

Pronóstico de áreas de ocurrencia de zeolitas mediante análisis espectral de imágenes en las secuencias volcánicas de los Pequeños Limbombos, Mozambique

Zeolites occurrences prognostic using image spectral analysis in the volcanic sequences of Pequeños Lembombos, Mozambique

Elmidio Estévez Cruz¹, Gerardo Antonio Orozco Melgar²

¹Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Titular. Universidad de Pinar del Río, Cuba. estevez@upr.edu.cu

²Doctor en Ciencias Geológicas. Profesor Titular. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba. gorozco@ismm.edu.cu

Resumen

Con el propósito de evaluar la potencialidad para contener zeolitas microcristalinas de las lavas basálticas de la formación Movene (supergrupo Karoo) se emplearon, de manera integrada, itinerarios de reconocimiento, análisis mineralógico de fases y métodos de procesamiento digital de imágenes para identificar zonas espectralmente similares a las de las zeolitas determinadas. Las muestras de lavas con zeolitas se sometieron a análisis de difracción de rayos X para determinar las fases minerales. Las imágenes del Landsat 8 se procesaron con herramientas estándares como composición de colores, razones de banda y métodos de clasificación supervisada. La interpretación del modelo digital de elevación permitió revelar estructuras y, combinado con las composiciones coloridas, facilitó la discriminación litológica. Se mapearon cinco ocurrencias o puntos de mineralización y se revelaron las áreas más promisorias para hospedar depósitos de zeolitas. Los sectores favorables se circunscriben a la parte norte del área de trabajo y están generalmente asociados a las proximidades de los contactos entre riolitas y basaltos. Las fases minerales identificadas son: heulandita-clinoptilolita, mesolita, mordenita, estilbita y laumontita.

Palabras clave: zeolitas; basaltos; rocas efusivas básicas; análisis espectral; procesamiento de imágenes; Lansat 8; formación Movene; Mozambique.

Abstract

The research aims at evaluating the mineral potential of the basaltic lavas of the Movene Formation, to host microcrystalline zeolites. In order to attain this goal the methods of digital image processing, geological traversing and mineralogical analysis are used in an integrated approach. Landsat 8 images were processed using standard tools such as color composite, band ratios and supervised classification methods to understand the geology of the area and to identify areas spectrally similar to the minerals studied. The interpretation of the digital elevation model allowed to reveal structures and their combined use with the color compositions facilitated the lithologic discrimination. Fieldworks were carried out in the areas with the highest exposure of the basaltic lavas to identify and sample the zeolites. Finally, the collected samples were analyzed by X-ray diffraction in order to determine mineral composition. The study increased the existing geological knowledge about this important industrial mineral, mapping five mineral occurrences and revealing the most promising areas to host this type of deposits. Favorable sectors are circumscribed to the northern part of the working area, and they are generally in the proximity of rhyolites-basalts contact. The following mineral phases were also identified: heulandite-clinoptilolite, mesolite, mordenite, stilbite and laumontite.

Keywords: zeolites; basalts; basic effusive rocks; spectral analysis; image processing; Lansat 8; Movene formation; Mozambique.

1. INTRODUCCIÓN

Las zeolitas constituyen un gran grupo de minerales, generalmente bien cristalizados que se encuentran fundamentalmente en las cavidades de las lavas basálticas; son aluminosilicatos hidratados cristalinos de elementos alcalinos y alcalinotérreos que muestran capacidad de intercambio catiónico y deshidratación reversible. Este grupo de minerales posee una estructura tridimensional de tetraedros aniónicos (AlO_4 y SiO_4) similares al feldespato, con microporos interconectados que contienen agua y cationes intercambiables. En general, solo las rocas con más de 50 % de zeolitas (zeolititas) se consideran económicamente explotables.

El proceso de formación de las zeolitas -zeolitización- es rápido; estos minerales se originan en unos pocos días o años, a partir de la alteración del vidrio volcánico de composición basáltica o riolítica por la acción de aguas calientes o de aguas meteóricas (Cilek 1989).

La potencialidad de las vulcanitas de Karoo para contener importantes depósitos de zeolitas ya ha sido anteriormente investigada. Neves y Nunes (1968) describen las zeolitas de la montaña de Corumana en la cordillera de Lebombo; en las cavidades de las lavas basálticas reportan grandes cristales de cuarzo, estilbita, laumontita, escolecita y natrolita con un tamaño de hasta 10 x 30 cm. En este sitio, la asociación paragenética de minerales comienza con cuarzo sacaroideo, estilbita blanca en cristales y finalmente laumontita. Las zeolitas fibrosas -natrolita y escolecita- están íntimamente asociadas y cristalizadas simultáneamente.

Por su parte Cilek (1989) reconoce que las zeolitas cristalinas en cavidades y vetas dentro de los basaltos de Karoo de origen hidrotermal tardío, probablemente estaban más ampliamente distribuidas que lo que se conocía hasta ese momento. Las zeolitas microcristalinas de importancia económica pueden esperarse en gruesas capas de tobas y tufitas de composición riolítica y basáltica, depositadas en cuencas poco profundas, y alteradas por la acción de aguas subterráneas durante o poco después de la deposición. El citado autor considera que las zeolitas se pueden encontrar por debajo de las capas de bentonita o en zonas de grandes movimientos tectónicos, y que han sido afectadas por aguas hidrotermales o meteóricas.

No obstante a las reconocidas potencialidades de las vulcanitas de Karoo para hospedar depósitos industriales de minerales del grupo de las zeolitas, pocas investigaciones han sido realizadas, lo cual contrasta con las amplias posibilidades de uso que pueden tener en esa región de Mozambique.

Este trabajo tiene como objetivo evaluar, de modo preliminar, el potencial zeolítico de los basaltos de la formación Movene, en un área ubicada al sur de Mozambique y, a la vez, caracterizar las fases minerales presentes en los afloramientos identificados.

1.1. Caracterización del área de estudio

El área elegida para el estudio se encuentra en la cadena montañosa de los Limbombos, al oeste de la ciudad de Maputo y dentro de los distritos Boane, Moamba, Namaacha y Matutuine (Figura 1). La cadena los Limbombos, de orientación norte-sur, forma parte de la gran provincia ígnea de Karoo, constituida por una asociación bimodal de tobas e ignimbritas riolíticas, con flujos de lava de composición andesítico-basáltica (basaltos de inundación),

formadas como consecuencia del desmembramiento del supercontinente Gondwana durante el Jurásico inferior y medio (GTK Consortium 2006).

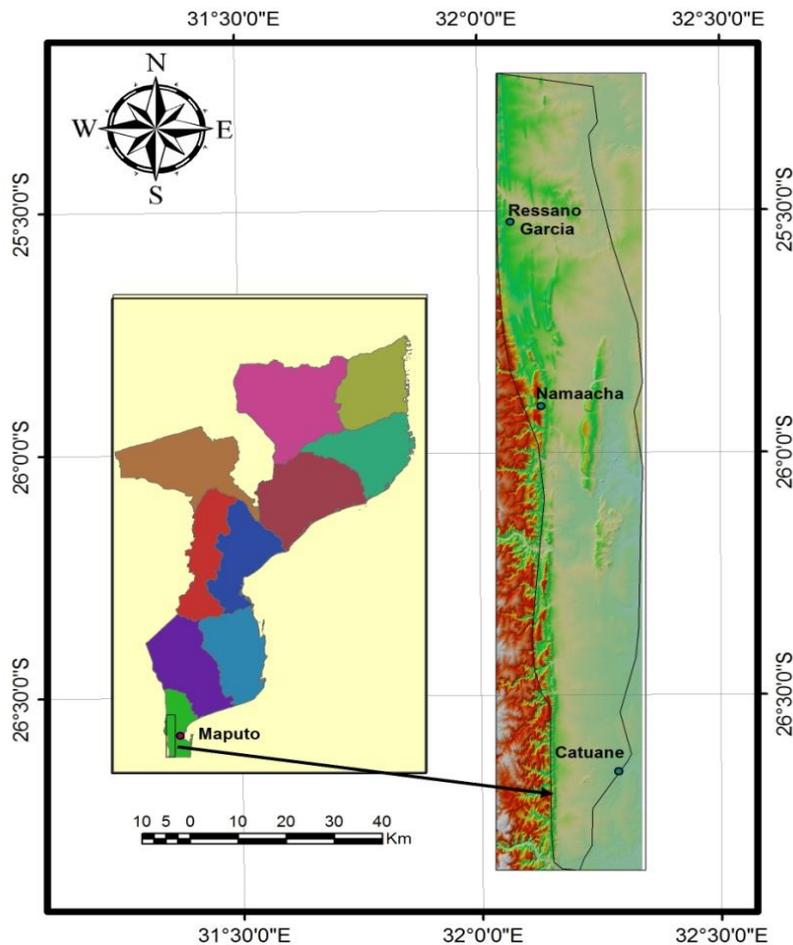


Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio. Sobre el modelo de relieve sombreado se sobrepone el área de la Fm. Movene marcada por una línea continua.

En el área aparece la formación Movene (JrM) que constituye la unidad superior del monoclinial y está formada por flujos de lava basáltica con intercalaciones de flujos riolíticos (tobas, tufitas e ignimbritas), incluidos dentro del miembro Pequeños Limbombos (JrMr). Sobre los basaltos, muy alterados y con muy escasos afloramientos, se forman potentes espesores de suelo que constituyen extensos valles fértiles (sabanas). Por otra parte, las riolitas (tobas de flujos de ceniza soldada) afloran formando un relieve típico de cuesta con una suave inclinación hacia el este. Geomorfológicamente, el área se caracteriza por una alternancia de cuestas y valles planos.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó bajo un enfoque integrador que combinó varias fuentes de información, a saber: Landsat 8, modelo digital de elevación (MDE), mapa de suelo, mapa geológico, datos de los trabajos de campo y resultados de los análisis mineralógicos. Se utilizaron dos tipos fundamentales de datos: imágenes satelitales del Landsat 8 y el modelo digital de elevación SRTM (sigla en inglés de *Shuttle Radar Topography Mission*). Ambos se descargaron del sitio web: <https://ers.cr.usgs.gov/> en formato geotiff.

El satélite Landsat 8, lanzado en el 2013, transporta dos sensores: OLI y TIRS. El primero provee acceso a nueve bandas espectrales que cubren el espectro desde los 0,433 μm hasta los 1,390 μm (del visible al infrarrojo de onda corta), mientras que el segundo registra desde 10,30 μm hasta 12,50 μm (infrarrojo térmico). La escena usada en este trabajo fue adquirida en la fecha 14-05-2016 y corresponde a la siguiente ubicación: WRS_PATH = 168 WRS_ROW = 78.

La Misión Topográfica Shuttle Radar es un proyecto internacional entre la Agencia Nacional de Inteligencia Geoespacial, NGA y la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio, NASA. Su fin es obtener un MDE del globo terráqueo. El modelo usado posee una resolución espacial de 90 m, aproximadamente.

La investigación se organizó en etapas: a) trabajos de campo, b) interpretación preliminar de las imágenes satelitales y c) aplicación de técnicas de clasificación supervisada.

2.1. Trabajos de campo

Durante los trabajos de campo se muestrearon las zonas con afloramientos de minerales del grupo de las zeolitas, para lo cual se realizaron itinerarios por las áreas de mayor exposición de los basaltos de la formación Movene. Fundamentalmente se aprovecharon las excavaciones de cámaras de préstamos y los cauces de los ríos. Los afloramientos identificados fueron descritos y establecidas sus coordenadas con un GPS de la marca Garmin. Los puntos revelados permitieron construir un mapa de ocurrencia, y fueron utilizados posteriormente como patrones, en el proceso de clasificación espectral, para entender los controles de la distribución espacial de las zeolitas dentro de los basaltos.

Con vistas a comprobar la presencia de zeolitas y determinar las fases presentes se realizaron análisis de difracción de rayos X (DRX), usando un difractómetro de la marca BRUKER AXS D4 ENDEAVOR de la empresa Mozal

y empleando radiación CuK α , con rango de medición desde 6 hasta 80 grados 2 θ , voltaje 40 kV y corriente 35 mA.

2.2. Procesamiento digital de imágenes

Las imágenes Landsat descargadas de internet fueron reproyectadas al sistema local de coordenadas UTM (Moznet UTM-36). Los números digitales se convirtieron a reflectancia planetaria en la parte superior de la atmosfera, utilizando los factores y parámetros suministrados en el fichero de metadatos de la escena; las fórmulas empleadas fueron descritas por Zanter (2016). Las bandas del Landsat fueron procesadas usando los procedimientos clásicos, o sea, composiciones de colores, razones de banda y métodos de clasificación espectral.

Las composiciones de colores (CC) son una técnica importante que facilita la discriminación litológica y la identificación de lineamientos regionales. Las CC usadas son aquellas que se recomiendan en la literatura científica (Ali y Pour 2014; Pour y Hashim 2014, 2015) para la cartografía geológica.

La estadística descriptiva se empleó para seleccionar la triada de bandas que ofrecía mayor información geológica; para esto se calculó el factor de información óptimo (OIF, por sus siglas en inglés), el cual utiliza la combinación de bandas menos redundantes (menor coeficiente de correlación) y mayor contraste (mayor desviación estándar) (Qaid & Basavarajappa 2008) .

Diversas razones de bandas (5/7, 5/4, 4/2) y (5/7, 4/5, 4/2) fueron utilizadas para intentar revelar las heterogeneidades dentro de la formación Movene. También se calculó el índice de vegetación por diferencia normalizada para evaluar las zonas de mayor cobertura vegetal y las áreas de suelos expuestos o desnudos.

2.3. Técnicas de clasificación supervisada

Finalmente se usaron métodos de clasificación supervisada para revelar zonas espectralmente similares a las áreas de afloramiento mapeadas en el campo y a espectros de referencia obtenidos en el laboratorio (librería espectral USGS) (Clark *et al.* 2007). Los métodos de clasificación asignan cada píxel de una imagen a un grupo o clase temática basados en criterios de similitud. Se definió una clase de cobertura (área de interés), digitalizando polígonos cuyos límites coinciden con los de las ocurrencias cartografiadas en el campo.

La técnica de mapeo espectral empleada fue el SAM (*spectral angular mapping*). Este método de clasificación funciona a nivel de todos los pixeles

y calcula la similitud entre los espectros de cada píxel de la imagen y los espectros de referencia, lo que permite la identificación de los materiales que predominan en cada píxel a partir del ángulo entre los vectores referencia y desconocido. Como vectores de referencia se utilizaron las áreas de afloramientos y las librerías espectrales de los minerales buscados (Clark *et al.* 2007). Cuanto más pequeño es este ángulo, mayor es la similitud espectral entre las muestras (Clark *et al.* 1990; Kruse *et al.* 1993). El procesamiento de las imágenes se inició con el cálculo de la estadística descriptiva para identificar las combinaciones de bandas más informativas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las bandas B5, B6, B7 (infrarrojo cercano y de onda corta) y B10 y B11 (infrarrojo térmico) muestran los mayores contrastes espectrales; simultáneamente, estas mismas bandas presentan los valores más bajos de correlación estadística (Tabla 1).

Tabla 1. Matriz de correlación y el valor de la desviación estándar de cada banda

	B2 (512)*	B3 (560)	B4 (768)	B5 (1588)	B6 (1543)	B7 (1482)	B8 (634)	B10 (2091)	B11 (1860)
B2	1,00								
B3	0,96	1,00							
B4	0,84	0,92	1,00						
B5	0,36	0,48	0,30	1,00					
B6	0,66	0,78	0,86	0,51	1,00				
B7	0,65	0,74	0,90	0,21	0,91	1,00			
B8	0,91	0,97	0,97	0,39	0,82	0,82	1,00		
B10	0,73	0,61	0,54	0,09	0,36	0,43	0,58	1,00	
B11	0,74	0,63	0,54	0,13	0,36	0,41	0,59	0,99	1,00

*Entre paréntesis se da el valor de la desviación estándar de cada banda

Los valores calculados del OIF (Tabla 2) indican que las combinaciones de colores que incluyen las bandas con longitudes de ondas del infrarrojo cercano, infrarrojo de onda corta y térmica, garantizan una excelente discriminación espectral para el área de estudio.

Se seleccionaron e interpretaron las siguientes combinaciones de falso color: CC5_7_11, CC5_6_10, CC4_5_10, CC5_6_7. En todas ellas es posible identificar las principales litologías que afloran, además de los rasgos geomorfológicos principales. En CC5_6_7 los basaltos se identifican por el color azul y la pseudoestratificación magmática, las riolitas presentan

tonalidades de azul más clara y las rocas sedimentarias (dunas) blanco crema (Figura 2).

Tabla 2. Valores del factor de información óptima (OIF)

Combinaciones de colores	OIF
CC5_7_10	6 596,01
CC5_7_11	6 196,97
CC5_6_10	5 125,06
CC5_6_11	4 796,63
CC4_5_10	4 458,27
CC5_10_11	4 395,49

En la imagen resultan visibles estructuras anulares de mucho contraste espectral dentro de las riolitas del miembro Pequeños Limbombos que no aparecen representadas en el mapa geológico del área; estas podrían representar intrusivos alcalinos (¿?). También se realzan los depósitos aluviales y los coluvios asociados con las cuestas. Las áreas de afloramiento de los basaltos de la Fm. Movene que están cubiertas por sedimentos que fueron digitalizadas se identifican por la abundancia de vegetación (color rojo) y la ausencia de estratificación.

Una vez precisados los contactos de las diferentes litologías se analizaron las razones de bandas y el mapa de suelos con el objetivo de identificar las heterogeneidades dentro de las extensas planicies formadas por las lavas basálticas.

Las lavas basálticas apenas afloran y están cubiertas por suelos arcillosos y arcillo-arenosos, con una profundidad menor que 30 cm para los suelos líticos, y entre 30 cm y 150 cm para los negros y rojos. La razón B4/B2, que ha sido usada para cartografiar óxidos e hidróxidos de hierro (Pour & Hashim 2014), permitió diferenciar claramente los suelos negros (bajo contenido de Fe) de los rojos (altos contenidos). Estos últimos poseen una amplia distribución espacial y ocupan la parte centro sur del área de estudio (Figura 3).

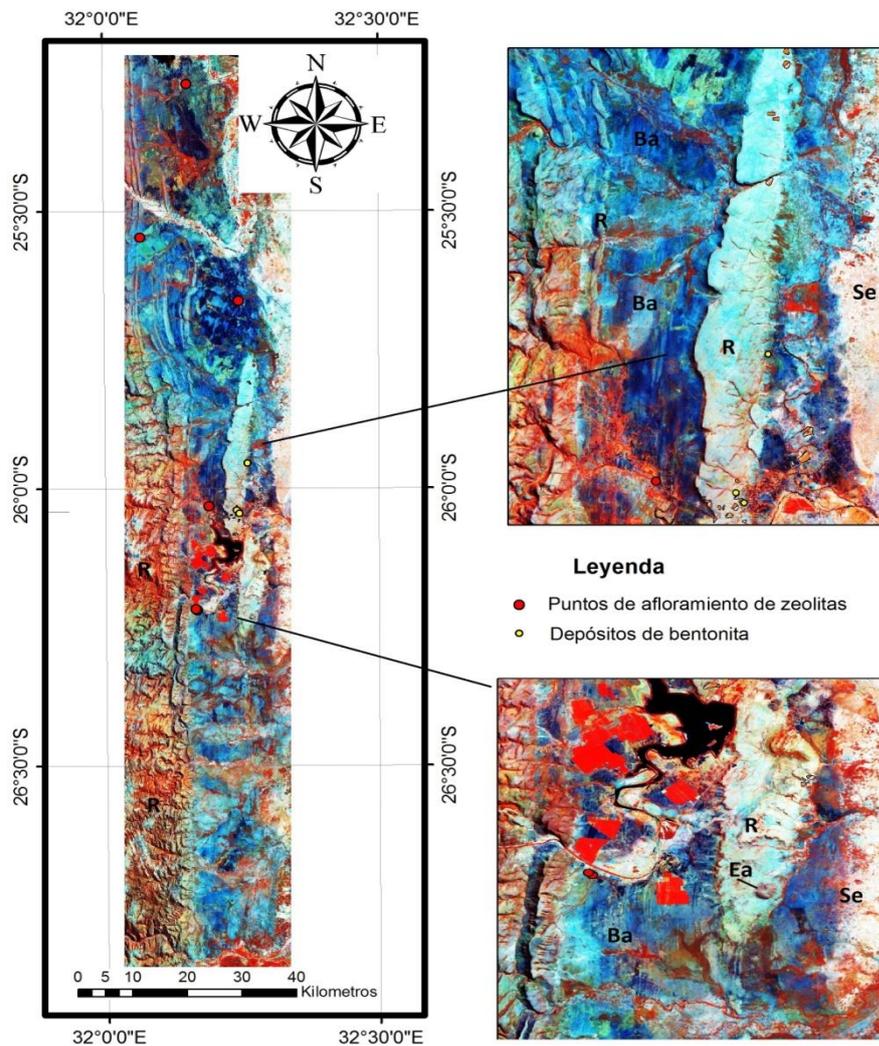


Figura 2. Composición de colores CC5_6_7 donde se diferencian basaltos (Ba), riolitas (R), rocas sedimentarias (Se) y estructuras anulares (Ea).

A partir del MDE se construyeron modelos de sombra con diferentes posiciones de la fuente de luz y se aplicaron filtros direccionales para realzar alineamientos y estructuras anulares. El uso combinado del MDE y las composiciones coloridas facilitaron la discriminación litológica, pues los afloramientos de riolitas, al ser rocas más duras, generan formas positivas (cuestas) del relieve, mientras que en los basaltos se desarrollan formas negativas como planicies (Figura 4).

Los resultados de la interpretación visual de las imágenes Landsat y el MDE se muestran en la Figura 4. Fueron cartografiados alineamientos, estructuras anulares, canteras y las áreas de distribución de los sedimentos recientes.

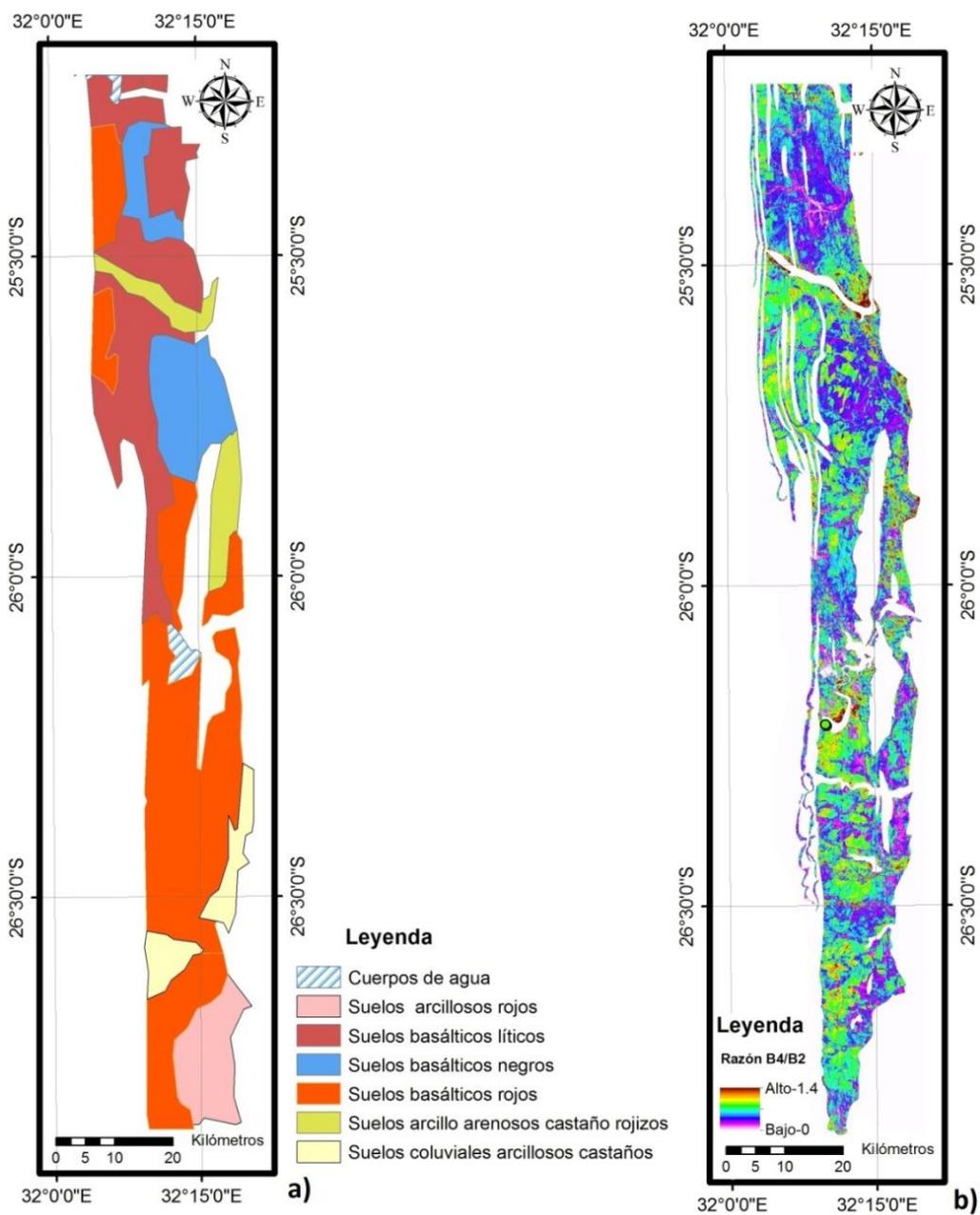


Figura 3. Mapa de suelos (a) y mapa de la razón B4/B2 (b).

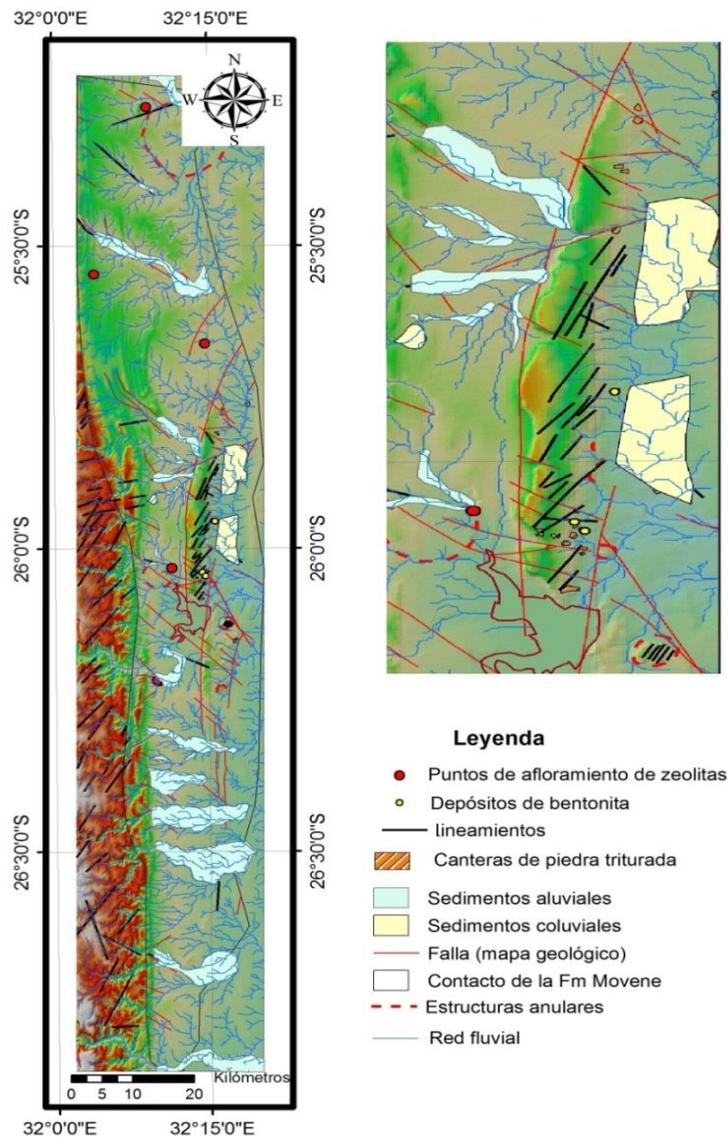


Figura 4. Esquema geológico sobre el modelo de relieve sombreado, que indica los elementos interpretados en las composiciones de falso color y el MDE (sector ampliado a la derecha).

Los sedimentos recientes se utilizaron para enmascarar la imagen. Este enmascaramiento es necesario para reducir la variabilidad espectral que surge de las distintas coberturas de suelo y prestar atención a la superficie del suelo desnudo (afloramientos de basaltos o suelos desarrollados sobre estos).

Considerando los resultados preliminares del procesamiento digital se realizaron trabajos de campo para identificar afloramientos de basaltos con presencia de zeolitas (Figura 5). Fueron mapeados un total de cinco puntos de ocurrencia de este grupo de minerales, los cuales aparecen en pequeños filones o rellenando vesículas y mega-amígdalas (Figuras 5 y 8) en las lavas

basálticas de Karoo. En general, los afloramientos son limitados, con pequeño desarrollo areal.



Figura 5. Bloque de basalto con amígdalas rellenas por zeolitas, región de Goba. Con los análisis de DRX se identificaron las siguientes fases minerales: heulandita-clinoptilolita (Figura 6), mesolita (Figura 7) y mordenita (Figura 8) (reportados por primera vez) y estilbita y laumontita (Figura 7), que confirman descripciones anteriores.

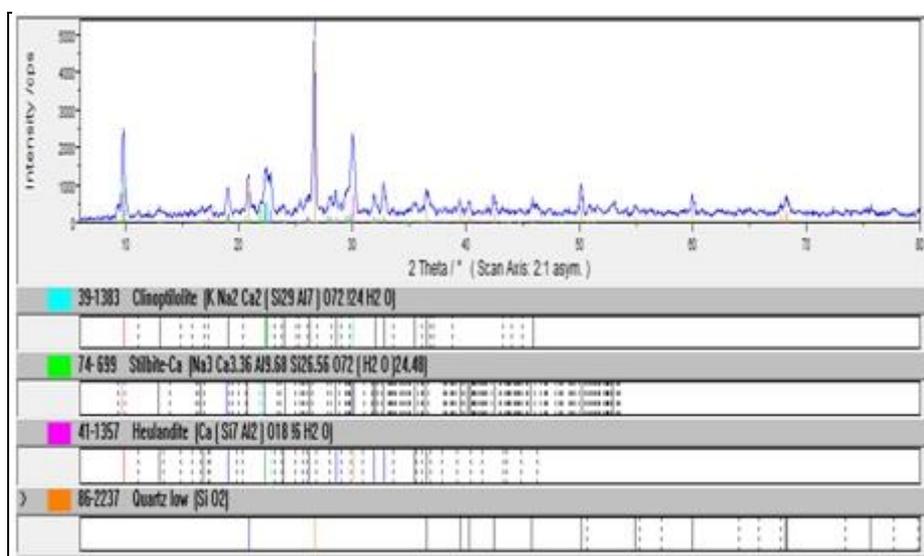


Figura 6. Muestra BMI14 de la región de Goba. Fase principal, cuarzo con valores de d(3,35; 4,25; 1,82), con clinoptilolita-heulandita, valores de d(8,93; 6,87; 5,12).

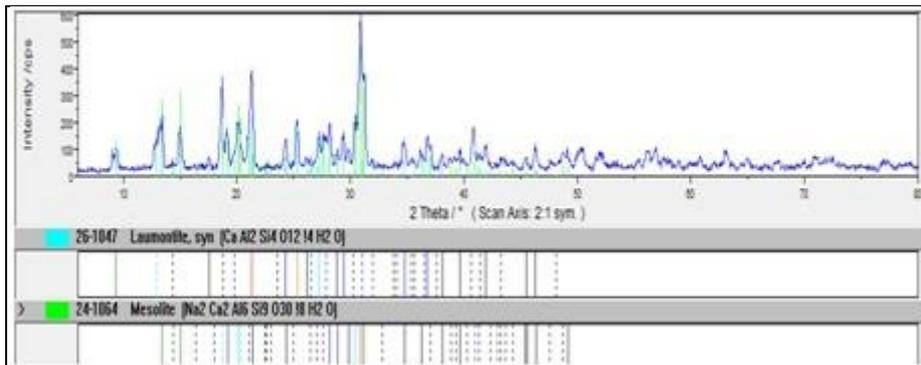


Figura 7. Muestra BZG12 de la región de Goba. Fase principal mesolita con valores principales de d (2,89; 2,86; 2,58). Hay también laumontita, según los picos con valores de d (4,17; 3,51; 3,40).

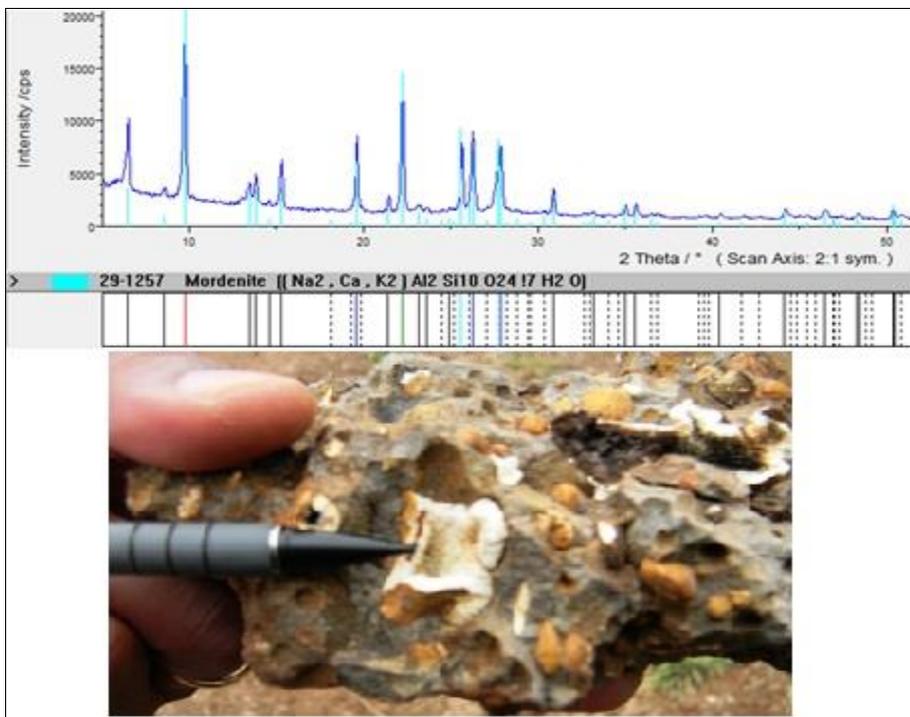


Figura 8. Difractograma de la muestra P-1, cerca de Boane. Las amígdalas del basalto (foto de abajo) están rellenas por mordenita de hábito fibroso y color blanco.

Las zeolitas hidratadas (mesolita, mordenita, estilbita y heulandita) predominan en condiciones de baja temperatura (<150 °C), mientras que las menos hidratadas (150 °C - 200 °C) ocurren a profundidades progresivamente mayores en los sistemas hidrotermales que dieron origen a la formación de zeolitas en las cavidades de los basaltos.

Las zonas de ocurrencia de basaltos con zeolitas se utilizaron como patrones o áreas de entrenamiento para aplicar métodos de clasificación supervisada y encontrar zonas espectralmente similares. Como las áreas

son reducidas en número y tamaño se probaron varias variantes de ángulos espectrales (0,02; 0,03 y 0,05) para seleccionar aquellas zonas con mayor coherencia espacial y en las proximidades de las ocurrencias conocidas (Figura 9). Las áreas favorables identificadas se concentran mayoritariamente hacia la parte centro norte, principalmente en la región de Goba.

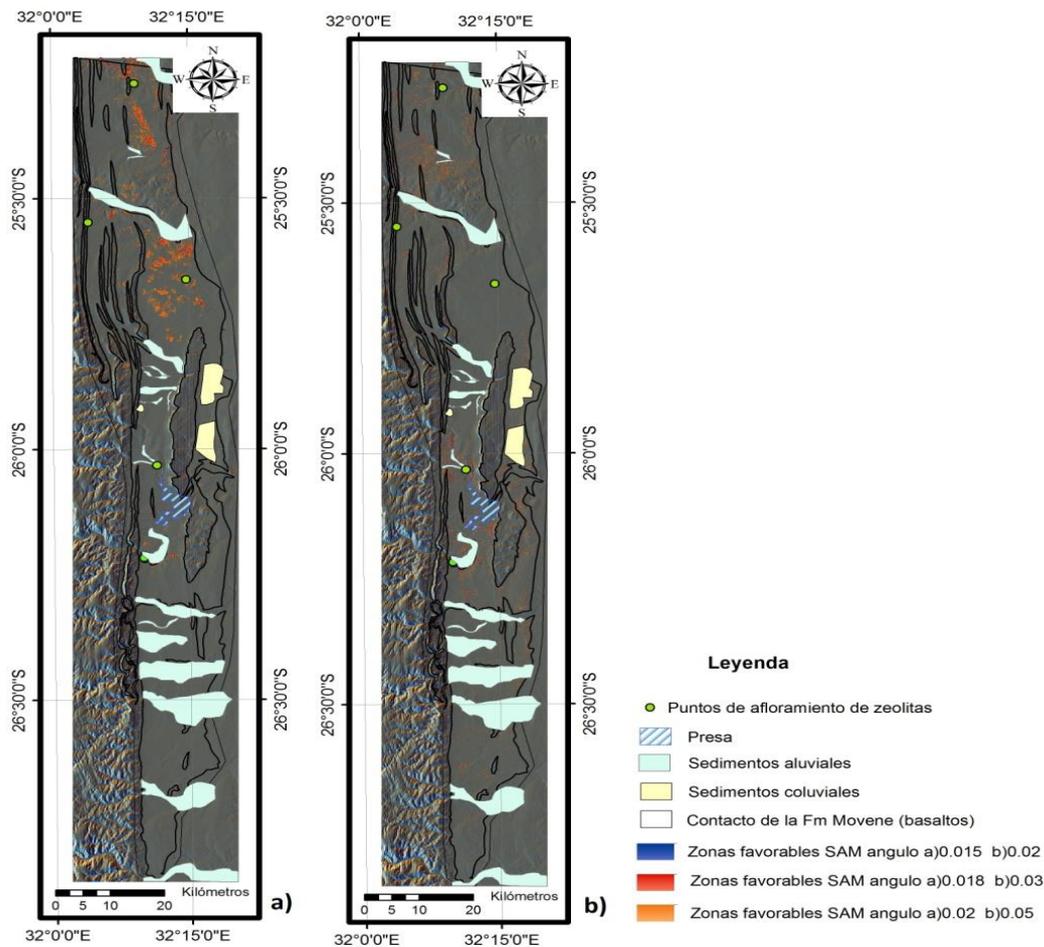


Figura 9. Áreas potenciales para la ocurrencia de zeolitas, a través de la aplicación del SAM, a) usando espectros de referencia (librería espectral) b) usando áreas de entrenamiento (ROI). El mapa base es un modelo de relieve sombreado. Angulo espectral en radianes.

