

Mineralogía Cuantitativa de los Depósitos de Zeolitas en la Costa del Ecuador

Lieven Machiels¹, Ruben Snellings¹, Fernando Morante², Jan Elsen¹, Cecilia Paredes³

¹ Applied Geology and Mineralogy
Catholic University of Leuven (KUL)
Celestijnenlaan 200E, B-3001 Heverlee, Belgium
lieven.machiels@geo.kuleuven.be

² Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

³ Facultad de Ingeniería en Mécanica y Ciencias de la Producción
Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)

Campus Gustavo Galindo Km. 30,5 Vía Perimetral P.O. Box 09-01-5863, Guayaquil, Ecuador
fmorante@espol.edu.ec

Resumen

La mineralogía cuantitativa de los depósitos de zeolita de la formación Cayo de la Costa del Ecuador fue investigada con difracción de Rayos-X. De estos datos, se puede concluir que la formación Cayo es un depósito importante de zeolitas, con una extensa área de afloramiento de más de 1000 km², y altos contenidos de zeolita. En el área oriental, cerca de Guayaquil, dos zonas de metamorfismo por enterramiento, pueden ser distinguidas, una zona (sur, zona alta) de clinoptilolita-heulandita (mordenita) y una zona (norte, zona baja) de albita-laumontita-cuarzo. En la zona baja, el contenido de zeolita es mínimo mientras que en la zona alta, el contenido de zeolita varía de acuerdo a cambios litológicos a través de secuencias de ignimbritas decamétricas. Las rocas sedimentarias interestratificadas con ignimbritas, tienen contenidos de zeolita de menos del 30%, tobas lapilli y tobas de cristal, que dominan las secuencias de ignimbritas, poseen contenidos de zeolita de 30 a 50%. Las tobas vítreas de grano fino tienen un alto contenido de zeolita de más del 60%. Cerca del límite costero se encuentra una zona rica en zeolita clinoptilolita-heulandita-mordenita. No se encuentran minerales de alto grado tales como laumontita y albita, y el contenido de cuarzo es bajo. El contenido de zeolita es alto en esta área y, debido a la presencia de tobas zeolitizadas relativamente puras (>80% de clinoptilolita-heulandita y mordenita), esta área es interesante para exploraciones futuras. Las zeolitas de la formación Cayo pueden ser utilizadas a nivel local para agricultura, acuicultura, industria del cemento y para el tratamiento de aguas residuales municipales y de minas.

Palabras clave: zeolitas naturales, XRD, clinoptilolita, heulandita, mordenita, laumontita, analcima, wairakita, erionita, facies de zeolita, metamorfismo de subducción, Cayo, Guayaquil, Ecuador.

Abstract

The quantitative mineralogy of the zeolite deposits of the Cayo formation of Coastal Ecuador was investigated with X-ray diffraction. From this data, it can be concluded that the Cayo formation is an important zeolite deposit, with a large outcrop area of more than 1000 km², and a high zeolite content. In the eastern outcrop area, near Guayaquil, two burial metamorphic zones, a clinoptilolite-heulandite-(mordenite) zone (south, upper zone) and an albite-laumontite-quartz zone (north, lower zone), can be distinguished. In the lower zone, zeolite content is low, while in the upper zone, zeolite content varies according to lithological changes through decametric ignimbritic sequences. Sedimentary rocks, interstratified with ignimbrites, have zeolite contents of less than 30%, lapilli-tuffs and crystal tuffs, which dominate the ignimbritic sequences, have zeolite contents of 30 to 50%, fine-grained glass tuffs have very high zeolite contents of more than 60%. Near the coastal line, a zeolite-rich clinoptilolite-heulandite-mordenite zone, similar to the upper zone in Guayaquil, is present. No high-grade minerals such as laumontite and albite are found and the quartz content is low. The zeolite content is high in this area and because of the presence of relatively pure zeolite tuffs (>80% clinoptilolite-heulandite and mordenite), it is interesting for further exploration. The zeolites of the Cayo formation can be used locally in agriculture, aquaculture, cement industry and for the treatment of city and mining waste waters.

Keywords: natural zeolites, XRD, clinoptilolite, heulandite, mordenite, laumontite, analcime, wairakite, erionite, zeolite facies, burial metamorphism, Cayo, Guayaquil, Ecuador.

1. Introducción

Descubrimientos recientes indican la presencia de un gran depósito de zeolitas en la zona costera del Ecuador, al oeste de Guayaquil [1-5]. Las rocas con zeolita se encuentran en la formación Cayo, una unidad rocosa del Cretáceo, compuesta por rocas marinas vulcanoclásticas y rocas sedimentarias interestratificadas. La formación Cayo se extiende por un área de más de 1000 km² de superficie, en una cadena montañosa de tipo “horst”, bordeada por cuencas sedimentarias más recientes y situada al oeste de Guayaquil. Los minerales de zeolita fueron descritos por primera vez cerca de Guayaquil por un grupo de investigadores Cubanos (sin publicar). En marzo de 2000, el proyecto “Sustratos Ecológicos a base de Zeolitas Naturales en la ESPOL” fue planteado con el objeto de investigar la aplicabilidad local del mineral. Las zeolitas poseen una amplia gama de aplicaciones locales: en la agricultura (Ej. como fertilizante en plantaciones de banano y café), en la crianza de animales (nutrición animal y desodorización de establos) y en acuicultura (extracción de amonio de piscinas de cultivo de camarón [6]). Hasta el momento el mineral es explotado principalmente para el uso en la agricultura como fertilizantes, pero sus propiedades de intercambio catiónico, absorción, tamiz molecular, y deshidratación – rehidratación pueden ser utilizadas en las industria local, como por ejemplo en la separación de gas (extracción de NO₂, CO₂ y H₂O del metano), como tamiz molecular y en el tratamiento de aguas industriales y de minería (remoción de metales pesados y protones). Debido a la proximidad de los depósitos a Guayaquil, una ciudad de más de 3 millones de habitantes, las zeolitas pueden ser muy útiles para la purificación de aguas servidas municipales. Una gran demanda para el uso de zeolitas viene de la industria local de producción de cemento, porque la caliza, la base para la producción del cemento, es escasa en la costa del Ecuador y tiene que ser importada de regiones o países vecinos. Las Zeolitas de este depósito son sumamente aptas para su uso como puzolanas [7] y puede así ser agregado al cemento.

