rho}_g \left(\frac{(1-\lambda)^2}{(1-H_L)} \right) \quad (30)$$

9. Hallar el número de Reynolds de la mezcla.

$$N_{Rem} = \frac{d \times v_m \times \rho_m}{\mu_m} \quad (31)$$

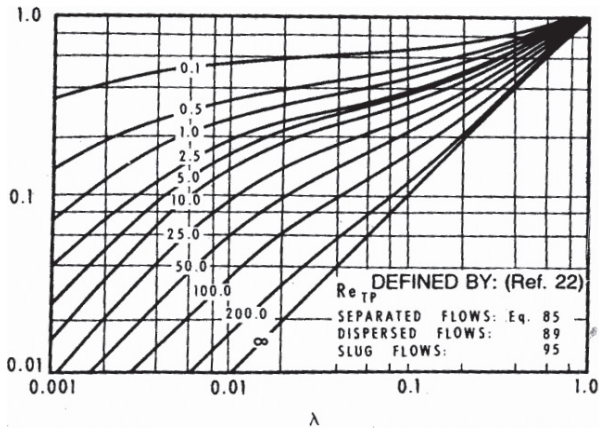


Figura 7. Correlación Duckler.
Fuente: Duckler [5]

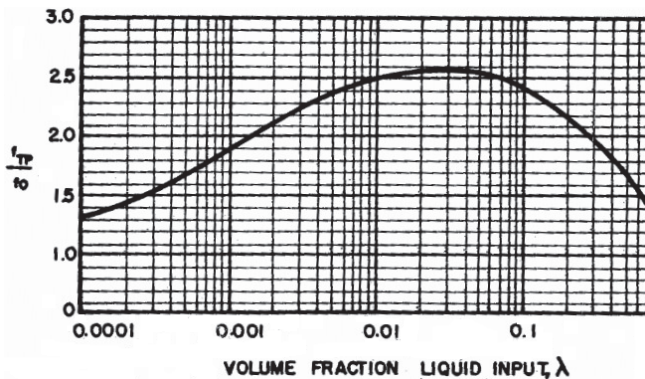


Figura 8. Segunda fase de los factores del flujo de fricción.
Fuente: Duckler [5]

10. Con el valor λ , del paso 3 y con el número de Reynolds calculado se entra a la Fig. 7 y se lee el valor de H_L y se compara con H_L supuesto si no compara se toma el valor calculado como el nuevo valor supuesto y se repite el procedimiento.

La correlación para el factor de fricción bifásico, f_{TP} , está en función de λ y de un factor de fricción f_o que sería el factor de fricción que se obtendrá si por la tubería solo estuviera fluyendo fase líquida.

11. De la Fig. 8 se obtiene $\frac{f_{TP}}{f_o}$.

12. Hallar el valor de fricción asociado al flujo monofásico de aceite:

$$f_o = 0.0014 + \frac{0.125}{(N_{Re,TP})^{0.22}} \quad (32)$$

13. Hallar el valor de fricción bifásico con la correlación de Duckler.

$$f_{TP} = \frac{f_{TP}}{f_o} \times f_o \quad (33)$$

14. Finalmente se obtiene la caída de presión por Duckler y comparar con el valor supuesto.

4. Resultados y discusión

Se diseñaron dos algoritmos para validar la metodología compuesta por los dos procedimientos. Luego se codificaron en un lenguaje visual y se obtuvieron pruebas con relación a métodos tradicionales. Las variables utilizadas en ambos algoritmos fueron (Tabla 1):

Tabla 1.
Variables utilizadas en ambos algoritmos.

Variable	Descripción
L	Longitud de la línea (ft)
API	Densidad del crudo (API)
PP	Presión promedio (Lpc)
TP	Temperatura promedio (Rankine)
f_o	Corte de petróleo
f_w	Corte de agua
RGL	Relación gas-líquido (PCN/BN)
Y_g	Gravedad específica del gas
Y_w	Gravedad específica del agua
Bo	Factor volumétrico del petróleo
B_w	Factor volumétrico del agua
Rs	Relación de solubilidad (PCN/BN)
Z	Valor para Z
u_o	Viscosidad del petróleo (Cp)
u_w	Viscosidad del agua (Cp)
u_g	Viscosidad del gas (Cp)
d_l	Diámetro de la línea (ft)
Q_l	Caudal líquido (BPD)
Q_o	Caudal de petróleo (BPD)
Q_w	Caudal de agua (BPD)
P_i	3.14159265358979
Y_o	141.5 / (131.5 + API)

Fuente: los autores

4.1. Hagedorn & Brown

A continuación, se presenta el algoritmo diseñado para el procedimiento Hagedorn & Brown [4].