Los resultados de la clasificación SAM, usando la librería espectral de minerales de zeolitas, muestran un patrón de distribución espacial similar, pero aquí se revelan zonas más coherentes, y con mayor asociación espacial, con las ocurrencias conocidas. En general, las zonas más favorables se circunscriben a la parte norte del área de trabajo, coincidiendo con áreas de desarrollo de suelos negros. Se identificaron ocurrencias en todo el corte estratigráfico de las lavas basálticas (parte inferior, media, superior) y, generalmente, en las proximidades del contacto con las riolitas.

Por otra parte, la asociación espacial de las ocurrencias con fallas, lineamientos o estructuras anulares resulta evidente.

4. CONCLUSIONES

- Las potencialidades de los basaltos del supergrupo Karoo, en la cordillera de los Lembombos, para hospedar depósitos económicos de zeolitas microcristalinas queda evidenciada con los resultados de este trabajo.
- Los sectores más favorables para la ocurrencia de zeolitas se localizan fundamentalmente en la parte norte del área de estudio y están controlados por diferentes tipos de estructuras, la proximidad al contacto con las riolitas y el tipo de suelo.
- En los afloramientos estudiados dentro de las lavas basálticas de la formación Movene se reveló la existencia de las fases minerales del grupo de las zeolitas siguientes: heulandita-clinoptilolita, mesolita, mordenita, estilbita, laumontita.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo del Departamento de Geología de la Universidad *Eduardo Mondlane* de Maputo, Mozambique, por facilitar los medios materiales y el transporte que permitieron realizar esta investigación. Además, agradecemos a la empresa MOZAL (aluminio de Mozambique) por facilitar el acceso a los laboratorios donde se realizaron los análisis de difracción de rayos X, en particular al Ing. Luis Duarte.

6. REFERENCIAS

- ALÍ, A. S. Y POUR, B. A. Lithological mapping and hydrothermal alteration using Landsat 8 data: a case study in ariab mining district, red sea hills, Sudan. *International Journal of Basic and Applied Sciences*, 3(3): 199-208, 2014.
- CILEK, V. G. *Industrial minerals of Mozambique*. Geological Survey Office, 1989. Disponible en: <http://www.infomine.com/publications/docs/Cilek1989.pdf> Consultado: 16 mayo 2017.
- CLARK, R. N.; KING, T. V. V.; KLEIJWA, M.; SWAYZE, G. A. Y VERGO, N. High spectral resolution reflectance spectroscopy of minerals. *Journal of Geophysical Research*, 95(B8): 12653-12680, 1990.
- CLARK, R. N.; SWAYZE, G. A.; WISE, R.; LIVO, E.; HOEFEN, T.; KOKALY, R. Y SUTLEY, S. J. USGS digital spectral library splib06a. *U.S. Geological Survey, Digital Data Series 231*, 2007. Disponible en: <http://speclab.cr.usgs.gov/spectral.lib06>.

- GTK CONSORTIUM. Map Explanation. Volume 1: Sheets 2032–2632. Geology of Degree Sheets, Espungabera/ Chibabava, Nova/Mambone, Massangena, Chidoco, Save/Bazaruto, Chicualacuala, Machaila, Chigubo, Mabote/Vi-lanculos, Rio Singuédzi/Massingir, Rio Changana, Funhalouro/Inhambane, Chilembene, Chókwè, Zavala/Inhar-rime, Maputo, Xai-Xai/Zavala and Bela-Vista, Mozambique. Direccção Nacional de Geologia (DNG), Maputo, 341 pages and 5 appendices. 2006.
- KRUSE, F. A.; LEFKOFF, A. B.; BOARDMAN, J. W.; HEIDEBRECHT, K. B.; SHAPIRO, A. T.; BARLOON, P. J. Y GOETZ, A. F. H. The Spectral Image Processing System (SIPS) -interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data. *Remote Sensing of Environment, Special Issue on AVIRIS*, 44(2-3): 145-163, 1993.
- NEVES, C. Y NUNES, L. Zeolites from Corumana Mountain (Lebombo Range, Mozambique-Portuguese East Africa). *Revista de Ciencias Geol. Univ. Louvenco Marques*, 1(A): 73-92, 1968.
- POUR, B. A. Y HASHIM, M. The application of Landsat-8 OLI/TIRS data for geological mapping: a case study from SE Iran. *ACRS Proceedings*, 2014.
- POUR, B. A. Y HASHIM, M. Hydrothermal alteration mapping from Landsat-8 data, Sar Cheshmeh copper mining district, south-eastern Islamic Republic of Iran. *Journal of Taibah University for Science*, 9(2): 155–166, 2015.
- QAID, A. M. Y BASAVARAJAPPA, H. T. Application of Optimum Index Factor Technique to Landsat-7 Data for Geological Mapping of North East of Hajjah, Yemen. *American-Eurasian Journal of Scientific Research*, 3(1): 84-91, 2008.
- ZANTER, K. *Landsat 8 (L8) data users handbook*. LSDS-1574 Version 2.0, vol. 1. Department of the Interior U.S. Geological Survey. 2016.
Disponibile en:
<https://landsat.usgs.gov/sites/default/files/documents/Landsat8DataUsersHandbook.pdf>

Recibido: 14/07/17

Aprobado: 04/10/17

Elmidio Estévez Cruz, Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Titular
Universidad de Pinar del Río, Cuba estevez@upr.edu.cu

Utilidad de los valores de susceptibilidad magnética para el análisis petrográfico de muestras del basamento de la corteza de intemperismo

Utility of magnetic susceptibility values for the petrographic analysis of weathering crust basement samples

Alfredo Hernández-Ramsay¹, Emilio R. Escartín-Sauleda², Martha L. Gutiérrez-Herrero³

¹Máster en Geofísica Aplicada. Empresa Geominera Oriente. Santiago de Cuba, Cuba, ahr_amsay@yahoo.es

²Ing. Geofísico. Doctor en Ciencias Geológicas. Universidad Tecnológica de La Habana, Cuba. escartin@civil.cujae.edu.cu

³Ing. Geóloga. Empresa Geominera Oriente, Santiago de Cuba, Cuba. martha.gutierrez@geominera.co.cu

Resumen

Este artículo expone el poder resolutivo de las mediciones de la susceptibilidad magnética en muestras de minerales del basamento del perfil de meteorización laterítica, como un elemento de análisis complementario en la caracterización petrográfica de las rocas y de utilidad en el mapeado de las heterogeneidades magnéticas del basamento. La comparación de los datos de la susceptibilidad magnética con los datos petrográficos de diferentes muestras reveló que aun en muestras que corresponden a litotipos homogéneos se pueden manifestar grandes heterogeneidades y diferencias desde el punto de vista físico-mineralógico. De modo general, se observó una alta concordancia entre la intensidad de los procesos de intemperismo en las muestras de rocas y los valores de la susceptibilidad magnética de tales muestras. Los resultados sustentan la posibilidad de extrapolar la información de composición a muestras con mediciones de susceptibilidad magnética y sin estudios petrográficos.

Palabras clave: susceptibilidad magnética; cortezas de intemperismo; lateritas; Cuba oriental.

Abstract

This article exposes the resolving power of the magnetic susceptibility measurements in basement minerals samples of the lateritic weathering profile as an element of complementary analysis in the petrographic characterization of the rocks, and useful in the mapping of the magnetic heterogeneities of the basement. The comparison of the magnetic susceptibility data with the petrographic data of different samples revealed that even in samples that correspond to homogeneous lithotypes, great heterogeneities and differences can be manifested from the physical-mineralogical point of view. In general, a high concordance was observed between the intensity of the weathering processes in the rock samples, and the values of the magnetic susceptibility of such samples. The results support the possibility of extrapolating the composition information to samples with magnetic susceptibility measurements and without petrographic studies.

Keywords: magnetic susceptibility; weathering crust; laterites; Eastern Cuba.

1. INTRODUCCIÓN

En los trabajos de prospección y exploración de los yacimientos de cortezas de intemperismo del nordeste cubano no es posible realizar estudios petrográficos a todas las muestras de la red de pozos, pues se encarece demasiado la investigación. Los estudios petrográficos requieren de mucho tiempo y grandes recursos en la preparación de las secciones delgadas y la posterior observación de las muestras bajo el microscopio.

En los yacimientos de corteza de intemperismo se han encontrado dificultades relativas a:

- La caracterización, cartografía y discriminación de las secuencias magnéticas, no magnéticas (secuencias gabroide) y cuerpos de composición no ultramáfica en la corteza de intemperismo y el basamento.

- La alta variabilidad y complejidad geológica en la corteza de intemperismo y su basamento, con muestras químicamente homogéneas, pero heterogéneas física y mineralógicamente.

Considerando estas dificultades reales se hace necesario y conveniente establecer algún método de estudio complementario, sencillo, barato y rápido, cuyos resultados den indicios de la naturaleza mineralógica de las muestras petrográficas.

La susceptibilidad magnética es una propiedad física más de cada mineral relacionada con el origen y formación del mismo. Su magnitud puede ser fácilmente medible e indica muchas veces los procesos geológicos (el grado e intensidad de alteración) sufridos o que posee dicho mineral. Es capaz de revelar el punto o estadio en que se encuentra un mineral dentro de su transformación de un mineral por otro y como los minerales son los que constituyen las rocas, entonces el estudio de este parámetro físico nos lleva al conocimiento de las características físico-geológicas de los mismos y al completamiento de la información geológica.

El poder resolutivo de la susceptibilidad magnética (SM) hace que los valores medidos de esta propiedad, base del método magnético de la geofísica, se puedan convertir en una valiosa herramienta para el petrógrafo moderno, al proporcionarle información a priori que da idea de la composición mineralógica de las muestras, la intensidad del intemperismo y el grado de alteración en cada muestra, y permite realizar una clasificación magnética de las muestras bajo estudio.

Las irregularidades químicas, geológicas y mineralógicas en las rocas de la corteza laterítica ferro-niquelífera-cobaltífera y su basamento provocan variaciones en sus características físicas, las que pueden ser detectadas con la aplicación de métodos magnéticos debido a:

- La disponibilidad de equipos ligeros, portátiles y de bajo costo para medir la susceptibilidad magnética, que pueden ser utilizados en condiciones de campo, en los frentes de cantera, y dentro del proceso fabril, y que tienen una rápida respuesta. Los ensayos no son destructivos, son baratos, no requieren transformar la muestra y solo requieren de un buen acoplamiento inductivo entre la muestra y la sonda del equipo, así como cumplir con los procedimientos normativos de las mediciones.
- La capacidad de la susceptibilidad magnética para separar los minerales en magnéticos, electromagnéticos y no magnéticos.

- El hecho de que los valores de la susceptibilidad magnética están más relacionados con el tipo de mineralización existente en la muestra que con su contenido total de hierro. Por ejemplo, cuando una muestra de laterita tiene un valor de susceptibilidad magnética de $65 \cdot 10^{-3}$ SI, este valor indica la presencia mayoritaria de magnetita y no de hematita; sin embargo, cuando el contenido químico de Fe es del 50 %, no hay un indicio definitivo del tipo de mineralización, la cual puede ser de hematita, ilmenita, maghemita o magnetita.

El valor de la susceptibilidad magnética proporciona una medida del grado en que una sustancia puede ser magnetizada; es la relación k o k' de la magnetización M o I con respecto a la fuerza magnetizante H , que es la responsable de la magnetización, según se expresa como:

$$kH = M \quad \text{en el sistema SI} \quad (1)$$

$$k'H = I \quad \text{en el sistema cgs} \quad (2)$$

La susceptibilidad es adimensional, pero tiene diferente magnitud en los dos sistemas:

$$k = 4\pi k' \quad (3)$$

Desde el punto de vista geológico, la susceptibilidad magnética con frecuencia es proporcional a la fracción de magnetita presente en el material rocoso (Sheriff 2002).

2. CARACTERÍSTICAS PETROGRÁFICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

Desde el punto de vista petrográfico en el área de estudio están presente seis variedades de rocas: harzburgitas (H), dunitas (D), peridotitas plagioclásicas (PP), serpentinitas (S), gabros (G) y lherzolitas (L), las cuales han sufrido procesos de intemperización en mayor o menor grado, así como la influencia de la tectónica regional con los procesos de compresión, que han servido de vía a las soluciones ricas en minerales. Todos estos procesos han dado origen a una enorme cantidad de minerales, propios de la corteza ofiolítica intemperizada.

3. METODOLOGÍA

Se muestrearon rocas del basamento del yacimiento La Delta. El muestreo en todos los casos fue realizado por geólogos y petrógrafos, según las normas ramales vigentes en la Empresa Geominera Oriente del Grupo Geominsal, perteneciente al Ministerio de Energía y Minas (Hernández 2009). Se midió la susceptibilidad magnética a 228 muestras del basamento o fondo de pozo, con el objetivo de caracterizar, evaluar,

clasificar y correlacionar solamente el material de la muestra con sus atributos y parámetros físicos, geológicos, químicos y petrográficos.

La metodología aplicada y el procesamiento de los valores de la susceptibilidad magnética de las muestras procedentes de pozos de perforación en redes ordinarias está tratada con un cierto nivel de profundidad por Hernández (2009). Se utilizó la clasificación magnética de Bersudskin recogida en Delgado (1979).

4. RESULTADOS

4.1. Susceptibilidad magnética de las muestras del basamento

La Tabla 1 muestra a la izquierda los intervalos magnéticos según Bersudskin y a la derecha la clasificación magnética que utilizan los mineralogistas. El intervalo no magnético establecido por estos últimos coincide con el intervalo prácticamente no magnético que emplean los geofísicos y en este se ubican todas las muestras cuyo valor de susceptibilidad magnética es menor a $0,3 \cdot 10^{-3}$ SI, donde predominan minerales no magnéticos como: caolín, gibbsita, cuarzo, plagioclasas, albita y otros (Milovski y Kónonov 1988). Muchos de estos minerales intervienen en la composición básica de los gabros y secuencias gabroides.

Tabla 1. Frecuencias de la clasificación magnética de los valores de SM de todas las muestras del basamento estudiadas

Intervalos de clasificación de Bersudskin	N	%	Clasificación magnética según mineralogistas
SM < 0,3 prácticamente no magnético	2	0,9	Intervalo no magnético 0,9 %
SM ≥ 0,3 SM < 1,25 muy débilmente magnético	3	1,35	Intervalos electromagnéticos 82,51 %
SM ≥ 1,25 SM < 6,25 débilmente magnético	115	51,57	
SM ≥ 6,25 SM < 12,5 débilmente magnético	66	29,6	
SM ≥ 12,5 SM < 20 magnético	22	9,87	Intervalos magnéticos 16,59 %
SM ≥ 20 SM < 31,66 magnético	8	3,59	
SM ≥ 31,66 SM < 44,74 magnético	3	1,35	
SM ≥ 44,74 SM < 62,8 magnético	2	0,9	
SM ≥ 62,8 fuertemente magnético	2	0,9	

SM: susceptibilidad magnética. N: número de muestras

El intervalo electromagnético (de acuerdo con la clasificación mineralógica) incluye a las categorías petrofísicas de muy débilmente magnética y

débilmente magnética; aquí abundan los minerales electromagnéticos con una $SM \geq 0,3 \cdot 10^{-3}$ SI y $SM < 12,5 \cdot 10^{-3}$ SI (Milovski y Kónonov 1988). Según estudios mineralógicos y petrográfico-petroológicos aparece goethita $FeOOH$ (sistema rómbico); hematita, mena roja de Fe, $\alpha-Fe_2O_3$ (el 70 % de Fe) (sistema trigonal); ilmenita $FeTiO_3$ (sistema trigonal); SiO_2 ; Al_2O_3 , gibbsita, espinela, minerales de Mn, psilomelano, ilmenita, minerales arcillosos, minerales de serpentina, indicando que en dichas muestras existe un predominio de minerales alterados, intemperizados, hematitizados, característicos de la corteza laterítica; mientras que en las muestras del basamento encontramos minerales máficos o básicos y no magnéticos, plagioclasas, etc. Por tal razón se deben esperar incrementos de los valores de las determinaciones del SiO_2 , MgO , Al_2O_3 , entre otros.

Dentro del intervalo magnético se incluyen las muestras con valores de $12,5 \cdot 10^{-3}$ SI $\leq SM < 62,8 \cdot 10^{-3}$ SI, en las cuales predominan los minerales magnéticos en los que se dan incrementos de elementos y compuestos químicos asociados a los minerales magnéticos. Esto indica el predominio en las muestras analizadas de los minerales magnéticos magnetita (hierro magnético) $FeFe_2O_4$ (un 72,4 % de Fe) (sistema cúbico); maghemita $\gamma-Fe_2O_3$ y otros (Milovski y Kónonov 1988). En el intervalo fuertemente magnético se incluyen las muestras con una $SM \geq 62,8 \cdot 10^{-3}$ SI, donde predomina la magnetita (hierro magnético) $FeFe_2O_4$ (un 72,4 % de Fe).

4.2. Relación entre los valores de la SM con las diferentes litologías de la roca del basamento

Cuando es posible proporcionar los valores de SM de las muestras de las secciones delgadas durante los estudios petrográficos, antes de realizar las observaciones en el microscopio, resulta de gran utilidad, pues permite usar la caracterización y clasificación magnética, que revela las heterogeneidades magnéticas y consecuentemente mineralógicas existentes dentro de los grupos de muestras de una misma clasificación petrográfica. De esta forma, se puede anticipar que no todo el material de las muestras es homogéneo y se advierte de la necesidad de analizar algunas muestras con detalle y análisis especiales. A continuación se discute la clasificación magnética de cada litología. Resulta pertinente aclarar que la clasificación, nomenclatura y codificación de las litologías usadas siguió un criterio petrográfico.

Serpentinitas

Se incluyó dentro de la litología serpentinita a las siguientes muestras: serpentinita oxidada, serpentinita, serpentinita con abundante cromita, serpentinita fracturada y oxidada, serpentinita por harzburgita oxidada, serpentinita cloritizada y carbonatizada oxidada, serpentinita

mineralizada, oxidada, serpentinita con intensos procesos de oxidación, serpentinita con procesos de alteración secundarios, serpentinita antigorítica. El histograma de la SM de las serpentinitas, (Figura 1) es polimodal, lo que revela la heterogeneidad de la litología serpentinita, derivada de los procesos y fenómenos geológicos a que están sometidas. Un total de diez muestras presentó valores de SM $>12,5 \cdot 10^{-3}$ SI, a las cuales corresponden contenidos de Cr_2O_3 , Fe_2O_3 y FeO por encima de la media de la población.

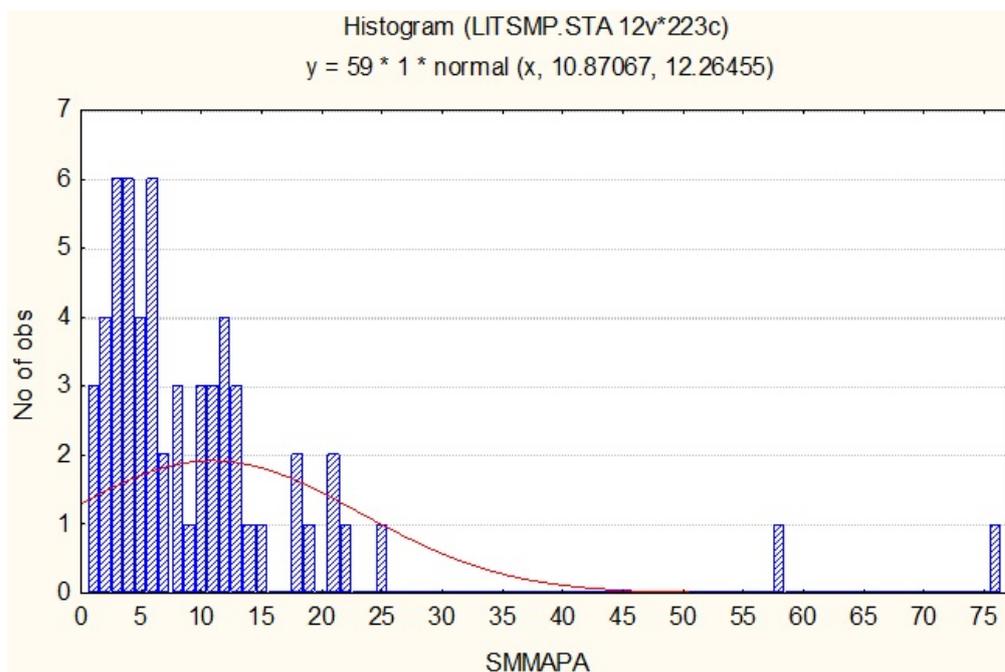


Figura 1. Susceptibilidad magnética de las serpentinitas.

Harzburgitas

Se consideraron como de esta litología las siguientes muestras: harzburgita serpentinizada, serpentinita de composición harzburgítica y serpentinita harzburgítica. Desde el punto de vista magnético y mineralógico la población es heterogénea. El histograma de la SM de las harzburgitas es polimodal y se muestra en la Figura 2. Existen tres muestras que se separan de la población con valores de SM $>12,5 \cdot 10^{-3}$ SI y contenidos de Cr_2O_3 , Fe_2O_3 y FeO por encima de la media de la población.

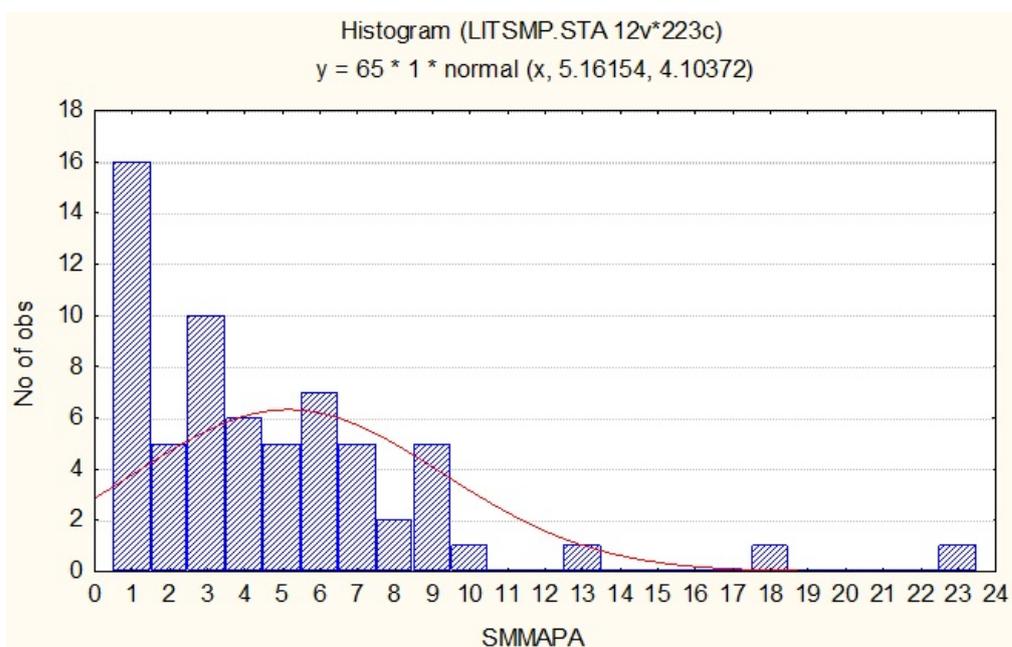


Figura 2. Susceptibilidad magnética de las harzburgitas.

Lherzolitas

Dentro de esta litología se consideran: lherzolita serpentinizada y lherzolita serpentinizada, alterada. Según los datos de la SM son dos muestras muy diferentes. La lherzolita serpentinizada tiene una $SM = 17,91 \cdot 10^{-3}$ SI y un contenido de $FeO = 8,95\%$, mientras que la lherzolita serpentinizada, alterada, tiene valores de $SM = 5,03 \cdot 10^{-3}$ SI y contenido de $FeO = 4,48\%$. El histograma de la SM de las lherzolitas se muestra en la Figura 3.

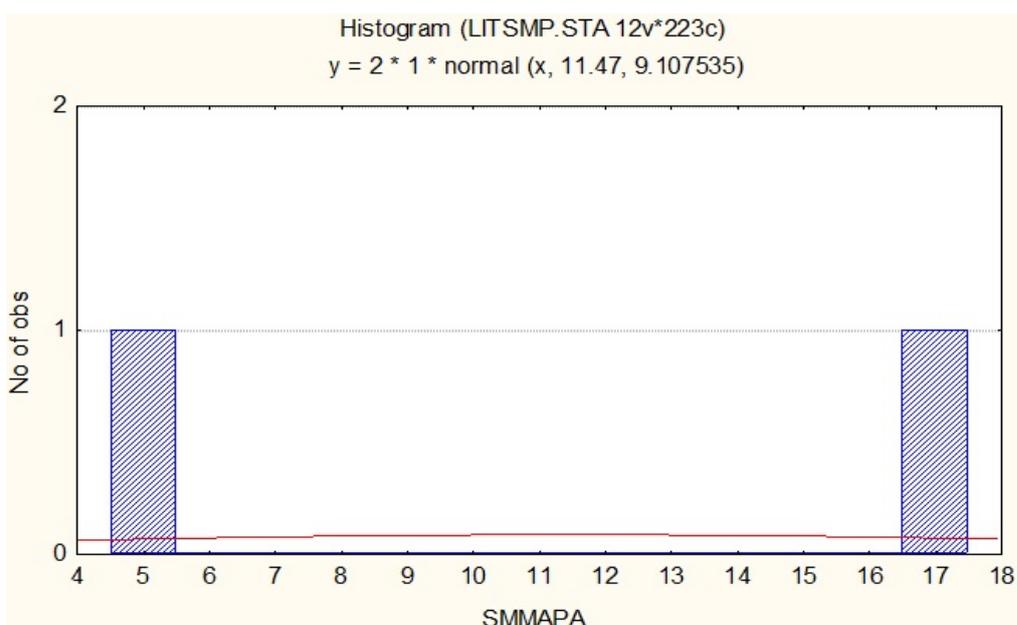


Figura 3. Susceptibilidad magnética de las lherzolitas.

Dunitas

Bajo el nombre de dunitas se incluyeron: dunita serpentizada, serpentinita por dunita, dunita enstatítica serpentizada, serpentinita con intensos procesos de oxidación de composición dunítica y serpentinita de composición dunítica. El histograma (Figura 4) de la SM de las dunitas es también polimodal, lo que revela la heterogeneidad de esta litología. 18 muestras forman poblaciones e individuos aislados. En general, las muestras con $SM > 12,5 \cdot 10^{-3}$ SI presentan contenidos de Cr_2O_3 , Fe_2O_3 y FeO por encima de la media de la población.

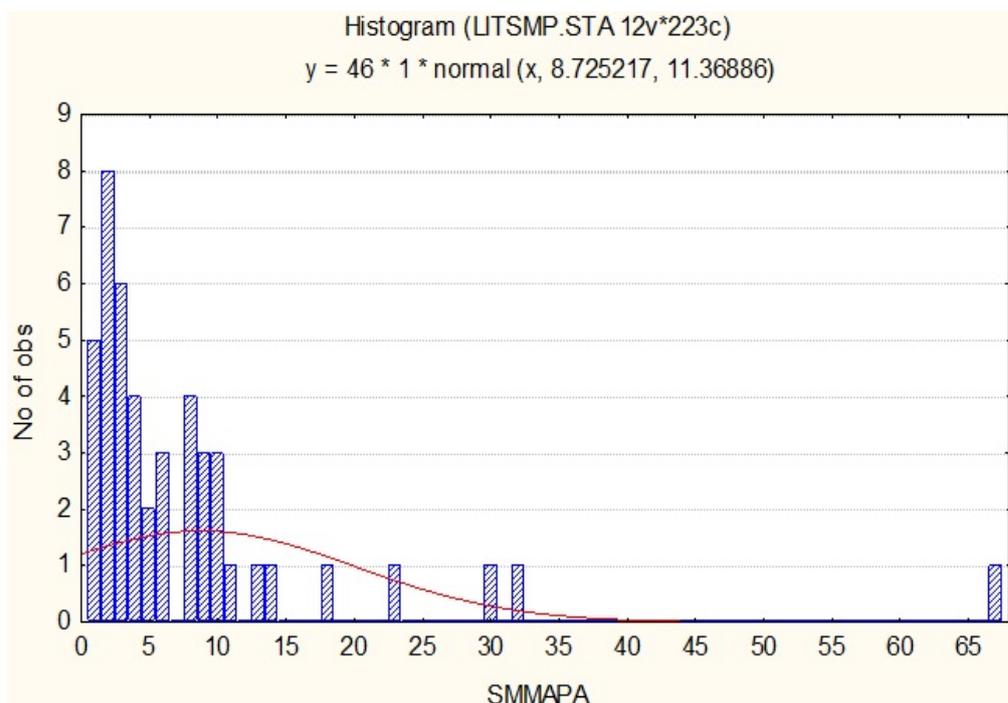


Figura 4. Susceptibilidad magnética de las dunitas.

Peridotita plagioclasa

Se consideró peridotita plagioclasa a las peridotitas plagioclásicas, serpentinita peridotítica, serpentinita por peridotita plagioclásica oxidada. En la Figura 5 se muestra el histograma de la SM de la peridotita plagioclasa, revelando igualmente la heterogeneidad de la litología. Por sus valores de SM, 13 muestras forman poblaciones e individuos aislados. Las muestras con $SM > 12,5 \cdot 10^{-3}$ SI presentan contenidos de Cr_2O_3 , Fe_2O_3 y FeO por encima de la media de la población.

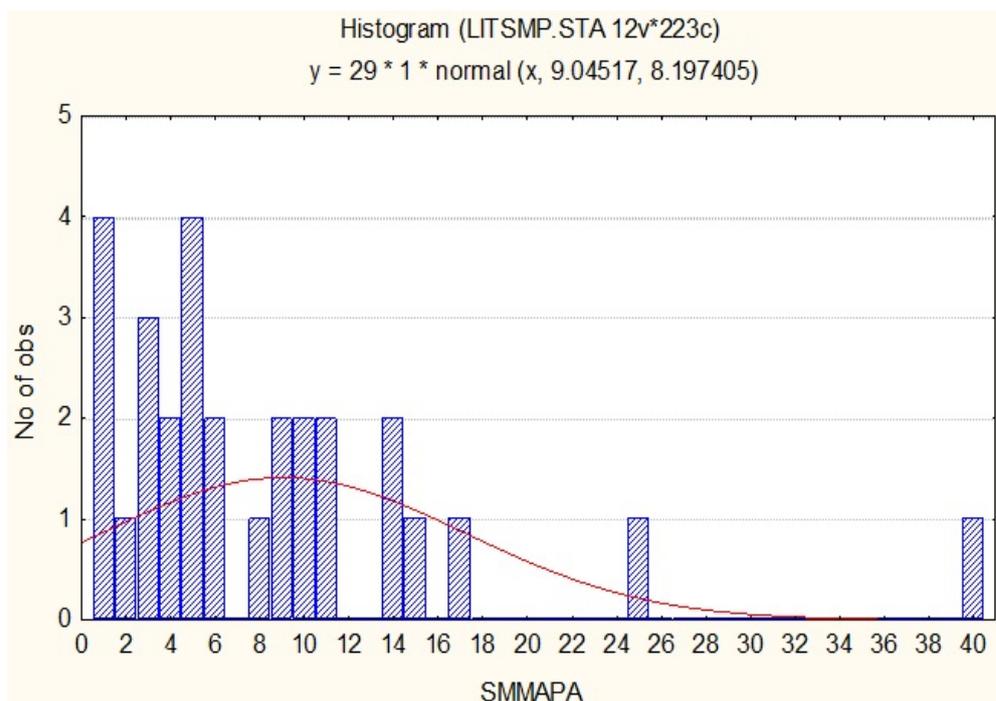


Figura 5. Susceptibilidad magnética de las peridotitas plagioclasas.

Gabro

Dentro de la litología se incluyeron el gabro olivínico alterado y el gabro olivínico. El histograma (Figura 6) es polimodal, lo que evidencia una litología heterogénea. Tres muestras forman poblaciones e individuos aislados. La diferencia mayor se encuentra en una muestra de gabro olivínico alterado, que posee una $SM=13,19 \cdot 10^{-3}$ SI, con un contenido de $FeO=4,01$ %, debido a la presencia de la magnetita en forma de polvo fino. Realmente no es común encontrar un gabro de composición básica con valor de SM típico de los minerales magnéticos. Los resultados de los informes de los levantamientos realizados por el CAME (Consejo de Ayuda Mutua Económica) y de los trabajos de prospección y exploración de la región nororiental de Cuba describen a los gabros como una litología típicamente no magnética.

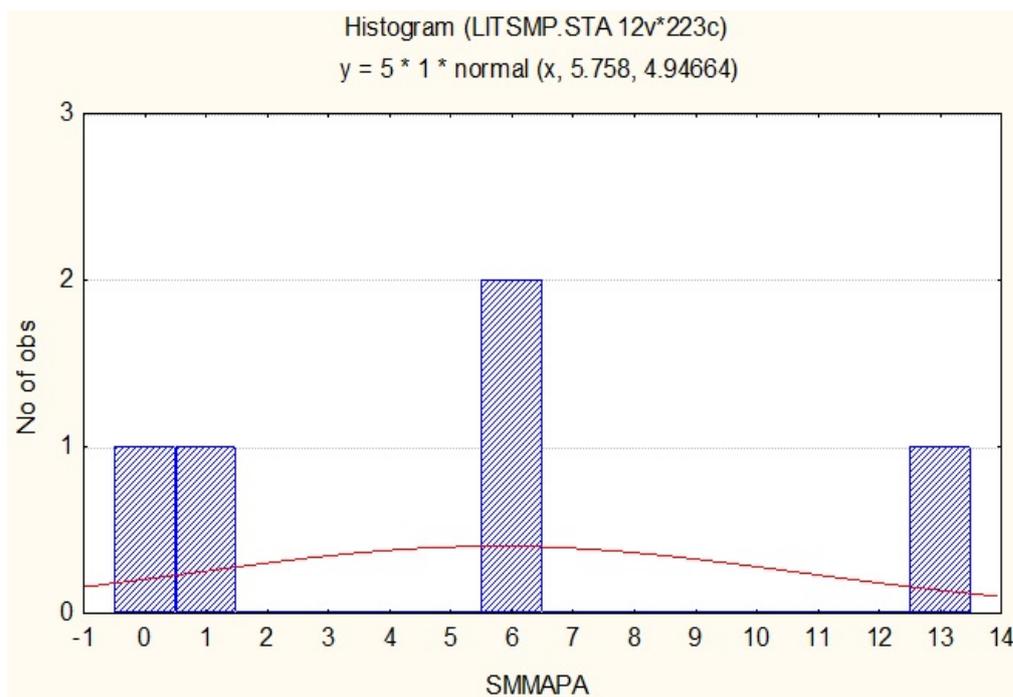


Figura 6. Susceptibilidad magnética del gabro.

En general, la presencia de procesos de alteración como la cloritización, talquitización y carbonatización, la existencia de serpentinita de composición dunítica, con intensos procesos de oxidación, gabro olivínico alterado, dunita serpentinizada, serpentinita por harzburgita oxidada, entre otros, dificultó la caracterización y separación petrográfica de las rocas que, por sus valores de SM, se encuentran en los intervalos magnéticos.

La diferencia principal y contrastante para una misma población litológica es la existencia de muestras de rocas con valores de SM bajos, correspondientes a los intervalos no magnéticos y electromagnéticos, coexistiendo con muestras de rocas con valores de SM altos, típicos de los minerales magnéticos y fuertemente magnéticos. Esto alerta sobre la necesidad de seleccionar algunas muestras para análisis específicos y especiales, con el objetivo de revelar la génesis de sus diferencias.

Las muestras con valores de SM, correspondientes a los intervalos magnéticos y fuertemente magnéticos, se asocian con altos grados de serpentización del olivino y la presencia de magnetita y cromita. Esta información favorece la confección de patrones petrofísicos-petrográficos acertados y contribuye a perfeccionar el modelo físico-geológico del área de estudio. La Figura 7 conjuga en un mapa las litologías establecidas con los valores de SM.

Como la medición de la susceptibilidad magnética constituye un análisis de respuesta rápida, es posible realizarlo a todas las muestras tomadas en las diferentes redes y estadios de estudio de los laboreos mineros, siempre que se cumplan las normas de medición, pues no se destruye la muestra; ello ofrece la posibilidad de extrapolar los resultados a muestras de los pozos a los que se les midió la SM pero no se les practicaron estudios petrográficos.

Es más rápido y barato realizar mediciones de la SM a todas las muestras en una o varias campañas de prospección y exploración, que realizar estudios petrográficos a todas las muestras. Los estudios petrográficos quedarían reservados solamente a las muestras de pozos seleccionados, mientras que la medición de la SM se aplicaría a todas las muestras de todos los pozos, sin encarecer demasiado los trabajos. Es aquí donde radica la importancia de incluir la medición de la susceptibilidad magnética, antecediendo a los estudios petrográficos y del conocimiento a priori del valor de este parámetro en todas las secciones delgadas, antes de que el petrógrafo las analice en el microscopio.

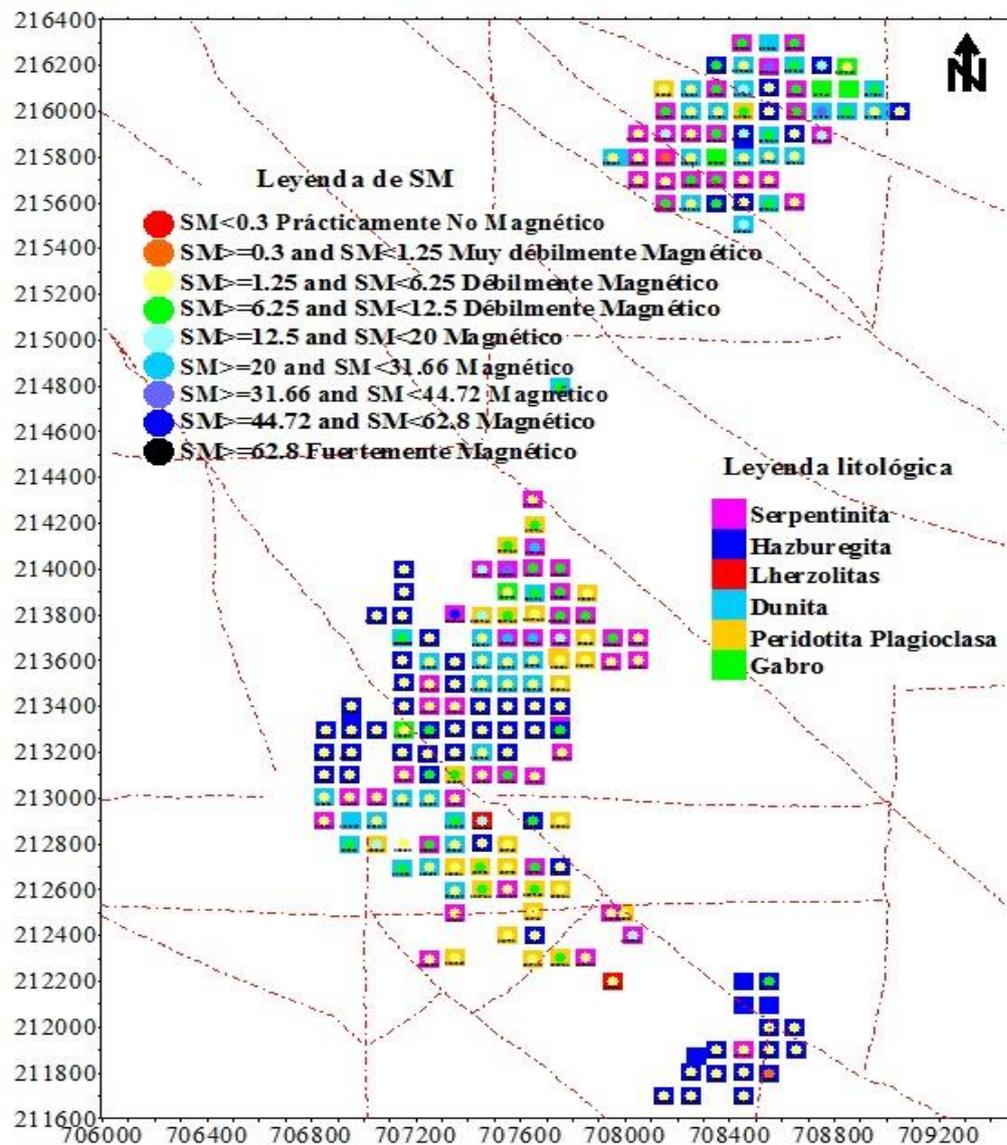


Figura 7. Relación espacial de los valores de la SM con la litología de la roca del basamento.