El área de superficie de la formación Cayo es enorme (más de 1000 km², fig. 1). Un depósito de esta dimensión puede ser de gran importancia para un país en desarrollo como el Ecuador. Debido a las grandes variaciones laterales y verticales en la litología y mineralogía a través de la unidad rocosa, la explotación al momento está restringida a delgadas capas de “toba verde” que constituye solamente el 10% de la unidad rocosa. Para lograr una explotación óptima, se requiere de un estudio detallado del marco deposicional, mineralogía e historia genética del depósito. Este artículo se enfoca principalmente en la mineralogía cuantitativa del depósito.

2. Metodología

Se recogieron muestras en la región de Guayaquil (corte por Vía Perimetral e Isidro Ayora) y en la zona costanera (cortes Río Ayampe, Río Blanco, Puerto López y Agua Blanca (fig.1). A lo largo de la Vía Perimetral en Guayaquil, dos cortes detallados de 50 metros fueron muestreadas para investigar variaciones litológica y mineralógicas a pequeña escala a través de secuencias ignimbríticas. Se distingue con facilidad entre tobas vulcanoclásticas ásperas de lapili y rocas sedimentarias. Para rocas de grano fino esta distinción es más difícil, y por lo tanto los nombres lutita, lodolita y arenisca son utilizados, a menos que se haya hecho una identificación apropiada con microscopía óptica.

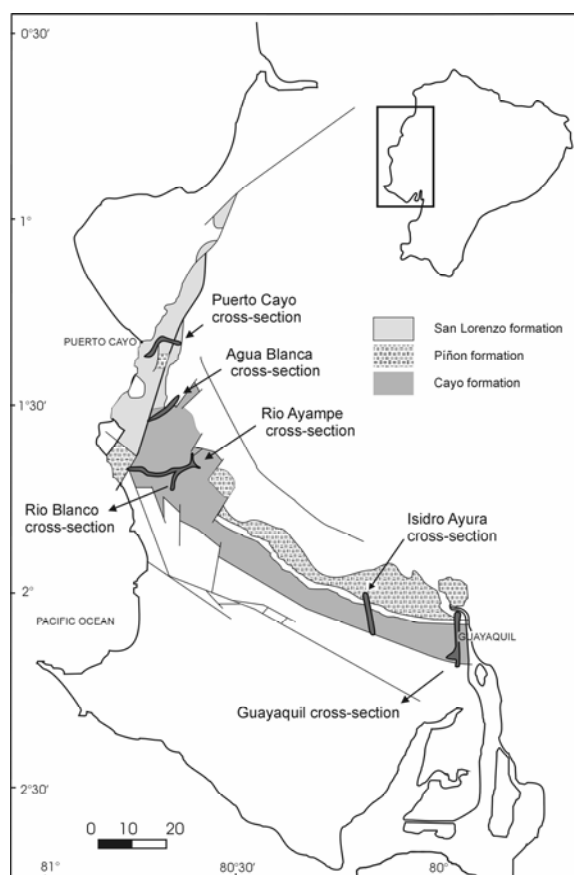


Fig. 1 Ubicación de cortes (modificado de [9])

160 muestras fueron analizadas mediante difracción de Rayos X. Para el análisis cualitativo las muestras fueron molidas, cargadas en porta muestras y medidas en un difractómetro Philips PW1710 con radiación CuK α y filtro de Ni, monocromador de grafito, 25kV, 30mA, 0.04° de tamaño paso, 3-50° 2 θ y un tiempo de conteo de 2 segundos por paso.

Para la cuantificación precisa de 70 muestras un procedimiento de preparación estandarizado fue introducido. Las muestras fueron molidas y tamizadas a < 500 μ m, reforzadas con 10% de

estándar interno de ZnO y molidas en metano por 5 minutos utilizando un molino micronizador McCrone. La espectroscopía infrarroja mostró que esta técnica reduce el tamaño de grano a $<10\mu\text{m}$, que es la granulometría requerida para análisis cuantitativo. El uso del molino micronizador McCrone y un fluido de molienda minimiza la amorfización de las zeolitas en mezclas de zeolita-cuarzo y evita la creación de poblaciones con granulometrías diferentes (algo que fue revisado en los análisis de espectroscopía infrarroja). Montículos aleatorios de polvo de roca fueron preparados utilizando la técnica de carga lateral (con escarcha sobre vidrio) para evitar orientaciones preferenciadas de los cristales de los minerales (Ej. mordenita fibrosa). Las muestras fueron colocadas en una cámara de equilibrio con una solución sobresaturada de $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ por al menos 16 horas antes de las mediciones con Rayos-X para crear una atmósfera con humedad relativa constante de 52.0%. Esta técnica es utilizada para lograr la completa hidratación de las zeolitas, y es muy importante para muestras que contengan laumontita, la cual puede deshidratarse a temperatura ambiente y con baja humedad relativa. Las muestras fueron medidas en un difractor Philips PW1830 con radiación $\text{CuK}\alpha$ y filtro de Ni, monocromador de grafito, 25kV, 30mA, 0.04° de tamaño paso, 3-50° 2θ y un tiempo de conteo de 2 segundo por paso. Para la interpretación cuantitativa de la información se utilizaron dos métodos independientes, un método de sumatoria de perfiles (RockJock®) y el método Rietveld (Topas Academic®). En el método RockJock el patrón medido es ajustado a un patrón calculado compuesto de estándares de minerales puros medidos bajo arreglos difractométricos idénticos. En el método Rietveld, algunas muestras de zeolitas fueron intercambiadas a la forma rica en K para llegar a un ajuste óptimo con los datos cristalográficos, otras fueron tratadas con calor previamente a las mediciones con el difractor de Rayos-X para distinguir entre clinoptilolita y heulandita. Esta distinción puede ser hecha porque la heulandita se vuelve amorfa a los Rayos-X a 450° mientras que la clinoptilolita se mantiene estable a esta temperatura. El contenido total de arcilla fue determinado con el método RockJock utilizando 060 reflexiones en la región $55\text{-}65^\circ 2\theta$.

3. Geología Local

Una buena visión general de la geología del área de estudio está dada por Benitez [8] y Reynaud et al [9]. La formación Cayo es una unidad rocosa de 3 kilómetros de espesor, del Cretáceo tardío, compuesta por rocas vulcanoclásticas interstratificadas con rocas sedimentarias menores. El depósito aparece como una cadena montañosa de tipo "horst", la Cordillera Chongón-Colonche. La

formación Cayo está limitada por la cuenca del Río Guayas al oeste de Guayaquil, la cuenca Manabí al norte, la cuenca Progreso al sur, y la falla Puerto Cayo-Canade al oeste [9]. Las rocas encontradas a lo largo de la línea costanera en Puerto Cayo, la localidad tipo original de la formación Cayo (Olsson, 1942 en [8]), no pertenece a la formación Cayo sino a la formación más joven de San Lorenzo (Eoceno). Benitez [10] propuso un nuevo tipo de localidad para la formación Cayo, a lo largo de la Vía Perimetral en Guayaquil. En esta ubicación se puede encontrar un buen corte norte-sur a través de la estratigrafía Cretácea-Paleogena de la región Costa.

El basamento de la Costa del Ecuador está formado por un fragmento de una meseta oceánica de la edad pre-Turoniana [9, 11]. La meseta fue trasladada a Sudamérica occidental en el Eoceno Medio (ca. 45 Ma [12]). Restos de la meseta pueden ser encontrados en la formación Piñón, que aflora al norte de Guayaquil. En esta ubicación la formación Piñón está superpuesta por una fina capa de basaltos phyric, llamados miembros Orquídeas [9] o el Arco Cayo [8]. Los basaltos Orquídeas están estratigráficamente superpuestas por el grupo Chongón que está dividido en tres unidades rocosas: la unidad Calentura, la unidad Cayo y la unidad Guayaquil. La unidad Calentura es considerada como el miembro basal de la formación Cayo, tiene 200 metros de grosor en Guayaquil, y está compuesta de calizas y finos lechos volcánicos o vulcanoclásticos intercalados. La unidad Calentura no ocurre en la región occidental de Guayaquil e incluso en el corte Guayaquil, el borde con la formación Cayo no está claramente definido, y se considera al menos parte de la unidad Calentura, como se indica en el mapa geológico de Pascuales 1:50000 (sin publicar), como parte de la formación Cayo sensu stricto (cfr. Infra).

La formación Cayo tiene 2000 m de espesor a la altura del corte de la Vía Perimetral y es considerada como el producto de la erosión de un arco de isla (Thalman, 1946 en [8]; [9,13]), probablemente con una naturaleza tholeítica primitiva [14]. Se han propuesto muchos orígenes para las rocas de la formación Cayo incluyendo la Cordillera Oriental (Faucher y Savoyant (1973) y Vera et al. (1985) en [8]), el arco Macuchi en los Andes occidentales [15] y el arco San Lorenzo cerca la Océano Pacífico [16], pero estas posibilidades fueron descartadas cuando los arcos Macuchi y San Lorenzo fueron datados con menor edad. La posibilidad más obvia es que las rocas se originaron de una fuente andesítica-dacítica cercana, la cual no aflora en el presente, aunque se le puede seguir el rastro en intrusivos cercanos tales como las tonalitas de Pascuales (al norte de Guayaquil) y Pedro Pablo Gómez (al noreste del Río Ayampe). Estos intrusivos son similares en composición y edad a las rocas de la formación Cayo

(andesitic-dacitic, 73.3 +/- 6.9 Ma and 76.9 +/- 4.8 Ma, [17]).

En el corte de la Vía Perimetral la formación Cayo está compuesta por un gran número de secuencias decamétricas superpuestas de ignimbritas submarinas de grano grueso [4,5]. Una dirección de flujo NE-SW de flujos ignimbriticos pudieron ser deducidos al oeste de Guayaquil [8] y un flujo NS pudo ser deducido a lo largo del perfil de la Vía Perimetral [5]. En periodos volcánicamente activos múltiples secuencias de ignimbrita fueron depositados, compuestas de tobas de lápili de grano grueso, alternadas con tobas menores de airfall de grano fino. En periodos menos activos rocas sedimentarias (pelagicas y reworked) alternan las secuencias ignimbriticas.

El tercer miembro del grupo Chongón, la formación Guayaquil, esta compuesta por 400 m de lutitas pelagicas oscuras, cherts, tobas siliceas y lechos finos de turbiditas, y aflora en la parte sur del corte de la Vía Perimetral en la ciudad de Guayaquil. Las rocas son fácilmente reconocidas por su alta silicificación. La formación Guayaquil parece ser continua hacia el oeste como se puede ver en el Río Ayampe cerca de la costa del Pacífico [5].

4. Mineralogía de la formación Cayo

Los resultados de los análisis de difracción con Rayos-X son presentados en la tabla 1. Todas las coordenadas están en sistema UTM UPS Prov S Am 756 (Sector 17M). Las muestras de los cortes de la Vía Perimetral e Isidro Ayora están ordenados desde la parte baja hacia la parte alta de la formación Cayo (norte a sur). Las muestras de los cortes occidentales están ordenados de oeste a este. Para los análisis cualitativos la presencia de clinoptilolita-heulandita, mordenita, laumontita, cuarzo, feldespato, calcita, arcillas y otros minerales (principalmente piroxeno y minerales opacos) es indicada. Las fracciones de minerales en las muestras son estimadas comparando la altura de los picos en cada mineral indicado como un componente mayor (>15%), menor (5-15%) o accesorio (<5%).

Para los análisis cuantitativos los porcentajes de peso de clinoptilolita-heulandita, mordenita, laumontita, cuarzo, albita, feldespato (feldespato potásico, andesina, bytownita, labradorita y anortita), piroxeno, minerales de arcillas y otros minerales son dados. En las últimas dos columnas el porcentaje de mineral sin identificar (calculados a partir de la diferencia con el 100%) y el Rwp de cada análisis son dados.

4.1 Distribución de minerales de zeolita en la formación Cayo.

Investigaciones previas han demostrado la ocurrencia de minerales de zeolita en el campus de la

ESPOL a lo largo de la Vía Perimetral en Guayaquil [3]. Nuestros datos prueban que los minerales de zeolita dominan la totalidad del área de afloramiento de la formación Cayo, implicando que la formación Cayo en gran depósito de zeolitas cubriendo un área de mas de 1000 km². El contenido de zeolita es bajo, tendiendo a nulo, en los alrededores de la formación Cayo. No se han encontrado zeolitas en la unidad Piñón, solamente pequeñas cantidades de laumontita aparecen en la unidad Calentura y no se han encontrado zeolitas en la unidad Guayaquil, aunque pequeñas cantidades de clinoptilolita han sido descritas en finos estratos de toba cerca del límite C/T a lo largo del corte de la Vía Perimetral [18].

Solamente una zona de bajo contenido de zeolita ha sido esbozado en el área estudiada, ocurriendo en la base de la formación Cayo en el corte de la Vía Perimetral (muestras VP1-VP4 y VPD1-VPD10). La mineralogía es dominada por albita, cuarzo y en menor cantidad laumontita. Algunas alteraciones hidrotermales menores cerca de las zonas de falla (Ej. VP5-6) también no poseen zeolita.

4.2 Los principales minerales de zeolita: clinoptilolita, heulandita, mordenita y laumontita.

López et al. [1] describen la presencia de clinoptilolita a lo largo de la Vía Perimetral en Guayaquil. Morante [3] indica la presencia de heulandita junto a la clinoptilolita en la misma ubicación. Estos dos minerales son los miembros finales de una serie sólida de soluciones con una razón de >4 de Si/Al para la heulandita y <4 para la clinoptilolita. Nuestros resultados indican la presencia de ambos minerales, siendo los elementos de zeolita más importantes en la formación Cayo, ocurriendo en todas las regiones y en todos los tipos de roca. Dos grupos que se agrupan alrededor de una razón de 3.25 de Si/Al (heulandita) y 4.25 (clinoptilolita) (deducido de análisis EPMA, sin publicar) pueden ser reconocidas. El calcio es el catión intercambiable dominante en todas las zeolitas. La Mordenita es la segunda zeolita de ocurrencia más abundante en rocas con alto contenido de sílice, donde es asociada con clinoptilolita-heulandita. Tobas verdes características, con alto contenido de mordenita, son las únicas litologías que son realmente explotadas en el área. El calcio es el catión intercambiable dominante en la mordenita. La mordenita es común en la mayoría de regiones, pero es menos abundante la región de Guayaquil, donde puede ser encontrada en grandes cantidades solo en estratos de tobas verdes que afloran al centro del perfil de la Vía Perimetral (VP7, llamada K α Cayo en mapa geológico 1:50000 de Pascuales, sin publicar).

La laumontita es menos abundante que la mordenita, ocurre solamente en rocas intermedias a

básicas en la parte basal del corte de la Vía Perimetral. En el segundo perfil, solamente una muestra con laumontita fue encontrada, y en la región oeste no se encontró laumontita.

4.3 Menores minerales de zeolita: analcima, wairakita y erionita

En la formación Cayo se encontró analcima como un constituyente mayoritario en solo dos muestras, en la parte alta los cortes de la Vía Perimetral e Isidro Ayora (VP14, IA8). En algunas otras muestras, se encontraron trazas de analcima. En la formación San Lorenzo, muestreada a la altura del corte de Puerto Cayo, es más común la presencia de analcima. Trazas de erionita han sido encontradas en el corte de la Vía Perimetral, tal como ha sido probado por análisis EPMA (sin publicar). Así como en la clinoptilolita-heulandita y mordenita, el Ca es el catión intercambiable dominante.

Se ha encontrado wairakita en una muestra (RA045), una toba de lapili blanco-azulada fuertemente alterada, muestreada en un bloque de falla en el corte del Río Ayampe.

4.4 Minerales Asociados

Los minerales detríticos y vulcanoclásticos encontrados en el área son feldespatos, cuarzo, augita y Ti-magnetita. En las series de plagioclasa la andesita es el feldespato más común pero la bytownita y la anorthita también ocurren. El feldespato potásico es de tipo microclínico intermedio o ortoclásico, pero es difícil diferenciarlo del feldespato authigénico.

Los minerales diagenéticos y metamórficos son cuarzo, albita (solamente en la parte basal del corte de la Vía Perimetral), feldespato potásico, calcita y arcilla. Se encontró ópalo-CT cerca de las zonas de falla. Se encontró celadonita en la parte alta de la sección de la Vía Perimetral y todas las otras secciones. Otros minerales son capas mezcladas de clorita-saponita, con razones de saponita-clorita que van en un rango de 0.10 hasta 0.90. También se identificó corrensita. En algunas muestras se encontraron kaolinita y montmorillonita en pequeñas cantidades.

4.5 Mineralogía cuantitativa

La mayoría de las muestras investigadas cuantitativamente son del corte de la Vía Perimetral. El contenido de zeolita en la parte alta del corte (muestra VP7-35) depende principalmente del tipo de rocas presentes (composición elemental). La cuantificación de una sección de 50 metros cerca al campus de la ESPOL (VPD10-34) ilustra la variación del contenido de zeolita a través de secuencias ingnimbríticas. Tres secuencias seguidas fueron muestreadas. Una secuencia completa consiste de tres partes principales: una parte basal de

tobas de lapili, una parte central de tobas de lapili estratificadas y una parte sedimentaria. La parte basal consiste de tobas de lapili de grano grueso con un contenido de zeolita relativamente constante del 30% en este caso. El contenido de cuarzo en esta parte es muy bajo, mientras que los contenidos de feldespato y piroxeno son altos. En la parte central de cada secuencia, las tobas de lapili laminadas son alteradas con tobas de cristal de grano fino y tobas vítreas. El contenido de zeolita es más variable, con un rango de 30% en tobas de lapili hasta 65% en tobas vítreas. En la parte alta, en este caso solo presente en la secuencia superior (muestras VPD 31-34), las rocas sedimentarias son predominantes, el contenido de zeolita es de alrededor de 30% y el contenido de cuarzo es alto (> 30%).

La parte basal de la formación Cayo en el corte de la Vía Perimetral (muestras VP1-4 y VPD1-10) es dominada por la presencia de cuarzo, albita, calcita y laumontita en menor cantidad. Son raras la clinoptilolita-heulandita y mordenita. El total de contenido de zeolita es muy bajo. El contenido de albita sobre el contenido total de feldespato es claramente más alto que en la parte alta del corte.

Se puede ver dos diferencias minerales mayores si el contenido mineral de los perfiles orientales (cortes de la Vía Perimetral e Isidro Ayora) es comparado con el contenido mineral en el corte del Río Ayampe. En el Río Ayampe, el contenido total de zeolita es mayor que en la muestras de Guayaquil, mientras que el contenido de cuarzo es mucho menor. Ambas, la clinoptilolita-heulandita y la mordenita contribuyen a este alto contenido de zeolita. La presencia de capas de tobas con contenidos de clinoptilolita-heulandita de > 80% hace de gran interés a esta área para investigaciones futuras.

5. Conclusión y consecuencias para la explotación de zeolita

La formación Cayo puede ser considerada como un importante depósito de zeolitas. Los minerales de zeolita dominan toda el área de afloramiento, cubriendo una superficie de más de 1000 km². Los minerales principales de zeolita, clinoptilolita y heulandita, ocurren en casi todas las rocas, mientras que la mordenita y laumontita tienen más bien importancia local. La presencia de analcima es rara en la formación Cayo, pero más común en la formación San Lorenzo a la altura de la línea costanera. En el corte de la Vía Perimetral, una zona de albita-cuarzo-calcita-laumontita (hacia el norte) y una zona alta de clinoptilolita-heulandita-mordenita son reconocidas. En la zona inferior, el contenido total de zeolita es bajo. En la zona alta, el contenido de zeolita es fuertemente dependiente del tipo de roca presente. Los contenidos más bajos ocurren en rocas sedimentarias (<30%). Las tobas cristalinas y

de lapili tienen un contenido intermedio (30-50%) y las tobas vítreas tiene un alto contenido (>60%). Existe una clara relación entre el contenido de zeolita y su ubicación en secuencias ignimbríticas. Hasta el momento solo tobas verdes de mordenita son explotadas (muestra VP7). Para la explotación de clinoptilolita-heulandita, la zona rica en zeolita al sur de este punto (entre ellas el campus de la ESPOL) es recomendada. El material puede ser minado en masa, pero para obtener material de alto contenido de zeolita, se debe excluir las intercalaciones sedimentarias que ocurren sobre algunas secuencias. Para evitar bajos contenidos de zeolita, se debe minar zonas con varias secuencias ignimbríticas superpuestas gruesas, representativas de períodos de de volcanismo activo con bajo ingreso sedimentario.

En la región occidental, el contenido de zeolita es mayor, así como la abundancia de mordenita. La laumontita y albita authigénica están ausentes, y el contenido de cuarzo en las rocas es mucho menor. Debido a la ocurrencia de capas de alto contenido de zeolita (>80%), esta área es muy interesante para explotaciones futuras depósitos de zeolita monomineral (clinoptilolita) de alto contenido de zeolita (>95%).

6. Agradecimientos

Agradecemos a G. Mertens por sus valiosas sugerencias concernientes a cuantificación mineral, H. Nijs por la cuidadosa preparación de las láminas delgadas y a los estudiantes y personal de la FICT por su asistencia durante los trabajos de campo del 2004 y 2006.

7. Referencias

- [1] López, K., Morante, F., Botto, L.I., Adhemazar, J., "Geología y mineralogía de zeolitas al oeste de Guayaquil, provincia del Guayas-Ecuador," *Memorias del XV congreso geológico Boliviano*, October 2002, pp. 250-253.
- [2] Nazareno, J., Peña, E., Morante, F., "Gestión del movimiento de tierras y aprovechamiento de las zeolitas naturales existentes en el parque tecnológico campus ESPOL," *Revista Tecnológica ESPOL* 15, no. 1, 2002, pp.50-57.
- [3] Morante, F., "Las zeolitas de la Costa de Ecuador (Guayaquil): Geología, caracterización y aplicaciones," Ph.D. Thesis, Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid, 2004.
- [4] Machiels, L., "Geologische en mineralogische studie van de zeolietafzettingen van de Cayo formatie aan de kust van Ecuador," Masters Thesis, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium, 2005.
- [5] Snellings, R., "Geologie en mineralogie van de zeolietafzettingen van de westelijke Cayo formatie, Ecuador," Masters Thesis, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium, 2006.
- [6] Falcão, G.F., Paiva, P.R.P., "Caracterização de zeólita e sua aplicação como adsorvente de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$," *Série Anais da XIII Jornada de Iniciação Científica*, 2005.
- [7] Robalino, P., Morante, F., Ramos, V., Egüez, H., "Caracterización Básica de las zeolitas (Fm. Cayo-Ecuador) para su aplicación como material puzolánico," Internal report ESPOL, 2005.
- [8] Benítez S., "Evolution géodynamique de la province côtière sud-Équatorienne au Crétacé Supérieur-Tertiaire," *Géologie Alpine* 71, 1995, pp.3-163.
- [9] Reynaud, C., Jaillard, E., Lapierre, H., Mamberti, M., Mascle, G.H., "Oceanic plateau and island arcs of southwestern Ecuador: their place in the geodynamic evolution of northwestern South America," *Tectonophysics* 307, 1999, pp. 235-254.
- [10] Benítez, S., "Estratigrafía de las Formaciones Cayo y Guayaquil en la Cordillera Chongón Colonche: Hacia una redefinición," *Geociencia, Rev. del CIGMP-Guayaquil*, 1990, 3:7-11, 4:18-20, 5:11-14.
- [11] Kerr, A.C., Tarney, J., "Tectonic evolution of the Caribbean and northwestern South America: The case for accretion of two Late Cretaceous oceanic plateaus," *Geology* 33, no. 4, 2005, pp. 269-272.
- [12] Spikings, R.A., Winkler, W., Seward, D., Handler, R., "Along-strike variations in the thermal and tectonic response of the continental Ecuadorian Andes to the collision with heterogeneous oceanic crust," *Earth and Planetary Science letters* 186, 2001, pp.57-73.
- [13] Wallrabe-Adams, H.-J., "Petrology and geotectonic development of the Western Ecuadorian Andes: the Basic Igneous Complex," *Tectonophysics* 185, 1990, pp. 163-182.
- [14] Allibon, J., Monjoie, P., Lapierre, H., Jaillard, E., Bussy, F., Bosch, D., "The role of the Cretaceous Caribbean Oceanic Plateau in the genesis of late cretaceous arc magmatism in Ecuador," *3th Swiss Geoscience Meeting Zürich*, November 2005, pp. 59-60.
- [15] Lebrat, M., Megard, F., Dupuy, C., Dostal, J., "Geochemistry and tectonic setting of pre-collision Cretaceous and Paleogene volcanic rocks of Ecuador," *Geologic society of America Bulletin* 99, no. 4, 1987, pp. 569-578.
- [16] Van Thournout, F., Hertogen, J., Quevedo, L., "Allochthonous terranes in northwestern Ecuador," *Tectonophysics* 205, 1992, pp. 205-221.

- [17] Pichler, H., Aly, S., "Neue K-Ar-Alter plutonischer Gesteine in Ecuador," *Zeitschrift Deutsche geologische gesellschaft* 134, 1983, pp. 495-506.
- [18] Keller, G., Adatte, T., Hollis, C., Ordóñez, M., Zambrano, I., Jiménez, N., Stinnesbeck, W., Aleman, A., Hale-Erlich, W., "The Cretaceous/Tertiary boundary event in Ecuador: reduced biotic effects due to eastern boundary current setting," *Marine Micropaleontology* 31, 1997, pp. 97- 133.
- [19] Machiels, L., Morante, F., Snellings, R., Elsen, J., Paredes, C., "Quantitative mineralogy and genetic history of the natural zeolite deposits of Coastal Ecuador," *7th international conference on the Occurrence, properties and Utilization of Natural Zeolites*, July 2006.
- [20] Coombs, D.S., "The nature and alteration of some Triassic sediments from Southland, New Zealand," *Transactions of the Royal Society of New Zealand* 82, 1954, pp. 65-109.

Tabla 1. Resultados de los análisis de difracción de Rayos-X. Nr.: VP1-VP35: corte Via Perimetral. VPD1-VPD34: corte detallado de Via Perimetral. IA1-IA9: Isidro Ayora, RA1-RA58: Río Ayampe, RB1-RB3: Río Blanco, PC01-PC15: Puerto Cayo. AB1-AB3: Agua Blanca. CLI-HEU: clinoptilolita-heulandita, MOR: mordenita, LAU: laumontita, QTZ: cuarzo, ALB: albita, FSP: feldespato (-albita), CC: calcita, PX: pyroxeno, CLAYS: minerales de arcilla, OTH: otros minerales: ana: analcima, ma: magnetita, amph: Ca-amfibole, opa: opal-CT, wai: wairakita, UNID: porcentaje sin identificar. ++: minerales mayores (>15%), + : minerales menores (5-15%), - : mineral accesorio (<5%), V: veta

Nr.	Coordinates	Rock type	CLI-HEU	MOR	LAU	QTZ	ALB	FSP	CC	Px	CLAYS	OTH	UNID	Rwp
VP1	0616658-9768960	lutite, grey				41	25	10	14		5		6	0.22
VPD1	0616674-9769148	siltstone	1			63	2	14			11	5	4	0.19
VPD2	0616665-9769126	lutite	1			65	13	9			12		0	0.30
VPD3	0616655-9769104	lapilli-tuff	1			19	45	15		1	13	1	7	0.24
VPD4	0616659-9769076	siltstone				38	3	11		37	5		6	0.21
VPD5	0616668-9769050	lapilli-tuff				30	45	9		1	4	1	10	0.21
VPD6	0616677-9769032	siltstone				++		+			-			
VPD7	0616677-9769032	lutite	1			60	3	12			17		6	0.26
VPD8	0616677-9769032	lapilli-tuff, layered				69	8	7	1		10		5	0.22
VPD9	0616672-9769018	tuff-lutite			8	34	28	15	2	1	8		3	0.25
VPD10	0616655-9768968	tuff			1	52	2	7	21		10		6	0.22
VP2	0617226-9768359	lutite, brown	1		11	27	30	10	1		16		4	0.18
VP3	0617228-9767060	lapilli-tuff				16	25	14		3	28	3	12	0.18
VP4	0617228-9767060	siltstone, grey, heavy	1			36	24	13			21	1	4	0.22
VP5	0614282-9766076	loose, altered material				+		+	+		+			
VP6	0614751-9765956	loose, altered material				+		+	+		++			
VP7	0613704-9765766	glasstuff, green	14	41	2	18		8			10		7	0.18
VP8	0617210-9764644	lapilli-tuff	40		1	4	2	4	8	2	32	1	6	0.15
VP9	0617214-9764594	siltstone, pelagic	15		1	32	1	7	18		27		0	0.17
VP10	0617214-9764594	lutite, browngrey	+			++		++			+			
VP11	0617257-9764140	lutite, brown	18			30	2	10	1	1	30	1	10	0.19
VP12	0617481-9763742	lapilli-tuff			20		20	12	9	8	23	2	6	0.15
VP13	0617481-9763742	siltstone, grey	21			14	6	18	21	2	15	2	3	0.18
VP14	0617469-9763302	lapilli-tuff	++			-		-			+	ana		
VP15	0617516-9763136	siltstone, grey	29			31	2	9		1	37		0	0.17
VP16	0617516-9763136	lapilli-tuff, in laminae	7			3	2	14	1	3	60	1	10	0.12
VP17	0617402-9762444	sandstone	43			3	5	17	1	4	23	1	4	0.13
VP18	0617402-9762444	lapilli-tuff	33			3	6	25	5	17	2	8	8	0.14
VP19	0617371-9762322	lapilli-tuff	18			7	9	33	3	6	16	2	7	0.15
VPD11	0617323-9762318	lapilli-tuff	28			7	7	29	1	8	11	2	6	0.16
VPD12	0617323-9762308	lapilli-tuff	21		7		17	22	4	6	11	3	8	0.15
VPD13	0617320-9762300	lapilli-tuff	29		5		15	22	4	6	6	3	10	0.15
VPD14	0617317-9762292	lapilli-tuff	2		22	2	23	25	5	8	9	2	2	0.19
VPD15	0617314-9762284	lapilli-tuff	23		7		16	22	3	6	15	2	6	0.15
VPD16	0617307-9762274	lapilli-tuff	28		5		15	21	4	6	9	3	9	0.15
VPD17	0617300-9762254	lapilli-tuff	35		4		14	14	5	6	3	3	17	0.14
VPD18	0617305-9762248	lapilli-tuff	35			4	7	31	3	7	7	3	2	0.17
VPD19	0617292-9762242	tuff	65			3	2	1	3	3	9	1	15	0.12
VPD20	0617292-9762242	tuff	50	1		7	1	14	3	3	8	2	11	0.13
VPD21	0617292-9762242	siltstone	60	3		11		4	1	2	6		12	0.15
VPD22	0617293-9762234	lapilli-tuff	22			10	5	33	4	4	19	2	0	0.13
VPD23	0617288-9762212	lapilli-tuff	25		4		13	23	3	7	13	2	10	0.14
VPD24	0617283-9762204	lapilli-tuff	44			1	6	23	3	6	16	3	0	0.15
VPD25	0617279-9762192	lapilli-tuff	40	1		2	4	30	2	5	11	2	2	0.14
VPD26	0617275-9762178	lapilli-tuff	43	5		7	3	22	1	3	5	2	9	0.13
VPD27	0617277-9762170	lutite	61	9		9	1	4		2	4	1	11	0.14
VPD28	0617269-9762158	siltstone	37			11	1	22	3	4	9	2	11	0.14
VPD29	0617269-9762152	lapilli-tuff	21	1		9	4	41	7	5	11	2	0	0.15
VPD30	0617264-9762140	lapilli-tuff	30	1		5	4	31	7	4	16	2	0	0.12
VPD31	0617260-9762132	lapilli-tuff	28			43	2	6			13	8	8	0.21
VPD32	0617256-9762120	lapilli-tuff, layered	33			33		7	4		22		1	0.21
VPD33	0617251-9762104	lutite	27			33	3	7	7	1	23	1	0	0.15
VPD34	0616950-9762256	siltstone	28			27	4	16	1	1	18	1	3	0.17
VP20	0616833-9762874	glass-tuff, greenbrown	++		v	++		+			+			
VP21	0616532-9762770	glass-tuff, green,				33	2	10		1	23	1	0	0.19
VP22	0616499-9762730	lapilli-tuff	30	7		8	3	25	4	3	10	2	8	0.13
VP23	0617301-9762158	glasstuff, green	6		1	1	4	22	1	5	52	1	7	0.16
VP24	0616189-9762058	lapilli-tuff	8	1		2	9	4	13		25	2	36	0.40
VP25	0616045-9761664	lutite, beige	10			49	1	5			33		2	0.20
VP26	0615990-9761612	lutite, sedimentary, grey	+			++		-			+			
VP27	0615941-9761390	lapilli-tuff	33			7	3	20	3	3	25	1	5	0.14
VP28	0615955-9761406	lutite, green	31			52		4			9		4	0.23
VP29	0614907-9761888	sandstone	+			+		+			+			
VP30	0614521-9762010	lapilli-tuff	28			3	2	15		3	36	1	13	0.15

Nr.	Coordinates	Rock Type	CLI-HEU	MOR	LAU	QTZ	ALB	FSP	CC	PX	CLAYS	OTH	UNID	Rwp
-----	-------------	-----------	---------	-----	-----	-----	-----	-----	----	----	-------	-----	------	-----

VP31	0614430-9761660	siltstone, browngrey	16	1	1	39	2	11	1	19		10	0.19	
VP32	0617183-9761066	siltstone, brown	19			38	1	15		20	2	5	0.15	
VP33	0617430-9760520	siltstone, brown	45			28		1		16		10	0.19	
VP34	0617430-9760520	lapilli-tuff	6		1	1	4	22	1	5	54	1	6	0.16
VP35	0617430-9760520	sandstone-siltstone	15			15	5	33		1	27	1	3	0.16
IA1	0592022-9778800	sandstone, brown				+		++		+		px, ma		
IA2	0591708-9776944	glasstuff, green	4	33	1	31		7		13		11	0.17	
IA3	0593469-9774326	sandstone, green	-	++		++								
IA4	0593469-9774326	lutite, green or red	-	++		++								
IA5	0594036-9775592	lutite, green	-	++		++								
IA6	0591641-9775070	lutite, green	-	++		++								
IA7	0593679-9773032	sandstone, green	-	++		++								
IA8	0593356-9770614	lapilli-tuff	++		V?	-				++		ana		
IA9	0592965-9770284	pelagic lutite	38		1	26	2	3	9	18		1	0.14	
RA1	0526437-9814871	lapilli-tuff	++			-				+		ana?		
RA2	0527459-9815449	crystal-tuff	++	-		+		++	++	+				
RA3	0527301-9815372	lapilli-tuff, layered	+			+		++	++					
RA4	0527301-9815372	lutite	++			?			++					
RA5	0528354-9815916	crystal-tuff	+	++		+		++	++	++				
RA6	0528324-9815954	lutite	-			-			++					
RA7	0528557-9815616	lutite		+		++								
RA8	0530390-9813986	lutite	84									1	15	0.17
RA9	0530390-9813986	lutite	++					+	++					
RA10	0530390-9813986	lutite	++			+		+	+					
RA11	0531816-9814578	tuff	52			?		3	1	1	18	1	24	0.15
RA12	0531816-9814578	siltstone												
RA13	0532033-9814714	lapilli-tuff	++			?		+	++	++				
RA14	0532399-9815148	lutite	+			++			-					
RA15	0532399-9815148	lapilli-tuff	54			1	1	13	3	2	15	3	10	0.11
RA16	0532399-9815149	lapilli-tuff	+			++		?						
RA17	0532958-9815112	lutite		+		++			-					
RA18	0532958-9815112	lapilli-tuff	++	++		+								
RA19		lutite		++		++								
RA20	0533042-9815148	glasstuff, green	27	38	2	11	1	6		5	1	9	0.14	
RA21	0533034-9815354	lapilli-tuff	++			+		?	?					
RA22	0533376-9815386	lutite	++	++		++			-					
RA23		siltstone	++			+		++		-				
RA24	0534002-981558?	lutite	++			+		++	++	+				
RA25	0534254-9815426	lapilli-tuff, layered	++			+		++	+					
RA26	0534613-9815358	tuff		++		++		+						
RA27		lutite	30	15	2	6		5	2		15		25	0.12
RA28	0535683-9815234	lutite	-			++		-						
RA29	0545540-9820466	siltstone				+		-	++	+				
RA30	0536054-9815062	tuff	++			++		++	+					
RA31	0537087-9814939	lutite	-			+		++	++					
RA32	0537158-9815016	lutite	+			++		+	++					
RA33	0537617-9815164	fault zone material				-			++	++				
RA34	0539212-9815808	lutite	++			++		++		-				
RA35	0539786-9815850	tuff/lapilli-tuff, layered	++			+		++	++	+				
RA36	0539780-9816034	lapilli-tuff	++			?		?						
RA37	0540394-9816656	lutite	55	17		1	2	4	?	?	12	1	7	0.13
RA38	0540384-9816150	tuff	+	++		++				-				
RA39	0541603-9816834	siltstone		+		++		++	++	+		opa?		
RA40	0540384-9816150	lapilli-tuff	62	1		7				1	20	1	9	0.11
RA41	0540502-9816708	lapilli-tuff	++			++		++	-					
RA42	0540733-9816988	lutite	++			++		++	?					
RA43	0540992-9817210	siltstone	+			++		-	++	-				
RA44	0541315-9816762	lutite		++		++		+	+	-				
RA45	0541768-9817620	lapilli-tuff?Uplifted fault block				++		++	++	+			wai	
RA46	0541558-9816810	limestone				++		++	+	-				
RA47	0541739-9817386	limestone				++		++	++					
RA48	0542903-9816702	lutite				++		+		-				
RA49	0543035-9816415	lapilli-tuff	+			++		++	-				opa	
RA50	0543034-9815932	tuff	++	+		+		+	+	-				
RA51	0543125-9815840	lutite	-	+		++		+	+	-			opa	
RA52	0543312-9815560	lutite	++			++		+	-	+				
RA53	0543312-9815560	lapilli-tuff	++			+		++	-	+				
RA54	0543660-9815590	lapilli-tuff	39			1	2	18	5	4	20	1	10	0.14
RA55	0544270-9815730	lutite	++	++		+			-					
RA56	0541910-9818186	lutite	++			++		+		+				
RA57	0542069-9818766	lutite	++			++		-		-			amph	
RA58	0542959-9819422	lutite	+			++		+		+				
RB1	0537243-9810524	siltstone	+			+		+		+			ana	
RB2	0539126-9803060	lutite	++			?		?	?	+				
RB3	0538926-9803000	lutite	-			++		-		-				
PC01	0537787-9852478	basalt	-					++		-			amph	
PC02	0536940-9852450	lutite	++			++		+	++	+				
PC03	0536940-9852450	lutite	++			++								
PC04	0536410-9852050	tuff-siltstone	++			-		++	+	+				
PC06	0534579-9853010	lutite	-			++			-					
PC07	0534579-9853010	basalt		?				++	-	+				
PC08	0534579-9853010	pillow basalt						++		+				
PC09	0534579-9853010	lutite	+			++			-					
PC10	0532849-9852158	siltstone	++			+				-				
PC11	0532849-9852158	lapilli-tuff	++					++	++	+				
PC12	0529203-9849206	lapilli-tuff	13				1	41	1	5	38	2	0	0.17
PC13	0529203-9849206	lutite	+			-		-	++					
PC14	0529203-9849206	lapilli-tuff, layered	32					17		1	30	1	19	0.14
PC15	0529203-9849206	lapilli-tuff						+	-	+			ana	
AB1	0532488-9830826	siltstone	+			-		+	++	-				
AB2	0534842-9832878	siltstone	++			+		-	++	+				
AB3	0534842-9832878	lapilli-tuff, layered	++					+	+	++				