Algoritmo 1. Hagdorn & Brown. Fuente: los autores

```

Qlpr = (6.49 * 10-5) * (Qo * Bo + Qw * Bw)
ul = uo * fo + uw * fw
dlpr = ((Yo * 62.4 + ((0.0764 * Yg * Rs) / 5.615)) / Bo) * fo + (62.4 * Yw
      * fw) / Bw
Imprima Yo, Qlpr, ul, dlpr
If PP = 0 or TP = 0 Then
  Qgpr = 0
  Imprima Qgpr
  Lan = 1
  Imprima Lan
  Dgpr = 0
  Imprima Dgpr
  Vm = (Qlpr) / ((Pi * dl2) / 4)
  Imprima Vm
  utp = (ul * Lan + ug * (1 - Lan)) * 0.000672
  Imprima utp
  Dtp = dlpr
  Imprima Dtp
  Nretp = (dl * Vm * Dtp) / utp
  Imprima Nretp
  fo = 0.0014 + 0.125 / (Nretp0.32)
  Imprima fo
  ftp = fo
  deltapf = (2 * ftp * L * Vm2 * Dtp) / (32.2 * dl * 144)
  Imprima deltapf
  Imprima "Las pérdidas por fricción del sistema son", deltapf
  Lea psep
  pwh = psep + deltapf
  Imprima pwh
  Imprima "La presión en cabeza necesaria del sistema es", pwh
Endif

```

4.2. Duckler

A continuación se presenta el algoritmo diseñado para el procedimiento Duckler [5].

Algoritmo 1. Duckler. Fuente: los autores

```

Qgpr = (3.27 * 10-7) * Ql * (RGL - Rs * fo) * (Z * TP / PP)
Imprima Qgpr
Lan = Qlpr / (Qlpr + Qgpr)
Imprima "El valor de la fracción líquida (Landa) es", Lan
Dgpr = (0.0764 * Yg * 520 * PP) / (14.7 * Z * TP)
Imprima Dgpr
Vm = (Qlpr + Qgpr) / ((Pi * dl2) / 4)
Imprima Vm
utp = (ul * Lan + ug * (1 - Lan)) * 0.000672
Imprima utp
Imprima "Asumir inicialmente que el valor de Holdup es igual a la fracción
      líquida"
HL = Lan
C = 0
DIF = 5
Imprima "Se realizará un proceso iterativo hasta que el valor de Holdup
      calculado alcance una tolerancia del 5% como máximo respecto a
      la misma variable leída en gráfica"
Do While ((DIF > 0.05) and (C <= 30))
  If HL = 1 Then
    DIF = 0.0001
    C = 50
    Imprima "No es posible que Holdup sea 1 porque hay gas"
  Else
    Dtp = dlpr * (Lan2 / HL) + Dgpr * ((1 - Lan)2 / (1 - HL))
    Nretp = (dl * Vm * Dtp) / utp
    Imprima "El valor del número de Reynold de las 2 fases es",
      Nretp
    Imprima "Con el valor del Número de Reynold y la fracción
      líquida mostrados, se procede a leer de la gráfica el valor
      del Holdup"
    Leer HL1
    DIF = Abs(HL - HL1) / HL1
    HL = HL1
    C = C + 1
  End If
Loop
If HL = 1 Then
  Imprima "Verificar información suministrada porque hay error en

```

```

Else
  Imprima "El valor final de Holdup es", HL
  Dtp = dlpr * (Lan2 / HL) + Dgpr * ((1 - Lan)2 / (1 - HL))
  Imprima Dtp
  Nretp = (dl * Vm * Dtp) / utp
  Imprima "Nretp", Nretp
  fo = 0.0014 + 0.125 / (Nretp0.32)
  Imprima "fo", fo
  Imprima "Al haber gas en el fluido se calcula el cociente Ftp/fo
      mediante gráfica adjunta en el trabajo escrito, la cual depende
      del valor de fracción líquida"
  Imprima "Ingrese el valor del cociente entre ftp/fo y fracción de
      líquido, leído de gráfica"
  Lea CFTPFO
  ftp = CFTPFO * fo
  Imprima "ftp", ftp
  deltapf = (2 * ftp * L * Vm2 * Dtp) / (32.2 * dl * 144)
  Imprima "Deltapf", deltapf
  Imprima "Las pérdidas por fricción del sistema son", deltapf
  Imprima "Ingrese la presión del separador(Lpc)"
  Lea psep
  pwh = psep + deltapf
  Imprima "Pwh", pwh
  Imprima "La presión en cabeza necesaria del sistema es", pwh
End If