5. CONCLUSIONES

- Los valores de la SM constituyen una magnífica y barata fuente de información a priori que complementa la información petrográfica de las muestras de los sectores objeto de estudio, a la vez que advierte y orienta al petrógrafo sobre las muestras que se alejan mucho de las características generales de cada población litológica.
- Los incrementos de los contenidos de Cr_2O_3 , Fe_2O_3 y FeO son los responsables de que aumenten los valores de la susceptibilidad magnética en todos los tipos de rocas, tanto de composición ultramáfica como máfica.

- Los procesos de alteración de tipo cloritización, talquitización, carbonatización y los intensos procesos de oxidación, disminuyen los valores de la susceptibilidad magnética.
- Los resultados sustentan la posibilidad de extrapolar la información de composición a muestras con mediciones de SM, pero sin estudios petrográficos. También permite la creación de patrones sobre regularidades petrofísicas-petrográficas y del modelo físico-geológico del área de estudio.

6. REFERENCIAS

- COLEMAN, R. G. *Ophiolites: Ancient Oceanic Litosphere?* Springer-Verlag, 1977. 282 p.
- DELGADO, R. *Magnetometría*. La Habana: Pueblo y Educación, 1979.
- HERNÁNDEZ, A. J. *Metodología para la investigación de la susceptibilidad magnética en muestras de cortezas de intemperismo del norte de oriente de Cuba*. Tesis de maestría. La Habana: ISPJAE, 2009.
- HERNÁNDEZ, A. J.; RODRÍGUEZ, A.; CHÁVEZ, S.; RODRÍGUEZ, A. Y CHAVÉZ, S. Características magnéticas de la corteza de intemperismo y su basamento en la región nororiental de Cuba. En: Congreso de Geología, Minería y Geofísica. Memorias Geomin, La Habana, 19-23 marzo 2001. ISBN 959-7117-10-X. Disponible en: http://www.redciencia.cu/geobiblio/paper/2001_Geomin_Prospeccion_Geofisica.pdf
- MILOVSKI, A.V. Y KÓNONOV, O.V. *Mineralogía*. Moscú: Mir, 1988.
- RUÍZ, R.; PÉREZ, M.; HERNÁNDEZ, A. Y GUTIÉRREZ, M. Trabajos especiales de la exploración del yacimiento La Delta. Informe Geominera Oriente para Moa Nickel S. A. 2013.
- SHERIFF, R. E. *Encyclopedic Dictionary of Applied Geophysics*. USA: Society of Exploration Geophysicists, 2002.
- STRECKEINSEN, A. To each plutonic rock, its proper name. *Earth Science Reviews*, 12(1): 1-33, 1976.

Recibido: 20/04/16

Aceptado: 31/10/17

Alfredo Hernández Ramsay, Máster en Geofísica Aplicada. Empresa Geominera Oriente. Santiago de Cuba, Cuba ahr_amsay@yahoo.es

Caracterización geológico-ambiental de la unidad experimental agrícola Santa Bárbara, municipio de Cañada de Urdaneta, estado Zulia

Geological-environmental characterization of the Santa Bárbara agricultural experimental unit, Cañada de Urdaneta municipality, Zulia State

Liseth Pérez-Albornoz¹, Moraima Fernández-Rodríguez², Betzabeth Gi-Socorro³

¹Licenciada en Educación Mención Geografía. Profesora Asistente. Instituto Universitario de Tecnología de Maracaibo, Venezuela. lisethperezalbornoz@gmail.com

²Magister en Ciencias Ambientales. Profesora Auxiliar. Instituto Superior Minero-Metalúrgico de Moa, Cuba. fernandez@ismm.edu.cu

³Magister en Ciencias Biológicas, Mención Ecología Acuática. Universidad del Zulia, Venezuela. betzagil34@hotmail.com

Resumen

El presente trabajo tuvo como propósito establecer una línea base (referencial) en la Unidad Experimental Santa Bárbara desde un punto de vista geológico y ambiental. La investigación fue descriptiva, no experimental, con una fase de campo. La metodología empleada consistió en la revisión bibliográfica y cartográfica, entrevistas, observación directa en campo, recolección y análisis de muestras, consulta a especialistas, diseño y actualización de plano, y procesamiento de la información. Como resultado se obtuvo la caracterización física y biótica del territorio. Se concluye que el área ha sido intervenida sin tomar en cuenta sus características ambientales ni geológicas, lo cual ejerce un impacto ambiental crítico a la biodiversidad y a los recursos naturales de la zona. Se proponen tres estrategias y nueve acciones concretas destinadas a mejorar la situación de la zona de estudio.

Palabras clave: geología ambiental; impacto ambiental; agricultura; proyectos productivos; Venezuela.

Abstract

The purpose of this work was to establish a baseline (referential) in the Santa Bárbara Experimental Unit from a geological and environmental point of view. The research was descriptive, not experimental, with a field phase. The methodology used consisted of bibliographic and cartographic review, interviews, direct observation in the field, collection and analysis of samples, consultation with specialists, design and updating of plans; and, information processing. As a result, the physical and biotic characterization of the area was obtained. It is concluded that the area has been intervened without taking into account its environmental or geological characteristics, which exerts a critical environmental impact on biodiversity and the natural resources of the area. Three strategies and nine concrete actions are proposed to improve the situation of the study area.

Keywords: environmental geology; environmental impact; farming; productive projects; Venezuela.

1. INTRODUCCIÓN

El conocimiento de las características geológico-ambientales de un lugar es esencial para la conceptualización, diseño y ejecución de proyectos agrícolas. La planificación de los sistemas agrícolas debe partir de la conceptualización de sus parámetros ambientales, con el fin de buscar las estrategias necesarias para minimizar los impactos y lograr la conservación efectiva de los recursos naturales, tales como el agua y el suelo, vitales para el desarrollo de cultivos.

La Unidad Experimental Santa Bárbara (UESB) se ubica en el asentamiento campesino Los Bienes, entre los sectores El Olvido y Campo Sur, parroquia Chiquinquirá, municipio de La Cañada de Urdaneta, estado Zulia (Figura 1). La caracterización ambiental de la mencionada unidad es una necesidad para disponer de información base que proporcione un marco de referencia, lo cual requiere del conocimiento de las características ambientales para la comprensión de las diversas dinámicas e interacciones que en ella se desarrollan.

En este estudio se aplicaron los principios teóricos del enfoque de sistema (Acosta y Fernández 1997). La caracterización geológico-ambiental se realizó con los siguientes objetivos: caracterizar los principales aspectos del medio físico y biótico del ámbito de estudio, analizar la evolución del uso del

espacio en el área investigada, describir la problemática ambiental existente en el entorno de la UESB y proponer alternativas de solución para la problemática ambiental existente.

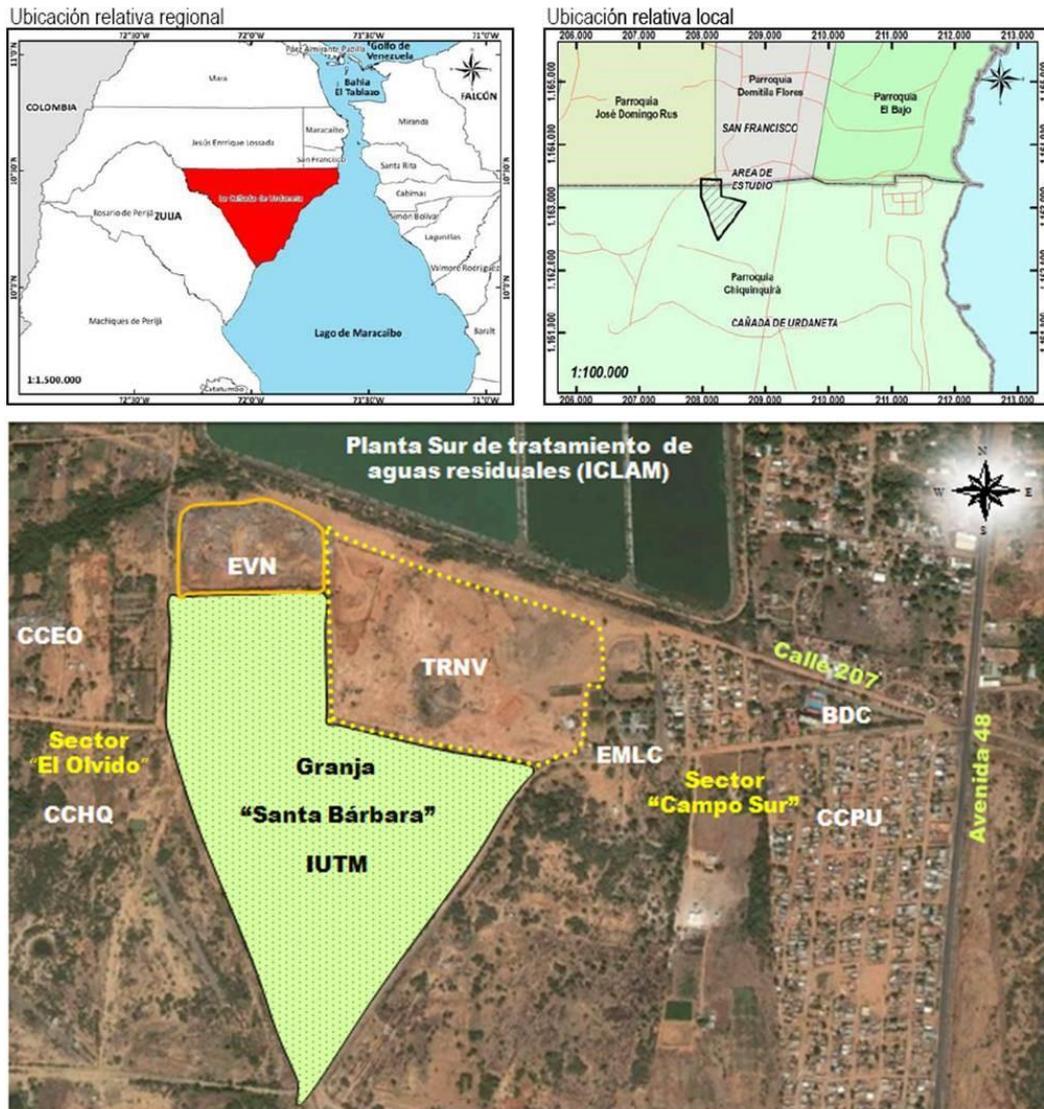


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se llevó a cabo un estudio descriptivo con un diseño no experimental y una fase de campo. En esta investigación se observó y analizó el fenómeno en su contexto natural, recolectando y validando la información documental con revisión en el área de estudio.

La metodología seguida se sintetiza en la búsqueda y análisis de fuentes bibliográficas y cartográficas, actualización de la cartografía existente y revisión de campo que permitió la caracterización del clima, suelo, hidrología, topografía y geología del área de estudio. Se utilizaron reportes

climáticos de la estación meteorológica La Cañada (2007-2014) y las estadísticas de sismicidad de la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas -FUNVISIS (2012-2014 y primer trimestre de 2015). Se realizaron ensayos granulométricos a cuatro muestras recolectadas en dos calicatas en el área de estudio, también se consideraron los estudios previos de diversos investigadores (Noguera *et al.* 1994; Larreal *et al.* 2012, 2013 y Briceño *et al.* 2015).

En cuanto a la caracterización del medio biótico se hizo un estudio previo de imágenes satelitales de la zona y cartas topográficas escala 1:1250, para luego realizar una serie de visitas exploratorias de campo y, con base en la información suministrada por los empleados de la granja, se delimitó el área representativa de las diferentes comunidades vegetales presentes.

La identificación de cada espécimen a nivel de familia, género y/o especie se determinó con ayuda de literatura especializada (Linares 1998; Medrano *et al.* 1999; Valle, Borges y Rincones 2000; Llamaza *et al.* 2003; Martínez y Alfonso 2003; Pietrangeli 2006; Delgado y Ramírez 2008; Hokche, Berry y Huber 2008; The Plant List 2010; Soto, Díaz y Ramírez 2014; Benavides 2015), la consulta a especialistas y a través de comparaciones de las colecciones de los herbarios de la Universidad del Zulia (herbario de Agronomía, HERZU) y el herbario de referencia de la Facultad de Ciencias (HMBLUZ).

Para complementar la caracterización ambiental se revisaron las imágenes satelitales históricas de la UESB de los años 2001, 2004, 2006, hasta el 2015; unido a entrevistas a personas claves, revisión de campo y documentación fotográfica. Esto fue muy importante en la comprensión de la evolución del espacio y su problemática ambiental.

Para la descripción de los factores que inciden negativamente en el medio ambiente se aplicó la metodología para la determinación y caracterización del daño ambiental y del peligro de daño ocasionado, de GreenlabUC (2012) y para las alternativas de solución se realizó un análisis DAFO al ámbito de estudio para utilizar todos los recursos disponibles.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Caracterización física

El paisaje de la UESB se encuentra dentro de la altiplanicie del lago de Maracaibo, por lo que no presenta contrastes topográficos marcados y una pendiente inferior al 1 % hacia el NE. Como señalan Alvillar y otros investigadores (citado por Larreal *et al.* 2013, p. 94): "esta forma de paisaje se caracteriza por presentar afloramientos de depósitos detríticos en

forma de glaciares coluviales con topografía predominantemente plana, formados de materiales retomados de la Formación El Milagro”.

El área en estudio se emplaza sobre la formación El Milagro (Figura 2) la cual se encuentra recubierta por suelos arenosos sueltos de grano fino a muy fino, de acuerdo al análisis granulométrico realizado en la zona de estudio.

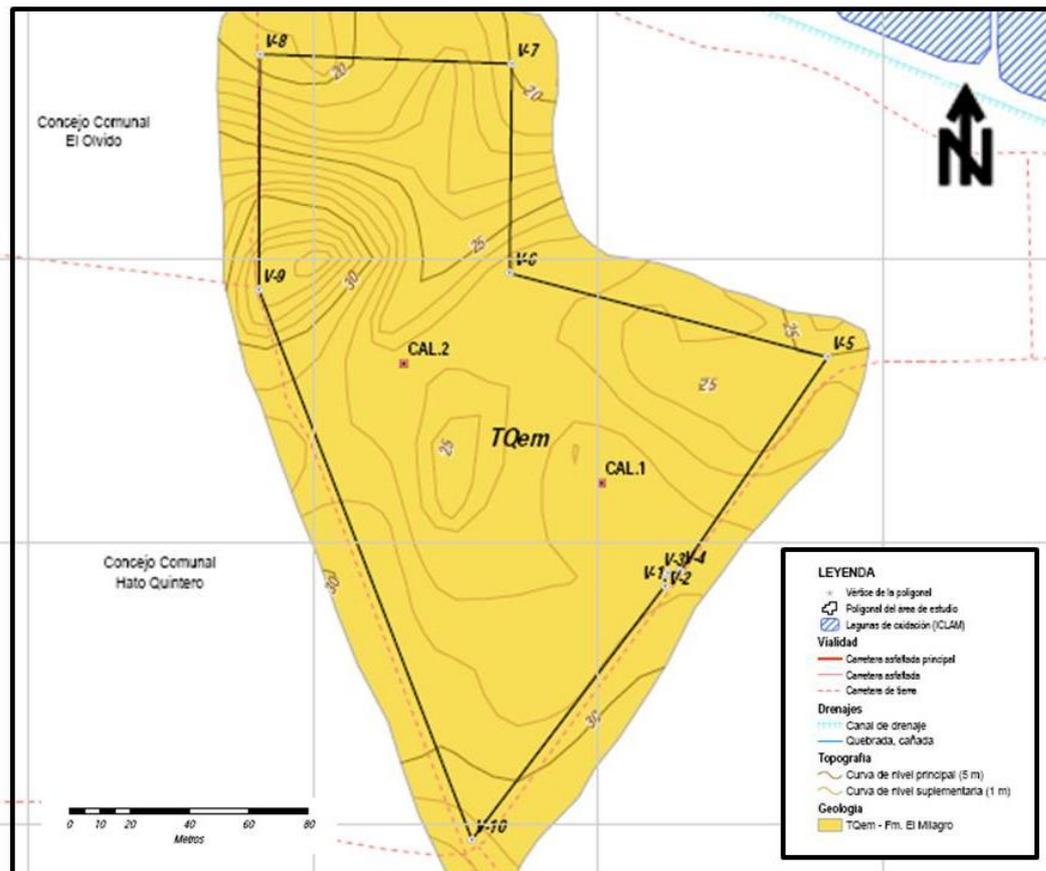


Figura 2. Mapa geológico del ámbito de estudio. Fuente: Pérez (2015).

En cuanto a la sismicidad, la UESB se encuentra en la zona sísmica 3, lo que indica que existe un peligro sísmico intermedio que, de acuerdo a las estadísticas sísmicas de FUNVISIS, en el primer trimestre del 2015 se registraron nueve eventos sísmicos en el rango de magnitud entre 2,5 y 3,5.

El área se encuentra dentro de la cuenca hidrográfica de la cañada El Bajo Grande y se caracteriza por un clima semiárido, con una precipitación media anual de 696,9 mm y una temperatura media anual de 29,30 °C.

3.2. Caracterización biótica

Se identificaron y ubicaron nueve unidades muestrales que constituyen los diferentes ambientes alterados situados en los alrededores de la UESB. Estos comprenden:

- Arbustales bajos, medio densos a densos;
- Asociación arbustales bajos, medio densos a ralos, con pastizales sin riego y suelos desnudos;
- Asociación de pastizales sin riego, con arbustales bajos, ralos dispersos con suelos desnudos;
- Herbazales secundarios bajos a ralos con suelos desnudos;
- Herbazales bajos, ralos dispersos con suelos desnudos;
- Cultivos perennes sin riego;
- Cultivos anuales con riego;
- Árboles ornamentales;
- Frutales cultivados.

En estos ambientes se reconocieron 35 familias y 60 géneros representados en 67 especies, incluyendo todas las formas de crecimiento (Figura 3).

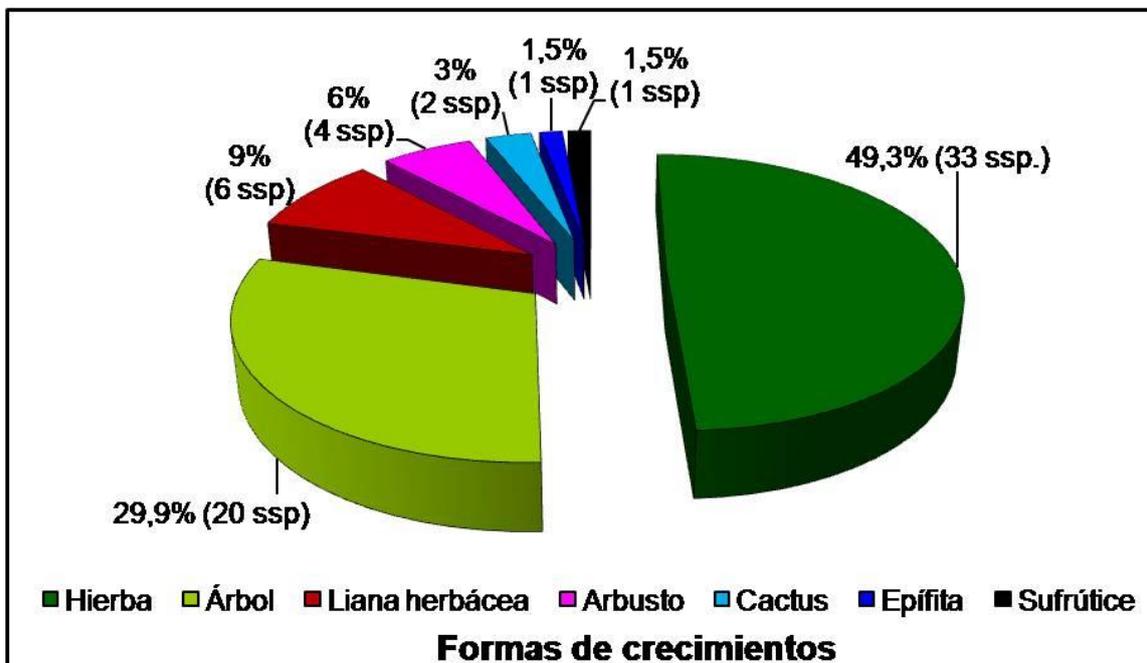


Figura 3. Formas de crecimiento presentes en el área de estudio. Fuente: Gil y Pérez (2015).

Por su parte, la densidad faunística del área se puede considerar baja por encontrarse en hábitats completamente intervenidos. En el área de estudio no se reportan especies de fauna endémicas en peligro de extinción; sin embargo, se hallaron especies de interés cinegético (*Didelphis marsupialis*, *Iguana iguana* y *Forpus passerinus*).

3.3. Uso del espacio de la UESB

El uso principal del emplazamiento ha sido agrícola, no obstante, las áreas destinadas a las actividades agrícolas presentan una tendencia hacia la reducción significativa de su superficie que conlleva a una baja producción alimentaria. Esta situación se ha agravado por la incorporación de actividades de extracción de la capa vegetal y argílico, vertederos no controlados y deforestación en el ámbito de estudio.

Esta afectación representa un grave problema por la pérdida de valor paisajístico y por la potenciación de los procesos erosivos en el área. Lo más grave es su cercanía al cauce de la cañada El Bajo, pues acarreará consecuencias a largo plazo al perjudicar su cuenca hidrológica.

En el año 2012 se observó al norte y noreste una deforestación de 26 ha y el aumento de la extracción de capa vegetal en dos zonas: al norte de la UESB (área invadida) y al este en los terrenos cedidos a Radio Nacional Venezolana (RNV), donde se observa, además, la presencia de vertederos no controlados al noreste. Cabe destacar que en el 2014 se inició una nueva zona de extracción de la capa vegetal y argílico al noroeste de los terrenos cedidos a RNV, en el límite noreste de la UESB. La acumulación de desechos sólidos en el saque inactivo ya abarca 3,9 ha en este mismo periodo y continúa en expansión desde el 2015.

3.4. Problemática ambiental en el ámbito de estudio

Del análisis del uso del espacio realizado en el área de estudio se pudo observar que una serie de acciones tienen incidencias negativas sobre el ambiente y que pueden causar efectos no previstos (Figura 4). Estas acciones se describen a continuación:

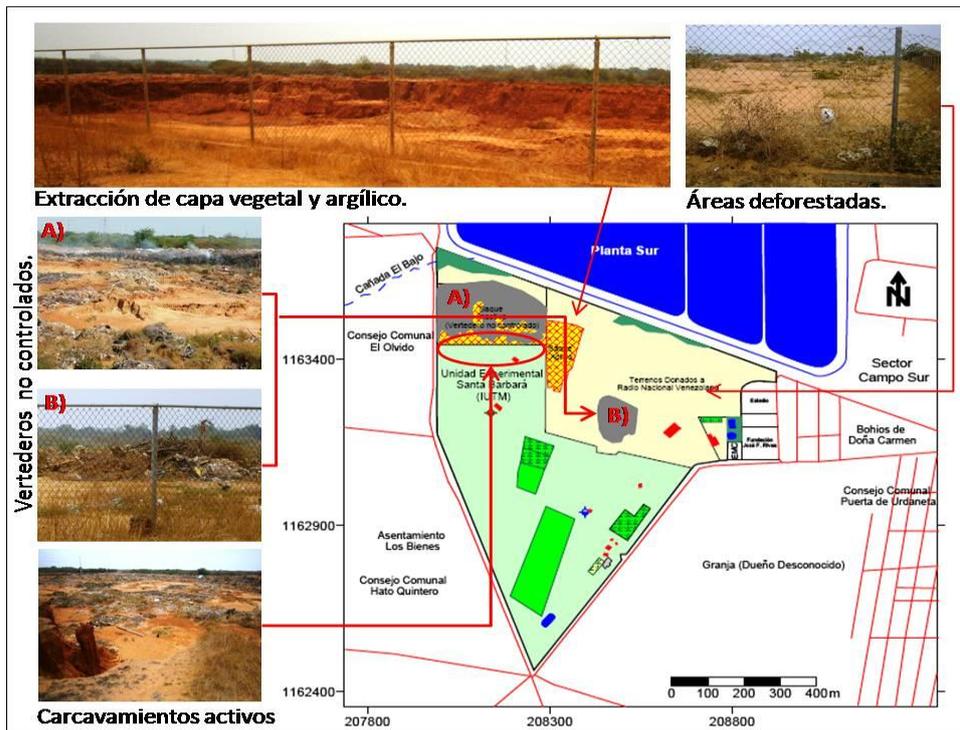


Figura 4. Problemática ambiental existente en el ámbito de estudio. Fuente: Pérez (2015).

- *Deforestación*

Esta acción se observa desde la imagen satelital analizada del año 2012 y abarca un total de 26 ha; el área exhibe vegetación típica muy dispersa con suelos desnudos. Esto pudo haber ocasionado una importante afectación para la flora y la fauna del lugar.

- *Extracción y remoción de capa vegetal y argílico*

Esta actividad se desarrolla desde el 2011 y ha afectado un área aproximada de 6,91 ha al momento del estudio y continúa en expansión en los terrenos cedidos a RNV. Ha representado una amenaza continua a la degradación física y química de los suelos pobres en materia orgánica y deficientes en nutriente. Las actividades agrícolas han sido desarrolladas con métodos tradicionales sin el empleo extensivo de agroquímicos, por lo que representaba un riesgo bajo al ecosistema, pero desde los inicios de la extracción de la capa vegetal y argílico en el área la degradación ha aumentado de forma acelerada y ha incidido sobre la producción agrícola de la zona. Esta acción ha desencadenado los procesos erosivos en el área, provocando la aparición de acarcavamientos al norte de la UESB.

- *Vertederos no controlados*

Los vertederos se desarrollan en las áreas abandonadas de extracción de capa vegetal y argílico; en dicha zona se dispone cualquier tipo de desecho por lo que se estima que los lixiviados que allí se generan sean altamente contaminantes para los suelos y las aguas (superficiales y subterráneas). Otro daño asociado a esta actividad es la pérdida de belleza escénica, del valor de los terrenos y de las cosechas producidas en el área, además de las implicaciones de salud de los habitantes de la zona y de los consumidores finales de los productos agrícolas del área.

3.5. Caracterización e importancia del daño en la biodiversidad y recursos naturales renovables de la UESB

El daño ambiental se estimó, de acuerdo con los criterios establecidos, como de significancia crítica (Tabla 1), con un daño reparable (Tabla 2) y una importancia muy grave (Figura 5), por lo que requiere la pronta intervención para su recuperación.

Tabla 1. Estimación de la significancia del daño en la biodiversidad y recursos naturales renovables

Factor	Criterio	Valoración	Puntuación
Grado de perturbación, GP	Cambios en el relieve y geomorfología del área afectada	Muy Alta	9
Duración, Du	Si el tiempo total es o estará entre 1 y 10 años	Alta	7
Extensión, Ex	Dentro de un rango de 10-100 km ²	Alta	7
Vulnerabilidad, Vu	Uno de los ecosistemas involucrados puede ser categorizado como vulnerable	Alta	7
Pérdida de valor social, VS	Afecta entre 50 % y 75 % de la población presente en el área de influencia del daño	Alta	7
Suma de los factores GP+Du+Ex+Vu+VS			37
Componente	Cualificación significancia	Puntaje	
Biodiversidad y recursos naturales renovables	Crítica (39 pto)	9	

Tabla 2. Estimación de la irreparabilidad e importancia del daño en la biodiversidad y recursos naturales renovables

Subcomponente	Irreparabilidad	Puntuación
Suelo	Muy Alta	10
Agua	Alta	8
Aire	Media	6
Biodiversidad	Media	6
Paisaje	Alta	7
Promedio		7

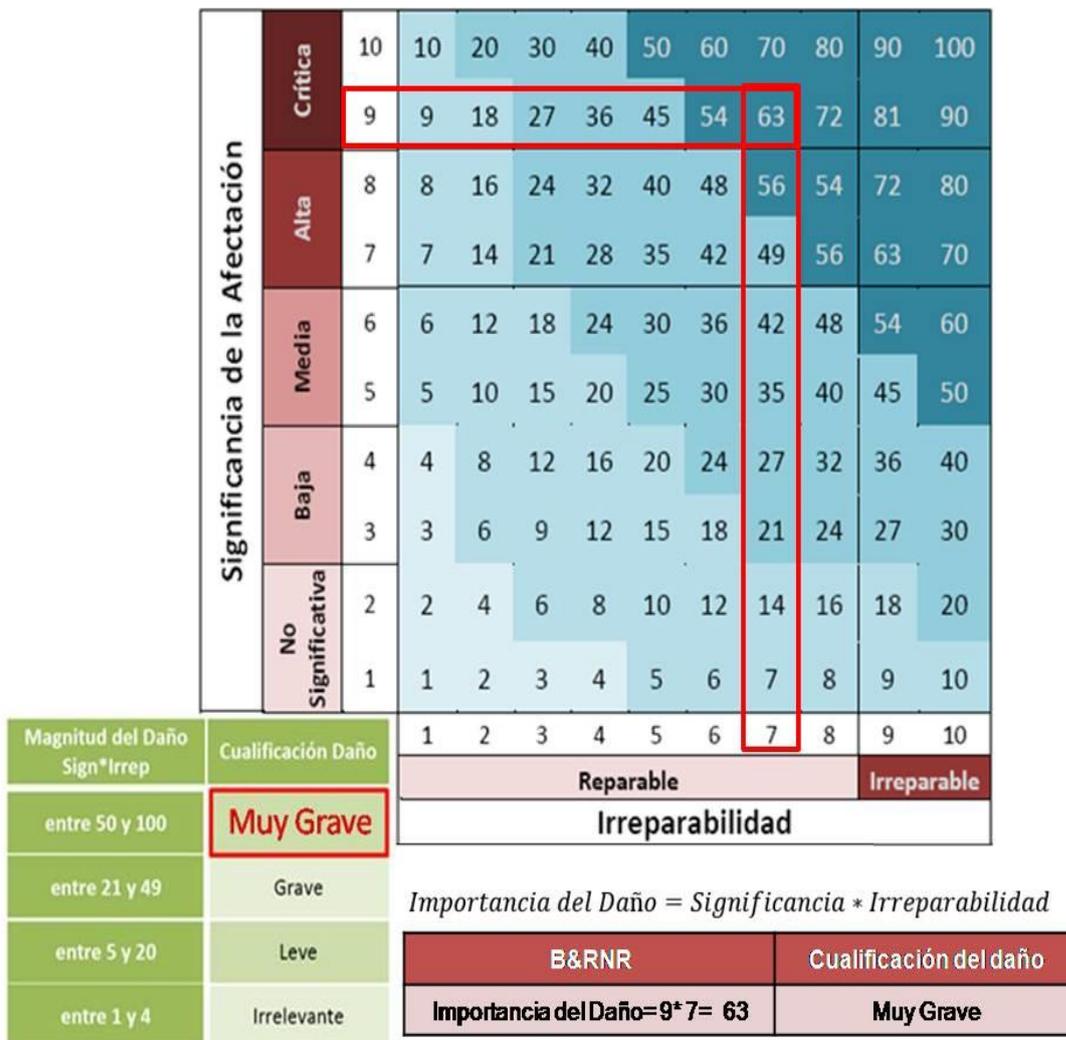


Figura 5. Resultado de la caracterización del daño ambiental en el área de estudio. Modificado de GreenlabUC (2012).

Las actividades desarrolladas en la UESB no consideran las características ambientales de la misma, por lo que se encuentra bajo una fuerte presión ambiental ante los diferentes usos inapropiados que han tenido lugar y que ha repercutido en las actividades agrícolas, generando un daño muy grave sobre la biodiversidad y los recursos naturales.

Ante esta situación se debe insistir en la reducción de las áreas cultivables en el sitio (Figura 6), esto incide directamente sobre la producción de alimentos, tanto vegetal como animal, aunque no pudo ser cotejado ante la falta de reportes de producción del área.

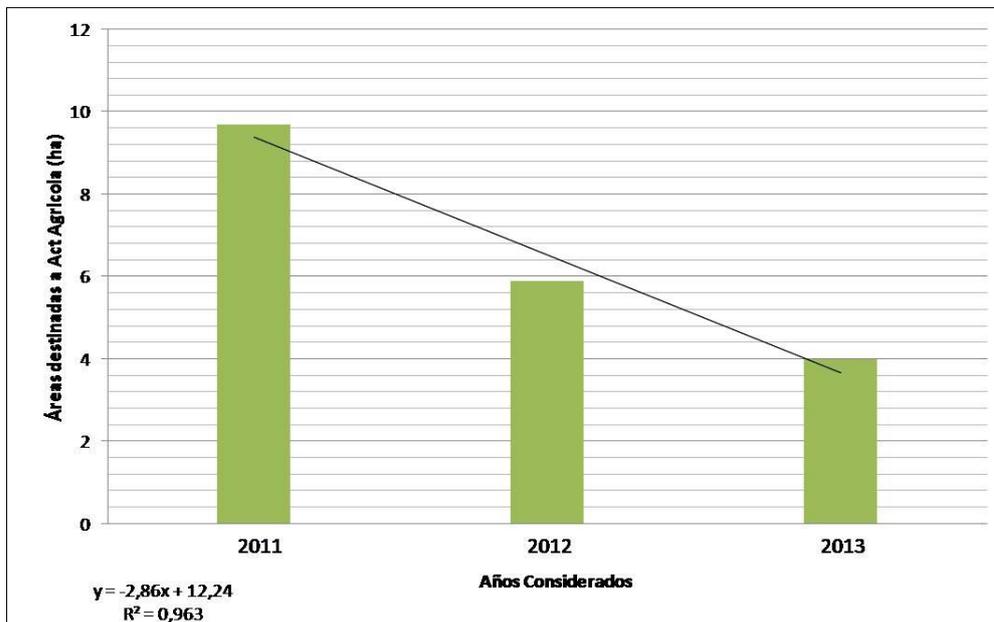


Figura 6. Disminución de las áreas de cultivos periodos 2011-2013.

3.6. Estrategias y acciones propuestas

La Tabla 3 resume la propuesta de estrategias y acciones para la remediación de los tres problemas ambientales principales identificados en el área de estudio.

Tabla 3. Propuesta de estrategias y acciones

Impactos ambientales	Estrategias	Acciones
Erosión del suelo	Estabilidad del talud (zona crítica en el desarrollo de cárcavas) del antiguo área de saque	Diseño de un proyecto para la estabilidad del Talud Sur del área de saque al norte de la UESB, dirigido por los PNF Obras Civiles, Geociencias, Agroalimentaria y Materiales Industriales
Efectos negativos del vertedero no controlado al norte y este de la UESB	Rehabilitación de las áreas utilizadas como vertederos no controlados	Diseño de un proyecto para la evaluación de la contaminación de los acuíferos del área, dirigido por el PNF en Geociencias Búsqueda de alianzas estratégicas con Planimara e ICLAM para obtener la información necesaria en la evaluación de los acuíferos Diseño de un plan para el cierre y rehabilitación de las áreas utilizadas como vertedero, evaluado desde un punto de vista medioambiental, técnico y económico; deben involucrarse todos los PNF del IUTM
Pérdida de capa vegetal y argílico al este de la UESB	Evitar las actividades de extracción de capa vegetal y argílico al este de la UESB	Establecer una agenda de reuniones con los representantes de Radio Nacional Venezolana (RNV) y directivos de FUNDAIUTM con el objetivo de detener las actividades de extracción de capa vegetal y argílico en los terrenos donados a RNV Formular la denuncia ante los entes competentes en materia ambiental (Ministerio del Poder Popular para el Ambiente y de Agricultura, Alcaldía de la Cañada de Urdaneta, Gobernación del estado Zulia), con el fin de detener la extensión de la extracción de material que afecta la producción de la zona y la soberanía agroalimentaria Involucrar a la masa estudiantil, mediante charlas, en la problemática ambiental existente en la UESB para generar sensibilización en torno a este espacio cedido en comodato al IUTM, para fines de investigación y desarrollo de práctica del PNF en agroalimentaria Establecer en las instalaciones de la UESB una extensión de sus programas curriculares y cursos, dirigidos a las comunidades aledañas, en aras de fortalecer su relación con la misma y, de esta forma, convertirlos en aliados, para solucionar la problemática ya planteada

4. CONCLUSIONES

- En el análisis de la composición florística se reconocieron 35 familias y 60 géneros representados en 67 especies. En cuanto a la fauna, en el área de estudio no se reportan especies de fauna endémicas que estén en peligro de extinción; sin embargo, se hallaron especies de interés cinegético. La densidad faunística del área se considera baja por encontrarse en hábitats completamente intervenidos.
- El uso predominante en la UESB es notoriamente agrícola, sin embargo, desde finales de 2011 y principios de 2012 se evidencia otros usos inapropiados del suelo, como la extracción de capa vegetal y argílico al norte del área, que en la actualidad está siendo utilizado como vertedero no controlado. En el año 2014 se traslada esta actividad altamente degradante al noreste del área, que se encuentra aún activa.
- Por los usos inapropiados de los terrenos de la UESB se evidencia un fuerte impacto ambiental que ocasiona daños a la biodiversidad y a los recursos naturales (suelo, agua y paisaje), que se estima crítica y reparable, con una importancia alta de intervención, al tener una magnitud del daño de 63 y una cualificación de muy grave.

