

## EXISTENCIA DE PRODUCTOS DE ALTERACIÓN EN GABROS-OLIVÍNICOS DE MOA (HOLGUÍN): EL EJEMPLO DE LA REGOLITA DEL SECTOR "CENTENO"

### OCCURRENCE OF ALTERATION PROCESSES IN OLIVINE-GABBROS FROM MOA (HOLGUÍN): THE EXAMPLE OF THE REGOLITH IN THE "CENTENO" AREA

<sup>1</sup>JOSÉ ANTONIO ALONSO PÉREZ<sup>1\*</sup>, <sup>2</sup>WALDO DAMIÁN LAVAUT COPA<sup>3</sup>, <sup>3</sup>GISELLE VALDIVIA GARCÍA<sup>2</sup>,  
<sup>1</sup>CARBENY RAMIRO CAPOTE MARRERO<sup>1</sup>, <sup>3</sup>INÉS MILIA GONZÁLEZ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Geología y Paleontología, Servicio Geológico de Cuba (IGP-SGC), MINEM, Vía Blanca No. 1002 / Río Luyanó, San Miguel del Padrón, La Habana, Cuba. E-mail: [carbeny@igp.minem.cu](mailto:carbeny@igp.minem.cu)

<sup>2</sup>Centro de Investigaciones para la Industria Minero Metalúrgica (CIPIMM), MINEM, Carretera de Varona # 12028, Km 11/2, Boyeros, La Habana, Cuba. E-mail: [giselle@cipimm.minem.cu](mailto:giselle@cipimm.minem.cu)

<sup>3</sup>Investigador Independiente, Cuba. E-mail: [waldo23@gmail.com](mailto:waldo23@gmail.com)

\*Autor para la correspondencia: José Antonio Alonso Pérez, e-mail: [josea@igp.minem.cu](mailto:josea@igp.minem.cu)

**RESUMEN:** Se presentan resultados del avance de la meteorización que transcurrió en la regolita de gabro olivínico del sector "Centeno" en Moa (prov. Holguín), a partir de cálculos de los índices máfico-ultramáfico (UMIA) y lateritización (IOL), lo que permitió clasificar dicho proceso como de máxima intensidad (grado VI). Por su parte, en el intervalo comprendido entre los 2.00 y 11.50m de profundidad, las diferentes neoformaciones mineralógicas que se identificaron, mediante el empleo de técnicas instrumentales de análisis químico y mineralógico disponibles en el país, señalaron la presencia de minerales arcillosos caoliniticos de estructura desordenada en contenidos de significación (61 - 64% m/m), lo que posibilitó proponer el posterior uso de la regolita como fuente de Materiales Cementicios Suplementarios (MCS) para la obtención de Cemento de Bajo Carbono LC<sup>3</sup>. Como resultado importante de la investigación se consideró la identificación de tres productos de alteración en el gabro olivínico del sector en las zonas de mayor profundidad (13.50 - 16.70m) de la regolita; bowlingita, iddingsita y rodingita, reportándose por vez primera en el complejo cumulativo de gabros "Sagua-Moa-Baracoa" la arcilla esmectítica trioctaédrica saponita de hierro, cuyos termogramas TG-D1TG resultaron en cuanto a la magnitud de sus respectivos endoeftectos, similares a los que se reportaron en una localidad de Hungría.