```

4.3. Interfaz

Luego de ingresar diversos datos provenientes de producción por flujo natural se obtuvieron excelentes resultados, ya que la información arrojada por el algoritmo es coherente. Cabe anotar que al modificar los datos arbitrariamente se presentaban errores, lo cual se debe al requerimiento básico de proporcionar información lógica al programa para que funcione adecuadamente. Esto con miras a realizar una eficiente lectura de las gráficas anexas. Además los resultados obtenidos fueron cerciorados detalladamente mediante el uso de herramientas comerciales. Para validar los algoritmos se utilizaron las variables de la Tabla 1.

Las Figs. 9 y 10 presentan la interfaz gráfica con los resultados conseguidos para el análisis nodal en tubería y análisis nodal en línea respectivamente.

VARIABLES	UNIDADES	MAGNITUD
To	-----	0.8498498
M	Lbm/ftl	361.0077
DI	Lbm/ft ³	58.99568
ul	Cp	5.55
Cl	Dyn/cm	50
Vsl	ft/seg	1.800616
Dg	Lbm/ft ³	4.697006
Ysg	ft/seg	1.063206
Vm	ft/seg	2.863822
Nlv	-----	3.636952
Ngr	-----	2.147922
NI	-----	1.674861E-02
Hd	-----	27.35325
Grupo1	-----	3.818093E-04
Grupo2	-----	3.8098E-04
Hf	-----	0.6
Dm	Lbm/ft ³	37.27621
um	Cp	0.4937242
Nrem	-----	69508.1
GP	Lpc/ft	-0.2642784
Qop	BD	625.3607

Figura 9. Interfaz del programa de análisis nodal en tubería con gas en solución.

Fuente: los autores

VARIABLES	UNIDADES	MAGNITUD
Yo		0,8498498
H	Lbm/Bbl	341,2237
Di	Lbm/Rt ³	58,99568
Lf	Cp	5,55
Cl	Dynal/cm	50
Vd	Rtseg	1,800615
Dg	Lbm/Rt ³	0
Ysg	Rtseg	1,800615
Vm	Lbm/Rt ³	58,99568
Dm	Cp	5,55
um		5843,235
Wem	Lpc/Rt	-0,4127484
GF	BPD	303,867
Qep		

Figura 10. Interfaz del programa de análisis nodal en tubería con gas en solución.

Fuente: los autores

4.4. Comparativo con métodos tradicionales

A continuación se presentan dos graficas comparativas entre los dos algoritmos y el método tradicional (Figs. 11 y 12). Se realizaron veinte pruebas en donde el resultado demuestra que los algoritmos son más eficientes que el método tradicional. Se evaluaron variables como rapidez, confiabilidad de la respuesta, manejo de los datos, reducción del índice de error, facilidad, entre otras.

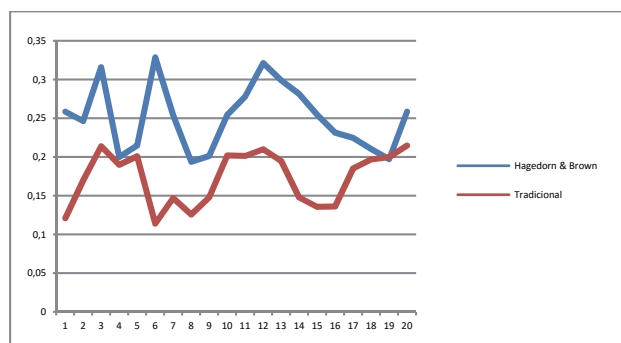


Figura 11. Resultados de la validación del algoritmo Hagedorn & Brown vs. procedimiento tradicional.

Fuente: los autores

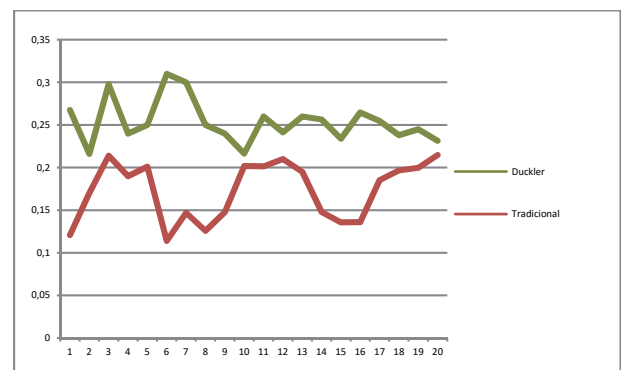


Figura 12. Resultados de la validación del algoritmo Duckler vs. procedimiento tradicional.

Fuente: los autores

5. Conclusiones

Las correlaciones presentes para resolver el problema de flujo multifásico planteadas en este trabajo sirven para obtener una visión gen eral de cómo es su análisis de flujo en tuberías.

La implementación de los algoritmos permite automatizar y modernizar los procedimientos eliminando los cálculos manuales. El uso de un lenguaje de programación visual para resolver este tipo de problemas implica ser sumamente cuidadoso al momento de programar ya que pueden presentarse inconvenientes en el tiempo de ejecución y entrada de datos.

Los resultados obtenidos fueron coherentes y tienen una alta confiabilidad al momento de resolver problemas de comportamiento de pozos. Los tiempos de solución disminuyen dramáticamente, ya que problemas como los resueltos en el presente trabajo sin el uso de un algoritmo pueden llegar a tardar hasta 90 minutos, a diferencia de solo cinco minutos que requiere el aplicativo que implementa el algoritmo para entregar datos confiables, los cuales pueden ser utilizados en gráficas.

Así mismo, este análisis permite tener una perspectiva técnica respecto a decisiones relacionadas con costos de producción en cualquier compañía petrolífera. Esto se consigue mediante la implementación de los resultados obtenidos en el algoritmo computacional en un marco administrativo.

Referencias

- [1] Gilbert, W., Flowing and gas lift well performance. API Drill. Prod. Practice, 1954
- [2] Odair, G.S., Sergio, N.B. and Francisco, J.S.A., Study of the dynamics, optimization and selection of intermittent gas-lift methods comprehensive model. JPSE, 32, pp. 231-248. 2001. DOI: 10.1016/S0920-4105(01)00164-4
- [3] Golan, M., Whitson, C.H., Well Performance. 2nd ed. Prentice Hall. New Jersey. 1991.
- [4] Hagedorn, A.R. and Brown, K.E., Experimental study of pressure gradients occurring during continuous two-phase flow in small-diameter vertical conduits. Journal of Petroleum Technology, 17(04), pp. 475-484, 1965. DOI: 10.2118/940-PA
- [5] Duckler, A.E. et al., Gas-Liquid Flow in Pipelines, I. Research Results. AGA-API Project NX-28, 1969.
- [6] Nind, T.E.W., Principals of well production. McGraw-Hill, 1964.
- [7] Brown, K.E. and Beggs, H.D., The technology of artificial lift methods. Penn Well Publ. Tulsa, Oklahoma, 1978.
- [8] Clegg, J.D., High-rate artificial lift. Journal of Petroleum Technology, 40(03), pp. 277-282, 1988. DOI: 10.2118/17638-PA
- [9] Briceño, D. and Jaramillo, J., Herramienta multimedia para el estudio y diseño de métodos de producción en la industria de los hidrocarburos. Tesis de Grado Ingeniería de Petróleos. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 2011.
- [10] Hirschfeldt, M., Análisis de un sistema de producción y análisis nodal. Reporte técnico. OilProduction.net. 2014
- [11] Kermit, E., Brown, S. and James, F., Nodal systems analysis of oil and gas wells, Journal of Petroleum Technology, 37(10), pp. 1751-1763, 1985. DOI: 10.2118/14714-PA

R. Salazar, es Ing. de Petróleos de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. MSc. en Dinámica de Sistemas y MBA otorgados por las Universidades de Bergen, Radboud y Palermo. Ha publicado artículos para la conferencia internacional en dinámica de sistemas y participado en proyectos académicos en Noruega, Holanda e

Italia, referentes a la toma de decisiones, diseño y evaluación de políticas mediante modelamiento y simulación computacional. Actualmente analiza e investiga las decisiones que son implementadas en organizaciones públicas y privadas de diverso índole, mediante el uso de un enfoque sistémico, causal y endógeno basado en el Dynamic Performance Management.
ORCID: 0000-0001-7946-9546

J. Caicedo, es Ing. de Petróleos de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. Actualmente labora en una empresa del sector petrolero en Colombia.
ORCID: /0000-0003-0684-5349

J. Jiménez, es Lic. en Docencia de Computadores de la Universidad de Medellín, Colombia MSc. en Ingeniería de Sistemas y Dr. en Ingeniería – Sistemas, ambos de la Universidad Nacional de Colombia. Es Profesor Titular de la Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia y Director del grupo de investigación Inteligencia Artificial en Educación.
ORCID: 0000-0001-7598-7696

NORMAS DE PUBLICACIÓN - BOLETIN CIENCIAS DE LA TIERRA

Instrucciones a los Autores

La Revista **Boletín Ciencias de la Tierra** pretende dinamizar la discusión científica en torno al conocimiento del territorio colombiano, sus recursos y restricciones; publicará tanto artículos de análisis específicos como de interés regional, que promuevan el desarrollo de las ciencias de la tierra. Se publican artículos originales resultados de investigación en las diferentes áreas de las Geociencias, todos los artículos se someten a revisión por pares o árbitros académicos de conocida idoneidad en el tema.

«**Boletín Ciencias de la Tierra**» publicará dos números al año anual 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. Todo lo publicado se considerará propiedad de «**Boletín Ciencias de la Tierra**» y solo podrá ser reproducido total o parcialmente con el permiso expreso del director.

La revista publica artículos sobre las siguientes áreas:

Geodinámica	Geología Regional	Paleontología
Geofísica	Geomorfología	Vulcanología
Georecursos	Geotecnia	Estratigrafía
Geografía	Geología Ambiental	Petrografía
Geomecánica	Aprovechamiento y explotación de recursos	Petrofísica

Los artículos que sean publicados en la revista **Boletín Ciencias de la Tierra** podrán ser también publicados en la versión electrónica de la revista, en Internet, así como en otros formatos electrónicos (CD-ROM y otros) que surjan en el futuro, aceptando los autores de los artículos éstas y otras formas de publicación virtual o digital. La revista **Boletín Ciencias de la Tierra** asume para la publicación de los artículos las «Normas Vancouver y Harvard» con las especificaciones que se detallan a continuación. Los criterios que se aplicarán para valorar la aceptación de los artículos serán el rigor científico metodológico, novedad, trascendencia del trabajo, concisión expositiva, así como la calidad literaria del texto. El Comité Editorial podrá rechazar, sugerir cambios o llegado el caso, realizar modificaciones en los textos recibidos; en este último caso, no se alterará el contenido científico, limitándose únicamente al estilo literario.

TIPOS DE SECCIONES

1. Editorial

Trabajos escritos por encargo del Comité Editorial, o bien, redactados por alguno de sus miembros. Su extensión no debe ser superior a 6 páginas; la bibliografía si la hay, no debe contener una cifra superior a 10 citas. Esta editorial debe ser puesta a consideración del Comité Editorial para su aprobación final.

2. Artículos de Investigación y Ensayos

Son trabajos que versen sobre resultados de investigaciones o ensayos en las áreas de geociencias, definidas con anterioridad. Deben tener las siguientes características: No debe superar 25 páginas escritas a doble espacio, debe tener máximo 6 tablas y 8 figuras y no superar las 50 citas bibliográficas. La estructura generalmente utilizada contiene cuatro partes: Introducción, Metodología, Resultados y Conclusiones.

3. Artículos de Reflexión

Son documentos que presentan resultados de investigación desde una perspectiva analítica, interpretativa o crítica del autor, sobre temas específicos de las geociencias en las áreas definidas anteriormente; recurriendo a las fuentes originales. No debe superar 20 páginas escritas a doble espacio, un máximo de 4 tablas y figuras en total y no superar las 10 citas bibliográficas.

4. Artículos de Revisión

Documentos resultados de una investigación donde se analizan, sistematizan e integran los resultados de investigaciones publicadas o no publicadas, sobre el campo de las geociencias, con el fin de dar cuenta de los avances y las tendencias de desarrollo de los temas citados anteriormente. Se caracterizan por presentar una cuidadosa revisión bibliográfica de por lo menos 50 referencias.

5. Comunicación Breve y Reseñas

Esta sección permitirá publicar artículos breves, con mayor rapidez, facilita que los autores presenten observaciones, resultados iniciales de investigaciones en curso, revisiones de libros e incluso realizar comentarios a trabajos ya publicados en la revista. El texto debe tener hasta un máximo de 8 páginas, 4 tablas y figuras en total y no superar las 15 citas bibliográficas.

6. Imagen diagnóstica. (Reporte de Casos)

En esta sección de la revista se presentarán casos singulares en los que la imagen sea resolutoria. Para ello, se aportarán una o como máximo dos imágenes, o casos diagnósticos, de cualquier rama de las ciencias de la tierra y acompañada de un breve comentario en relación con el caso. La extensión no será menor de 15 líneas escritas a doble espacio. Esta página se remitirá junto a otra, de presentación, con la información del autor o autores y que se detalla adelante.

8. Traducciones

Se presentan traducciones de textos clásicos, o de actualidad, o transcripciones de documentos históricos o de interés particular en el dominio de publicación de la revista.

7. Noticias de Eventos

Incluirá breve información que anunciará eventos relacionados con el tema de las geociencias. No tiene ningún costo.

PRESENTACIÓN DE LOS TRABAJOS

La presentación de un artículo al Comité Editorial de la Revista deberá ir acompañada de una carta de compromiso, en la cual el autor exprese que el artículo no ha sido publicado, o sometido a consideración para ser publicado, en otra publicación o revista técnica similar. En esta carta también se debe especificar si el artículo ha sido publicado en otro medio de diferente alcance divulgativo como memorias de seminarios, periódicos, separatas, etc., justificando su posible publicación en la revista. Los autores que deseen colaborar en algunas de las secciones de la revista deben enviar sus aportes (por duplicado) a la redacción de la misma, entendiéndose que ello no implica la aceptación del trabajo, que será notificada por escrito al autor. Todos los artículos se someten a revisión por pares o árbitros académicos de conocida idoneidad en el tema.

Siempre se presentará el artículo en Word, en letra arial 11 puntos, escritos a 1 ½ espacio, en una sola cara, en hojas tamaño CARTA (21.6 x 27.9 cm) y dejando las siguientes márgenes: 3 cm a la izquierda, 3 cm en la superior, 2 cm a la derecha y 2 cm en la inferior.

Los artículos deben ir acompañados de una carta de sometimiento de la publicación a la revista. En ésta se debe incluir una declaración en la que se aclare que el artículo es aprobado por todos los autores consulte el Modelo de Carta en: 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. Deberán acompañarse copias de los permisos para reproducir material ya publicado.

LA PRIMERA HOJA comprenderá:

- El título del trabajo en español e inglés, que siempre será lo más breve posible y, cuando sea necesario, irá acompañado de un subtítulo que lo amplíe.
- Nombre completo de los autores, con la máxima calificación académica o profesional de los mismos.
- Centro/s donde se ha realizado el trabajo y cargo de autor/es en dicho centro.
- A pie de página se colocará una nota que diga: «Enviar correspondencia a », indicando el nombre, la dirección, el teléfono y el e-mail de al menos uno de los autores.

LA SEGUNDA HOJA incluirá:

Un resumen del trabajo presentado, así como su traducción correcta al inglés. Dicho resumen será de alrededor de 200 palabras. Se recomienda encarecidamente cuidar la ortografía y sintaxis de la versión en inglés, para evitar ulteriores correcciones. El resumen debe tratar de especificar dentro de lo posible: los objetivos del estudio o investigación, la metodología fundamental utilizada, los principales resultados y las conclusiones más importantes y novedosas.

Debe incluir también PALABRAS CLAVE:

A continuación del Resumen los autores deberán presentar, e identificar como tales, en español y en inglés, entre 3 y 10 palabras clave o expresiones breves que faciliten a los encargados de la indexación la clasificación cruzada del artículo y que se publicarán junto con el resumen.

LA TERCERA HOJA dará inicio al texto del artículo. Cuando se considere apropiado, la última página del texto podrá contener una nota de agradecimiento por distintas colaboraciones, becas, ayudas, etc. que se refieran al trabajo presentado.

CON RESPECTO A LAS REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS: Las normas indican usar dentro del texto el nombre del autor o autores (hasta un máximo de 3, y si hay más se pone et al.) seguido con un paréntesis que incluye el año de publicación. **Ej:** (Martínez, 1988), (Etayo et al, 2000)

LA BIBLIOGRAFÍA se incluye al final del artículo por orden alfabético, siguiendo en la cita el siguiente orden:

Autores (Apellido, Inicial Nombre.), año. Título del artículo ó Nombre del libro. Casa Editorial, Ciudad, ó nombre de la revista, volumen y número, número de la página inicial y final ó total de páginas (pp. xx- xx, ó xxx P).

Algunos ejemplos:

Méndez, F. J., 1998. Contribución al estudio sobre el uso de aguas residuales con fines de riego. Trabajo de ascenso Universidad Central de Venezuela. Facultad de Agronomía. Maracay. 128 P.

Peiró, A. M., Ayllón, J. A., et al, 2001. TiO₂-Photocatalyzed Degradation of Phenol and Ortho-substituted Phenolic Compounds. Applied Catalysis B: Environmental 30, pp. 359–373.

APHA-AWWA-WPCF, 1992. Standard methods for examination of water and wastewater. Amer. Pub. Health Assoc. Washington, D. C.

Trate, en general, de evitar referencias de resúmenes, comunicaciones personales o no publicadas. Los trabajos aceptados pero aún no publicados, inclúyalos como «En prensa».

Consultas en Internet:

Parker, E., 1989. Re: Citing Electronic Journals. En: PACS-L (Public Access Computer Systems Forum) [en línea]. Houston (Tex.): University of Houston Libraries, 24 November; 13:pp. 29:35 CST [citado 1 enero 1995;16:15 EST]. Disponible en Internet: <telnet://brsuser@a.cni.org>.

Harnak, A.; Kleppinger, E. Online! A reference guide to use internet sources [en línea]. Bedford/St. Martin's, actualización 2001 [Consulta 9 septiembre 2002]. Chapters 5-8. Citation styles. <<http://www.bedfordstmartins.com/online/citex.html>>

PAUTAS GENERALES DE PRESENTACIÓN

1. Numere todas las páginas del texto, bibliografía incluida.
2. Numere cada sección del artículo en números arábigos. Para los artículos resultados de investigación, éstas son: Resumen, Introducción, Material y Métodos, Resultados y Discusión, Conclusiones.
3. Envíe dos copias completas (texto e ilustraciones) del artículo

TABLAS Y FIGURAS

Use letras, flechas, etc., tipo Letraset, nunca manuales. Deberán limitarse al mínimo imprescindible. Las Tablas, Mapas, Gráficos y Figuras se publicarán en blanco y negro, por lo que deben presentarse con la mejor calidad y cuidando al máximo la distorsión de información al pasarla a escalas de grises. Deben estar numeradas y su título será suficientemente explicativo y breve sin tener que referirse al texto. El autor ubicará cualquiera de éstas, seguido a la cita en el texto. Debajo de la Tabla, Gráfico o Esquema se definirán brevemente las abrogaciones usadas, cuando no sean standard. Asegúrese de que cada Tabla o Figura estén citados en el texto. La numeración y el título de las Gráficas y Figuras se sitúa debajo de ellas, al contrario de las Tablas.

Construya las Tablas en formato Word o Excel. No se aceptarán Tablas en formato tipo imagen. Los Gráficos, Esquemas y Fotografías deben ser de buena calidad, en blanco y negro preferiblemente y **en formato jpg o gif**; si las inserta en el documento de word deben quedar con impecable resolución (300 dpi); si las anexa separadas, en su dorso vendrán numeradas, con un título, y explicando la ubicación que les corresponde dentro del texto. **Las Fotografías** deben ser de buena calidad y en blanco y negro preferiblemente, **entregadas en formato .jpg o .gif**. Siempre vendrán numeradas, con un título, y explicando la ubicación que les corresponde dentro del texto.

OTRAS CONSIDERACIONES

El autor siempre conservará una copia del trabajo. Cada manuscrito será sometido a un proceso de evaluación por pares seleccionados de una lista de evaluadores. El Comité Editorial decidirá o no su publicación y sugerirá posibles modificaciones cuando lo crea oportuno. Todo este trámite será lo más breve posible. El Comité Editorial de la Revista acusará recibo de los originales e informará al autor sobre su aceptación.

La redacción de la revista pondrá el máximo cuidado en evitar errores en la transcripción definitiva de los artículos enviados, no obstante no se responsabiliza de los errores que puedan aparecer. Si los autores detectaran errores importantes deberán dirigirse cuanto antes a la redacción para poder realizar una fe de erratas en el siguiente número de la revista.

La redacción se reserva el derecho de realizar pequeñas adecuaciones en los títulos de los artículos, en los resúmenes, así como rectificaciones menores en la redacción de los artículos y en las traducciones de los Resúmenes/Abstracts, aunque la política general que se seguirá será la de consultar a los autores sobre estas cuestiones.

NOTA: Para envíos de artículos, ingrese al Sistema Open Journal System (OJS) a: <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/rbct/login>

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. 40

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

En Todográficas Ltda.

Medellín - Colombia

Occurrence of chloritoid-bearing metapelitic rocks and their significance in the metamorphism of the Silgará Formation at the Central Santander Massif
Oscar Mauricio Castellanos-Alarcón, Carlos Alberto Ríos-Reyes & Carlos Alberto García-Ramírez.

Geology, lithostratigraphy, determination of the quality and classification of carbones of Espino-Boyacá, Colombia
Jenny Esmeralda Velandia-Tarazona, María Esther Rivera, Jesús Ramón Delgado-Rodríguez & Jorge Mario Monroy-Gallo.

Stratigraphic analysis and calculation of reserves in the Colorado field, MMV, Colombia
Ricardo Mier-Umaña, Tania Sarith Palmera-Henao, Juan Sebastian Luna-Osorio & Leidy Alexandra Delgado-Blanco.

Drilling grid blasting upgrading based on Geological Strength Index (GSI), case “La Maruja” mine, Colombia
Camilo Andrés Ortega-Ramos, Andrés Felipe Jaramillo-Gil & Jorge Martín Molina-Escobar.

Failure potential index for slopes conditioned by landforms
Sebastián Camacho-Orozco & Alfonso Mariano Ramos-Cañón.

Review of fossiliferous localities at Antioquia department, Colombia
Yenny Paola Valencia-Giraldo, Luis Carlos Escobar-Arenas, Juliana Mendoza-Ramírez, Daniel Delgado-Sierra, Andrés Leonardo Cárdenas-Rozo.

Biological and physicochemical evaluation of mortar as substrate for manufacturing artificial reef
Monica Andrea Bedoya-Gutiérrez, Jorge Iván Tobón, Tatiana Correa-Herrera & Juan Diego Correa-Rendón.

Efecto del glicerol en la inhibición de la combustión espontánea de carbón sub-bituminoso
Esteban Alberto Taborda-Acevedo, William J. Jurado & Farid B. Cortés-Correa.

Toma de decisiones mediante el uso de un algoritmo para analizar los sistemas de producción de hidrocarburos
Robinson Stevens Salazar-Rúa, Johan Darío Caicedo-Reyes & Jovani Alberto Jiménez-Builes.

Occurrencia de rocas metapelíticas con presencia de cloritoide y su significado en el metamorfismo de la Formación Silgará en la región central del Macizo de Santander
Oscar Mauricio Castellanos-Alarcón, Carlos Alberto Ríos-Reyes & Carlos Alberto García-Ramírez.

Geología, litoestratigrafía, determinación de la calidad y clasificación de carbones de El Espino-Boyacá, Colombia
Jenny Esmeralda Velandia-Tarazona, María Esther Rivera, Jesús Ramón Delgado-Rodríguez & Jorge Mario Monroy-Gallo.

Análisis estratigráfico y cálculo de reservas del Campo Escuela Colorado, VMM, Colombia
Ricardo Mier-Umaña, Tania Sarith Palmera-Henao, Juan Sebastian Luna-Osorio & Leidy Alexandra Delgado-Blanco.

Modificación de las mallas de perforación de voladuras a partir del índice de esfuerzo geológico (GSI), caso mina “La Maruja”, Colombia
Camilo Andrés Ortega-Ramos, Andrés Felipe Jaramillo-Gil & Jorge Martín Molina-Escobar.

Indicador potencial de falla para taludes condicionados por las geoformas
Sebastián Camacho-Orozco & Alfonso Mariano Ramos-Cañón.

Revisión de las localidades fosilíferas del departamento de Antioquia, Colombia
Yenny Paola Valencia-Giraldo, Luis Carlos Escobar-Arenas, Juliana Mendoza-Ramírez, Daniel Delgado-Sierra, Andrés Leonardo Cárdenas-Rozo.

Evaluación biológica y fisicoquímica de un mortero como sustrato para la fabricación de arrecifes artificiales
Monica Andrea Bedoya-Gutiérrez, Jorge Iván Tobón, Tatiana Correa-Herrera & Juan Diego Correa-Rendón.

Glycerol effect on the inhibition of spontaneous combustion of sub-bituminous coal
Esteban Alberto Taborda-Acevedo, William J. Jurado & Farid B. Cortés-Correa.

Decision making by using a computer algorithm to analyze hydrocarbon production systems
Robinson Stevens Salazar-Rúa, Johan Darío Caicedo-Reyes & Jovani Alberto Jiménez-Builes.