5. REFERENCIAS

- ACOSTA, C. Y FERNÁNDEZ, O. *Teoría de Sistemas, Región y Problemática Ambiental*. Maracaibo (Venezuela): EdiLUZ, 1997. 130 p.
- BENAVIDES, J. Árboles y arbustos forrajeros: una alternativa agroforestal para la ganadería. Costa Rica. Conferencia electrónica de la FAO sobre Agroforestería para la producción animal en Latinoamérica. 2015. Disponible en:
<http://www.fao.org/Ag/aga/AGAP/FRG/Agrofor1/bnvdes23.htm>.
- BRICEÑO, C.; MACHADO, M.; MORENO, M. Y RODRÍGUEZ, A. Caracterización sedimentológica del área destinada para la construcción de una Piscina para el cultivo de Cachama, en la Unidad Experimental Santa Barbará. Proyecto sociocomunitario del PNFG. Departamento de Geología e Hidrocarburos. Instituto Universitario de Tecnología de Maracaibo. 2015.
- DELGADO, H. Y RAMÍREZ, L. Árboles y arbustos forrajeros como alternativa alimenticia para la ganadería bovina y su impacto sobre la productividad animal. *Desarrollo sostenible de la ganadería doble propósito*. (Eds. C. González y E. Soto). Venezuela: Ediciones Astro Data SA Maracaibo, 2008, p. 385. Disponible en:
http://www.avpa.ula.ve/libro_desarrollosost/pdf/capitulo_32.pdf.

- GREENLABUC Metodología para la determinación y caracterización del daño ambiental y del peligro de daño ocasionado. Informe Final. 2012. Disponible en:
<http://www.greenlabuc.cl/wp-content/uploads/2012/05/Metodología-para-la-Determinación-y-Caracterización-del-Daño-Ambiental-.pdf>.
- HOKCHE, O.; BERRY, P. Y HUBER, O. *Nuevo Catálogo de la Flora Vasculare de Venezuela*. Caracas: Fundación Instituto Botánico de Venezuela, 2008.
- LARREAL, M.; JIMÉNEZ, L.; POLO, V. Y NOGUERA, N. Definición de la serie de suelos San Francisco, en el sector semiárido de la altiplanicie de Maracaibo. Variabilidad de la morfología del suelo. *Revista de la Facultad de Agronomía de la Universidad del Zulia*, 29(1): 37-55, 2012.
- LARREAL, M.; POLO, V.; JIMÉNEZ, L.; MÁRMOL, L. Y NOGUERA, N. Variabilidad de algunas propiedades físicas de los suelos para la definición de la serie "Maracaibo", sector semiárido de la altiplanicie de Maracaibo, estado Zulia, Venezuela. *Revista Científica UDO Agrícola*, 13(1): 93-103, 2013.
- LINARES, O. *Mamíferos de Venezuela*. Caracas: Sociedad Conservacionista Audubon de Venezuela, 1998. 691 p.
- LLAMOZA, S.; DUNO, M.; MIER, W.; RIINA, R.; STAUFFER, F.; AYMARD, G. Y HUBER, O. *Libro rojo de la Flora Venezolana*. PROVITA – Fundación Polar. FIBV. Conservación internacional. 2003.
- MARTÍNEZ, M. Y ALFONSO, P. Especies de malezas más importantes en siembras hortícolas del Valle de Quibor, estado Lara, Venezuela. *Bioagro*, 15(2): 91–96, 2003.
- MEDRANO, C.; FIGUEROA, V.; GUTIÉRREZ, W.; VILLALOBOS, Y.; AMAYA, L. Y SEMPRÚN, E. Estudio de las malezas asociadas a plantaciones frutales en la planicie de Maracaibo, Venezuela. *Revista de la Facultad de Agronomía de la Universidad del Zulia*, 16(6): 583–596, 1999.
- NOGUERA, N.; PETERS, W.; JIMÉNEZ, L. Y MORENO, J. Centro de información y referencia de suelos para la cuenca del lago de Maracaibo. Caracterización química y mineralógica de los suelos de la colección. *Revista UCV*, 2(2), 1994. Disponible en:
http://saber.ucv.ve/ojs/index.php/rev_venes/article/view/1039
- PIETRANGELI, M. Inventario florístico y caracterización fisonómica-estructural de los bosques y vegetación riparina buffer asociada, presentes en los alrededores de los embalses Socuy y Tulé, Edo. Zulia. Informe de avance del 2do año del proyecto financiado con fondos nacional de ciencias, tecnología e innovación (Fonacit S1- 2001001069). 2006.
- THE PLANT LIST. Versión 1. 2010. Disponible en: <http://www.theplantlist.org/>
- SOTO, J.; DÍAZ, J. Y RAMÍREZ, M. Diagnóstico florístico y fitosanitario de las especies arbóreas presentes en la parroquia Francisco Eugenio

Bustamante, Maracaibo, estado Zulia, Venezuela. *Revista de la Facultad de Agronomía de la Universidad del Zulia*, 31(3): 341-361, 2014.

VALLE, A.; BORGES, F. Y RINCONES, C. Principales malezas en cultivos de caña de azúcar en el municipio de Unión del estado Falcón, Venezuela. *Revista de la Facultad de Agronomía de la Universidad del Zulia*, 17(1): 51-62, 2000.

Recibido: 14/07/17

Aceptado: 04/10/17

Liseth Pérez-Albornoz, Licenciada en Educación Mención Geografía. Profesora Asistente. Instituto Universitario de Tecnología de Maracaibo, Venezuela. lisethperezalbornoz@gmail.com

Definición de localizaciones para la ubicación de pozos monobore en el yacimiento B6 LL 370 del campo Tía Juana Lago, Venezuela

Definition of localities for placing monobore wells in the B6 LL 370 oil deposit from Tía Juana Lago field, Venezuela

Alfonso G. Castro-Cerrada¹, José Q. Cuador-Gil², Carlos G. Banzer-Sánchez³

¹Master en Geología. Geólogo de Reservas División Boyaca. FPO. PDVSA Barinas, Venezuela. castroagx@pdvsa.com

²Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Titular. Universidad de Pinar del Río, Cuba. cuador@upr.edu.cu

³Master en Ingeniería de Petróleo. PDVSA Gas Occidente. Maracaibo. Venezuela. banzercg@pdvsa.com

Resumen

La discordancia angular del Eoceno, que pone en contacto las arenas B de la formación Misoa con la formación La Rosa, afecta, estructura arriba, el espesor del miembro B6, truncándolo hasta erosionarlo en dirección noroeste, con presencia de cambios de facies y fallas locales. Con el objetivo de contribuir a recuperar las reservas de gas se inició una revisión geológica para ubicar puntos de drenaje. La presente investigación tiene el propósito de identificar el marco estratigráfico y estructural favorable para situar, en la parte alta de la estructura, pozos monobore para drenar las reservas remanentes de gas del yacimiento B6 LL 370, del campo Tía Juana Lago. Se pudo establecer que la parcela A-226 es la de mayor prospectividad para el establecimiento de puntos de drenaje para la perforación de pozos monobore por presentar las mejores condiciones geológicas y de yacimiento. Se proponen dos localizaciones (LL-Z-AB-AC-306-A4 y LL-AC-6-C5A1) para completar monobore con tubería de 5-1/2" para un potencial de producción de 2,8 MMPCND.

Palabras clave: geología del petróleo; pozo monobore; campo Tía Juana Lago; puntos de drenajes; reservas remanentes; gas.

Abstract

The angular discordance of the Eocene that puts B sands of the Misoa Formation in contact with the La Rosa Formation affects, structure up, the thickness of the B6 member truncating it until eroding it in a northwesterly direction, with the presence of facies changes and local faults. With the objective of contributing to the recovery of gas reserves, a geological review was initiated to locate drainage points; the present investigation had the purpose of identifying the favorable stratigraphic and structural framework to locate in the upper part of the structure, monobore wells to drain the remaining reserves of gas from reservoir B6 LL 370, from the Tia Juana Lago field. It was established that plot A-226 is the most prospective for the establishment of drainage points for the drilling of monobore wells due to the best geological and reservoir conditions. Two locations are proposed (LL-Z-AB-AC-306-A4 and LL-AC-6-C5A1) to complete monobore with 5-1/2" pipe for a production potential of 2,8 MMPCND.

Keywords: magnetic susceptibility; weathering crust; laterites; Eastern Cuba.

1. INTRODUCCIÓN

Nuevos proyectos para la búsqueda y explotación de reservas gasíferas en el lago de Maracaibo han sido emprendidos a fin de impulsar la explotación de otras oportunidades gasíferas que satisfagan la demanda energética local. En este sentido se manejan novedosas técnicas y tecnologías más rentables y eficientes para la explotación de gas.

Sin embargo, se afronta una incertidumbre geológica por la influencia erosiva de la discordancia angular del Eoceno, que pone en contacto las arenas B de la formación Misoa, de edad Eoceno, conformadas por areniscas y lutitas intercaladas, con la formación La Rosa, de edad Mioceno inferior, con litología de lutitas. Este evento discordante, estructura arriba, afecta el espesor del miembro B6 truncándolo hasta erosionarlo en dirección noroeste, presentándose cambios de facies y fallas locales (Sutton 1946; Miller *et al.* 1958; Van Veen 1972; González, Iturralde de Arozena y Cadillat 1980; Arianto, Susatyo y Srisantoso 2006; Ingvarlsen y Kritzler 2009; Alí y Alí 2012).

Con el objetivo de contribuir a recuperar las reservas de gas se inició una revisión geológica para ubicar puntos de drenaje en la parte alta de la estructura.

La presente investigación se enfocó en la identificación del marco estratigráfico y estructural favorable para ubicar pozos monobore que permitan drenar las reservas de gas remanentes del yacimiento B6 LL 370 del campo Tía Juana Lago del estado Zulia, Venezuela.

2. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL ÁREA DE ESTUDIO

Las áreas LL-370/LL453, pertenecientes al campo Tía Juana Lago, se ubican al noreste del lago de Maracaibo, en el estado Zulia, y abarcan un área aproximada de 210 km².

El yacimiento B6 LL 370 se encuentra en el área LL 370 a 20 km, costa afuera en dirección sureste de la ciudad de Tía Juana Lago (Figura 1).

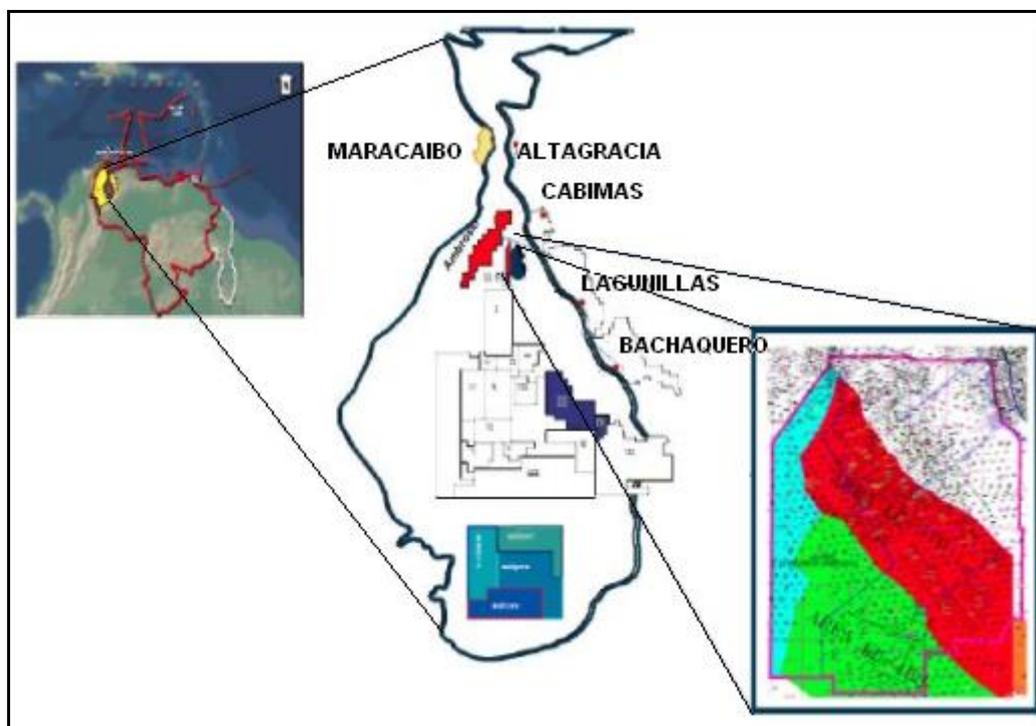


Figura 1. Ubicación geográfica del campo Tía Juana Lago.

2.1. Columna estratigráfica del campo Tía Juana Lago

La columna estratigráfica del Cenozoico del campo Tía Juana Lago (Figura 2) comprende, de base a tope, la formación Guasare; prosigue en la secuencia la formación Misoa que está en contacto concordante con la formación Paují. Continúa en discordancia la formación La Rosa y suprayacen las formaciones Lagunillas, Isnotú, Onia y el Milagro que van desde el Mioceno hasta el Plioceno–Pleistoceno (González, Iturralde de Arozena y Cadillat 1980).

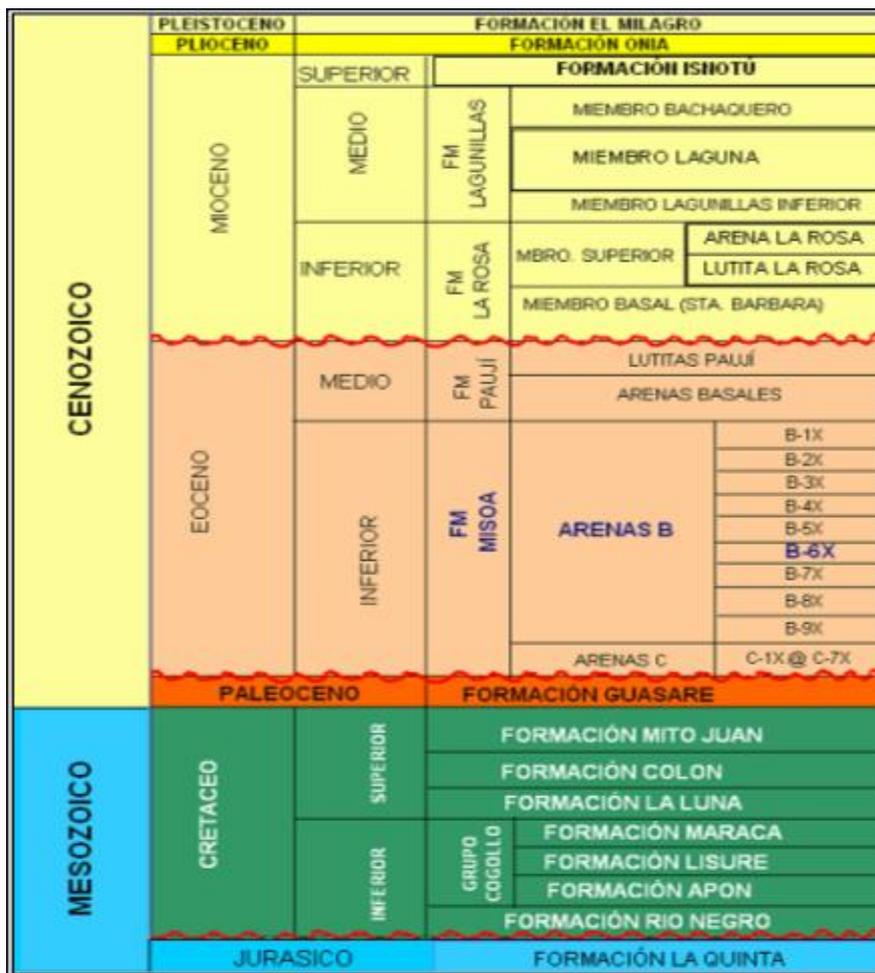


Figura 2. Columna estratigráfica del campo Tía Juana Lago.

2.2. Geología estructural local

El área LL-370 presenta plegamientos tipo nariz con rumbo NO-SE y monoclinales con buzamientos menores a 7° hacia el sureste. Los yacimientos están limitados por fallas normales con rumbo NO-SE, con saltos entre 200' y 900'. El área LL-370 está limitada tanto al norte como al sur por fallas normales principales (la falla LL-388 al norte y la falla LL-601 al sur). Ambas fallas son normales y presentan un rumbo noroeste-sureste y buzamiento hacia el norte (Figura 3).

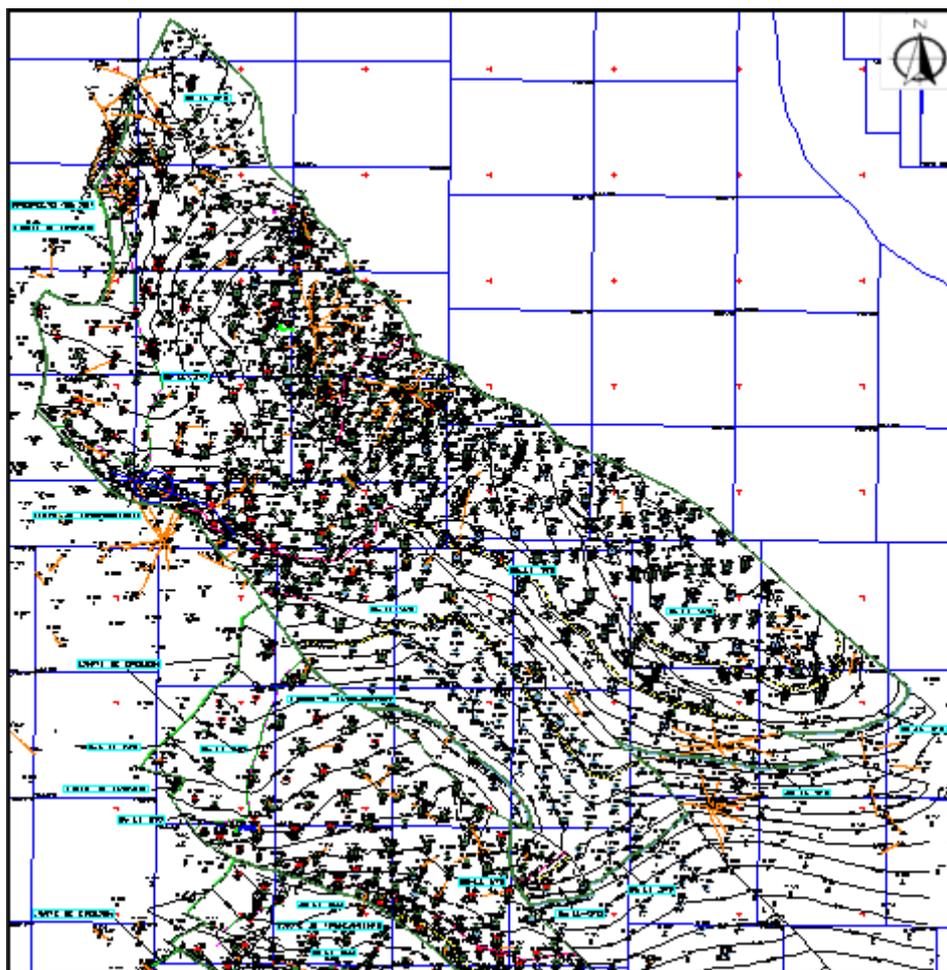


Figura 3. Mapa estructural del yacimiento B6 LL 370.

2.3. Generalidades del yacimiento B6 LL 370

El yacimiento B6 LL 370 inició su producción en el año 1939, con la perforación del pozo LL 370. Para incrementar el recobro de petróleo, en 1955 se inició el proyecto de inyección de gas mediante 10 pozos inyectoros, ubicados en la zona más alta de la estructura. Actualmente se encuentra suspendido por indisponibilidad de gas para inyectar en occidente.

El desarrollo continuó en forma progresiva, en el año 1968 se alcanzó la producción máxima de petróleo. A partir de 1969 comienza a declinar la producción de petróleo hasta alcanzar valores de 30.000 BNPD para el año 1980, mientras que la relación gas-petróleo comenzó a aumentar progresivamente. La causa de esta pérdida de producción se atribuye a la poca disponibilidad de gas para inyección, lo cual produjo la pérdida de presión de la capa de gas secundaria en el yacimiento y, por consiguiente, la disminución de la producción.

3. METODOLOGÍA

Para establecer las localizaciones se revisó la información contenida en trabajos previos, textos y artículos técnicos que sirvieron como guía y soporte para el estudio, generalidades geológicas del campo Tía Juana Lago y del yacimiento B6 LL 370, historias de pozos, reportes e informes geológicos de los pozos perforados, registros de pozos, diagramas mecánicos, historia de presión, producción, modelos sedimentológicos, interpretaciones estructurales, mapas estructurales e isopacos, mapas de contactos de fluidos, data sísmica, evaluaciones petrofísicas, manuales técnicos y metodológicos para la perforación y completación de pozos (Dyer, Ismanto y Haas 2000; García *et al.* 2001; Arianto, Susatyo y Srisantoso 2006; Ingvarlsen y Kritzler 2009). Esta revisión se organizó según se muestra seguidamente:

1. Comprobación de la información sísmica

Los reflectores interpretados en el área son los correspondientes al evento geológico más resaltante (la discordancia del Eoceno) y se determinó la continuidad horizontal de los reflectores sísmicos interpretando los horizontes B6, B7, B8 y B9. En el levantamiento COL-93 la discordancia del Eoceno y B6 están representados como una deflexión positiva, B7 deflexión negativa, B8 cero crossing +/- y B9 cero crossing -/+. La sísmica tiene una resolución de más o menos 300 pies.

2. Límites de las arenas B de la formación Misoa

Con las secciones estratigráficas se observó la continuidad lateral de las arenas de interés y se definieron los topes estructurales para realizar el análisis estratigráfico, que permitió observar las secuencias sedimentarias e interpretar, de acuerdo con la curva de rayos gamma, el ambiente de depositación, y así establecer la dirección preferencial de sedimentación. Mediante las secciones estructurales se identificaron las fallas que no se observan en la sísmica y que se ven a nivel del registro; se estableció la estructura local del yacimiento B6 LL 370 y se vio la continuidad del fluido (gas) con el cruce en los registros densidad-neutrón, asociados a una alta resistividad en esta área.

3. Revisión petrofísica del yacimiento

Las propiedades petrofísicas generales del área, según la última revisión del libro de reservas oficiales del 2015, son: porosidad 17,8 %, espesor de arena neta petrolífera 164 pies y permeabilidad absoluta 407 mD. Se revisaron los mapas de isopropiedades para ubicar las mejores áreas sobre la base de la mejor calidad de roca. Se analizó la petrofísica de los pozos

vecinos de las áreas prospectivas de acuerdo al análisis sísmico, estructural y sedimentológico para establecer los puntos de drenaje y así sumar, con mayor precisión, aspectos geológicos favorables para la mejor ubicación de las localizaciones.

4. Generación del modelo estratigráfico-estructural

Se elaboró básicamente para identificar las parcelas donde se pudieran establecer los puntos de drenaje y definir las posibles localizaciones de nuevas oportunidades de producción de gas. Se resaltaron las consideraciones geológicas por parcelas en cuanto análisis sísmico, estructural, estratigráfico, sedimentológico y petrofísico, con parámetros de ingeniería de yacimientos de producción y presiones. Se determinaron los puntos de drenaje con sus respectivas coordenadas, prognosis, petrofísica estimada y parámetros geológicos operacionales a seguir durante la perforación.

5. Evaluación de escenarios de productividad

En esta fase se evaluaron diferentes escenarios de productividad de la completación con tecnología monobore con las completaciones convencionales, con la finalidad de cuantificar su impacto sobre la capacidad de producción. Se utilizó el software de simulación PIPESIM.

4. RESULTADOS

4.1. Punto de drenaje, localización LL-Z-AB-AC-306-A4

Las características de la información que presentan en su respuesta sísmica (Figura 4) son buenas en lo que se refiere a la zona de interés, producto de la calidad del proceso aplicado al cubo sísmico en su versión kirb95. El modelo estructural que se observa en la geometría en la configuración de la línea arbitraria 11, con orientación SW-NE, ofrece un bosquejo de un cuerpo tipo anticlinal con culminación en esta línea donde se encuentra propuesta la localización.

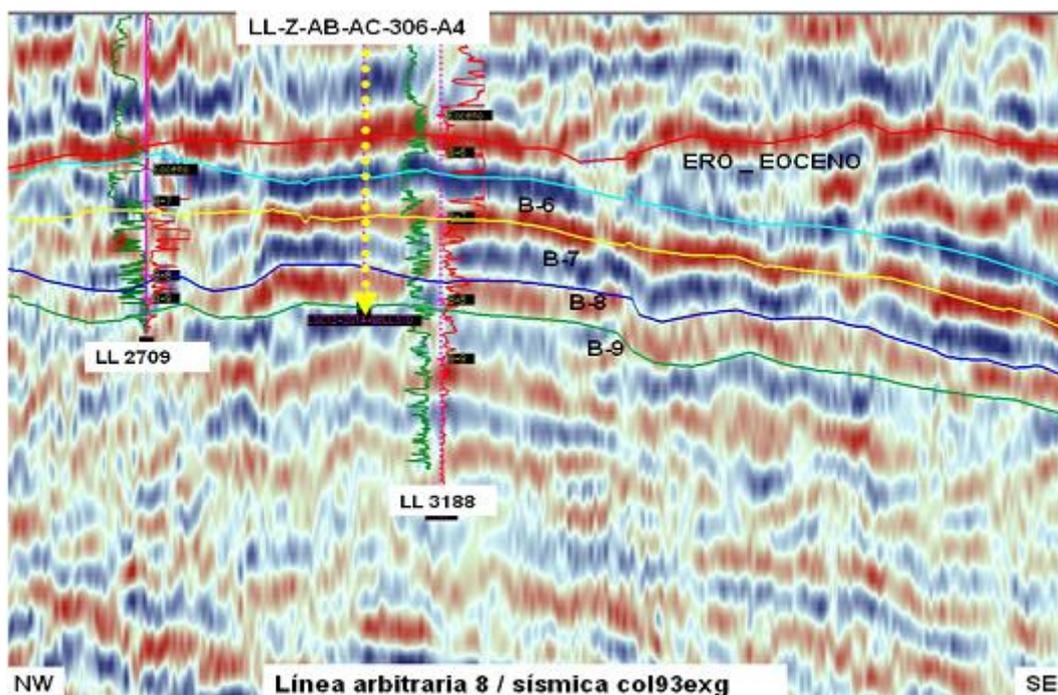


Figura 4. Línea sísmica de dirección NO-SE.

La correlación sísmica se efectuó con los siguientes pozos: en su flanco derecho el LL3188 y en su flanco izquierdo el LL1871; ambos productores en los intervalos B6, B7. De acuerdo a las curvas *Well logs* que representan estos intervalos (GR en color verde y RT_N en color rojo) se tiene una respuesta de arenas limpias factibles de ser rocas almacenadoras de fluidos.

En la interpretación de los horizontes Eoceno (color rojo), superficie de erosión, se tiene una correlación continua y en los subsecuentes B6 (color azul), B7 (color amarillo), B8 (azul marino), con sus puntos de contacto. El objetivo de interés no genera ninguna incertidumbre, ya que la correlación que se observa en los estratos es continua en el área y en las demás secciones sísmicas no existen evidencias estructurales que represente riesgo durante la perforación.

4.1.1. Desarrollo estratigráfico de las arenas B6 y B7 del área LL370

El espesor de la localización se estimó en 180' para B6. Se observa continuidad lateral de las arenas en B6, esta describe canales apilados y lutitas intercaladas de hasta 15' de espesor que pueden estar asociadas a dique natural o llanura de inundación. En estas zonas la mayoría de las lutitas tienen una continuidad lateral limitada y se espera que sirvan más como restricciones al flujo vertical que como sellos propiamente dichos, lo que permite que exista coalescencia de cuerpos de B6, definiendo comportamiento como unidad de flujo. Con la perforación de la localización LL-Z-AB-AC-306-A4 se prevé encontrar desarrollos de intervalos de

areniscas similares a los presentes en el pozo LL3188, a 406 m con espesor de 180' aproximado, de resistividades en el orden a los 100-500 Ohm, que permitirán por medio de su apertura a través de cañoneo, drenar las reservas de gas existentes en el área (Figura 5).

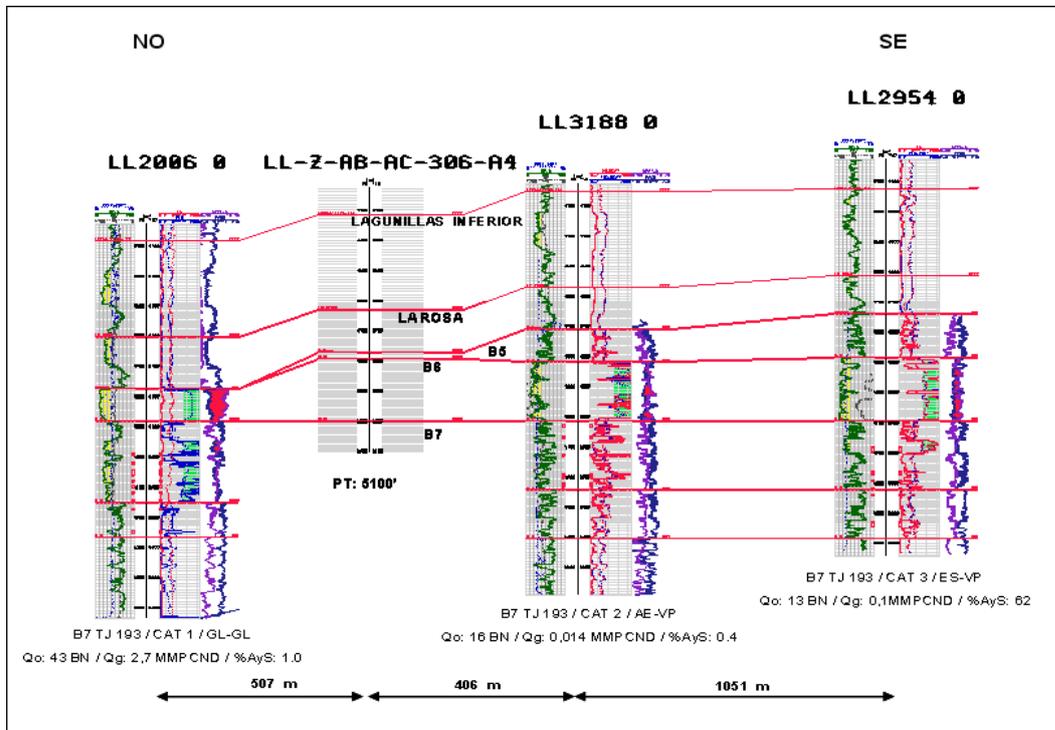


Figura 5. Sección estratigráfica (A-A') en dirección NO-SE, al tope del miembro B-6-X, localización LL-Z-AB-AC-306-A4.

4.1.2. Análisis estructural del miembro B6

La sección estructural A-A' que soporta la perforación de la localización, tipo vertical LL-Z-AB-AC-306-A4, se elaboró en dirección preferencial noroeste sureste, con los pozos vecinos: LL 694, LL1957, LL 4008 y LL1336, procurando mostrar la ubicación estructural favorable de la localización, en función de pozos del área asociados con alta producción de gas en el horizonte objetivo B6 (Caso pozo LL 4008). Se estima definir el tope del miembro B6 @ 4794' TVD', con un espesor bruto aproximado de 180 pies, aproximadamente de sedimentos de edad Mioceno.

La estructura se muestra en la zona como un monoclinal de buzamiento bajo (entre 3° y 7°), con aparente poco riesgo geológico asociado a fallas. Por la posición estructural de la localización, y basado en el pozo LL1957 situado a 956 m y el LL 4008 con muestra de cruce del registro de densidad-neutrón, el cual presenta una producción asociada promedio de 2,5 MMPCND, se infiere que el fluido a encontrar en el miembro B6 en su desarrollo como unidad productora pudiera ser gas o algún tipo de

hidrocarburo volátil; esta afirmación es respaldada por la ubicación según el mapa oficial de la localización en la capa de gas definida para el área en estudios previos. (Figura 6).

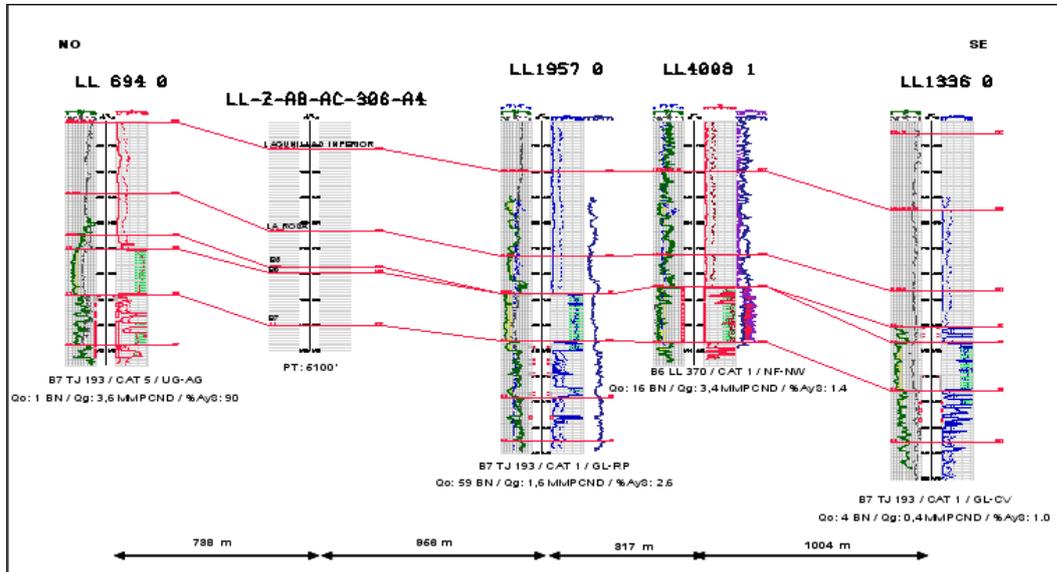


Figura 6. Ubicación de sección estructural (A-A') en dirección NO-SE, al tope del miembro B6, localización LL Z AB AC 306 A4.

4.2. Punto de drenaje, localización LL-AC-6-C5A1

La localización LL-AC-6-C5A1 está ubicada en la línea sísmica 903 y en la línea arbitraria 3 en los flancos de los pozos LL2006, flanco izquierdo, y LL962 flanco derecho (Figura 7).

La posición de la localización en las dos líneas sísmicas coincide en la culminación de un alto estructural tipo anticlinal según la geometría de los horizontes configurados. En la interpretación se identificaron los reflectores que corresponden a la discordancia del Eoceno, B6, B7, B8 y B9, tal como se muestra en las secciones sísmicas. Los reflectores correspondientes a las formaciones B6, B7 prospectivos y que, de acuerdo a la respuesta en las curvas GR en color verde y RT_N color rojo, presentan cuerpos de arenas productoras en los cuatro pozos adyacentes y la trayectoria vertical propuesta, desde la erosión del Eoceno. Las formaciones B6 y B7 presentan una respuesta continua y no se observan eventos geológicos estructurales que pueda comprometer la perforación.

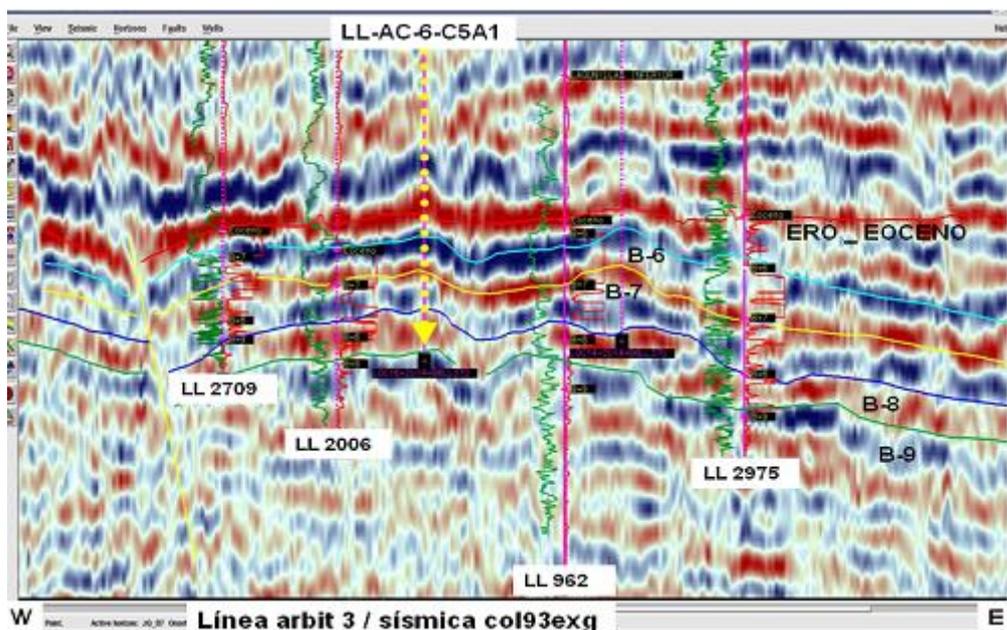


Figura 7. Línea sísmica de dirección O-E donde se muestran los pozos LL2709, LL2006, LL 962, LL2975 y la localización LL AC 6 C5A1.

4.2.1. Sección estratigráfica B-B' (NO-SE)

La sección estratigráfica B-B' soporta la perforación de la localización tipo vertical LL-AC-6-C5A1. Esta se elaboró en dirección suroeste-noreste con los pozos vecinos: LL1871, LL3188 y LL1184; en ella se usó como datum estratigráfico el tope del miembro B6 para estimar su espesor y correlacionar, estableciendo la continuidad lateral en las electrofacies. El espesor de la localización se estima en 180' para B6 sobre la base de los pozos vecinos más cercanos y por prognosis ejecutada. Las electrofacies observadas corresponden a canales apilados, con intercalaciones de lutitas de distinto comportamiento, sin superar los 15' en espesor total. Se espera que el comportamiento del registro eléctrico de esta localización sea muy similar al pozo LL3188. Se garantiza la presencia de hidrocarburo gaseoso por encontrarse dentro de la capa de gas definida para el yacimiento B6 LL 370 y por estar situada a similar nivel estructural de pozos de alta producción como el LL1871 y/o LL3188; asimismo por encontrarse buzamiento arriba en la estructura del pozo LL1184, con producción de 1,2 MMPCD, respectivamente (Figura 8).

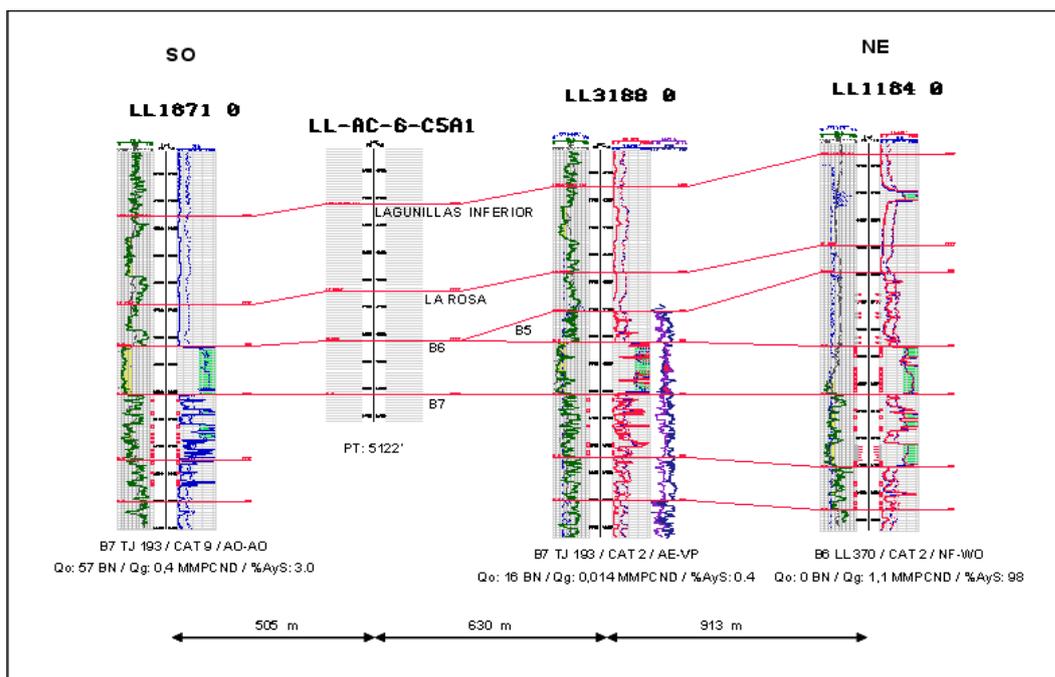


Figura 8. Sección estratigráfica (B-B') en dirección SO-NE, al tope del miembro B6, localización LL-AC-6-C5A1.

4.2.2. Sección estructural B - B' (NO-SE)

La sección estructural B-B' soporta la perforación de la localización tipo vertical LL-AC-6-C5A1; se elaboró en dirección preferencial noroeste-sureste con los pozos vecinos LL2006, LL1957 y LL 4008, procurando mostrar la ubicación estructural favorable de la localización, en función de pozos del área asociados con alta producción de gas en el horizonte objetivo B6.

Se estima definir el tope del miembro B6 con un espesor bruto aproximado de 179 pies; posterior a la perforación de sedimentos de edad Mioceno. La estructura se muestra en la zona como un monoclin de buzamiento bajo entre 3° y 7° , con poco riesgo geológico aparente asociado a fallas.

Según la posición estructural de la localización y basado en las características de los pozos LL2006, situado a 465 m estructura arriba con cruce de las curvas de densidad-neutrón, y el pozo LL1957 a 640 m buzamiento abajo. Adicionalmente el pozo LL 4008, ubicado a 703 m de la localización, actualmente presenta una producción de 2,5 MMPCND. Se infiere que el fluido presente en la localización en el miembro B6 puede ser gas o algún tipo de hidrocarburo volátil; según el mapa oficial del yacimiento B6 LL 370 la localización se encuentra ubicada en la capa de gas (Figura 9).

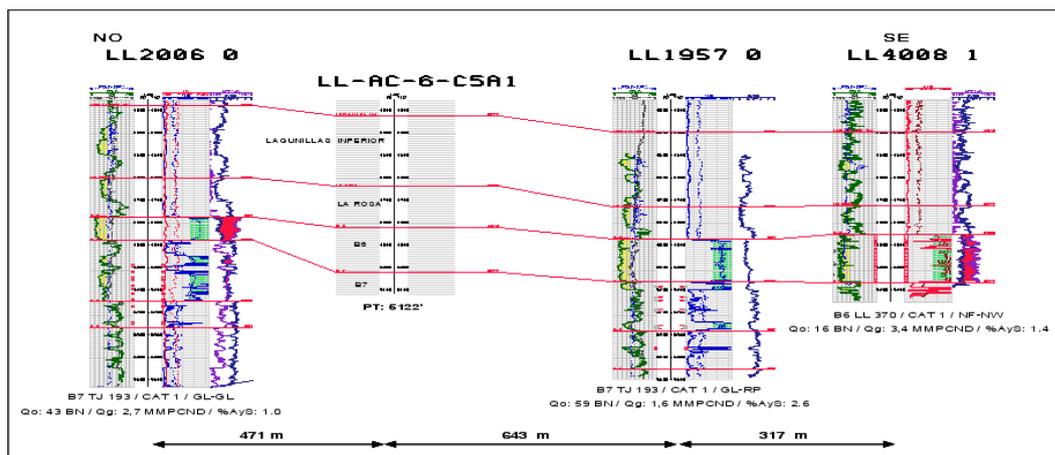


Figura 9. Ubicación de sección estructural (B-B') en dirección NO-SE, al tope del miembro B6, localización LL-AC-6-C5A1.

4.3. Análisis petrofísico de los puntos de drenaje propuestos

Con los topes geológicos estimados y en conjunto con la petrofísica de los pozos vecinos y los mapas de porosidad efectiva y permeabilidad absolutas se determina la prognosis petrofísica para las localizaciones propuestas LL-Z-AB-AC-306-A4, LL-AC-6-C5A1 (Tabla 1).

Tabla 1. Pronóstico petrofísico para las localizaciones recomendadas

Localizaciones	Unidad	ANH [pies]	Φ_e	K_{abs}	$K_{gas(efect)}$	S_h
LL-Z-AB-AC-306-A4	B-6-X	130	19	800	128	84
LL-AC-6-C5A1	B-6-X	130	20	800	128	85

5. DISCUSIÓN

Desde el punto de vista geológico las mejores condiciones para la ubicación de puntos de drenaje para pozos monobore son:

- Ubicación estructura arriba del contacto gas-petróleo.
- En los análisis sísmicos el punto proyectado debe estar en toda la trayectoria en los reflectores que no presenten deformación.
- Para el miembro B6 las areniscas apiladas y limpias son las mejores facies a determinar en la correlación estratigráfica por lo que se recomienda realizarlas en sentido noreste-sureste en dirección preferencial de la sedimentación.
- Ubicar las localizaciones preferiblemente después del límite de truncamiento donde la correlación estratigráfica indique el mejor

desarrollo de areniscas y espesor a encontrar, ya que al pasar la formación La Rosa se accede directamente en el miembro B6.

- Tener como premisa ubicar las localizaciones cercanas después del límite de truncamiento, de manera que el espesor a atravesar en el miembro B5 sea el menos posible para evitar cubrir espacio para una futura localización prospectiva en el miembro B5.
- El espesor mínimo óptimo para el miembro de B6 es de 60 pies así que en el área después del límite de truncamiento hay un buen espaciamiento para la ubicación de futuras localizaciones.
- Solapar las facies de canales con los mapas de porosidad efectiva y permeabilidad absoluta de tal forma que el punto de drenaje se ubique en el mejor tipo de roca de acuerdo a la evaluación petrofísica.

Las condiciones geológicas para la perforación son las siguientes:

- Mantener la mayor verticalidad posible del pozo, con un radio máximo de desviación de +/- 80 pies (radio de target de 25 m) en cualquier dirección al tope del miembro B6.
- Una vez determinada la base del miembro B6 atravesar +/- 100 pies de formación, perforando así el miembro B7, para tener una mejor holgura en la corrida de registros de pozos.
- Realizar toma y preservación de muestras del canal en la zona de interés, con la finalidad de ubicar y definir las formaciones y/o miembros atravesados durante la perforación y la cual se realizará a partir de 500 pies antes del tope estimado de la discordancia a intervalos de 20' hasta la profundidad final, según criterio del geólogo en sitio.

5.1. Escenarios de productividad

Basados en los parámetros de geología, petrofísica y de yacimiento (Tabla 2) se plantearon diferentes escenarios de diámetros de completación (Tabla 3) para simular la producción de las localizaciones propuestas. A continuación se presenta la Tabla 2 para la localización LL-Z-AB-AC-306-A4:

Tabla 2. Data de geología, petrofísica y yacimiento para la localización LL-Z-AB-AC-306-A4

DATOS DEL YACIMIENTO	
Yacimiento actual-Propuesto	B6 LL 370
Pws (Lpca)-Fecha (08/06/14)	235 lpc
Tyac (°F)	194
RGP (PCN / BN)	300 000
Intervalos a cañonear (Tope y base)	4 794'-5 000'
h (pies) Yacimiento	130
°API	27
%AyS	2
DATOS DE PETROFÍSICA	
Kefegas (mD)	128
Porosidad	17 %

Tabla 3. Comportamiento de producción con diferentes completaciones planteadas para la localización LL-Z-AB-AC-306-A4

DIAM. DE TUBERÍA	2-7 / 8"		3-1/2"		5-1/2"	
Daño	5	10	5	10	5	10
Qg (MMPCND)	1,3	1,2	1,8	1,7	2,8	2,4
Qo (BNPD)	3	3	5	5	9	7
Pwf (Lpc)	213	207	190	177	113	99
Pcab (Lpc)	54	54	59	58	69	63
Plim (Lpc)	53	53	58	57	68	62
Twf (°F)	194	194	194	194	194	194
Qg (MMPCND) carga de líquido	3		2,6		2	
Kefec			128			

De acuerdo con los resultados obtenidos, la completación sugerida para esta localización es con tubería de 5-1/2" (monobore), con la cual se obtendría una producción de 2,8 MMPCND y 9 BNPD, específicamente se recomienda para los puntos de drenajes: LL-Z-AB-AC-306-A4 y LL-AC-6-C5A1.

Se presenta un diagrama esquemático (Figura 10) de un pozo con completación monobore para la localización LL-Z-AB-AC-306-A4:

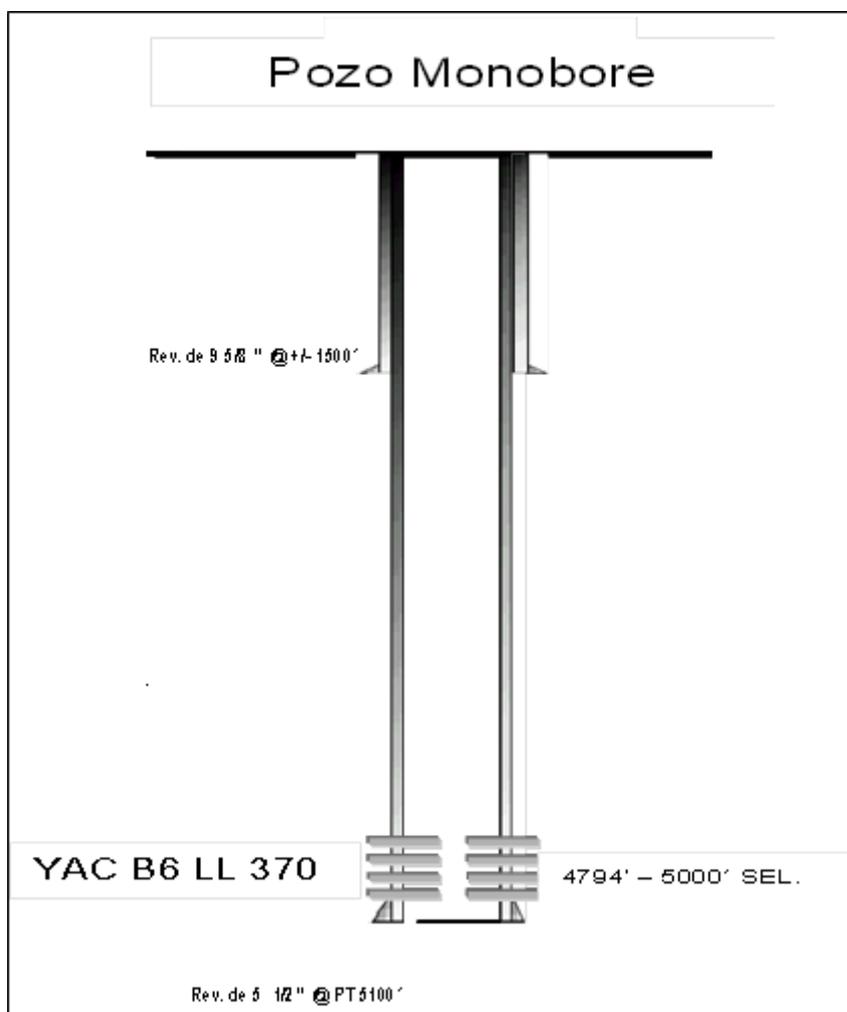


Figura 10. Diagrama mecánico propuesto con completación monobore para la localización: LL-Z-AB-AC-306-A4.

6. CONCLUSIONES

- La metodología empleada permitió determinar las características sísmicas, estratigráficas, estructurales y petrofísicas favorables que, en conjunto con la información de yacimientos, posibilitó, con una mejor estrategia, el análisis por parcelas en el yacimiento B6 LL 370. La parcela A-226 es la de mayor prospectividad para el establecimiento de puntos de drenaje para la perforación de pozos monobore por presentar las mejores condiciones geológicas y de yacimiento.
- La unidad B6 fue depositada en un ambiente fluvio-deltaico con predominio de canales, sobre la base de las correlaciones interpretadas. Estructuralmente el yacimiento B6 LL 370 está

formado por un monoclinal de suave buzamiento, que presenta un límite de truncamiento y límite de erosión en dirección noroeste. Las condiciones óptimas para la ubicación de puntos de drenaje son estructura arriba del contacto gas-petróleo cercanas al límite de truncamiento, en las facies de canales apilados.

- Geológicamente no existe riesgo estructural ni estratigráfico asociado a las arenas objetivo para las localizaciones seleccionadas. De acuerdo a los análisis geológicos y resultados de productividad se concluye que las localizaciones LL-Z-AB-AC-306-A4 y LL-AC-6-C5A1 se pueden completar monobore con tubería de 5-1/2" con un potencial de producción de 2,8 MMPCND.

7. REFERENCIAS

- ALÍ, J. Y ALÍ, L. *Completaciones monobore para producción de gas en el yacimiento B6 LL 570 del área sur Tía Juana Lago*. Trabajo Especial de Grado. Maracaibo: Universidad del Zulia, 2012.
- ARIANTO, M.; SUSATYO, Y. Y SRISANTOSO, B. New Completion Solution for Multi Layer Gas Field. A Case History. En: SPE Asia Pacific Oil y Gas Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers. Adelaide, Australia, 11-13 septiembre 2006.
- DYER, G.; ISMANTO, B. Y HAAS, M. New Well Architecture Successfully Optimizes the Development of Fluvio-Deltaic Multi-Layered Gas Field. En: Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, Brisbane, Australia, 16-18 octubre 2000.
- GARCÍA, R.; ALFARO, E.; BERNARDIS, A.; CASALIS, D.; GALLARDO, J.; DEL ZOTTO, D. Y ALONSO, A. Optimizing Development Costs by Applying a Monobore Well Design. En: Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference, Buenos Aires, Argentina, 25-28 marzo 2001.
- GONZÁLEZ, J. C.; ITURRALDE DE AROZENA, J. M. Y CADILLAT, X. P. *Geología de Venezuela y sus Cuencas Petrolíferas*. Caracas: Ediciones Foninves, 1980.
- INGVARDSEN, D. Y KRITZLER, J. Monobore Completion Systems Provides Low-Cost Completion Option. In: 2009 SPE Annual Technical Conference and Exhibition held in New Orleans, Louisiana, USA, 4-7 October 2009.
- MILLER, J. B.; EDWARDS, K. L.; WOLCOTT, P. P.; ANISGARD, H. W.; MARTIN, R. Y ANDEREGG, H. Habitat of oil in the Maracaibo Basin, Venezuela. *Amer. Assoc. Petrol. Geol.*, Sp. Publ.: Habitat of Oil: 601-640, 1958.
- SUTTON, F. A. Geology of Maracaibo Basin, Venezuela. *Am. Assoc. Petr. Geol. Bull.*, 30(10): 1621-1741, 1946.

VAN VEEN, F. R. Ambientes sedimentarios de las formaciones Mirador y Misoa del Eoceno inferior y medio en la Cuenca del Lago de Maracaibo. *Boletín de Geología, Publicación Especial*, 5: 1073-1104, 1972.

Recibido: 17/05/17

Aceptado: 18/10/17

Alfonso G. Castro Cerrada, Master en Geología. Geólogo de Reservas
División Boyaca. FPO. PDVSA Barinas, Venezuela. castroagx@pdvsa.com

Modelación geológico-geofísica con fines hidrogeológicos en los municipios Corrales y Gámeza, Colombia

Geological-geophysical modeling with hydrogeological purposes in Corrales and Gámeza municipalities, Colombia

Fredy A. Fonseca-Benítez

Sede Sogamoso. Grupo de Investigación INGEOFÍSICA Universidad Pedagógica y Tecnológica, Colombia. frefonseca@yahoo.com

Resumen

El propósito del estudio fue evaluar, en las litologías de formaciones geológicas de Boyacá y Casanare, el comportamiento de propiedades físicas como resistividad aparente y la intensidad gamma natural, con fines de localización de zonas favorables para la extracción de agua. A partir de la interpretación de los datos aportados por los métodos de perfilaje eléctrico, sondeo eléctrico vertical y radiometría se elaboraron cortes geológico-geofísicos que revelaron para ambos sectores condiciones favorables para la extracción de aguas subterráneas, ya que los valores más bajos de resistividades se asocian a las areniscas saturadas. Se recomienda verificar estos resultados mediante perforaciones y la toma de registros eléctricos.

Palabras clave: modelación geofísica; sondeo eléctrico vertical; perfilaje eléctrico dimétrico; intensidad gamma natural; aguas subterráneas; Colombia.

Abstract

The purpose of the study was to evaluate in the lithologies of geological formations of Boyacá and Casanare, the behavior of physical properties such as apparent resistivity and natural gamma intensity, in order to locate favorable zones for water extraction. From the interpretation of the data provided by the methods of Electric Profiling, Vertical Electrical Probe and Radiometry geological-geophysical sections were developed that revealed for both sectors favorable conditions for the extraction of groundwater, since the lowest values of resistivities were they associate with saturated

sandstones. It is recommended to verify these results by drilling and taking electrical records.

Keywords: geophysical modeling; Vertical Electric Probe; Symmetrical Electric Profiling; natural gamma intensity; groundwater; Colombia.

1. INTRODUCCIÓN

Los métodos geofísicos han cobrado gran aplicación en Colombia para resolver problemas relacionados con la prospección y exploración de yacimientos minerales y materiales de construcción, estudios de deslizamientos, así como la búsqueda de objetos arqueológicos. El incremento de su aplicación ha sido notable en la búsqueda de aguas subterráneas, debido a la gran escasez de este recurso en diferentes regiones del país. En tal sentido, el altiplano boyacense se encuentra entre las zonas prioritarias para el Programa de Exploración de Aguas Subterráneas del Instituto Colombiano de Geología y Minería.

En el año 2007 se realizó un proyecto hidrogeológico con investigación geofísica (INGEOMINAS–UPTC) como resultado del cual se establecieron modelos hidrogeológicos de la zona centro y norte en Boyacá, no obstante, la información geofísica fue escasa y estuvo basada en la realización de puntos de sondeo eléctrico vertical (SEV), con el fin de obtener cortes geológicos-geofísicos (Fonseca 2009).

El proyecto “Caracterización geológica-geoeléctrica de litologías presentes en sectores de la zona centro del departamento de Boyacá” se llevó a cabo en el año 2015, cuando se levantaron nuevos puntos de SEV y se realizaron líneas de perfilaje eléctrico simétrico (PES). De este modo se ubicaron las zonas más relevantes para estudios detallados con los métodos geofísicos (Fonseca 2015). El presente trabajo contiene los resultados de investigaciones realizadas desde 2015-2016, en varios proyectos llevados a cabo por el grupo de investigación INGEOFÍSICA en convenios de colaboración con diferentes empresas y entidades.

Debido a que el departamento de Boyacá presenta gran variedad de tipos litológicos en diferentes formaciones geológicas se planteó el presente estudio detallado, con el fin de estudiar las litologías y evaluar en ellas el comportamiento de propiedades físicas como resistividad aparente (ρ_a) y la intensidad gamma natural (I_γ). Se aplicaron los métodos geofísicos de sondeo eléctrico vertical (SEV), perfilaje eléctrico, (PE) y radiometría (I_γ), adelantando de esta forma estudios que permitan crear una base de datos para la realización de proyectos futuros.

Se escogieron los sectores Gámeza y Corrales, que ocupan una extensión de 3,6 km² (Figura 1). Su principal vía de acceso es desde la ciudad de Duitama, que comunica con la capital del departamento (Tunja).



Figura 1. Ubicación de los sectores de estudio, destacados en color rojo.

El municipio Corrales está ubicado en la provincia de Tundama, del departamento de Boyacá. El territorio del municipio se halla sobre el altiplano Cundiboyacence. Por su parte, Gámeza se ubica en la provincia de Sugamuxi, en el departamento de Boyacá. Está situado a unos 18 km de la ciudad de Sogamoso. El municipio tiene una superficie de 88 km², limita por el norte con los municipios de Tasco y Corrales, con Socotá por el este, por el oeste con Tópaga y Corrales y por el sur con Tópaga y Mongua. Por su extremo occidental contacta con el río Chicamocha, con su tributario, el río Gámeza, el cual recorre el límite sur del territorio. Cuenta con dos quebradas importantes: el Turmal y el Centro, y varias lagunas en la región de Páramo: la Negra, Larga, el Casadero, Tirones, Patos y la Verde.

1.1. Marco geológico

En general, en las zonas de estudio se encuentran rocas del Cretácico, Paleógeno y Cuaternario, representadas por las siguientes unidades estratigráficas formales fundamentales: formación Labor y Tierna (Ksit), formación Guaduas (Kpg), formación areniscas de Socha (Pgars), formación arcillas de Socha (Pgas), formación Picacho (Pgp), formación Concentración (Pgc), depósito cuaternario (Q), de origen aluvial y coluvial (Figura 2).



Figura 2. Vista panorámica geológica del área de estudio. Corrales (izq.) y Gámeza (der.)

En el municipio de Corrales se distingue la formación Concentración (Pgc), la cual presenta arcillolitas y limonitas intercaladas con areniscas. En la parte posterior se divisa la formación Picacho (Pgp), la cual en su mayoría consta de areniscas de manera predominante, aunque a veces presenta intercalaciones con arcillolitas.

De igual forma, se observa un depósito cuaternario reciente, el cual es disectado por el río Chicamocha. El depósito cuaternario es de origen aluvial y está compuesto por bloques que van de redondeados a semirredondeados, embebidos en una matriz areno-arcillosa (Figura 3). Se encuentra discordantemente sobre la formación Concentración.



Figura 3. Detalle del depósito cuaternario aluvial.

La formación Areniscas de Socha (Figura 4) suprayace en contacto normal a la formación Guaduas e infrayace a la formación Arcillas de Socha (Pgas) en forma concordante.

Labor y Tierna. l. Formación Los Pinos. m. Formación Plaeners. n. Formación Chipaque. o. y p. Formación Tibasosa. q. Falla de Cabalgamiento. r. Estructura cubierta. s. Sinclinal. t. Anticlinal. u. Ríos y quebradas. v. Carreteras.)

2. METODOLOGÍA

Se realizó un levantamiento geoelectrico utilizando los métodos de sondeo eléctrico vertical (SEV), perfilaje eléctrico simétrico (PES) y perfilaje radiométrico gamma (I γ). Posteriormente, se realizó el procesamiento, representación e interpretación de datos de SEV, PE y radiometría I γ para la final elaboración de cortes geológicos-geofísicos.

2.1. Sondeo eléctrico vertical

Se realizaron mediciones repetidas, en un punto central de observación, de la diferencia de potencial (ΔU) y la intensidad de corriente (I), para una sola posición de los electrodos de medición, variando la distancia entre los electrodos de alimentación (Danko y Azze 1972).

Los fundamentos físico-geológicos del SEV se basan en el estudio de la respuesta del medio geológico al paso de la corriente, a través de dos electrodos de alimentación (A y B), que mantienen un circuito cerrado (Figura 6). Esta respuesta es determinable utilizando dos electrodos de medición (M y N), (Dobrin 1961).

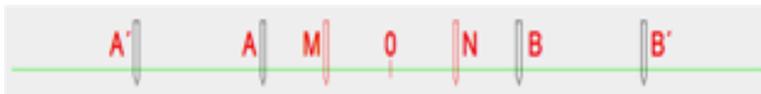


Figura 6. Esquema de ubicación del dispositivo de electrodos de SEV (Fonseca 2009).

Los SEV se localizaron con la ayuda de un GPS (*Global Positioning System*). El equipamiento estuvo compuesto por un resistímetro y un energizador marca DIAPIR VP. Los datos de campo obtenidos sirvieron para calcular los valores de resistividades aparentes e interpretar las curvas de campo mediante el programa de RESIS XP. La interpretación de las curvas de SEV y sus respectivos cortes geoelectricos permitieron confeccionar los cortes geológicos-geofísicos. En la Figura 7 se muestra un ejemplo de las curvas y cortes geoelectricos elaborados para cada sector de estudio.

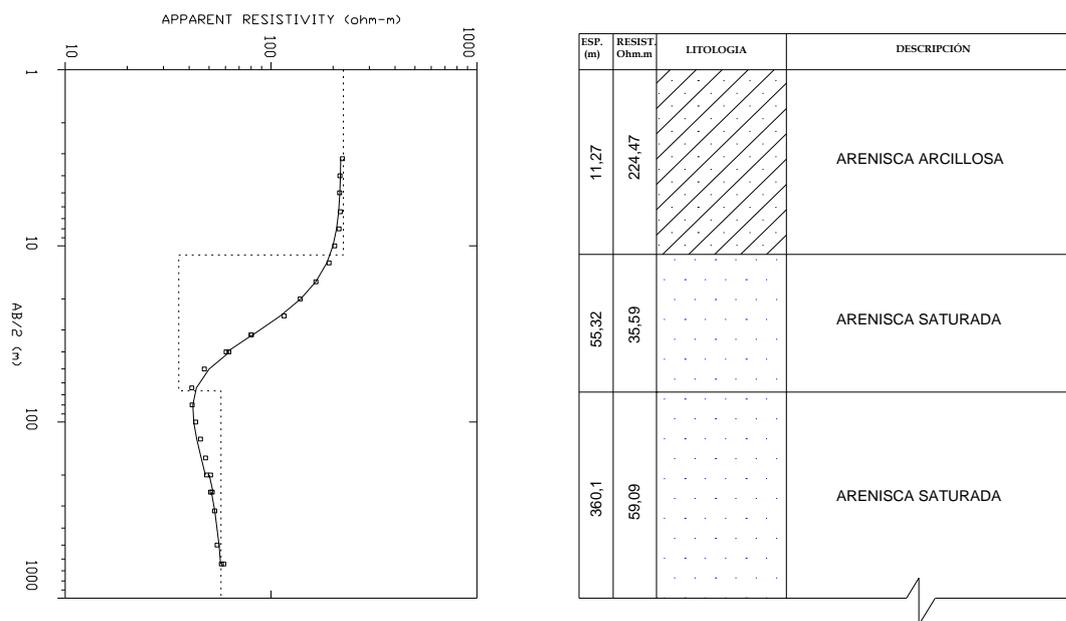


Figura 7. Curva de SEV y corte geoelectrico.

2.2. Perfilaje eléctrico simétrico

Este método de investigación horizontal permitió estudiar la distribución lateral de las resistividades y determinar los contactos verticales e inclinados. El equipamiento empleado estuvo compuesto por un energizador, un resistivímetro y demás accesorios que hacen parte del equipamiento.

La metodología de los trabajos consistió en la observación, en varios puntos, de los valores de diferencia de potencial y de la intensidad de corriente, mediante un dispositivo que mantiene fija la posición de los electrodos de alimentación y de los electrodos de medición (Figura 8), a diferencia del método de SEV (Orellana 1972).

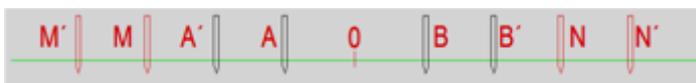


Figura 8. Esquema de ubicación del dispositivo de electrodos de perfilaje eléctrico simétrico.

2.3. Radiometría gamma natural

Con este método de investigación horizontal se midió la radiación gamma natural (Sinitsin 1994) a lo largo de perfiles, para conocer la distribución lateral de las intensidades radioactivas gamma. Este es un método de gran utilidad en la determinación de contactos y fallas. El equipamiento utilizado estuvo compuesto por un radiómetro SRP 68-02.

Los trabajos de campo se realizaron observando en varios puntos los valores de la intensidad radioactiva gamma. Estos puntos fueron escogidos con base en la dirección de las estructuras y la información geofísica ya obtenida. En la Figura 9 se observa la distribución de los puntos de un perfil con el paso o distancia entre puntos (ΔX).

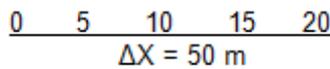


Figura 9. Paso de medición método de radiometría.

En cada sector de estudio se escogieron tres perfiles para realizar perfilaje eléctrico y radiometría. Los sondeos eléctricos verticales se distribuyeron aleatoriamente en ambas áreas (Figura 10). Los puntos de observación de SEV fueron 30 en total; de ellos 11 puntos en el sector Gámeza y 19 en Corrales. El AB máximo fue de 1 280 m. Los MN empleados fueron de 2 m, 20 m y 100 m. Se realizó un total de 31 puntos de perfilaje en el sector Gámeza y 54 en Corrales, con una distancia entre puntos de 100 m, AB máximo 50 m y MN 10 m. Se realizó un total de 60 puntos de radiometría en el sector Gámeza y 107 puntos en Corrales, a una distancia entre puntos de 50 m.

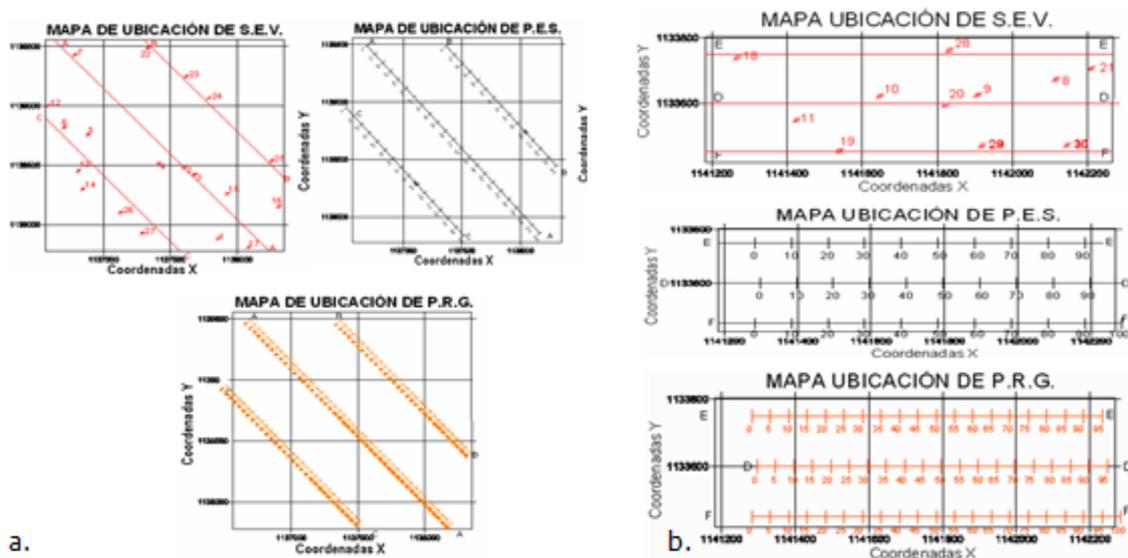


Figura 10. Mapas de ubicación de los puntos de medición geofísica. a. Sector Corrales. b. Sector Gámeza.

3. RESULTADOS

Los rangos de variación de la resistividad aparente y la intensidad radioactiva gamma I_γ para cada una de las litologías se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Rango de variación de los parámetros físicos en los sectores de estudio

Resistividad (Ohmios-m)		Correlación Litológica	
9-10		Areniscas Saturadas	
70-120		Arcillolitas	
120-300		Areniscas Arcillosas	
Sector	Formación	Correlación Litológica	IY(μR/h)
Corrales	Cuaternario Aluv. (Qal)	Areniscas Saturadas	12-15
		Arcillolitas	6-9
	Concentración (Pgc)	Arcillolitas	9-12
		Areniscas Saturadas	>15
		Picacho (Pgp)	Areniscas Arcillosas
Arcillas de Socha (Pgas)	Arcillolitas	9-12	
Gámeza	Guadas (Ksg)	Areniscas Saturadas	12-15
		Labor y Tierna (Ksit)	Areniscas Saturadas
		Arcillolitas	6-9

3.1. Mapas geológicos

Sector Corrales

Mediante la interpretación geológico-geofísica de los datos recolectados en campo se determinó la posible ubicación del contacto entre las formaciones Picacho (Pgp) y Concentración (Pgc), ubicado entre los SEV 1 y 15, 25 y 24 entre las estacas 170 y 180, 120 y 130 para PES y entre las estacas 175 y 180, 125 y 130 para radiometría; y el contacto entre Arcillas de Socha (Pgas) y Picacho (Pgp), ubicado entre los SEV 1 y 16 entre las estacas 190 y 210 para PES y entre las estacas 195 y 205 para intensidad radioactiva gamma I γ (μ R/h).

Se determinó el posible contacto entre la formación Concentración (Pgc) y el depósito Cuaternario Aluvial (Qal), ubicado entre los SEV'S 2 y 3, 23 y 24, 26 y 27 entre las estacas 130 y 140, 50 y 60, 110 y 120 para PES y

entre las estacas 135 y 140, 55 y 60, 110 y 105 para intensidad radioactiva gamma $I\gamma$ ($\mu\text{R/h}$).

Se pudo establecer la ubicación de una posible falla local (ubicada entre los SEV 5 y 7, 6 y 5 entre las estacas 50 y 70, 20 y 30 para PES y entre las estacas 55 y 65, 25 y 30 para intensidad radioactiva gamma $I\gamma$ ($\mu\text{R/h}$); y la falla de Buzbanzá ubicada entre los SEV'S 3 y 15, 24 y 25 entre las estacas 150 y 160, 100 y 110 para PES y entre las estacas 155 y 160, 100 y 105 para intensidad radioactiva gamma $I\gamma$ ($\mu\text{R/h}$), como se muestra en la Figura 11.

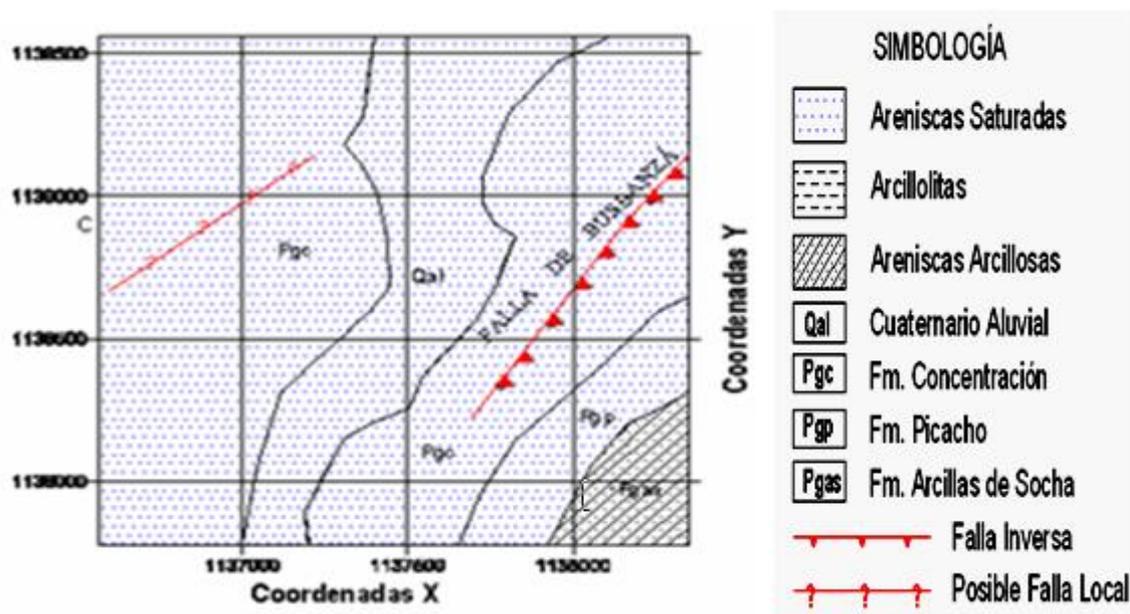


Figura 11. Mapa geológico del sector Corrales hasta los 50 m de profundidad, según SEV.

Las litologías presentes a los 50 m de profundidad corresponden a areniscas saturadas en las formaciones Concentración (Pgc), Picacho (Pgp) y en el Cuaternario Aluvial (Qal), arcillolitas en las formaciones Concentración (Pgc) y Arcillas de Socha (Pgas), y areniscas arcillosas presentes en la formación Arcillas de Socha (Pgas), las cuales presentan valores de intensidad gamma natural y de resistividad que varían de acuerdo a lo que se muestra en la Tabla 1.

Sector Gámeza

Basados en la interpretación geológico-geofísica de los datos obtenidos en campo se logró determinar el posible contacto entre las formaciones Guaduas (Kpg) y Labor y Tierna (Ksit), (ubicado entre los SEV 8 y 9, 28 y 8, 19 y 29 entre las estacas 70 y 80, 60 y 70, 30 y 40 para PES y entre

las estacas 75 y 80, 60 y 65, 35 y 40 para intensidad radioactiva gamma $I\gamma$ ($\mu\text{R/h}$), delimitado por la existencia de Falla de Tópaga.

Se pudo establecer la existencia de una falla muy localizada, ubicada entre los sondeos 9 y 8, entre las estacas 70 y 80 para PES y entre las estacas 70 y 75 para intensidad radioactiva gamma $I\gamma$ ($\mu\text{R/h}$), tal como indica la Figura 12.

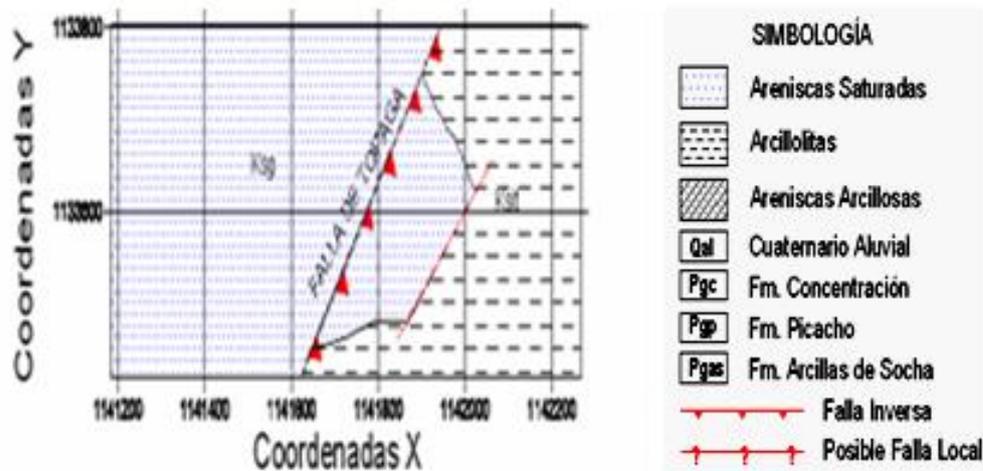


Figura 12. Mapa geológico del sector Gámeza hasta los 50 m de profundidad, según SEV.