**Palabras clave:** bowlingita, gabro, iddingsita, regolita, rodingita.

**Recibido:** 05/09/2025

**Aceptado:** 08/11/2025

**Conflicto de intereses:** Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

**Contribución de los autores:** **Conceptualización:** José Antonio Alonso Pérez, Inés Milia González, Waldo Damián Lavaut Copa, Carbeny Ramiro Capote Marrero. **Curación de datos; Análisis formal de datos:** José Antonio Alonso Pérez, Inés Milia González, Waldo Damián Lavaut Copa, Carbeny Ramiro Capote Marrero, Giselle Valdivia García. **Investigación:** José Antonio Alonso Pérez, Inés Milia González, Waldo Damián Lavaut Copa, Carbeny Ramiro Capote Marrero. **Metodología:** José Antonio Alonso Pérez, Waldo Damián Lavaut Copa, Inés Milia González, Carbeny Ramiro Capote Marrero, Giselle Valdivia García. **Administración de la investigación:** José Antonio Alonso Pérez, Waldo Damián Lavaut Copa. **Recursos:** Waldo Damián Lavaut Copa. **Software:** Waldo Damián Lavaut Copa, Giselle Valdivia García. **Supervisión:** Waldo Damián Lavaut Copa, José Antonio Alonso Pérez, Inés Milia González, Carbeny Ramiro Capote. **Validación:** José Antonio Alonso Pérez, Inés Milia González, Waldo Damián Lavaut Copa, Carbeny Ramiro Capote Marrero. **Visualización; Redacción-borrador original; Redacción-revisión y edición:** José Antonio Alonso Pérez.



Este artículo se encuentra bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial (CC BY-NC 4.0). <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



**ABSTRACT:** Results are presented regarding the progress of the weathering process that took place in the gabbro regolith from the "Centeno" sector in Moa (Holguín province), based on calculations of the mafic-ultramafic indices (UMIA) and lateritization (LLI), which allowed its classification as maximum intensity (grade VI). On the other hand, in the interval between 2.00 and 11.50 m depth, the different mineralogical neoformations that were identified in said regolith, through the use of instrumental techniques of chemical and mineralogical analysis available in the country, indicated the presence of kaolinitic clay minerals with a disordered structure at significant contents (61 - 64% m/m), a fact that made it possible to propose the subsequent use of the regolith as a source of Supplementary Cementitious Materials (SCM) for the production of Low Carbon Cement LC<sup>3</sup>. Another important result of the investigation was the identification of three metasomatic alteration products in the olivine gabbro of the sector in the deeper zones (13.50 - 16.70 m) of the regolith; bowlingite, iddingsite and rodingite, reported for the first time in the cumulative gabbro complex of the "Sagua - Moa - Baracoa" massif, the trioctahedral smectitic clay iron saponite, whose TG-D1TG thermograms resulted in terms of the magnitude of their respective endoeffects, similar to those of a locality in Hungary.

**Keywords:** bowlingite, gabbro, iddingsite, regolith, rodingite.

## INTRODUCCIÓN

Lavaut-Copa (2018) entre otros investigadores, plantea que la meteorización se considera un fenómeno supergénico singular en el que intervienen diferentes procesos que interactúan con el protolito, como son: (1) desintegración físico-mecánica; (2) descomposición química; (3) pérdida paulatina de la fábrica (textura-estructura); (4) acumulación y redistribución de diferentes elementos químicos del protolito y evacuación selectiva de los mismos; (6) formación de nuevos minerales (neoformación) y (7) colapso (asentamiento) de la materia mineral en su porción más superficial, lo que en la práctica de la meteorización se conoce como "regolita", término que al unísono introdujo Merrill en el año 1897 el cual proviene del griego (ῥήγος = «manto» y λίθος = «roca»), para nombrar cualquier depósito friable (no consolidado) de génesis in situ («sedentario-residual») o transportado («regolita transportada») sobre la superficie rocosa dura del planeta Tierra -aunque hoy en día también se incluye un origen cosmogénico asociada a los cuerpos celestes tales como la Luna, Marte, los asteroides, etc.- (Taylor & Eggleton, 2001). En los últimos años, su estudio ha cobrado relevancia en campos como la geomorfología, geoquímica, hidrología, exploración minera y evaluación de riesgos geotécnicos (Brantley et. al., 2007; Mcqueen & Scott, 2009; Benítez-Frómata et. al., 2023; Schroeder et. al., 2022; Chardon, 2023; Sergeev & Collins, 2024; Chardon et. al., 2025).

En Cuba, la meteorización motivado por las condiciones de clima tropical húmedo y los millones de años de procesos geológicos de alteración que tuvieron lugar en diversos tipos de rocas, generaron a su vez regolitas que alcanzan en algunos casos varios metros de espesor, con presencia adicional de metales críticos (MC) de interés económico presentes en su composición mineral, ejemplo de ello se mencionan las lateritas (Fe-Ni-Co) desarrolladas sobre rocas ultramáficas en las zonas de Nicaro y Moa asociadas a elementos del grupo del platino (EGP), tierras raras (ETR) y escandio (Sc) en menores cuantías (Proenza, 2015).

Según refieren Capote-Marrero y Lavaut-Copa (2019) y Lavaut-Copa et. al. (2022), los resultados del proyecto (I+D) que se ejecutó en el IGP-SGC durante el periodo 2015-2019: "Confección de mapas mineragénicos a escala 1: 250 000 de Cuba", vinculado al estudio de las regolitas de meteorización y la presentación final del mapa mineragénico de los recursos de minerales industriales (RMI) de la estructura tectono-geológica en Cuba, permitieron en lo que respecta al basamento geológico y contexto de ambientes geotectónicos donde se desarrollaron dichas regolitas, realizar el análisis mineragénico de las mismas, de igual forma, caracterizar y clasificar 63 diferentes tipos en 22 ambientes geotectónicos del país con niveles de productividad en recursos minerales industriales (RMI) y mineralizaciones metálicas, destacándose por su diversidad

9 tipos de regolitas caolínificadas entre las que destacan las de los sectores "Cayo Guam" y "Centeno" vinculadas al complejo cumulativo de gabros de la región de Moa en la provincia de Holguín.

Por lo expuesto y dada la importancia que para el país representa la búsqueda de nuevas fuentes nacionales y su posterior empleo como origen de materia prima, se planteó como objetivo general del presente trabajo: Monitorear el avance de la meteorización que transcurrió en la regolita de gabro del sector "Centeno" a través de las diferentes neoformaciones que en la misma se generaron, asimismo proponer sus potencialidades en usos más demandados por la industria local de Moa.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

Durante el desarrollo de la investigación, se seleccionó un diseño cuantitativo analítico-descriptivo, basado en el uso de datos numéricos, el posterior análisis de los mismos a partir de las muestras seleccionadas con la finalidad de obtener conclusiones objetivas y medibles, que permitan, por una parte, determinar la composición, estructura e intensidad de la meteorización y caracterizar las neoformaciones que transcurrieron durante el avance del mismo, de forma paralela, proponer las potencialidades de uso como una forma de contribuir al futuro desarrollo sostenible de la industria de los materiales de construcción en el municipio de Moa.

### **Contexto geológico regional y selección de muestras**

La regolita de gabro del sector "Centeno", se localiza en el macizo Sagua-Moa-Baracoa en la provincia de Holguín; coordenadas Lambert: X = 2064096; Y = 7500125, Sistema Cuba Sur (código: Omoa-a). Dentro del complejo de rocas, destaca, por su interés actual, las litologías propias del complejo cumulativo básico pertenecientes a la corteza oceánica, representada a su vez por extensos cuerpos y diques de gabroides con rasgos propios de gabros bandeados en la base del complejo, mientras que hacia la parte superior se aprecia la textura propia de los gabros isotrópicos (Njila y Díaz-Martínez, 2016). En la [figura 1](#) se muestra la imagen de la zona donde se tomaron las muestras a diferentes profundidades. De igual forma, en la [tabla 1](#) señalan las litologías e intervalos de profundidad donde se tomaron las diferentes muestras (Lavaut-Copa et. al., 2022).



**Figura 1.** Imagen que muestra la regolita de gabro del sector "Centeno" en Moa (Omoa-a)

**Tabla 1.** Intervalos de profundidad y clasificación litológica de las muestras seleccionadas (Ref: Lavaut-Copa et. Al. 2018)

Muestra código	Intervalo de profundidad (m)	Sub-tipo litológico
Omoa a-7	0.00 - 0.80	Laterita típica ferricrética
Omoa a-6	0.80 - 2.00	Saprolita ferroaluminica nodular
Omoa a-5	2.00 - 4.50	Saprolita aluminica no-nodular
Omoa a-4	4.50 - 11.50	Saprolita fina aluminica
Omoa a-3	11.50 - 13.50	Saprolita gruesa típica
Omoa a-2	13.50 - 13.70	Silcreta masiva
Omoa a-1	13.70 - 16.70	Saproca de gabro

## