

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

Estévez Cruz, Elmídio; Orozco Melgar, Gerardo Antonio

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

Minería y Geología, vol. 34, núm. 1, 2018

Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa 'Dr Antonio Nuñez Jiménez', Cuba

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223554993001>



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional.

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

Elmidio Estévez Cruz

Universidad de Pinar del Río, Cuba

estevez@upr.edu.cu

Redalyc: [https://www.redalyc.org/articulo.oa?](https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223554993001)

id=223554993001

Gerardo Antonio Orozco Melgar

Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba

gorozco@ismm.edu.cu

Recepción: 14 Julio 2017

Aprobación: 04 Octubre 2017

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 zeólítico 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).

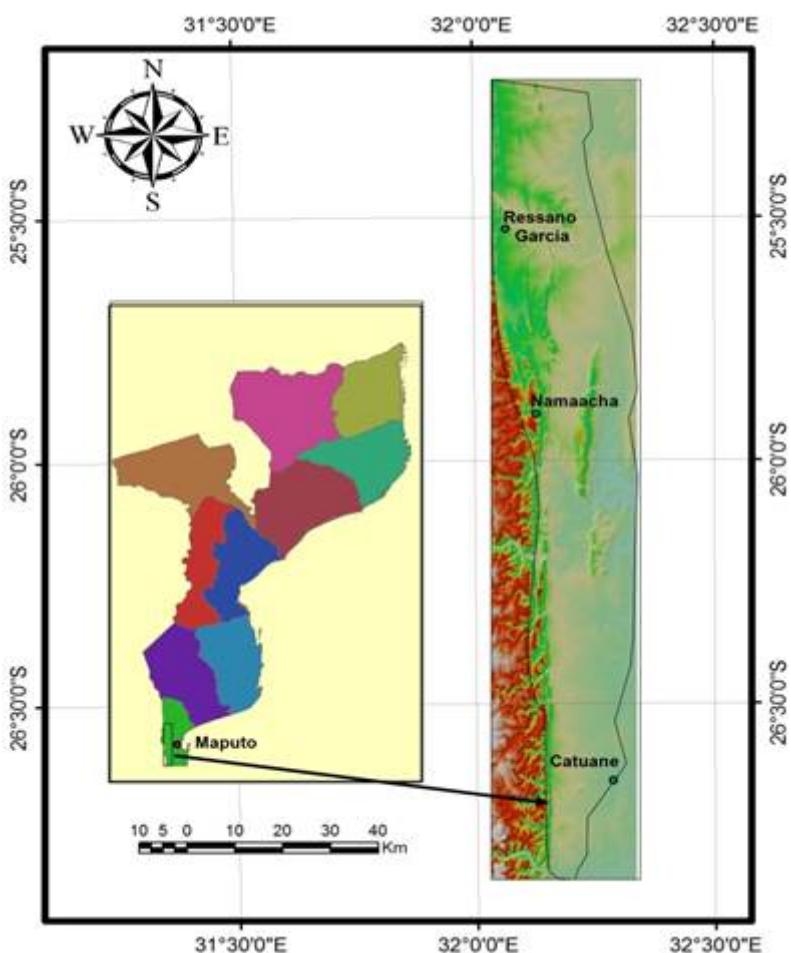


FIGURA 1.

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 monoclinal 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 muestraron 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 atmósfera, 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 spectral 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 espetrales 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 espetrales; 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).

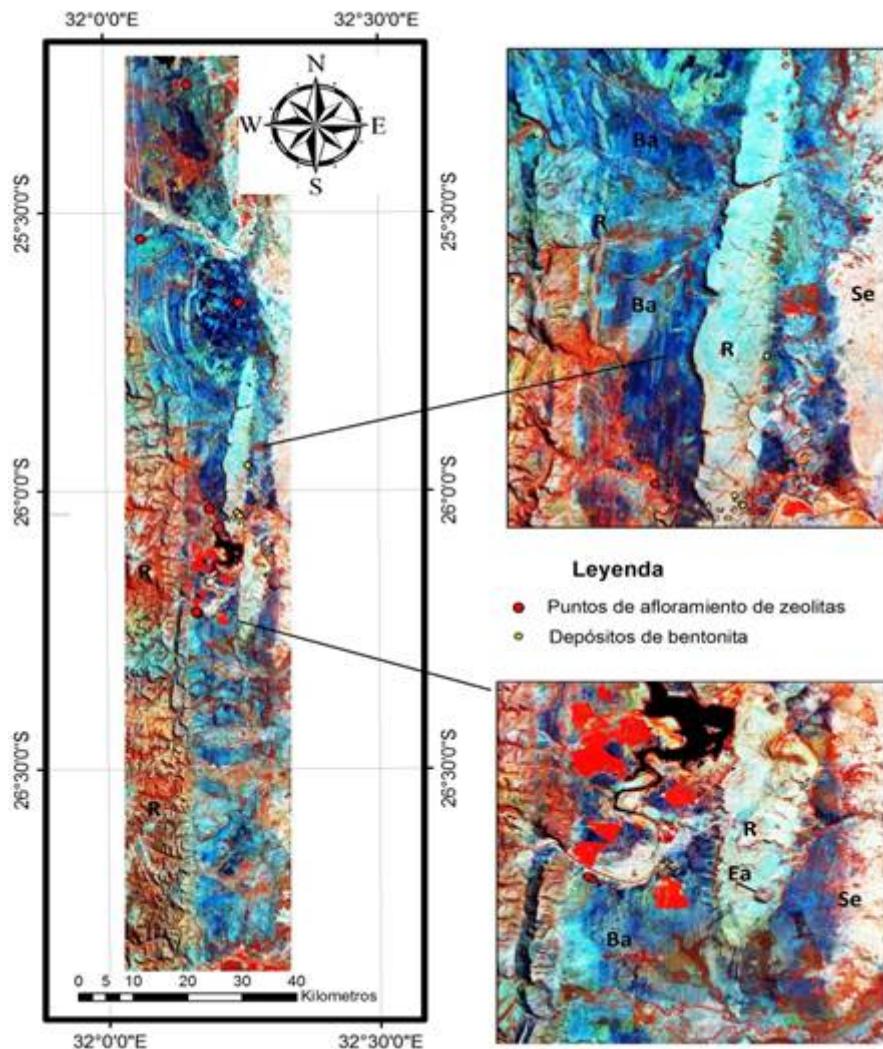


FIGURA 2.
Composición de colores CC5_6_7 donde se diferencian basaltos (Ba), riolitas (R), rocas sedimentarias (Se) y estructuras anulares (Ea).

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.

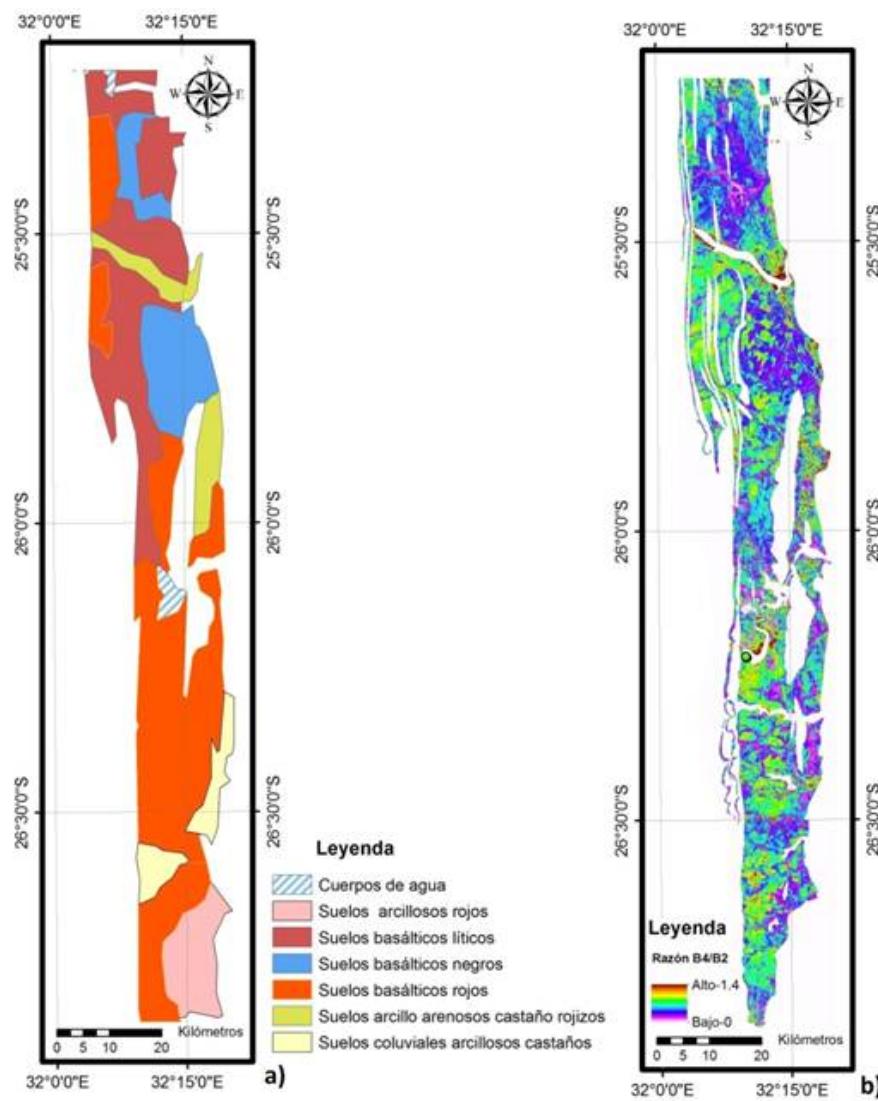


FIGURA 3.
Mapa de suelos (a) y mapa de la razón B4/B2 (b).

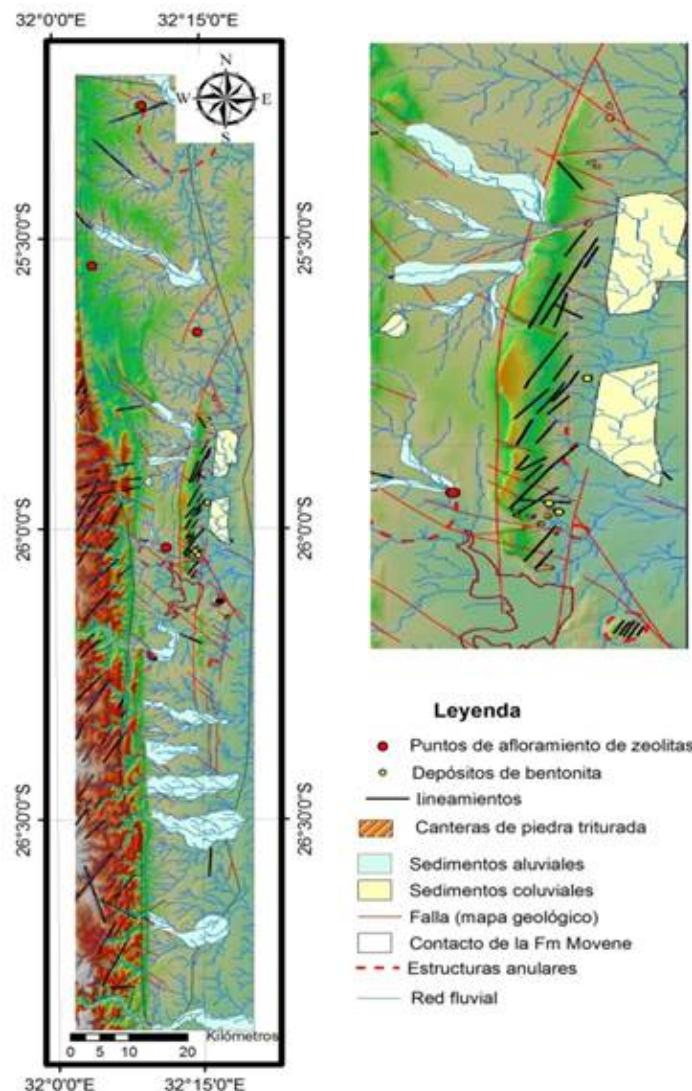


FIGURA 4.

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 llenando 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.

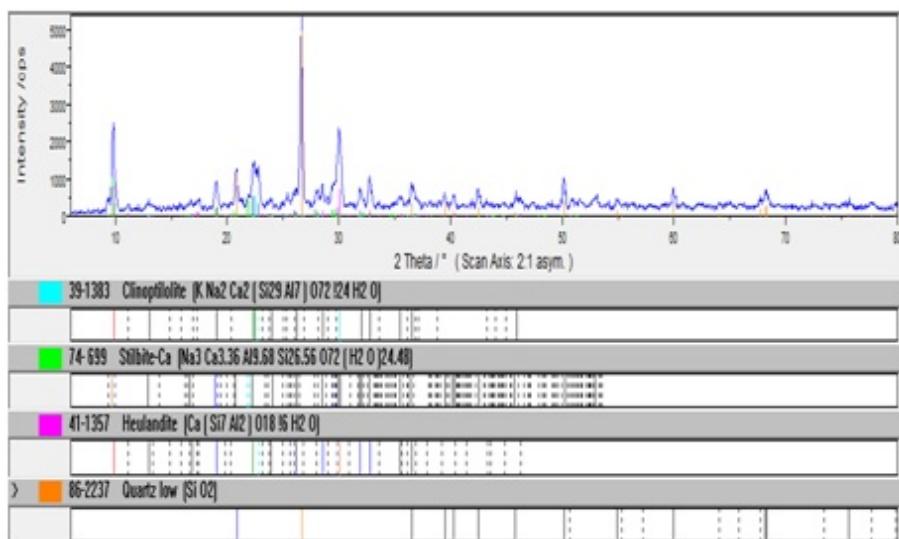


FIGURA 6.

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 $d(8,93; 6,87; 5,12)$.

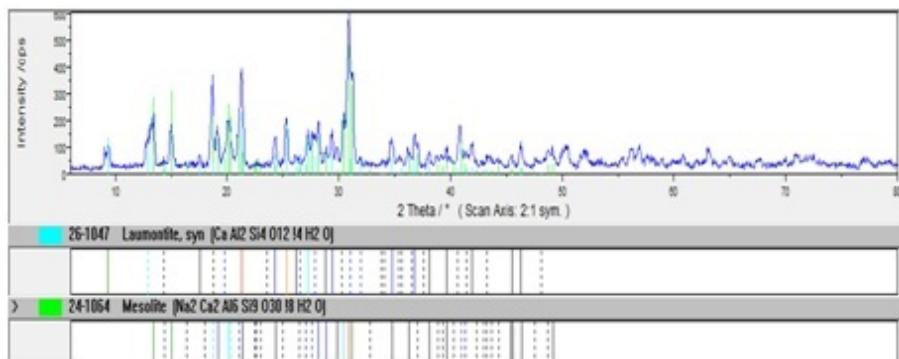


FIGURA 7.

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).

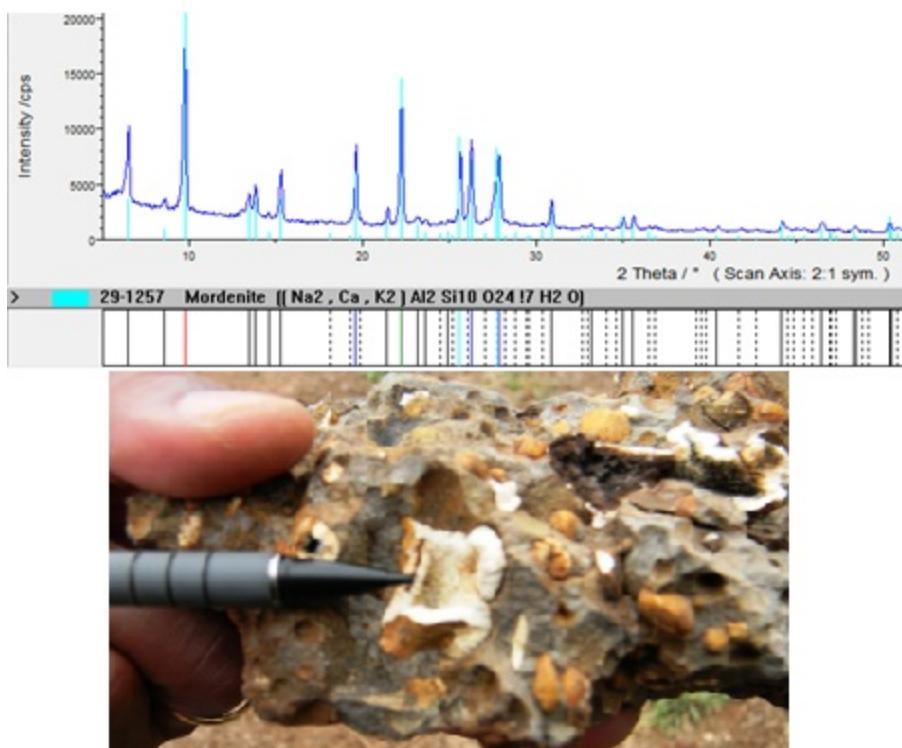


FIGURA 8.

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

Las zeolitas hidratadas (mesolita, mordenita, estilbita y heulandita) predominan en condiciones de baja temperatura ($<150\text{ }^{\circ}\text{C}$), mientras que las menos hidratadas ($150\text{ }^{\circ}\text{C} - 200\text{ }^{\circ}\text{C}$) 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.

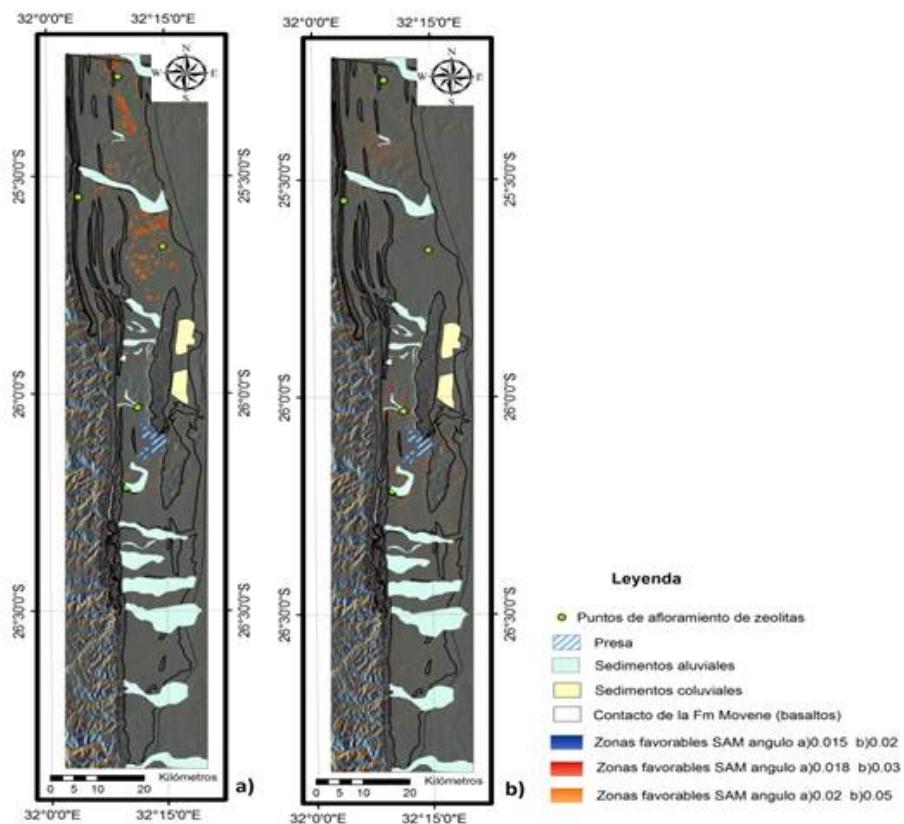


FIGURA 9.

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.

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.

5. 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. Direcção 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. Disponible en: <https://landsat.usgs.gov/sites/default/files/documents/Landsat8DataUsersHandbook.pdf>

ENLACE ALTERNATIVO

[http://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/article/view/art1_No1_2018/848 \(pdf\)](http://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/article/view/art1_No1_2018/848)