Las litologías existentes en superficie corresponden a areniscas saturadas en la formación Guaduas y arcillolitas en la formación Labor y Tierna, las cuales presentan valores de intensidad gamma natural y resistividad que fluctúan de acuerdo con lo reflejado en la Tabla 1.

3.2. Modelación geofísica

Sector Corrales

En el mapa en alto relieve y en el modelo 4D (Figura 13) se distinguen cinco zonas homogéneas en cuanto a intensidad gamma natural: la primera comprendida entre los 3 y 6 $\mu\text{R/h}$, la segunda entre 6 y 9, la tercera entre 9 y 12, la cuarta entre 12 y 15 y la quinta zona con una intensidad gamma natural mayor a 15 $\mu\text{R/h}$.

Por otro lado, las zonas con alto gradiente señalan el trazado de las fallas. Los rangos observados, al correlacionarse con la Tabla 1, permiten relacionar un valor de intensidad gamma natural y una unidad litológica.

En el modelo 4D y en el mapa en alto relieve se pueden diferenciar tres zonas homogéneas en relación con la resistividad aparente: la primera comprendida entre los 0 y 70 $\Omega\cdot\text{m}$, la segunda entre 70 y 120 y la tercera

mayor a $120 \Omega \cdot m$. De igual manera, las zonas con alto gradiente indican la alineación de las fallas. Los rangos observados, al ser correlacionados con la Tabla 1, permiten asociar los valores de intensidad gamma natural a una unidad litológica.

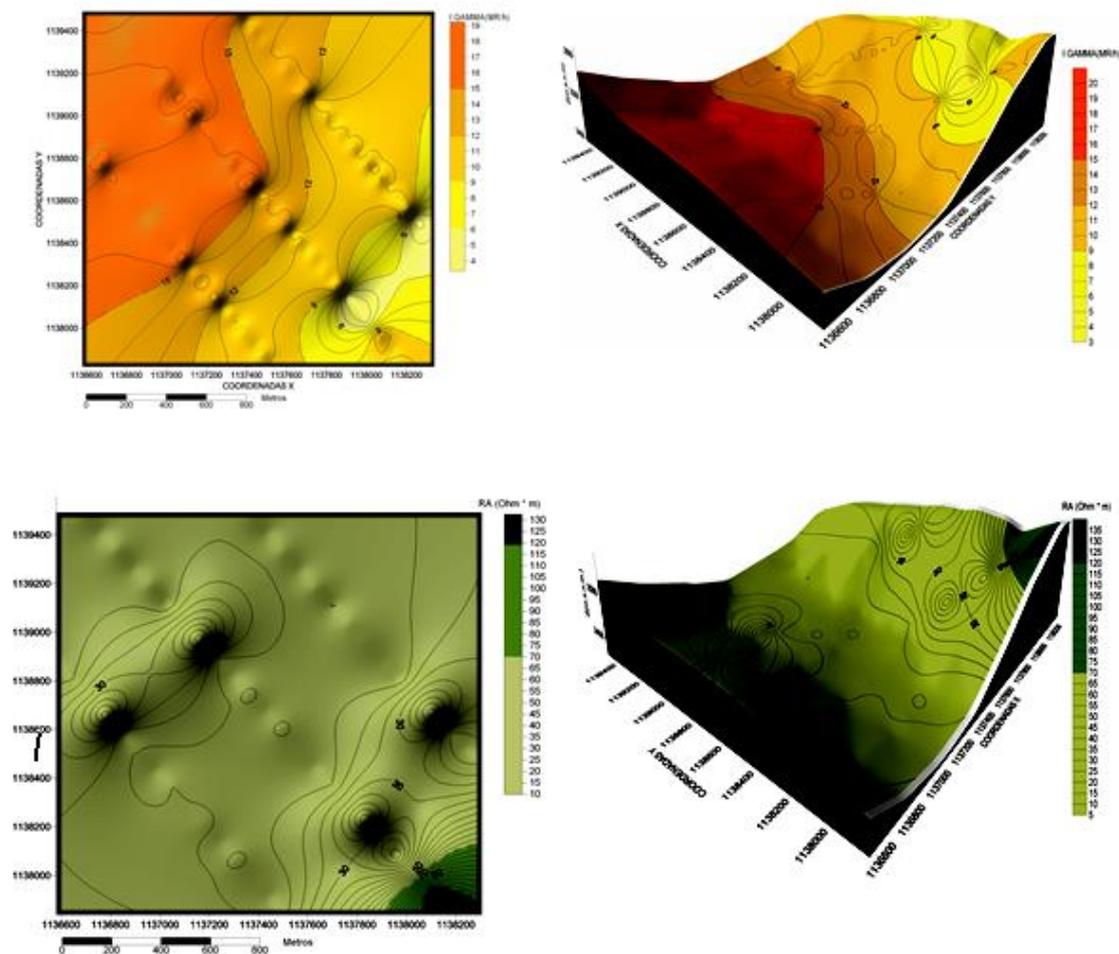


Figura 13. Modelación geofísica sector Corrales. Resistividad (arriba) e intensidad gamma natural (abajo).

Sector Gámeza

En los resultados 3D y 4D obtenidos (Figura 14) se pueden diferenciar tres zonas homogéneas en cuanto a intensidad gamma natural: la primera comprendida entre 6 y $9 \mu R/h$, la segunda entre 9 y 12 y la tercera entre 12 y $15 \mu R/h$. De la misma manera, zonas con alto gradiente indican el trazado de las fallas. Los rangos observados deben ser relacionados con la Tabla 1, con el fin de convertir los valores de intensidad gamma natural en unidades litológicas homogéneas y diferenciables entre sí.

En el modelo 4D y en el mapa en alto relieve se pueden distinguir dos zonas homogéneas en relación con la resistividad aparente: la primera

comprendida entre los 0 y 70, $\Omega \cdot m$ y la segunda entre 70 y 120 $\Omega \cdot m$. De igual forma las zonas con alto gradiente indican la alineación de las fallas. Los rangos observados en los resultados, al relacionarse con la Tabla 1, permiten la conversión de los valores de intensidad gamma natural en unidades litológicas.

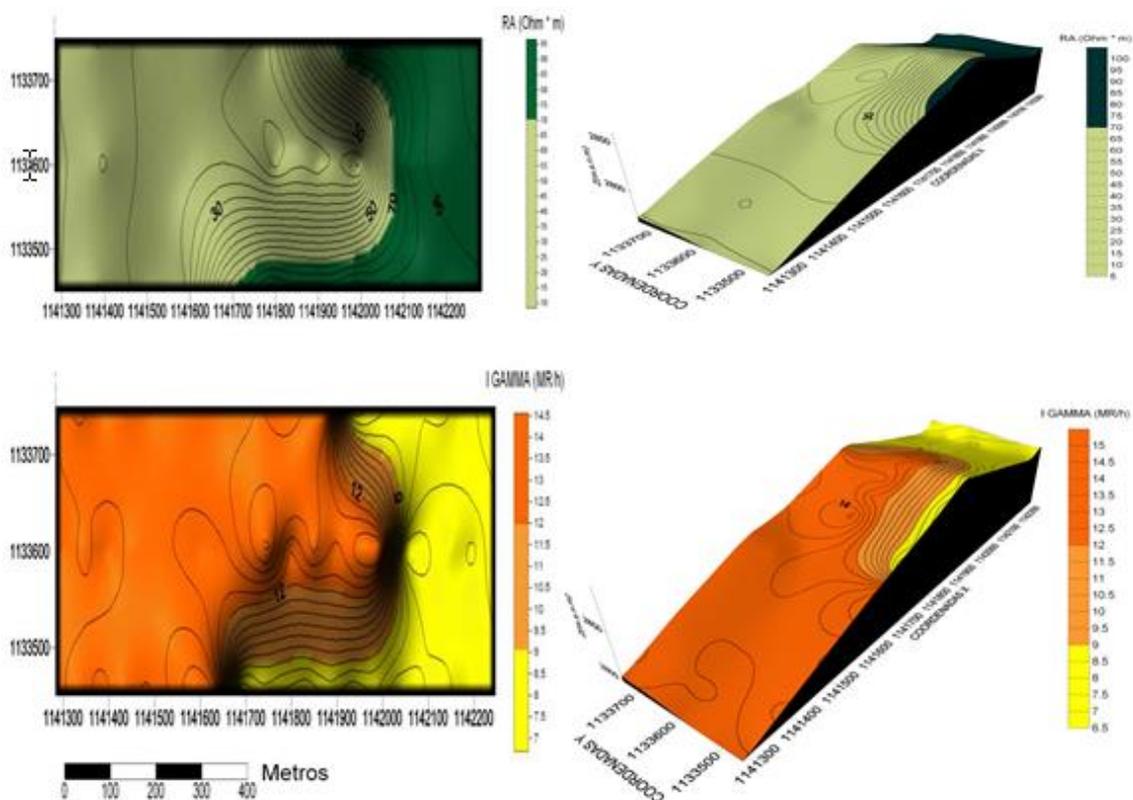


Figura 14. Modelación geofísica de sector Gámeza. Resistividad (arriba) e intensidad gamma natural (abajo).

3.3. Cortes geológico-geofísicos

Sector Corrales (A – A´)

A partir de los gráficos de resistividad aparente e intensidad gamma natural se ubicaron los posibles contactos litológicos y las fallas a través de grandes cambios en el parámetro físico medido. La pseudosección de resistividad aparente muestra las zonas con menor resistividad que corresponden a zonas con mayor saturación (Figura 15). En el corte geológico-geofísico se observa el predominio de areniscas saturadas.

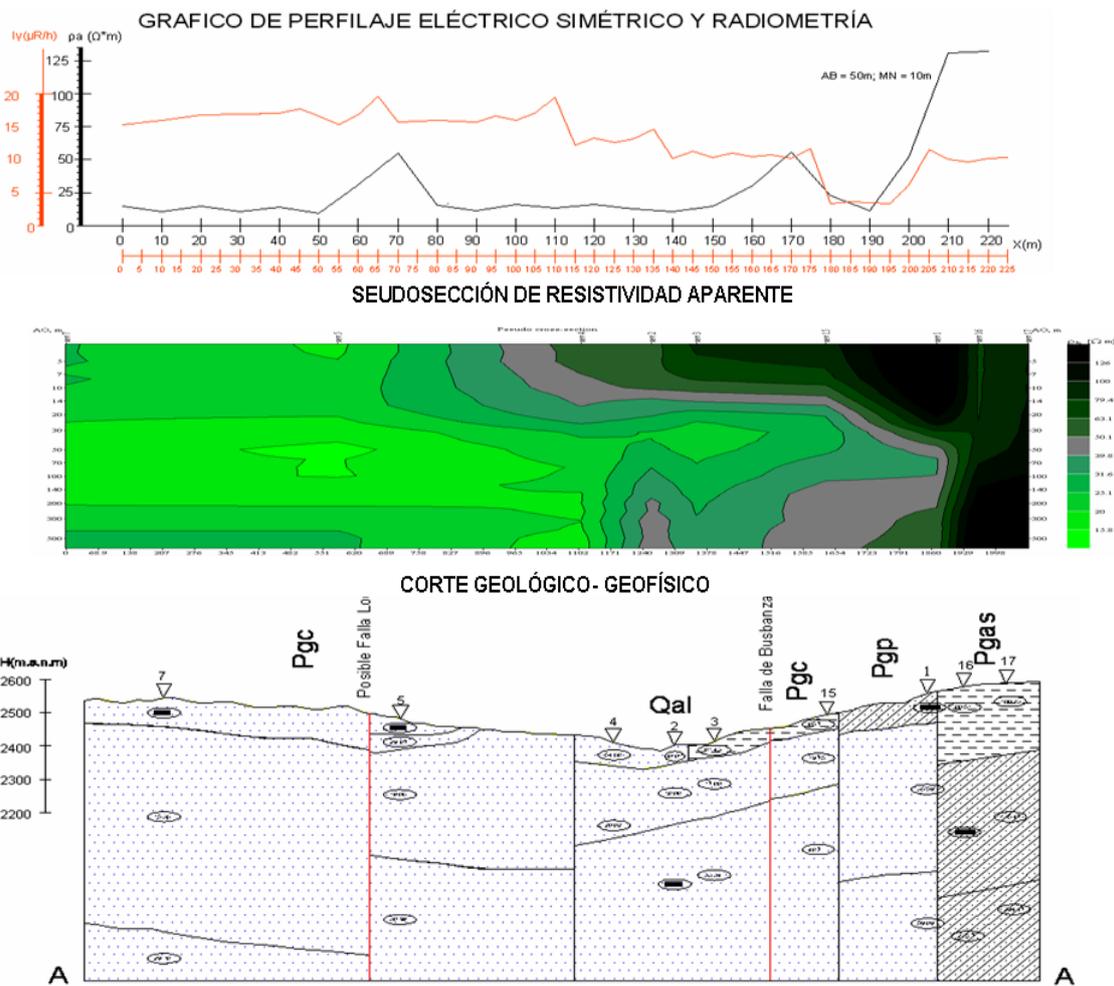


Figura 15. De arriba hacia abajo, gráfico de perfilaje eléctrico y radiometría. Pseudosección de resistividad aparente y corte geológico-geofísico A-A'. Sector Corrales.

Sector Gámeza (F-F')

La resistividad aparente y la intensidad gamma natural permitieron delimitar los posibles contactos litológicos y las fallas. La pseudosección de resistividad aparente revela las zonas con menor resistividad, las cuales corresponden a zonas de areniscas con mayor saturación (Figura 16). El corte geológico-geofísico, al igual que en el sector anterior, muestra predominio de areniscas saturadas.

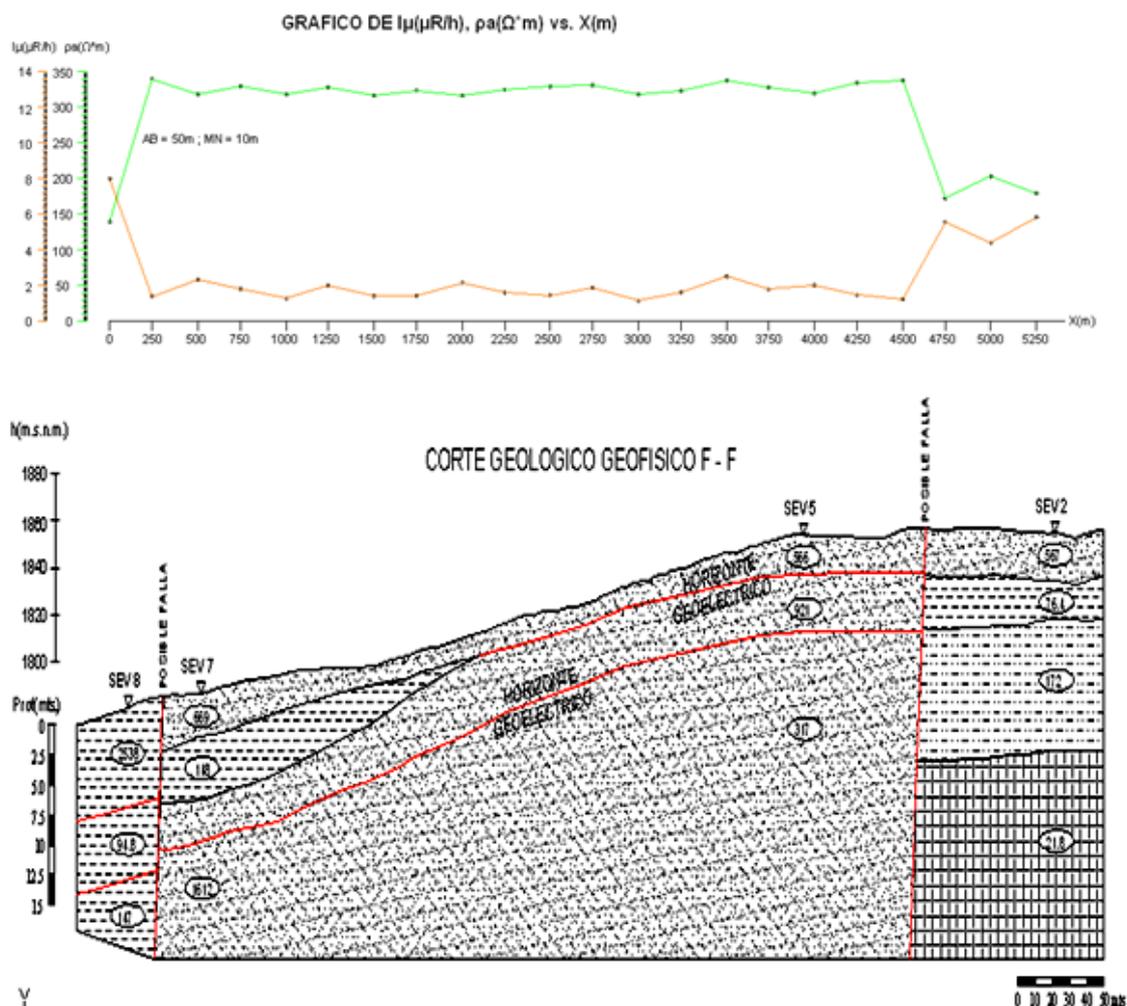


Figura 16. De arriba hacia abajo, perfilaje eléctrico, radiometría y corte geológico-geofísico F-F'. Sector Gámeza.

La aplicación del método de SEV permitió conocer la geología del subsuelo hasta una profundidad de 426 m; la aplicación combinada del perfilaje eléctrico con el método de radiometría facilitó la ubicación con mayor precisión de zonas de fallas y contactos geológicos.

La combinación del método de SEV con los métodos de perfilaje eléctrico y de radiometría hizo posible la elaboración de cortes geológico-geofísicos más precisos de una región de estudio, ya que la información obtenida con un método se enriquece con la del otro; es decir, el perfilaje eléctrico y la radiometría determinan los contactos verticales, mientras que el SEV delimita los espesores de las capas; la combinación de esta información conduce a generar un corte más completo y fiel a la realidad geológica. Se recomienda la realización de perforaciones y la toma de registros eléctricos con el fin de verificar la información geológica y geofísica obtenida.

4. CONCLUSIONES

- La combinación de los métodos geofísicos de sondeo eléctrico vertical con los métodos de perfilaje eléctrico y de radiometría facilita la elaboración de cortes geológico-geofísicos más ajustados a la realidad geológica del subsuelo.
- Debido a que los valores más bajos de resistividades se asocian a las areniscas saturadas es posible concluir que ambos sectores presentan condiciones favorables para la extracción de aguas subterráneas.

5. AGRADECIMIENTOS

El autor agradece al grupo de investigación INGEOFÍSICA por su cooperación y a la empresa *Geophysical Exploration* por los aportes técnicos y operacionales durante el desarrollo de la investigación.

6. REFERENCIAS

- DANKO, I. M. B. Y AZZE, A. *Geoelectricidad I*. La Habana: Escuela de Ingeniería Geofísica, 1972.
- DOBRIN, M. B. *Introducción a la prospección geofísica*. Barcelona: Ediciones Omega, 1961.
- FONSECA, F. Modelación geológico-geofísica y análisis geoestadístico de datos en sectores de Boyacá, Colombia. *Geología Colombiana*, 37(1): 27, 2012.
- FONSECA, F. Modelación 3D y análisis geoestadístico de datos geofísicos a partir de la implementación de los softwares Oasis Montaj y Surfer 8.0, de los sectores Gámeza y Corrales, Boyacá, Colombia. Informe de Proyecto. INGEOFÍSICA. 2009.
- FONSECA, F. Caracterización geológica-geoeléctrica de litologías presentes en sectores de la zona centro del departamento de Boyacá. Informe de Proyecto. INGEOFÍSICA. 2015.
- INGEOMINAS-UPTC. Proyecto de Hidrogeología en sectores centro y norte de Boyacá y Maní-Casanare. 2007.
- ORELLANA, E. *Prospección geoelectrica en corriente continua*. Madrid: Paraninfo, 1972.
- SINIT SIN, A. Y. *Radiometría*. La Habana: Pueblo y Educación, 1994.

Recibido: 19/07/17

Aceptado: 6/09/17

Fredy A. Fonseca-Benítez, Sede Sogamoso. Grupo de Investigación INGEOFÍSICA Universidad Pedagógica y Tecnológica, Colombia.
frefonseca@yahoo.com

Evaluación físico-mecánica y estructural del macizo gnéisico de mina Catoca para el diseño de voladuras

Physical-mechanical and structural evaluation of the Catoca gneissic massif for designing blasting

Nunes Filipe¹, José A. Otaño-Noguel², Roberto L. Watson-Quesada³

¹Ingeniero de minas. Escuela Superior Politécnica de Lunda-Sur, Angola, nfilipe@outlook.pt

²Dr. C. Profesor Titular. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Moa, Cuba
joseot@ismm.edu.cu

³Dr. C. Profesor Titular. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Moa, Cuba
rwatson@ismm.edu.cu

Resumen

Por su importancia e influencia en el diseño de los trabajos de voladura, tomando en consideración la acción de la explosión en el medio, en este trabajo se determinan las principales propiedades físico-mecánicas de las rocas encajantes y se analiza la estructura del macizo, constituido por gneises, en la mina Catoca. La densidad, masa volumétrica, límite de resistencia a compresión simple estática, límites de resistencia a tracción estática y velocidad de las ondas elásticas longitudinales fueron las propiedades determinadas en el macizo; en el caso del estudio estructural, con el empleo del método geológico, se realizó el levantamiento de los sistemas y familias de grietas. Como resultado se ofrecen los valores de las propiedades antes citadas y la caracterización de los diferentes sectores de la mina, según sus propiedades y agrietamiento, aspectos de capital importancia para el diseño de las voladuras de las rocas de caja.

Palabras clave: voladura de minas; propiedades físico-mecánicas; agrietamiento de roca; gneises; mina Catoca

Abstract

Due to its importance and influence in the design of the blasting works taking into consideration the action of the explosion in the environment, in this work the main physical-mechanical properties of the embedding rocks are determined and the structure of the massif, constituted by gneisses, is analyzed at the Catoca mine. The density, volumetric mass, limit of resistance to simple static compression, limits of resistance to static traction and velocity of the longitudinal elastic waves were the properties determined in the massif; In the case of the structural study, with the use of the geological method, the systems and families of cracks were surveyed. As a result, the values of the aforementioned properties and the characterization of the different sectors of the mine according to their properties and cracking are offered, aspects of capital importance for the design of the blasting of the box rocks.

Keywords: blasting of mines; physical-mechanical properties; rock cracking; gneisses Catoca mine.

1. INTRODUCCIÓN

Localizada a unos 30 km de la ciudad de Saurimo, en la provincia de Lunda-Sur, la mina Catoca ocupa un área de 64 ha dentro del escudo Cassai, donde se conocen más de 70 chimeneas agrupadas en cuatro campos: Camafuca-Camazamba (19 chimeneas), Camútue (15 cuerpos), Camagia (8 cuerpos) y Catoca (32 cuerpos). Esta última se encuentra en la margen derecha del río Chicapa, que corre según una falla extensional NE-SW del Cretácico (Neves y Guardado 2012).

La cantera está proyectada para un minado a cielo abierto, con el arranque directo y carga de la masa minera, con excavadoras de 5 a 18 m³ de capacidad. En el caso de las rocas de destape que rodean el kimberlito (los gneises) el arranque se realiza mediante voladura; se emplean los mismos equipos para la carga y el transporte se realiza en camiones de 40-100 toneladas y en bandas transportadoras de hasta 2,5 km. Los parámetros de explotación se reflejan en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros de explotación establecidos en la mina Catoca

PARÁMETRO	VALOR
Altura de los bancos de trabajo, (m)	5 - 10
Altura de los bancos provisionales no operacionales, (m)	10 - 30
Angulo de inclinación de los bancos duplos, (grado)	35
Angulo de inclinación de los bancos triplos, (grado)	30
Largo de los frentes de trabajo, (m)	30 - 60
Ancho de las plazoletas de transporte y de seguridad, (m)	20 - 30

La necesidad de determinar las propiedades físico-mecánicas y estructurales del macizo de rocas gnéisico parte del hecho de que durante el arranque de las rocas, el cual se realiza mediante trabajos previos de perforación y voladura, se produce un considerable volumen de fragmentos con dimensiones superiores a las admitidas por los eslabones posteriores de la cadena tecnológica (volumen de los fragmentos oscila entre 1,5 m³ y 8,5 m³). Esto genera la necesidad de realizar trabajos de fragmentación secundaria de los fragmentos sobredimensionados, con el consiguiente aumento del costo de producción.

En la literatura especializada sobre la fragmentación de rocas con explosivos diferentes autores como Sujanov y Kutuzov (1967) introducen coeficientes que consideran la acción de la explosión, la profundidad de colocación de las cargas, las propiedades de las rocas y el tipo de explosivo utilizado. Langefors y Kihlstrom (1963) establecen la constante **C** que relaciona la cantidad de explosivo por unidad volumétrica de roca a fragmentar. Diéguez, Otaño y Sargentón (2014) esclarecen que los parámetros de las ondas de tensión explosivas en las rocas dependen fundamentalmente de las propiedades físicas de estas y de las características de las sustancias explosivas, así como de la ubicación de la carga con respecto a la pared de la cámara.

Como se desconocen las causas que originan que, durante la voladura, en mina Catoca se obtengan fragmentos sobredimensionados, en esta investigación se pretende identificarlas para proponer un procedimiento de diseño y realización de los patrones de voladura que permita la disminución del volumen de estos fragmentos rocosos con dimensiones mayores que las admisibles.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Determinación de las propiedades físico-mecánicas de las rocas

El yacimiento de kimberlito de la mina Catoca se describe petrográficamente como una formación vulcanogénica diamantífera, representada por tobas kimberlíticas, brechas tobáceas y tobas gravelíticas con intercalaciones de areniscas tobáceas, además de rocas kimberlíticas de transición del substrato del complejo vulcanogénico sedimentario. Las principales rocas encajantes son los gneises, con una composición feldespático-piroxenítica con intercalaciones de cuarcitas y esquistos cuarzo-biotíticos, que presentan diferentes grados de meteorización y desintegración, desde saprolitos hasta las variedades monolíticas más resistentes. Sus contactos con las rocas kimberlíticas son acentuados, con paredes abruptas (Neves y Guardado 2011).

Entre las fundamentales propiedades físico-mecánicas de las rocas a determinar en este estudio se consideran las siguientes:

- Densidad (ρ_0): Se estableció mediante el método picnométrico;
- Masa volumétrica (ρ): Se precisó mediante el método de la pesada hidrostática;
- Límite de resistencia a compresión simple estática [σ_c^e]: Se determinó en muestras cilíndricas de 50 x 50 mm;
- Límite de resistencia a tracción estática [σ_T^e]: Se estableció por el método de flexión, utilizando muestras rectangulares con sección transversal de 35x35 mm y longitud de 315 mm.
- Velocidad de las ondas elásticas longitudinales en muestras grandes (V_L): Se comprobó en una varilla larga y fina y en el macizo, por medio del equipo de ultrasonido Litienov, de procedencia Rusa.

En el laboratorio de geología-geotecnia de la mina Catoca se ensayaron las muestras (Tabla 2) y como no se conocía la dispersión o variación de los parámetros a estudiar para determinar el número de muestras se tomó para cada una de las propiedades un número determinado, como sigue: diez muestras para densidad, masa volumétrica y resistencia a compresión; cinco muestras para resistencia a tracción y la velocidad de las ondas longitudinales; luego se determinó el índice de exactitud aplicando la distribución t de Student para probabilidad. En todos los casos la determinación dio un índice de exactitud menor de 3 %, por lo que se

consideró que el número de muestras ensayadas fue suficiente para obtener valores confiables.

La sección transversal de las muestras en varillas (V_L^v) se tomó de 4x4 mm, con longitud entre 80-120 mm; mientras que la sección transversal de las muestras en macizo (V_L^m) se tomó de 50x50 mm y una longitud de no menos de 10 cm.

2.2. Agrietamiento del macizo de rocas

Para el estudio de la estructura del macizo de rocas en el campo, además de las determinaciones del autor (sector este), se utilizó la información aportada por otros investigadores (Neves y Guardado 2012), realizada en los sectores sur y norte de la mina. El estudio de agrietamiento permite establecer las características de la fracturación estructural de las rocas, que son necesarias posteriormente en la investigación del mecanismo de fragmentación de las rocas por voladura. Ellas son: orientación de las grietas en el espacio (ángulo de buzamiento y azimuth del buzamiento); intensidad del agrietamiento: incluye abertura y distancia entre las grietas en los sistemas (fractura del macizo) y extensión de las grietas (su persistencia); indicadores de calidad del agrietamiento: material de relleno, carácter de la superficie de las grietas (ondulada o recta, rugosa o lisa), presencia de agua (seca, húmeda, inundada en forma de goteo o en chorro) (Kalichenko *et al.* 2000).

Como se dijo anteriormente, las características estructurales del macizo de rocas es el principal obstáculo para una óptima voladura. Independientemente de sus características y condiciones ellas pueden variar de una mina a otra y de área en área, dentro de una misma mina, por ello en este trabajo se dividió la mina en tres sectores de estudios estructurales: sur, norte y este; sin embargo, no se investiga el sector este ya que en el mismo no yacen los gneises objeto de la investigación.

Conforme a lo acordado y establecido en geología estructural de citar las direcciones geográficas con referencia a los 360° de la rosa de los vientos, estando situado el 0° en el norte y haciendo la graduación en la dirección de las agujas del reloj, y con el fin de facilitar la investigación, la interpretación de los datos de campo para el estudio del agrietamiento se realizó a partir de las etapas propuestas por otros investigadores (Kazikaev 1981; Hoek 2014).

De este modo, la técnica de la proyección estereográfica brindó la información de las distintas familias de grietas que intervienen en el macizo.

Finalmente, se realizó la interpretación de la salida gráfica dada por las rosetas.

La elaboración de las mediciones y su análisis, que incluye el tratamiento y representación, se realizó mediante el programa informático profesional DIP versión V 5.1, que consiste en procesar los datos medidos en el campo y obtener el comportamiento de las grietas en el macizo.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Propiedades físico-mecánicas

Los resultados se muestran en la Tabla 2. Los gneises aparecen muy alterados y deteriorados generalmente en los niveles superiores, lo que requiere un análisis físico-mecánico particularizado para los diferentes niveles, dada su variabilidad en el perfil minero. Según Neves y Guardado (2012) los valores de resistencia al corte presentan diferencias, en dependencia de las cotas o niveles de la mina, y de acuerdo al grado de meteorización y agrietamiento.

Tabla 2. Resultados de las propiedades físico-mecánicas de las rocas

CARACTERÍSTICAS	VALOR
Densidad de las rocas (ρ_0), (kg/m^3)	2 649
Masa volumétrica (ρ), (kg/m^3)	2 582
Resistencia a compresión simple estática [σ_c^e], (MPa)	60,06
Resistencia a tracción estática [σ_t^e], (MPa)	5,58
Velocidad de ondas longitudinales en la varilla (V_L^v), (m/s)	5 434,4
Velocidad de ondas longitudinales del macizo (V_L^m), (m/s)	5 029,4

3.2. Agrietamiento

Las rocas encajantes, los llamados gneises, sobreyacen los sedimentos arenoso-arcillosos y presentan un alto grado de alteración y agrietamiento. Las superficies de rotura pueden incluir no solo mecanismos de cizallamiento a lo largo de un plano preexistente, sino también estar combinadas con varias discontinuidades de grietas separadas, formando puentes rocosos. Estas superficies se manifiestan a través de tres familias de grietas (Figuras 1, 2 y 3) que se caracterizan por ser lisas, planas, de fricción y onduladas, y en ellas desarrollan mecanismos de cizallamiento a lo largo de las discontinuidades.

La información de las distintas familias de grietas que intervienen en el macizo aportada por la proyección estereográfica se ofrece en las

Tablas 3, 4 y 5. De esta valoración se señala que existe un alto grado de afectación del macizo por agrietamiento, y la existencia de grietas en todas las direcciones. En las grietas es más abundante el relleno de gneises meteorizado. La presencia de agua en las grietas, por lo general, es mucha, prácticamente en todas las estaciones del año, y se agudiza aún más en la época de lluvias. Prevalecen grietas sanas y no alteradas a medida que se profundiza en la mina. La caracterización general del agrietamiento en los tres sectores investigados se puede resumir en lo siguiente:

3.2.1. Sector sur

Familia de grietas 1: Azimut del buzamiento 160° – 200° . El ángulo de buzamiento varía desde 0° hasta 50° . Se observa una extensión de 0–15 m, la distancia entre las grietas es de 0,2–1,0 m. Las direcciones predominantes según el rumbo de las grietas $N75^{\circ}$ E.

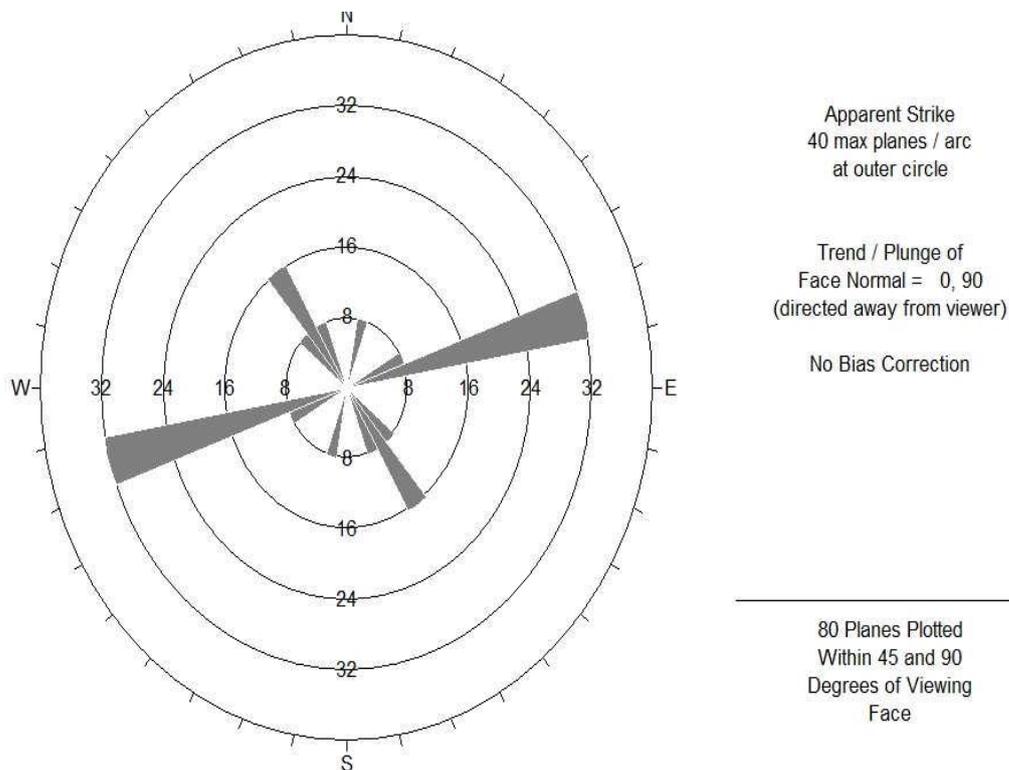


Figura 1. Diagrama de rosetas del agrietamiento del sector sur de la mina.

Tabla 3. Elementos de yacencia estructurales del sector sur de la mina

Cotas	Familia	Azimut/Buz. (Grado)		Abertura (cm)	Espac. (m)	Suprf.	Relleno
960	I	80	100	0,5	2	lisa	gneis
	II	88	192	0,7	2,5	lisa	gneis
	III	23	248	0,3	5	lisa	gneis
950	I	29	296	0,5	5	rugosa	gneis meteorizado
	II	70	240	0,5	5	lisa	gneis y agua
	III	85	245	0,3	3	lisa	gneis y agua
940	I	54	190	0,5-0,7	5	rugosa	gneis y agua
	II	55	185	0,3-0,5	5	ondulada	gneis y agua
	III	65	75	0,6	2-3	ondulada	gneis y agua
930	I	90	320	0,9	2-3	rugosa	gneis y agua
	II	58	176	1,0	3	lisa	gneis meteorizado
	III	69	350	1,0	3,5	lisa	gneis meteorizado

3.2.2. Sector norte

La distancia entre las grietas es de 0,3–0,7 m (media=0,5 m) y la magnitud de la extensión de 1–2 m.

Familia de grietas 2: Azimut del buzamiento 230°–260°. Ángulo del buzamiento 78°–84°; en el afloramiento No. 10 el buzamiento en el este alcanza direcciones (azimut del buzamiento 93°, ángulo del buzamiento 65°). La extensión observada es de 2–3 m; la distancia entre las grietas es de 0,5 a 1,5 m.

Familia de grietas 3: Azimut del buzamiento varía 182°–190°. El ángulo de buzamiento desde 40°–45° hasta 65°.

En la Figura 2 se muestran las direcciones predominantes según el rumbo de las grietas N10–20° W y N55° E y EW.

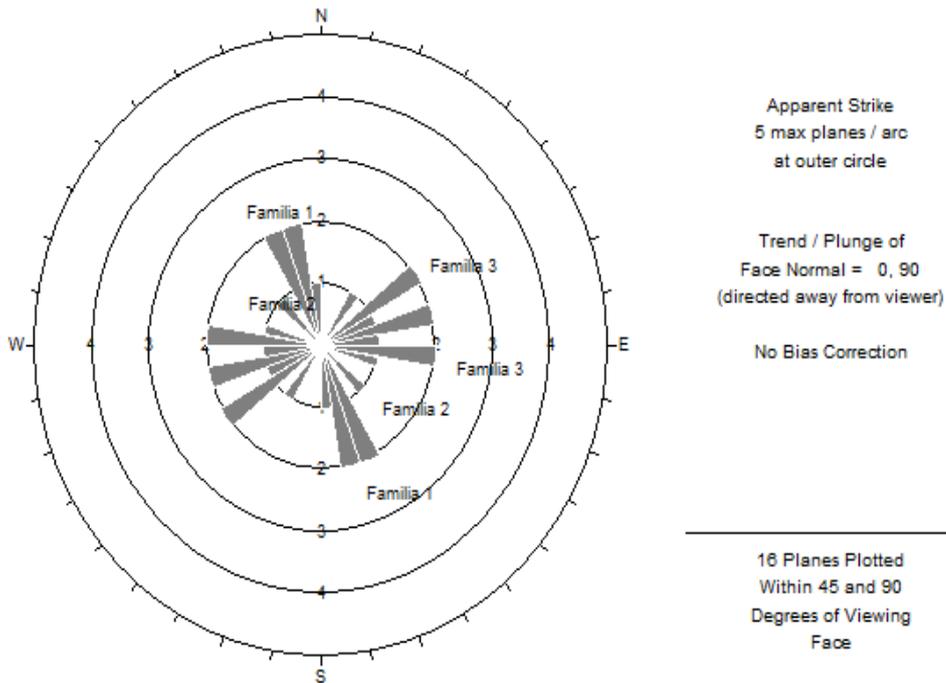


Figura 2. Diagrama de rosetas del agrietamiento del sector norte de la mina.

Tabla 4. Elementos de yacencia estructurales del sector norte de la mina

Cotas	Familia	Azimet/Buz. (Grado)	Abertura (cm)	Espac. (m)	Suprf.	Relleno
930	I	74	331	0,3	2	lisa gneis meteorizado
	II	83	83	0,3-0,5	2	lisa gneis
	IIIa	44	44	0,5-0,7	2	lisa gneis
930	I	183	58	0,2-0,3	1	rugosa Gneis meteorizado
	II	358	84	0,5-0,7	2	lisa gneis y agua
	IIIa	243	41	0,1-0,2	0,5	lisa gneis
930	I	54	3	0,7-1,0	1	lisa gneis meteorizado
	II	79	256	1,0-1,5	3	rugosa gneis
	IIIa	45	45	-	-	lisa gneis meteorizado
920	I	59	349	0,5	1,5	ondulada gneis meteorizado
	II	82	73	0,1	1,5	lisa gneis y agua

	IIIb	16	124	0,3-0,5	5-7	lisa	gneis meteorizado
920	I	58	322	0,3-1,0	5	lisa	gneis meteorizado
	II	80	81	0,5-3,0	5	lisa	gneis meteorizado
920	IIIa	29	176	1,0-1,5	5	lisa	gneis y agua
	I	70	349	0,3-0,5	15	lisa	gneis meteorizado
	IIIa	34	152	-	-	lisa	gneis meteorizado
	I	75	304	0,3-0,5	2	lisa	gneis meteorizado
920	II	72	64	1,0-1,5	2-3	lisa	gneis y agua
	IIIa	54	196	1,0-2,0	2-3	lisa	gneis meteorizado

3.2.3. Sector este

Se observa un espaciamiento entre grietas y sistemas de grietas, oscilando entre 0,85-1,00 m valores mínimos y máximos, respectivamente. En las superficies de las grietas son más representativas las grietas lisas con aberturas rellenas con gneis meteorizado de hasta 1,00 cm.

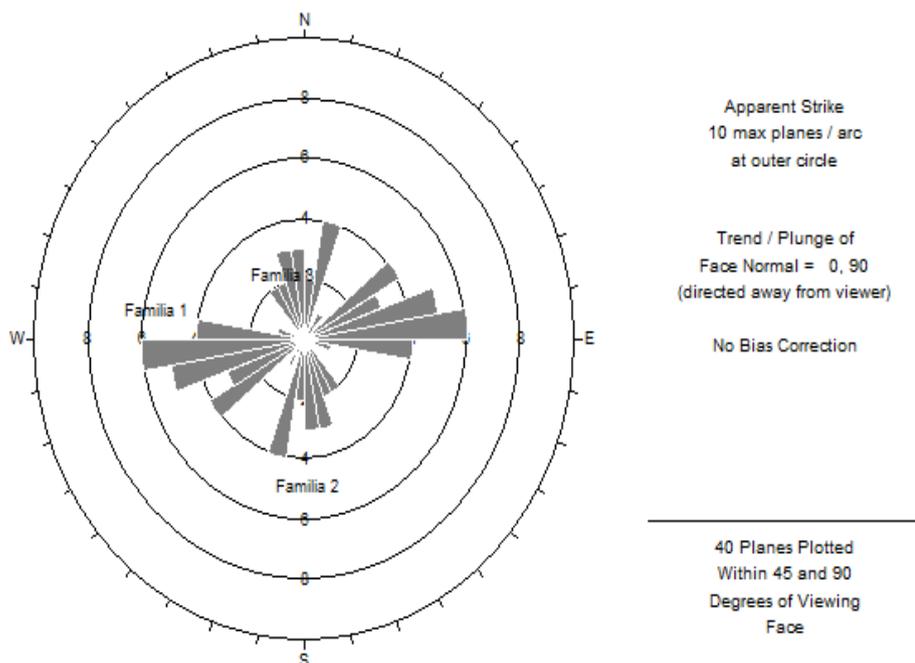


Figura 3. Diagrama de rosetas del agrietamiento del sector este de la mina.

Tabla 5. Elementos de yacencia estructurales del sector este de la mina

Cotas	Familia	Azimut/Buz. (Grado)		Abertura (cm)	Espac. (m)	Suprf.	Relleno
940	I	44	331	0,3	2	lisa	gneis
	II	68	330	0,4	2	lisa	gneis
	III	83	245	0,65	2	lisa	gneis
940	I	56	50	0,5	1	lisa	gneis
	II	56	85	0,7	2	ondulada	gneis
	III	29	227	0,5	0,5	ondulada	gneis
940	I	44	180	1,5	1,5	lisa	gneis meteorizado
	II	55	89	1,5	1	lisa	gneis meteorizado
	III	45	185	1,5	3	rugosa	gneis meteorizado
930	I	80	250	0	0	lisa	gneis meteorizado
	II	60	75	0,5	1,5	lisa	gneis meteorizado
	III	85	350	1	1	ondulada	gneis meteorizado
920	I	20	122	0,5	6	lisa	gneis meteorizado
	II	75	330	0	0	lisa	gneis meteorizado
	III	55	330	0,5	3,5	lisa	gneis meteorizado

4. CONCLUSIONES

- Las propiedades máficas de las rocas clasifican como rocas compactas, densas, poco porosas, que muestran valores de resistencia medios.
- Desde el punto de vista estructural el yacimiento en los tres sectores concebidos para el estudio presenta tres familias de grietas principales, lo que conduce a la formación de bloque naturales de disimiles tamaños, razón por la cual durante los trabajos de voladuras se obtienen pedazos de dimensiones no admisibles por la técnica empleada en los eslabones del proceso tecnológico minero

5. REFERENCIAS

- DIÉGUEZ, Y. Campo tenso-deformacional para voladuras con cordón detonante en el laboreo de túneles. *Minería y Geología*, 29(3): 38-55, 2013.
- DIÉGUEZ, Y.; Otaño, J. y Sargentón, G. Diseño de voladuras de contorno. *Minería y Geología*, 30(3): 49-66, 2014.
- HOEK, E. *Practical Rock Engineering*. New edition complete, 24 MB. 2014. Consulta: 20 julio 2014. Disponible en: www.rocscience.com.
- KAZIKAEV, D. M. *Procesos geomecánicos en la explotación conjunta y ulterior de las menas*. Moscú: Nedra, 1981. 89 p.
- KALICHENKO, V. M.; STIEPIN, N. I.; TUPIKLIN, I. I. Y USHAKOV, I. N. *Geometría del subsuelo*. Novcherkask: YRGU, 2000. 78 p.
- LANGFORS, U. Y KIHSTROM, B. *Técnica Moderna de Voladura de Rocas*. Bilbao: Ediciones Urmo, 1963.
- NEVES, D. Y GUARDADO, R. Deslizamientos de taludes en el yacimiento kimberlítico de Catoca (Angola). *Minería y Geología*, 27(3): 26-42, 2011.
- NEVES, D. Y GUARDADO, R. Evaluación de las propiedades geotécnicas de las rocas y suelos en el complejo minero kimberlítico de Catoca (Angola). *Minería y Geología*, 28(3): 1-17, 2012.
- OTAÑO, J. *Fragmentación de rocas con explosivos*. La Habana: Félix Varela, 1998.
- PEDRO, A.; JOE, S. Y OTAÑO, J. Análisis del diseño de voladuras con cargas compactas en la cantera de áridos El Cacao. *Minería y Geología*, 22(4), 2006.
- SUJANOV, A. F. Y KUTUZOV, B. N. *Fragmentación de rocas*. Moscú: Nedra, 1967.

Recibido: 14/07/16

Aprobado: 05/09/17

Nunes Filipe, Ingeniero de minas. Escuela Superior Politécnica de Lunda-Sur, Angola, nfilipe@outlook.pt

Obtención en horno eléctrico de arco de aleaciones del sistema Fe-Mn-Cr-C y escorias destinadas al desarrollo de consumibles de soldadura

Obtaining in electric arc furnace alloys of the Fe-Mn-Cr-C system and slag destined to the development of welding consumables

Lorenzo Perdomo-González¹, Rafael Quintana-Puchol², Amado Cruz-Crespo³, Carlos R. Gómez-Pérez⁴

¹Doctor en Ciencias Técnicas. Investigador Titular. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba, lperdomo@uclv.edu.cu

²Doctor en Ciencias. Profesor Titular, Centro de Investigación de Soldadura. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba, rquin@uclv.edu.cu

³Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Titular, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba, cruz@uclv.edu.cu

⁴Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Titular, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba

Resumen

Se presenta la obtención carbotérmica de ferroaleaciones al cromo manganeso para su uso en la preparación de cargas aleantes de consumibles de soldadura. Sobre la base de variaciones en las proporciones de los minerales de cromo y manganeso en las cargas metalúrgicas se establecen diferentes combinaciones que permiten obtener ferroaleaciones multicomponentes con rangos de composición para el cromo (9–32 %) y manganeso (24–65 %). El proceso de fusión-reducción se realiza en un horno de arco eléctrico con crisol de grafito y con la presencia de coque como reductor, lo que garantiza la obtención de aleaciones de alto contenido de carbono (5–6 %). El uso de la ferroaleación multicomponente, obtenida en la formulación de consumibles de soldadura, simplifica y abarata la fabricación de estos. Como resultado del procesamiento metalúrgico se obtienen escorias formadas por los óxidos de silicio,

aluminio, magnesio, manganeso y calcio, factibles de utilizar en la obtención de matrices de fundentes para soldadura por arco sumergido.

Palabras clave: ferrocromo; ferromanganeso; escoria; reducción carbotérmica; fundente de soldadura.

Abstract

The production of chromium manganese ferroalloys for the use in the development of alloying loads of welding consumables is presented. On the basis of variations in the proportions of the chromium and manganese minerals in the loads, different combinations are established, which allow obtaining multicomponent ferroalloys with composition ranging from 9 to 32 % chromium and from 24 to 65 % manganese. The melting-reduction process is carried out in an electric arc furnace with a graphite crucible and with the presence of coke as a reducing component which guarantees the obtaining of high carbon alloys (5–6 %). The use of the multicomponent ferroalloy in the formulation of welding consumables simplifies and makes cheaper the obtaining of these materials. As result of metallurgical processing, slag formed by the silicon, aluminum, magnesium, manganese and calcium oxides are obtained, which are feasible to use in the production of flux matrices for submerged arc welding process.

Keywords: ferrochromium; ferromanganese; slag; carbothermic reduction; welding flux.

1. INTRODUCCIÓN

Generalmente, los fundentes de soldadura para el proceso SAW (siglas del inglés *submerged arc welding*), destinados al relleno superficial, están formados por una matriz y una carga de aleación (Quintana *et al.* 2010) y por un núcleo metálico y un revestimiento de los electrodos macizos, que frecuentemente lleva parte de la carga de aleación (González *et al.* 2016; Fernández *et al.* 2014). Existe, además, un tipo de electrodo especial, denominado tubular, el cual contiene la carga de aleación en el interior del tubo (electrodo tubular revestido) (Fernández *et al.* 2014; Shan y Liu 2014). También se comercializan alambres tubulares que contienen en su interior elementos de aleación, los que también pueden ser utilizados en la recuperación de piezas, de acuerdo a sus características particulares, por diferentes procedimientos (Shan y Liu 2014; Lincoln Electric 2016).

Independientemente del tipo de consumible que se use, de forma general, se puede señalar que la composición química y, por ende, las propiedades

mecánicas obtenidas en los depósitos de soldadura dependen, fundamentalmente, de las características y composición de la carga de aleación del consumible utilizado y su interrelación con la escoria durante la formación de cordón o baño de soldadura (Amini, Bahrami y Sabet 2015; Kenchireddy, Jayadeva y Sreenivasan 2014).

La naturaleza de los componentes de las cargas de aleación de los consumibles de soldadura puede ser muy disímil, siendo posible usar metales puros, sales y óxidos, ferroaleaciones, entre otros. Es más frecuente el uso de las ferroaleaciones por ser más económicas en comparación con los metales puros y, por otro lado, al tener una temperatura de fusión menor que el metal puro son más fácilmente digeribles asimilables los elementos metálicos aportados en el metal fundido (Berciano *et al.* 2009).

Además de la función de aleación de los depósitos de soldadura, en las cargas de aleación de los materiales para soldar se adicionan elementos desoxidantes, con el objetivo de disminuir el contenido de óxidos en el metal y aumentar la transferencia de los elementos químicos, así como elementos desulfurantes; se logra un mejoramiento en las propiedades de los depósitos. El campo de aplicación de un consumibles de soldadura destinado a la recuperación de piezas mediante recargue depende, esencialmente, de las características y composición de su carga de aleación (Quintana *et al.* 2003, 2006).

Entre las ferroaleaciones de mayor uso en la formulación de cargas de aleación de consumibles de soldadura se encuentran: ferrocromo, ferromanganeso, ferrosilicio, ferromolibdeno, ferrovanadio, entre otros (Quintana *et al.* 2003; Kozyrev *et al.* 2016).

Las ferroaleaciones más frecuentemente adicionadas, como elemento de aleación, son el ferrocromo y el ferromanganeso y como desoxidante el ferrosilicio y el propio ferromanganeso, las cuales son capaces de cumplir ambas funciones (aleante-redox); el ferromanganeso también actúa (a través del Mn) como desulfurante efectivo. Es decir, es bastante frecuente encontrar, en diferentes consumibles destinados al relleno superficial, cargas de aleación integradas por estas tres ferroaleaciones, sobre todo para la recuperación de piezas que trabajan en condiciones de desgaste abrasivo e impacto (González *et al.* 2014, 2016). La proporción de una ferroaleación o de otra dentro del consumible depende de la magnitud de las propiedades físico-mecánicas y químicas predominantes a obtener en la pieza (dureza, tenacidad, mecanismo de desgaste, entre otros).

En el mercado se distribuye una amplia gama de ferroaleaciones de variado contenido de carbono, desde contenidos muy bajos hasta valores relativamente altos de este elemento, pero no es muy frecuente encontrar ferroaleaciones que contengan más de un elemento metálico de aleación con destacada influencia, a excepción de aleaciones que se comercializan con diferentes contenidos de carbono y silicio como consecuencia de su método de obtención. En el mundo se producen ferroaleaciones al manganeso-silicio (silicomanganeso) y ferroaleaciones al cromo-silicio, estas últimas muy utilizadas para refinar ferrocromo de alto contenido de carbono (Aranguren y Mallol 1963).

El obtener una ferroaleación multicomponente para la formulación de cargas de aleación de consumibles de soldadura reduce apreciablemente los costos de obtención de esta, ya que en un mismo proceso se obtienen ambos metales (por ejemplo Cr, Mn) en un relativamente amplio intervalo. Además, reduce el consumo de tiempo y energía, tanto durante el proceso de obtención como para la preparación de las ferroaleaciones individuales, fundamentalmente por las operaciones de pulverización y clasificación hasta granulometrías menores a 0,25 mm. Estas ferroaleaciones, por su restringido uso, pueden ser producidas a solicitud, en instalaciones de pequeña o mediana capacidad y la tecnología de producción puede ser adecuada, de forma tal que permita la obtención de ferroaleaciones de alta fragilidad, lo que reduciría aún más los costos de preparación de estas.

El presente trabajo está encaminado a la obtención de ferroaleaciones complejas (multicomponentes del sistema Fe-Cr-Mn-C) aplicables en la confección de cargas de aleación de consumibles de soldadura destinados al relleno superficial.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Materias primas

- Minerales portadores de cromo y manganeso: cromita refractaria, procedente de la Planta Cayo Guam en la provincia de Holguín y pirolusita, del yacimiento Margarita de Cambute, en Santiago de Cuba.
- Minerales formadores de escorias: arenas de cuarzo, roca caliza y fluorita.
- Reductor: coque.

La composición química de estos minerales, del coque y sus cenizas aparecen en la Tabla 1.

Tabla 1. Composición química de las materias primas (en % m)

Componente	Cromita	Pirolusita	Arena sílice	Roca caliza	Fluorita	Coque	Ceniza coque
Cr ₂ O ₃	32,87	-	-	-	-	-	-
SiO ₂	5,79	8,60	90,32	0,34	3,15	-	88,08
MnO ₂	-	76,86	-	-	-	-	-
TiO ₂	-	-	0,48	-	-	-	-
Al ₂ O ₃	26,06	-	0,73	0,23	0,43	-	-
FeO	14,54	1,50	1,17	0,15	-	-	-
CaO	0,42	2,00	1,63	55,20	0,22	-	2,17
MgO	16,00	0,32	0,90	0,68	0,10	-	1,58
K ₂ O	-	-	0,73	-	-	-	3,75
Na ₂ O	-	-	0,81	-	-	-	4,42
CaF ₂	-	-	-	-	96,1	-	-
C fijo	-	-	-	-	-	83,40	-
cenizas	-	-	-	-	-	12,00	-
S	-	-	-	-	-	1,10	-
P	-	0,11	-	-	-	-	-
H ₂ O	-	-	-	-	-	3,50	-
PPI	-	10,61	2,01	43,4	-	-	-

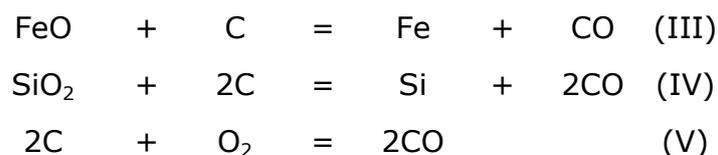
2.2. Conformación de las cargas

Se conformaron tres cargas, en las cuales se varió la proporción cromita/pirolusita de la siguiente manera:

Carga	cromita/pirolusita (% m)
1	75:25
2	50:50
3	25:75

La cantidad de coque adicionada se determinó a partir de la composición de los minerales (Tabla 1) y de las reacciones químicas principales de oxidación reducción que deben ocurrir, las que se señalan a continuación.





De la experiencia siderúrgica se tomó que la reacción (I) se efectúa con una eficiencia del 90 %, la (II) en un 80 % y la (III) en un 95 %. Para la reacción (IV) se asume la parte de la sílice que pudiera ser reducida por el carbono y que pasará al metal (2 % de Si) y la (V) representa el carbono que puede reaccionar con el oxígeno, además, en la carga se adiciona un 25 % de carbono en exceso, considerándose que el contenido de carbono en la aleación será aproximadamente un 7 % (Aranguren y Mallo 1963; Riss 1975).

De acuerdo a resultados obtenidos en el Centro de Investigaciones de Soldadura de la Universidad Central de Las Villas, para procesar la cromita refractaria es necesario adicionar a la mezcla aproximadamente un 13 % de componentes complementarios, los que formarán parte del sistema de escoria (Perdomo *et al.* 2003; Quintana *et al.* 2002). Por tanto, a cada una de las cargas se le adiciona una mezcla compuesta por: arena sílice (67 %), caliza (17 %) y fluorita (16 %). Los minerales fundamentales y el reductor constituyen el 87 % de la carga.

Con estos elementos quedaron conformadas las tres cargas a procesar, cuyos resultados se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Conformación mineral de las mezclas (en % m y g)

Componente	Mezcla 1		Mezcla 2		Mezcla 3	
	(m, g)	(m-%)	(m, g)	(m-%)	(m, g)	(m-%)
Cromita	1 500,0	53,5	1 000,0	34,8	500,0	16,9
Pirolusita	500,0	17,8	1 000,0	34,8	1 500,0	50,8
Coque	437,6	15,6	502,1	17,5	566,5	19,2
Subsuma	2 437,6	87	2 502,1	87	2 566,5	87
Arena sílice	244,0	8,7	250,5	8,7	256,9	8,7
Caliza	61,9	2,2	63,6	2,2	65,2	2,2
Fluorita	58,3	2,1	59,8	2,1	61,4	2,1
Total	2 801,9	100,0	2 875,9	100,0	2 950,0	100,0

Con los datos de la Tabla 2 y en concordancia con las principales reacciones químicas que deben ocurrir en el proceso, se realiza un balance de masa, cuyos resultados permiten evaluar las potencialidades de cada una de las

cargas metalúrgicas como fuente para la obtención de componentes de consumibles de soldadura. En los cálculos realizados se consideró que el 60 % del fósforo pasa a la aleación, un 20 % a la escoria y el otro 20 % se volatiliza y que el 10 % del azufre pasa al metal, el 30 % a la escoria y el 60 % se volatiliza (Aranguren y Mallol 1963).

En la Tabla 3 se muestran los resultados del balance para las mezclas presentadas en la Tabla 2.

Tabla 3. Balance de masa (en g) para las diferentes mezclas

Componente	Mezcla 1		Mezcla 2		Mezcla 3	
	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida
Cr ₂ O ₃	493,05	49,31	328,70	32,87	164,35	16,44
SiO ₂	398,58	366,86	425,31	391,60	452,05	416,33
MnO ₂	384,30	0,00	768,60	0,00	1 152,90	0,00
MnO	0,00	62,72	0,00	125,45	0,00	188,17
TiO ₂	1,17	1,17	1,20	1,20	1,23	1,23
Al ₂ O ₃	393,07	393,07	262,83	262,83	132,59	132,59
FeO	228,55	2,95	163,43	3,03	98,30	3,10
CaO	55,73	55,73	64,81	64,81	73,89	73,89
MgO	245,11	245,11	166,90	166,90	88,69	88,69
K ₂ O	3,75	3,75	4,09	4,09	4,42	4,42
Na ₂ O	4,30	4,30	4,69	4,69	5,09	5,09
CaF ₂	56,01	56,01	57,49	57,49	58,97	58,97
S	4,81	1,44	5,52	1,66	6,23	1,87
P	0,55	0,11	1,10	0,22	1,65	0,33
Σ Escoria	-	1242,52	-	1116,82	-	991,12
Cr	0,00	303,62	0,00	202,41	0,00	101,21
Mn	0,00	194,36	0,00	388,72	0,00	583,08
Fe	0,00	175,47	0,00	124,76	0,00	74,04
Si	0,00	14,80	0,00	15,73	0,00	16,67
C fijo	365,00	51,80	418,72	55,07	472,44	58,33
S	-	0,48	-	0,55	-	0,62
P	-	0,33	-	0,66	-	0,99
Σ Metal	-	740,86	-	787,90	-	834,94
CO	0,00	730,79	0,00	848,52	0,00	966,25

S	-	2,89	-	3,31	-	3,74
P	-	0,11	-	0,22	-	0,33
O ₂	97,33	14,14	111,66	28,27	125,98	42,41
PPI	84,83	84,83	138,72	138,72	192,60887	192,61
Σ Gases	-	832,75	-	1 019,04	-	1205,33
otros	83,09	83,09	63,83	63,83	44,56	44,56
Total	2899,23	2899,23	2987,59	2987,59	3075,95	3075,95

2.3. Proceso metalúrgico

El procesamiento pirometalúrgico se realizó en horno eléctrico de arco con un crisol de grafito, bajo un régimen de trabajo de aproximadamente 800 A y 35 V. Se controló la temperatura con un pirómetro óptico, de forma tal que permitiera realizar el vertido a una temperatura en el rango entre 1 500 °C y 1 600 °C (Perdomo *et al.* 2003; Quintana *et al.* 2002). La Figura 1 muestra una foto de la instalación utilizada.



Figura 1. Equipamiento utilizado para la obtención carbotérmica de las ferroaleaciones al Cr-Mn.

Cada una de las mezclas fue homogenizada en un mezclador rotatorio con paletas helicoidales internas durante 30 min y posteriormente suministrada al horno, de manera progresiva, en la medida en que esta se va fundiendo, lográndose que la masa fuera totalmente fundida entre 30 y 45 min. Una vez concluido el proceso, la masa fundida es vertida en agua, lo cual facilita la granulación y posterior separación del metal y la escoria (Perdomo *et al.* 2003; Quintana *et al.* 2002).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Potencialidades de las cargas

Los resultados potenciales de cada una de las cargas pueden ser determinados a partir de los datos mostrados en el balance de masa total

(Tabla 3). En cuanto a la cantidad de metal posible a obtener en la tabla se observa que debe aumentar desde 741 g para la mezcla 1 (26 %) hasta 835 g para la 3 (28 %). Por su parte, la cantidad de escoria debe disminuir desde 1 243 g para la mezcla 1 (44 %) hasta 991 g para la 3 (33 %), aumentando también la cantidad de gases generados desde 833 g hasta 1205 g. En general, la relación metal escoria va a aumentar desde 0,60 hasta 0,84; dicho comportamiento se debe a que el mineral de manganeso es de alta ley y el de cromo de baja (cromita refractaria), lo cual debe permitir un incremento en la cantidad de metal, aunque la suma de la ferroaleación y escoria (productos útiles) debe disminuir desde 1 983 gramos para la mezcla 1 hasta 1 826 gramos para la 3.

Por otro lado, el balance de masa (Tabla 3) permite predecir la composición química del metal, la escoria y los gases que deben producirse durante el procesamiento pirometalúrgico. Estos resultados se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Composición química teórica del metal, la escoria y los gases (en % m)

Escoria	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Ferroaleación	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3
Cr ₂ O ₃	3,97	2,94	1,66	Cr	40,98	25,69	12,12
SiO ₂	29,53	35,06	42,01	Mn	26,23	49,34	69,83
MnO	5,05	11,23	18,99	Fe	23,68	15,83	8,87
TiO ₂	0,09	0,11	0,12	Si	2,00	2,00	2,00
Al ₂ O ₃	31,63	23,53	13,38	C	6,99	6,99	6,99
FeO	0,24	0,27	0,31	S	0,06	0,07	0,07
CaO	4,49	5,80	7,46	P	0,04	0,08	0,12
MgO	19,73	14,94	8,95	Σ	100,00	100,00	100,00
K ₂ O	0,30	0,37	0,45	Gases	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3
Na ₂ O	0,35	0,42	0,51	CO	87,76	83,27	80,16
CaF ₂	4,51	5,15	5,95	S	0,35	0,32	0,31
S	0,12	0,15	0,19	P	0,01	0,02	0,03
P	0,01	0,02	0,03	O ₂	1,70	2,77	3,52
Σ	100,00	100,00	100,00	PPI	10,19	13,61	15,98
				Σ	100,00	100,00	100,00

En la Tabla 4 se aprecia que las escorias van a tener una composición química variable, dependiendo por supuesto, de la composición de cada mezcla, donde en el caso de las mezclas 1 y 2 debe predominar el sistema de óxidos SiO₂-Al₂O₃-MgO, con un contenido de MnO de 5 % y 11 %, respectivamente.

respectivamente. Mientras que en las escorias de la mezcla 3 debe predominar el sistema de óxidos $\text{SiO}_2\text{-MnO-Al}_2\text{O}_3$, con un 9 % de MgO. En todos los casos van a estar presentes contenidos de CaO y CaF_2 entre 9 % y 14 %, los cuales también van a influir en las propiedades de las escorias como componente matricial de fundentes aglomerados para la SAW (Potgaestki y Kuzmenko 1988; Potapov 1989).

3.2. Resultados del proceso

El procesamiento pirometalúrgico de cada una de las mezclas presentadas en la Tabla 2 permitió obtener los resultados mostrados en la Tabla 5.

Tabla 5. Resultados del procesamiento de las mezclas

Datos de colada	Mezcla 1		Mezcla 2		Mezcla 3	
	Metal	Escoria	Metal	Escoria	Metal	Escoria
Masa teórica (g)	740,86	1 242,52	787,9	1 116,82	834,94	991,12
Masa real (g)	562	1 118	585	898	620	652
Rendimiento (%)	75,86	89,98	74,25	80,41	74,26	65,78
Relación metal/escoria (teórica)	0,60		0,71		0,84	
Relación metal/escoria (real)	0,50		0,65		0,95	

En la Tabla 5 se observan los resultados obtenidos durante el proceso reductivo, apreciándose que la mayor cantidad de ferroaleación, como era esperado, se obtiene para la mezcla 3, seguida por la 2 y finalmente la 1. Este resultado coincide plenamente con los obtenidos en los balances de masa realizados y con las proporciones de cromita/pirolusita adicionados en cada una de las mezclas. Este comportamiento se puede observar en la Figura 2.

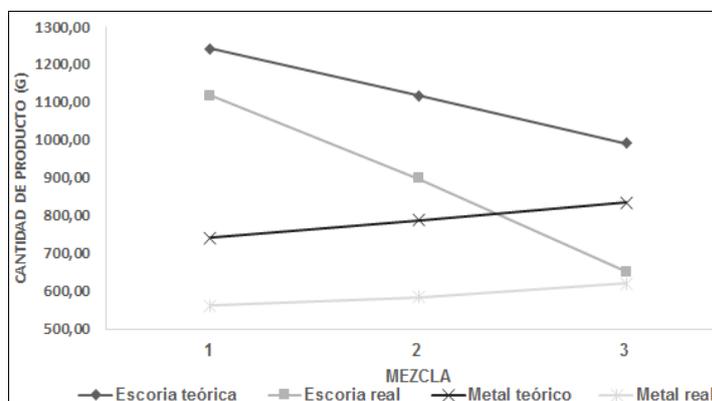


Figura 2. Resultados teóricos y reales cada una de las mezclas evaluadas.

En la Tabla 5 también se muestra el rendimiento metálico, donde puede observarse que esta relación varía en un estrecho margen, entre 74 % y 76 %, para las tres mezclas. Por otro lado, la relación metal/escoria mantiene la tendencia observada en los cálculos teóricos, aumentando desde 0,50 para la mezcla 1 hasta 0,95 para la mezcla 3. Estos resultados coinciden con los reportados en el balance de masa.

La composición química de las ferroaleaciones, obtenida mediante fluorescencia de rayos-X, se indica en la Tabla 6 y la composición química de las diferentes escorias, determinada por espectrometría de absorción atómica, a excepción del SiO₂ que se obtuvo gravimétricamente, se muestra en la Tabla 7.

Tabla 6. Composición química, determinada por fluorescencia de rayos-X, de las ferroaleaciones (en % m)

	Mn	Cr	C_{leco}	S_{leco}	P	Si	Ni	Ti	V	Al
Mezcla 1	23,9	32,0	5,02	0,002	0,02	5,1	0,28	0,35	0,16	0,16
Mezcla 2	49,8	21,0	6,32	0,001	0,04	4,1	0,19	0,05	0,13	0,05
Mezcla 3	65,7	9,8	5,21	0,04	0,04	4,5	0,12	0,22	0,06	0,26

En la Tabla 6 se aprecia que los contenidos de cromo y manganeso varían en proporción directa con los contenidos de cromita y pirolusita en cada una de las mezclas, disminuyendo el contenido de cromo desde un 32 % hasta un 9,8 % y aumentando el de manganeso desde 24 % hasta 66 %. Esta relación coincide totalmente con los datos de conformación de las cargas; se observó una correspondencia mayor a un 78 % con los datos previstos a partir de los resultados de los balances de masa.

El comportamiento del contenido de cromo y manganeso en las ferroaleaciones obtenidas en las tres mezclas aparece en la Figura 3.

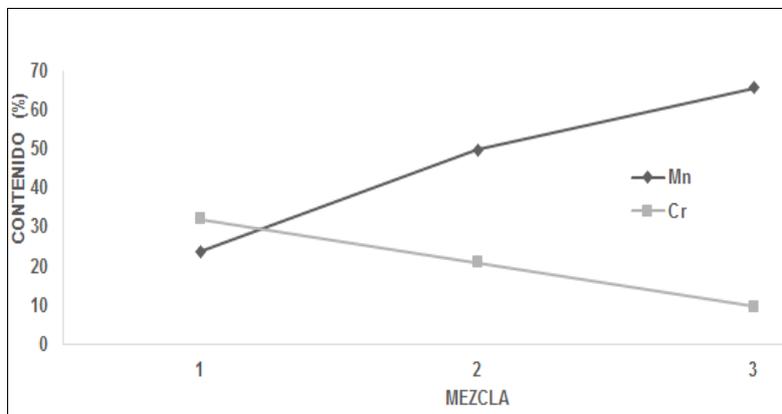


Figura 3. Contenidos de Mn y Cr en las ferroaleaciones obtenidas.

Si se procesan estadísticamente los contenidos de Mn y Cr para cada una de las mezclas, mediante el Statgraphics.Centurion.XV.v15.2.14 se pueden obtener los modelos que caracterizan el comportamiento de estos elementos.

Para el manganeso

$$\text{Mn} = 0,0466667 * \text{cromita} + 0,882667 * \text{pirolusita}, \quad R^2_{\text{aj.}} = 99,5476 \%$$

Para el cromo

$$\text{Cr} = 0,431333 * \text{cromita} - 0,0126667 * \text{pirolusita}, \quad R^2_{\text{aj.}} = 99,9991 \%$$

En cuanto a los contenidos de carbono se observa en la Tabla 6 que se mantiene entre 5 % y 6 % para las diferentes aleaciones, quedando su contenido ligeramente por debajo a los valores previstos en los balances de masa. Este menor contenido de carbono en las ferroaleaciones puede ser atribuido a las pérdidas de carbón que tiene el horno debido a que la bóveda del horno permite la entrada de aire, lo que facilita su combustión.

El contenido de silicio va a ser superior a los valores previstos en el balance de masa; esto se debe a que el contenido de sílice en la escoria es alto, lo cual favorece la reducción de esta última, elevando el contenido de silicio en el metal. No se establece ninguna relación entre el contenido de silicio en el metal y la conformación de las cargas.

En la Tabla 6 también puede apreciarse que aparecen en las ferroaleaciones determinados niveles de otros elementos metálicos como son el níquel, vanadio, titanio y aluminio, los cuales provienen de las diferentes materias primas que conforman las cargas, las que no afectan de manera significativa las características de los depósitos de soldadura.

La composición química de las aleaciones obtenidas garantiza su uso en la conformación de cargas de aleación de consumibles de soldadura (Kenchireddy, Jayadeva y Sreenivasan 2014; Cruz *et al.* 2012). Las variaciones en los contenidos de Mn y Cr permiten cubrir una amplia gama de composiciones de consumibles, siendo además posible establecer, dentro de los rango estudiados, nuevas combinaciones de acuerdo a las necesidades, las que pueden realizarse utilizando los modelos obtenidos para los contenidos de cromo y manganeso en las diferentes mezclas.

Tabla 7. Composición química de las escorias (% m)

Escoria	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	Sub- suma	FeO	Cr ₂ O ₃	Σ
Mezcla 1	27,30	32,90	5,58	20,18	6,20	92,16	1,72	4,50	98,38
Mezcla 2	33,75	25,71	6,10	16,81	10,51	92,88	1,48	3,21	97,57
Mezcla 3	42,06	18,86	7,84	11,60	14,58	94,94	1,10	2,19	98,23

En cuanto a las escorias que se generan en el proceso en la Tabla 5 puede observarse que la cantidad de escoria disminuye en la medida en que aumenta el contenido de pirolusita en la mezcla y disminuye el de cromita; esto coincide con lo obtenido en los balances de masa y responde directamente a la ley de los minerales utilizados. En cuanto al rendimiento, también en la Tabla 5 se observa una disminución desde un 89 % para la mezcla 1 hasta un 66 % para la mezcla 3.

En la Tabla 7 se distingue que las diferentes escorias se obtienen con una composición química, en correspondencia con la composición determinada a partir del balance de masa, predominando, para las mezclas 1 y 2, el sistema de óxidos del tipo SiO₂-Al₂O₃-MgO con importantes contenidos de MnO. En el caso de la mezcla 3 va a predominar el sistema SiO₂-Al₂O₃-MnO, con un 11,6 % de MgO, estando presente en todos los casos el CaO.

Para las tres mezclas estudiadas la suma de los contenidos de SiO₂, Al₂O₃, MgO, MnO y CaO representa entre el 92-95 % de la escoria.

Estos sistemas de escorias son característicos de diferentes fundentes de soldadura por arco sumergido (Potgaestki y Kuzmenko 1988; Potapov 1989; Kumar, Singh y Maheshwari 2013), lo cual puede ser corroborado al comparar los datos de composición mostrados en la Tabla 7 con la composición química promedio de algunos fundentes para la SAW comerciales que se muestran en la Tabla 8. La composición de la matriz del fundente puede ser recalculada a partir de la composición de la escoria, donde el contenido de Cr₂O₃ (entre 2-5 %) puede favorecer la transferencia de cromo al metal depositado durante el proceso de soldadura, disminuyendo las pérdidas de este elemento en las escorias de soldadura (Potgaestki y Kuzmenko 1988; Potapov 1989).

Tabla 8. Composición química de fundentes comerciales (en % m)

Tipo	Marca	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	CaF ₂	MnO
Fundido	F-624	44-49	7,0	16-19	10-14	3-6	8-11
	ØBT-4	38	22	26	-	7	6
	FU-22	34	20		30	15	4
	FU-16	29	19		27	19	5
	AH-42	30-34	13-18	-	12-16	14-20	14-19
Aglomerado	SPC Mn 40/360	27-29	33-36	4-6	12-14	8-10	10-12
	FC-60	20	19	37	17	4	

4. CONCLUSIONES

- El conocimiento preciso de la composición química de las pirolusitas y cromitas refractarias cubanas, respectivamente, permiten conformar mezclas metalúrgicas factibles de procesar carbotérmicamente en horno eléctrico de arco, potencialmente capaces de producir ferroaleaciones de cromo manganeso, con contenidos de cromo entre 12 % y 41 % y de manganeso entre 26 % y 70 %.
- Las mezclas conformadas permitieron obtener ferroaleaciones de cromo manganeso, con contenidos de cromo entre 10 % y 32 % y de manganeso entre 24 % y 66 %, recuperándose entre el 74 % y 76 % de los valores metálicos presentes en los minerales.
- Se obtienen escorias con contenidos variables de SiO₂, Al₂O₃, MgO, MnO y CaO, en función de la carga formulada, los cuales representan entre el 92–95 % de esta; lo cual, unido a los contenidos de Cr₂O₃ (entre 2–5 %), auguran la factibilidad de utilizar estas escorias como materia prima en la conformación de matrices de fundentes para la SAW.

5. REFERENCIAS

- AMINI, K.; BAHRAMI, A. Y SABET H. Evaluation of Microstructure and Wear Behavior of Iron-based Hard-facing Coatings on the Mo40 Steel. *International Journal of ISSI*, 12(1): 1-8, 2015. Disponible en: http://journal.issiran.com/article_14418_ba2999b827d79adbf4a4212ade6fc431.pdf
- ARANGURENT, F. Y MALLOL, A. *Siderurgia*. Madrid: Dorssat S.A., 1963. 617 p.
- BERCIANO, J. E.; TREMP, E.; FERNÁNDEZ, D. Y DE ELIO, S. Monografías sobre Tecnología del Acero. Parte I, ACERÍA ELÉCTRICA. Universidad

- Politécnica de Madrid. 2009. Disponible en: http://oa.upm.es/1929/1/Aceria_electrica_MONO_2009.pdf
- CRUZ, A.; SCOTTI, A.; FERNÁNDEZ, R. Y ORTÍZ, T. Relationship of coating factor of coated tubular electrodes for hardfacing by SMAW process, with the consumption parameters and the geometry of the deposited metal. *Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia*, 35(3): 224-232, 2012. Disponible en: http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_abstractypid=S0254-07702012000300002yInq=esynrm=isoytInq=en
- FERNÁNDEZ, A.; CRUZ, A.; ARIAZA, R.; SCOTTI, A. Y GUEDES, N. Caracterización de depósitos obtenidos con electrodos tubulares revestidos para el recargue de medios de labranza sometidos a desgaste abrasivo en el sector azucarero. *Centro Azúcar*, 41(2): 1-11, 2014.
- GONZÁLEZ, O.; GÓMEZ, C. R.; KAIRÚS H. A. Y VÁZQUEZ, E. Comparación de oscilogramas eléctricos al rellenar con electrodos doblemente recubiertos. *Ingeniería Mecánica*, 19(3): 128-136, 2016. Disponible en: <http://www.ingenieriamecanica.cujae.edu.cu/index.php/revistaim/articloe/view/543>
- GONZÁLEZ, O.; GÓMEZ, C.; QUINTANA, R.; PERDOMO, L.; MIGUEL, N. Y LÓPEZ, R. Alternativa de doble recubrimiento para electrodo destinado al proceso de relleno manual con arco eléctrico. *Ingeniería Mecánica*, 17(3): 245-254, 2014. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=225132611003>
- KENCHIREDDY, K. C. T.; JAYADEVA, C. Y SREENIVASAN, A. Some studies of hardfacing and metallurgical properties of mild steel using shielded metal arc welding processes. *Global Journal Of Engineering Science And Researches. Kenchireddy*, 1(4): 30-33, 2014. Disponible en: <http://www.gjesr.com/Issues%20PDF/Archive-2014/June-2014/6.pdf>
- KOZYREV, N.; GALEVSKY, G.; KRYUKOV, R.; TITOVA, D. Y SHURUPOV, V. New materials for welding and surfacing. *Materials Science and Engineering* 150(1): 012031, 2016.
- KUMAR, A.; SINGH, H. Y MAHESHWARI, S. Research Article. XRD and DTA Analysis of Developed Agglomerated Fluxes for Submerged Arc Welding. *Journal of Metallurgy* Volume, Article ID 827491, 8 pages, 2013. Disponible en: <https://www.hindawi.com/journals/jm/2013/827491/>
- LINCOLN ELECTRIC. Soldeo con alambre tubular. 16 pp. Consultado: 24 dic 2016. Disponible en: <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/objetos/figutut54/doc1tut54.pdf>.
- PERDOMO, L.; QUINTANA, R.; CRUZ, A.; CASTELLANOS, J.; GARCÍA, L.; FORMOSO, A. Y CORES, A. Empleo de cromitas refractarias para la obtención de fundentes aglomerados utilizados en la soldadura automática por arco

- sumergido (SAW). *Revista de metalurgia*, 39(4): 268-278, 2003: Disponible en: <http://digital.csic.es/bitstream/10261/21298/1/340.pdf>
- POTGAESTKI, V. V. Y KUZMENKO, G. *Teoría de las escorias*. Kiev: Naukova Dumka, 1988.
- POTAPOV, N. N. *Materiales para soldar*. Tomo 1. Gases protectores y fundentes. Moscú: Mashinostroinina, 1989.
- QUINTANA, R.; PRIETO, O.; HERNÁNDEZ, J. E.; CRUZ, A.; GÓMEZ, C. R. Y PERDOMO, L. Síntesis de una matriz cuasicerámica destinada a la obtención de fundentes aglomerados para proceso SAW y evaluación cinético-termodinámica de su proceso de humectación. *Soldagem & Inspeção*, 15(2): 130-140, 2010. Disponible en: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttextypid=S0104-92242010000200007
- QUINTANA, R.; CRUZ, A.; PERDOMO, L.; GARCÍA, L.; FORMOSO, A. Y CORES, A. Eficiencia de la transferencia de elementos aleantes en fundentes durante el proceso de soldadura automática por arco sumergido. *Revista de metalurgia*, 39(1): 25-34, 2003. Disponible en: <http://digital.csic.es/bitstream/10261/21288/1/315.pdf>
- QUINTANA, R.; HERRERA, A.; PERDOMO, L. Y GÓMEZ, C. Concepción metodológica en la confección de matrices vítreas para fundentes aglomerados destinados a la soldadura automática a partir de caolín y dolomita. *Soldagem e Inspeção*, 11(2): 85-92, 2006.
- QUINTANA, R.; PERDOMO, L.; GÓMEZ, C.; CRUZ, A.; RODRÍGUEZ, M.; PÉREZ, O. Y CASTELLANOS, G. Procedimiento de obtención simultánea de escoria esponjosa y aleaciones de cromo destinadas a la confección de fundentes aglomerados para la soldadura automática bajo fundente (SAW). Patente No. C22C 33/00, C22C 19/05. 2002.
- RISS, A. *Production of ferroalloys*. Moscow: Ed. Foreign languages publishing house, 1975. 278 p.
- SHAN, K. Y LIU, S. Flux-Coating Development for SMAW Consumable Electrode of High-Nickel Alloys. *Supplement to the Welding Journal*, 271-281, 2014. Disponible en: https://app.aws.org/wj/supplement/WJ_2014_08_s271.pdf

Recibido: 20/05/17

Aceptado: 05/10/17

Lorenzo Perdomo-González, Doctor en Ciencias Técnicas. Investigador Titular. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba.
lperdomo@uclv.edu.cu

Soldadura con los electrodos revestidos E 6010 y E 7018 en acero AISI 1025

Welding with coated electrodes E 6010 and E 7018 in AISI 1025 steel

Dennis Reyes-Carcasés¹, Tomás Fernández-Columbié², Dayanis Alcántara-Borges³,
Isnel Rodríguez-González⁴

¹Centro de Proyectos del Níquel, Moa, Holguín, Cuba dreyes@ceproni.moa.minem.cu

²Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Titular. Departamento de Mecánica, Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa, Cuba tfernandez@ismm.edu.cu

³Ingeniera mecánica. Profesora Asistente. Departamento de Mecánica Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa, Cuba dalcantara@ismm.edu.cu

⁴Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Titular. Departamento de Mecánica Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa, Cuba irgonzalez@ismm.edu.cu

Resumen

La soldadura de acero de bajo contenido de carbono es una práctica habitual en la industria del níquel, donde se fabrican componentes con aceros de estas características. El objetivo del trabajo fue establecer el comportamiento microestructural del acero AISI 1025 al ser soldado con dos tipos de electrodos (E 6010 y E 7018): el primero depositado como colchón y el segundo para garantizar la resistencia mecánica; ellos se realizaron en una plancha de 240 x 240 x 10 mm, con preparación en simple bisel. Las microestructuras obtenidas con el electrodo E 6010 son del tipo ferrita Widmanstätten, ferrita columnar y perlita intergranular, con una dureza de 345 HV; mientras que con el electrodo E 7018 las microestructuras son de ferrita Widmanstätten, austenita y martensita, con dureza de 332 HV. La disminución de dureza en este último caso está asociada al tratamiento térmico de recocido multipasadas.

Palabras clave: soldadura; acero de bajo carbono; electrodo E 6010; electrodo E 7018; microestructura.

Abstract

The welding of steel of low carbon content is a common practice in the nickel industry, where components with steels of these characteristics are manufactured. The objective of the paper was to establish the microstructural behavior of the AISI 1025 steel when it was welded with two types of electrodes (E 6010 and E 7018), the first one deposited as a mattress, and the second one to guarantee mechanical resistance; they were made in a 240 x 240 x 10 mm plate with simple bevel preparation. The microstructures obtained with the electrode E 6010 are of the ferrite type Widmanstätten, columnar ferrite and intergranular pearlite, with a hardness of 345 HV, while with the electrode E 7018 the microstructures are ferrite Widmanstätten, austenite and martensite, with hardness of 332 HV. The decrease in hardness in the latter case is associated with the thermal treatment of multipass annealing.

Keywords: welding; low carbon steel; E 6010 electrode; E 7018 electrode; microstructure.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente la mayoría de los procesos de soldadura se llevan a cabo mediante la aplicación de calor a las piezas que serán unidas. Este calor es, a menudo, de suficiente intensidad y cantidad como para producir la fusión del material de las piezas. El calor aplicado a los materiales metálicos produce un cambio en su estructura metalográfica; cuando la temperatura alcanzada supera un determinado valor característico para cada metal o aleación, la modificación de la estructura conlleva a la variación de las propiedades de material.

En estudio realizado por Bao y Zhang (2010) se plantea que el efecto del calentamiento tiene influencias inmediatas durante el ciclo térmico del proceso de soldadura, generalmente aumenta el tamaño de grano de la zona afectada por el calor (ZAC) y también en la zona fundida. Este crecimiento de grano tiene como consecuencia la alteración de las propiedades mecánicas finales.

El efecto de la entrada de calor en la soldadura, independiente si alcanza o no la fusión del material, genera zonas afectadas por el calor que ocasiona transformaciones de fase, cambios en las propiedades mecánicas, esfuerzos residuales y distorsiones en la junta soldada (Bhatti *et al.* 2015). Estas zonas se conocen como zona fundida (ZF), zona afectada

térmicamente (ZAT) y el metal base. Estas zonas son producto de la distribución de temperatura asociada a la entrada de calor.

Los picos de temperatura y el tiempo que toma en alcanzarlos permiten determinar completamente los efectos en los cambios macro y microestructurales de la junta soldada (Suresh 2014). La representación gráfica del cambio de la temperatura, con respecto al tiempo para un punto de análisis ubicado en la junta soldada, se conoce como ciclo térmico.

Algunos investigadores (Fuentes *et al.* 2016; Utria *et al.* 2016) consideran que la temperatura de recristalización determina la velocidad de nucleación y crecimiento de los nuevos granos. En la práctica la temperatura real a la que la recristalización tiene lugar depende fuertemente de la deformación previa del material. El requisito fundamental para que un metal recristalice es la poligonización de los granos, esto implica un reacomodo de las dislocaciones para formar nuevos bordes, los cuales se moverán bajo la acción de la fuerza impulsora de la energía almacenada debido a la deformación. Como una primera aproximación, esta energía almacenada es proporcional a la densidad de dislocaciones.

Según Fernández y demás investigadores (2016) el tamaño de grano es un parámetro importante en los metales, siendo clave para la determinación de resistencia y la tenacidad. El ciclo térmico de la soldadura es tal que en la mayoría de los metales produce crecimiento de grano en la ZAC, en algún grado, influyendo también en el tamaño de grano del metal de aporte. En este sentido el tamaño de la zona recristalizada, zona recalentada o ZAC dependerá del tamaño del cordón de soldadura que, a su vez, estará relacionado con los parámetros del proceso.

En particular el espesor del metal base y la velocidad de enfriamiento son parámetros que reúnen todas las variables involucradas en la caracterización de la zona recalentada, por lo que cualquier combinación de espesor de metal base y velocidad de enfriamiento definen un tamaño de cordón y, por ende, el tamaño de la zona recalentada.

El trabajo tuvo como objetivo establecer el comportamiento microestructural en la zona fundida (ZF), la zona afectada por el calor (ZAC) y la interfase, así como la dureza de la unión soldada en un acero al carbono AISI 1025, utilizando electrodos E 6010 y E 7018.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo del trabajo se seleccionó como material base el acero AISI 1025, con dimensiones de 240x240x10 mm, y cuya composición química se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Composición química del acero AISI 1025, en %

Acero	C	Mn	Cu	Cr	Ni	Fe
AISI 1025	0,24	0,60	0,03	0,05	0,08	Resto

La composición química de los aceros se determinó mediante análisis espectral, en un espectrómetro de masa cuántico, ESPECTROLAB 230, con electrodo de carbón bajo arco sumergido en atmósfera de argón.

Para evaluar el comportamiento microestructural del acero la unión se preparó como se muestra en la Figura 1 (a). Se depositaron los cordones en las planchas a unir tal y como se muestra en la Figura 1 (b).

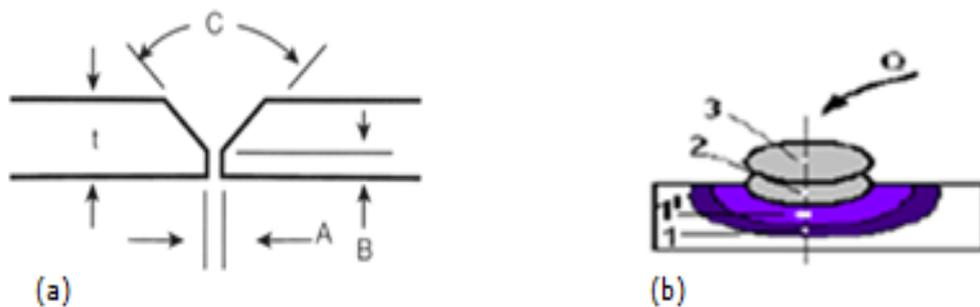


Figura 1. (a). Forma de preparación de la unión, (b). Deposición de los cordones.

Donde:

t máximo - 10 mm; A - 2,5 mm; B - 2 mm; C - 60°.

Se realizó el depósito de los cordones de soldadura con los materiales de aporte los electrodos E 6010 y E 7018 de 2,4 mm de diámetro. Se ejecutó la primera pasada con el E 6010 por su alta penetración en la soldadura de aceros suaves y baja aleación y para que sirviera de depósito de colchón; luego, con el electrodo E 7018 como revestimiento, ya que este se aplica en trabajos de alta responsabilidad y en materiales que requieren elevada ductilidad y tenacidad.

En la Tabla 2 se muestran los parámetros de soldadura tenidos en cuenta para establecer el comportamiento de las velocidades de alimentación (V_a) de ambos electrodos. El procedimiento establecido para la determinación de las velocidades de soldadura en los depósitos de cordones en las planchas con ambos electrodos se muestra en la Tabla 3.

Tabla 2. Parámetros para determinar las velocidades de alimentación con ambos electrodos

Electrodos	d (mm)	No cordones	tensión (V)	Intensidad (Amp)	t_s (s)	l_i (mm)	l_{fe} (mm)
E 6010	2,4	1	20	65	9	305	50
E 6010	2,4	2	21	65	10	305	60
E 7018	2,4	3	22	65	10	305	60

d – diámetro del electrodo, t_s – tiempo de fusión del cordón de soldadura, l_i – longitud inicial del electrodo, l_{fe} – longitud total fundida del electrodo.

Tabla 3. Parámetros para determinar las velocidades de soldadura con ambos electrodos

Electrodos	d (mm)	No cordones	Tensión (V)	Intensidad (Amp)	t_s (s)	l_c (mm)
E 6010	2,4	1	20	65	9	50
E 6010	2,4	2	21	65	10	50
E 7018	2,4	3	22	65	10	50

l_c – longitud del cordón de soldadura, V_s – velocidad de soldadura.

Durante el proceso de soldadura manual por arco eléctrico los parámetros seleccionados definen la calidad de la unión soldada. La corriente de soldadura es proporcional a la velocidad de alimentación del alambre, para un diámetro, una composición y una longitud libre del electrodo.

2.1. Microestructura de las aleaciones

Para el análisis microestructural se empleó un microscopio óptico NOVEL modelo NIM-100, con cámara acoplada, instalada mediante el hardware IMI.VIDEOCAPTURE.exe. El análisis microestructural consistió en la observación de una muestra patrón del acero AISI 1025.

La Figura 2 corresponde a la muestra patrón del acero AISI 1025. Para revelar las estructuras, luego de la preparación metalográfica de las muestras donde se tuvieron en cuenta procedimientos como corte, desbaste y pulido, se realizó el ataque químico con nital al 2 %, una parte de ácido nítrico y tres partes de ácido fluorhídrico, en un tiempo de 15 s.

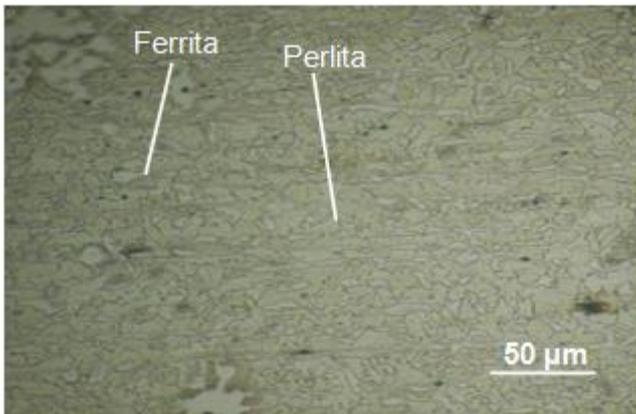


Figura 2. Microestructura del AISI 1025.

La figura anterior muestra la microestructura del acero AISI 1025, donde se observa una estructura de ferrita + perlita. Los granos de ferrita (zonas claras) y colonias de perlita (zonas oscuras) presentan una estructura de granos equiaxial, como resultado del proceso de conformado en caliente de este material.

Se seleccionó la zona del metal base, alejado de donde pudiera tener influencia el ciclo térmico de soldadura. El objetivo de este análisis fue obtener una muestra, sin afectación en su estructura cristalina, que permitiera determinar posibles cambios ocurridos tanto en la ZF como en la influencia térmica.

2.2. Ensayo de microdureza

En la medición de la microdureza se utilizó un microdurómetro modelo PMT-3 No. 168, con objetivo acromático acoplado y compensación libre trinocular de tubo inclinado a 30°. Las superficies de las probetas se prepararon de la misma manera que para el análisis microestructural, desbaste y pulido; la carga aplicada fue de 0,49 N, en un tiempo de 15 s. El indentador empleado fue el de pirámide de diamante, con un ángulo de 136° según la ASTM E 92-82. En la Figura 3 se muestra el procedimiento empleado para la medición de dureza en las probetas.

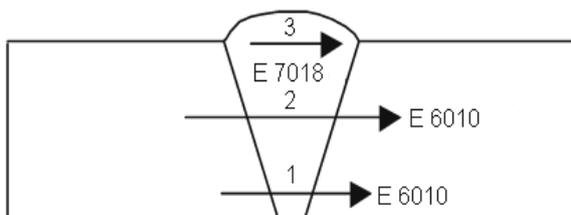


Figura 3. Procedimiento empleado para la medición de dureza.

La dureza de las probetas se ensayó en dos formas:

- a) Dureza longitudinal: luego de realizado el cordón se rectificó la parte superior de este para obtener una superficie plana y realizar la dureza a lo largo del cordón.
- b) Se realizaron un total de cinco mediciones para cada caso posible por cordón con una separación entre lectura de un milímetro.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Análisis de los parámetros del proceso de soldadura

Durante el proceso de soldadura, la energía calorífica se reparte entre el metal base y el de aporte a lo largo de todo el cordón, a medida que el arco avanza. En el aporte térmico se engloban la energía transferida por unidad de tiempo (proporcional al producto de tensión e intensidad) y la velocidad (v) de transporte de la fuente de esa energía (avance del arco).

En la Tabla 4 se muestran los resultados obtenidos de las velocidades de alimentación y de soldadura durante el depósito de los cordones en el acero AISI 1025 con los electrodos E 6013 y E 7018. Se obtuvieron los resultados a partir de los parámetros establecidos en las Tablas 2 y 3.

Tabla 4. Resultados de las velocidades de alimentación y de soldadura

Electrodos	d (mm)	$V_a = \frac{l_{fe}}{t_s}$	$V_s = \frac{l_c}{t_s}$
		(mm/s)	(mm/s)
E 6010		5,5	5,5
E 6010	2,4	6	5,5
E 7018		6	6

Se observa en la Tabla 4 que para los electrodos E 6010 y E 7018, con diámetros de 2,4 mm, la variación de la velocidad de alimentación fue de 5,5 mm/s hasta 6 mm/s, de igual manera ocurre con la velocidad de soldadura. La estabilidad en los parámetros analizados debe mantener proporcionalidad para lograr una adecuada apariencia del cordón.

El empleo de una velocidad de soldadura muy grande origina una disminución de la energía térmica por unidad de longitud, donde no se logra fundir la raíz de los bordes. Dado que la velocidad de soldadura es constante, la velocidad de crecimiento del cristal tendrá que variar considerablemente, dependiendo de la posición en la isoterma de líquidos; sobre la línea central detrás de la fuente de calor en movimiento el crecimiento del cristal será más veloz, mientras que en el borde del cordón el crecimiento será más lento. Este efecto tiene consecuencias importantes

en el desarrollo microestructural y en la tenacidad de la soldadura, según lo planteado por Almaguer y Estrada (2015).

3.2. Análisis microestructural de la zona fundida en el depósito con electrodo E 6010

En la caracterización microestructural de la zona fundida en el depósito con el electrodo E 6010 se realizó la observación en la ZF del borde superior del cordón y en el centro. Figuras 4 (a) y 4 (b).

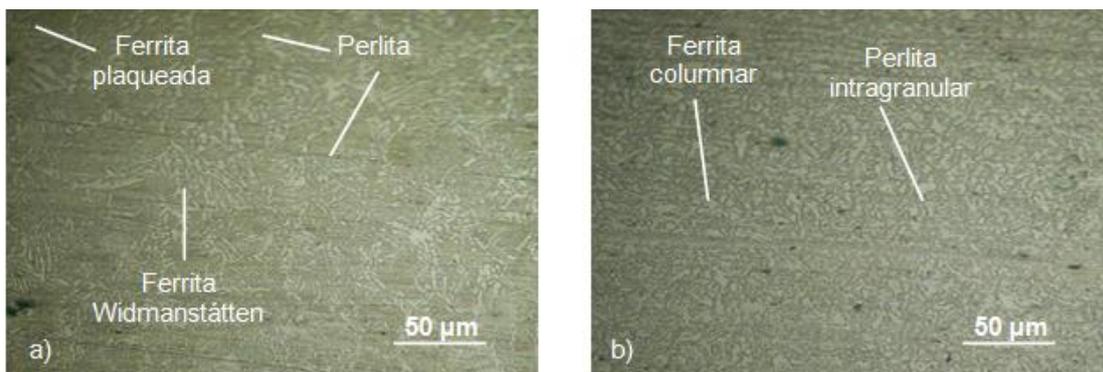


Figura 4. a). ZF borde superior. b). ZF (centro).

En la Figura 4(a) se muestra la microestructura del recubrimiento obtenido; fue observada en una zona cercana al borde. Se puede apreciar la presencia de una red de ferrita en forma de placa (zonas claras) y de ferrita Widmanstätten (estructura acicular); también se observa una estructura perlítica que corresponde a las zonas grises. La austenita se muestra en los límites de grano.

La formación de la ferrita en forma de placa está asociada a que es la primera fase que se forma producto del enfriamiento de los granos de austenita al pasar la línea de transformación A_{r3} y se desarrollan en las fronteras de los granos austeníticos, ya que estas son las vías más fáciles de difusión y se observan en la microestructura, como capas alargadas continuas de ferrita.

La microestructura de la Figura 4(b) presenta una microestructura de granos más finos con relación al material base, compuesto por estructura de ferrita columnar y perlita intragranular. Esto se puede explicar en términos de un proceso de recrystalización forzada por un incremento en la temperatura y el posterior enfriamiento brusco de las zonas cercanas a la zona de fusión, generándose una zona de grano más fina, lo que trae como consecuencia una diferencia en cuanto a las propiedades mecánicas.

De las microestructuras analizadas se puede plantear que luego de la aplicación del primer cordón se observa una banda de transformación intermedia entre el metal base y el cordón de soldadura, creada por la influencia del campo térmico del cordón sobre el metal base que, según su morfología, corresponde con una estructura formada por una mezcla dispersa de perlita y ferrita, que coincide con lo planteado por García y Salas (2011).

3.2.1. Comportamiento microestructural en la ZAC

Se analiza el perfil microestructural del depósito en la zona afectada por el calor (ZAC) para el electrodo E 6010. Las Figuras 5(a) y 5(b) se corresponden con el análisis de la ZAC en el borde superior y en el centro del cordón.

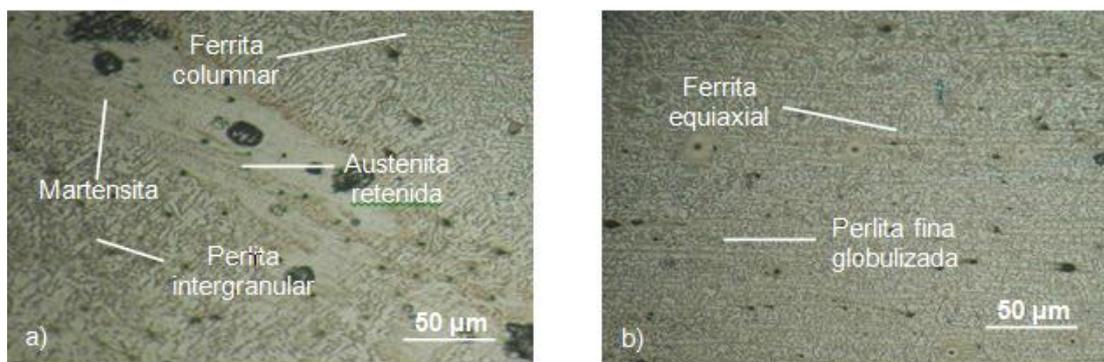


Figura 5. a). ZAC borde superior. b). ZAC (centro).

En la Figura 5(a) se muestra un detalle de la intercara del cordón en zona afectada por el calor, donde se puede apreciar una variación morfológica local, la cual está compuesta por una sección de estructuras del tipo ferrita columnar y la perlita se encuentra en pequeñas cantidades de forma intergranular. La austenita presente se exhibe en forma de granos, así como la presencia de martensita sobre una matriz de austenita retenida.

La microestructura de la Figura 5(b) está constituida por una estructura de ferrita equiaxial y por perlita fina globulizada. Esta intercara en la unión soldada es un estrecho límite que separa la zona de fusión del material de aporte del electrodo, de la zona afectada por el calor, constituida por una banda completa y delgada de metal base parcial o completamente fundido durante el proceso de fusión, el cual se ha solidificado inmediatamente después, pero antes de mezclarse con el metal en la zona del cordón.

En ambas microestructuras, por las morfologías obtenidas, se puede observar el efecto del tratamiento térmico que ejerce el pase de relleno sobre la raíz y entre pase; esto origina un reacomodo columnar típico de la

solidificación del metal. Ha sido planteado por Burgos y García (2003) que el tipo de proceso, las variables de proceso utilizadas y las características térmicas del metal base controlan el valor del gradiente térmico crítico; mientras que la velocidad de crecimiento del cristal es controlada por la velocidad de soldadura y la dirección de crecimiento relativa a la dirección de soldadura, parámetros que definen la geometría del cordón.

3.2.2. Comportamiento microestructural de la ZF con electrodo E 7018

Las microestructuras que se observan en las Figuras 6(a) y 6(b) se corresponden con la zona fundida realizada con el electrodo E 7018. Se realizó el análisis en el borde superior y en el centro de la soldadura.

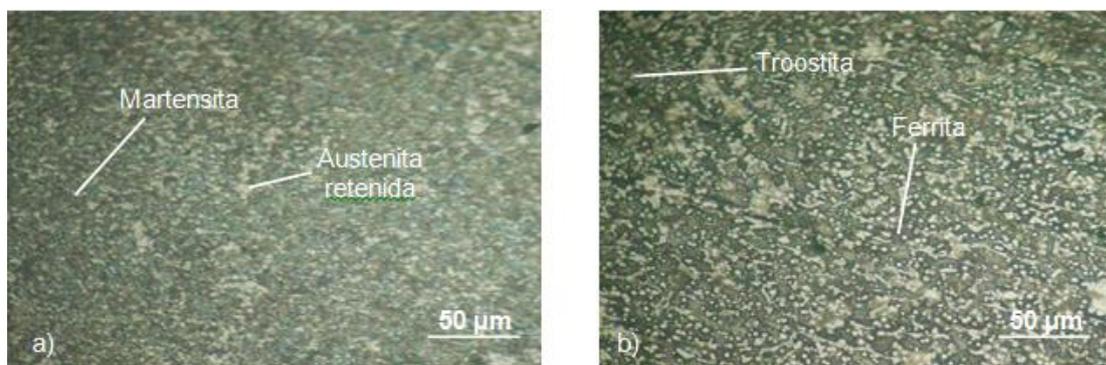


Figura 6. a). ZF borde superior. b). ZF (centro).

En la Figura 6(a), zona fundida obtenida del depósito con el electrodo E 7018, se puede observar la presencia de martensita en color más oscuro sobre una matriz de austenita retenida (representada por las zonas blancas). Las zonas mucho más oscuras de la microestructura representan la presencia de martensita, pero en forma masiva.

Para el último cordón y por la influencia térmica que este ejerce sobre el metal depositado, que se convierte en un tratamiento térmico, se observa en la Figura 6(a) una transformación estructural compuesta por troostita y una pequeña cantidad de ferrita distribuida por la frontera de los granos y de pequeñas dimensiones.

Las variaciones, tanto del gradiente térmico como de la velocidad de solidificación local al desplazarse sobre la línea de fusión desde el lateral hacia la línea central del cordón, causan un cambio progresivo en la subestructura de solidificación al cruzar un cordón de soldadura. A las velocidades de soldadura normalmente utilizadas se ha observado un gradual aumento de la naturaleza dendrítica al acercarse hacia la línea central del cordón (Susmel 2012).

3.2.3. Comportamiento microestructural de la ZAC con electrodo E 7018

Las Figuras 7(a) y 7(b) se corresponden con la ZAC de la unión soldada con electrodo E 7018. Se muestra la intercara del cordón afectado en esta zona.

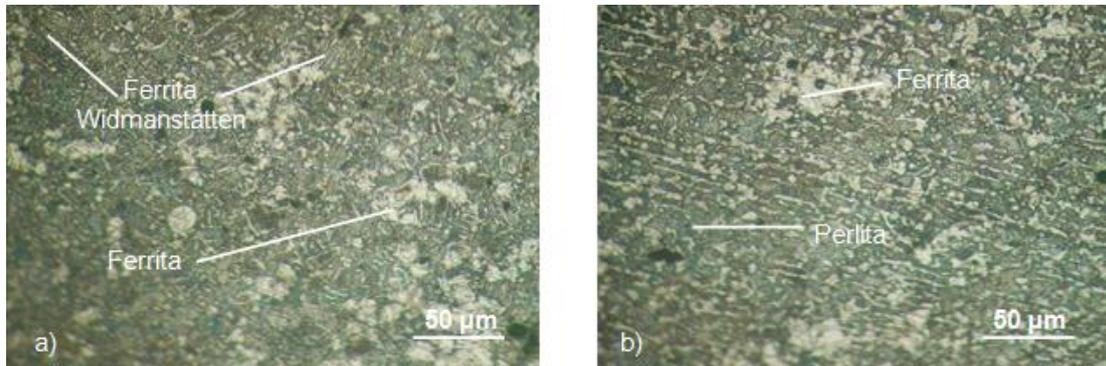


Figura 7, a). ZAC borde superior. b). ZAC (centro).

En la Figura 7 se presenta la microestructura del depósito obtenido en la ZAC. En la Figura 7(a) se exhibe una sección de estructuras del tipo ferrita Widmanstätten y granos bien definidos de ferrita. En la Figura 7(b) se observa que al aplicar en el cordón un tratamiento térmico posterior, las fases presentes son del tipo ferrita, de perlita, con zonas claras y oscuras, respectivamente, y austenita en los límites de grano.

En la región sobrecalentada de grano grueso, la ferrita proeutectoide se nuclea en las juntas del grano austenítico y forma también agujas dirigidas hacia el interior de los granos grandes existentes (estructura de Widmanstaetten). Estructuras similares aparecerán también en el enfriamiento del metal fundido.

Las propiedades mecánicas de la ZAC varían con respecto al acero base y se notará un ligero aumento en la dureza, límite elástico y resistencia a la tracción; mientras que la estructura basta de la zona recalentada (estructura Widmanstätten) suponen una disminución de la resiliencia y, como consecuencia, un aumento en la fragilización, que en algunos casos se recomienda un posterior tratamiento térmico con la finalidad de regenerar el grano, según el criterio de Maroef, Olson, Eberhart y Edwards (2012).

3.2.4. Análisis microestructural de la interfase del cordón

Las Figuras 8(a) y 8(b) muestran cortes transversales de la unión soldada, donde en la interfase del cordón se observan variaciones en las estructuras obtenidas.

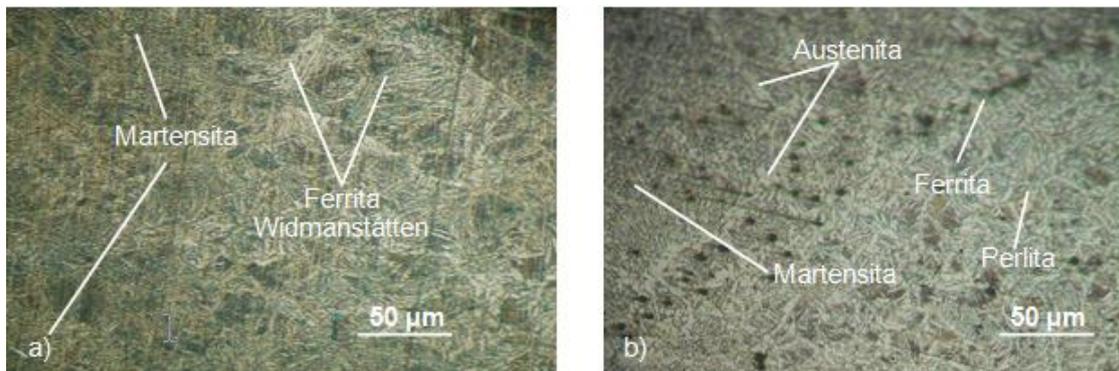


Figura 8. a). Interfase borde superior. b). Interfase (centro).

En el *Post Welding Heat Treatment* (PWHT) tiene lugar la difusión de elementos segregados durante el proceso de solidificación, disminuyendo el gradiente de concentración de estos. Como consecuencia de este fenómeno difusivo la austenita retenida ya no se inestabiliza 8(a) y puede transformarse finalmente en martensita 8(b).

En la Figura 8(a) se observa la evolución microestructural en función de la distancia a la línea de fusión. Se aprecia la fase martensita y la austenita retenida. Dicha martensita se presenta más oscura en la zona inferior del depósito, debido al revenido que realizaron los sucesivos cordones depositados.

3.3. Análisis de la microdureza longitudinal

En la Tabla 5 aparecen los resultados de los ensayos de dureza realizados en los depósitos de los cordones con los electrodos E 6010 y E 7018. Se consideró, en el depósito del electrodo E 6010, luego de realizado los dos pase de soldadura; y en el E 7018 solo la dureza del cordón final.

Tabla 5. Dureza de los depósitos realizados

Electrodos	Barrido	HV1	HV2	HV3	HV4	HV5
E 6010	1	180	180	345	345	180
E 6010	2	180	330	340	340	190
E 7018	3	300	332	330	330	305

Se observa que en los cordones evaluados, aunque presentan variaciones en cada una de las mediciones a lo largo del ensayo, las primeras mediciones están relacionadas con la dureza del material base (MB). En un primer cordón con el electrodo E 6010 se obtiene una dureza de 345 HV, la que disminuye hasta 330 HV con el tercer cordón realizado con el electrodo E 7018. Las durezas reportadas en todos los ensayos no afecta la integridad

del elemento soldado, por lo tanto, los cordones, desde el punto de vista de la dureza, presentan buena resistencia.

La disminución de la dureza en el depósito con electrodos E 7018 está asociada a que cuando se realiza soldadura multipasada esta se convierte en un tratamiento térmico de recocido, lo cual disminuye la dureza previa. Entre las diferentes pasadas se produjo un revenido de los cordones previos, las zonas afectadas por el calor pueden producir una importante caída de dureza, principalmente en las de mayor calor aportado.

4. CONCLUSIONES

- La velocidad de alimentación y de soldadura determinados para los electrodos (E 6010 y E 7018) con diámetro de 2,4 mm, en la unión soldada del acero AISI 1025, permiten establecer que la estabilidad de ambos parámetros garantizan una adecuada apariencia del cordón.
- En el análisis microestructural realizado en las diferentes zonas del cordón con ambos electrodos se obtienen estructuras no propensas al agrietamiento y que garantizan la continuidad metalúrgica en el cordón de soldadura.
- En los perfiles de dureza realizados se determina que esta disminuye en la medida en que se realiza la soldadura multipasada porque actúa como un tratamiento térmico de recocido que provoca el alivio de tensiones en los cordones.

5. REFERENCIAS

- ALMAGUER, P. Y ESTRADA, R. Evaluación del comportamiento a fatiga de una unión soldada a tope de acero AISI 1015. *Ingeniería Mecánica*, 18(1): 31-41, 2015.
- BAO, R. Y ZHANG, X. An inverse method for evaluating weld residual stresses via fatigue crack growth test data. *Engineering Fracture Mechanics*, 77(23): 3143-3156, 2010.
- BURGOS, J. Y GARCÍA, Y. Obtención del campo de temperaturas en juntas soldadas mediante el empleo de MEF. *Revista de la Facultad de Ingeniería de la U.C.V.*, 18(2): 31-37, 2003.
- BHATTI, A.; BARSOU, Z.; MURAKAWA, H. Y BARSOU, I. Influence of thermo-mechanical material properties of different steel grades on welding residual stresses and angular distortion. *Materials and Design*, 65(12): 878-889, 2015.

- FERNÁNDEZ, T.; ALCÁNTARA, D.; RODRÍGUEZ, I. Y SABLÓN, L. Deposición de un recubrimiento base níquel para la unión metalúrgica del acero al carbono y el hierro fundido. *Minería y Geología*, 32(3): 159-174, 2016.
- FUENTES, R.; FERNÁNDEZ, T.; GÁMEZ, O. Y DURÁN, N. Microestructura de una unión disímil AISI 321 y una aleación A 351 grado HK-40 obtenida mediante soldadura manual por arco eléctrico. *Minería y Geología*, 32(2): 112-123, 2016.
- GARCÍA, A. Y SALAS, R. Metalurgia de uniones soldadas de aceros disímiles (ASTM A240-A537) y comportamiento mecánico ante cargas monotónica y cíclica. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 32(11): 36-48, 2011.
- MADHUSUDAN, G. Y SRINIVASA, R. Microstructure and mechanical properties of similar and dissimilar stainless steel electron beam and friction welds. *International Journal of Advance Manufacturing Technology*, 45(5): 14-33, 2009.
- MAROEUF, I.; OLSON, D.; EBERHART, M. Y EDWARDS, G. Hidrógeno atrapado en la soldadura de un acero ferrítico. *Revisión Internacional de materiales*, 47(4): 191-223, 2002.
- SURESH, K. Analytical Modeling of Temperature Distribution, Peak Temperature, Cooling Rate and Thermal Cycles in a Solid Works Piece Welded by Laser Welding Process. *Procedia Materials Science*, 6(2): 821-834, 2014.
- SUSMEL, L. Modified Wöhler Curve Method and multiaxial fatigue assessment of thin welded joints. *International Journal of Fatigue*, 43(4): 30-42, 2012.
- UTRIA, M.; LEYVA, B.; FERNÁNDEZ, T. Y RODRÍGUEZ, I. Efecto de las tensiones en la unión soldada tubo-bridada del transportador de mineral reducido. *Minería y Geología*, 32(1): 76-92, 2016.
- ZHANG, M.; KELLY, P. Y GATES, J. The effect of heat treatment on the toughness, hardness and microstructure of low carbon white cast irons. *Journal of Materials Science*, 36(15): 3865-3875, 2001.

Recibido: 21/02/17

Aceptado: 14/09/17

Dennis Reyes Carcasés Centro de Proyectos del Níquel, Moa, Holguín, Cuba
dreyes@ceproni.moa.minem.cu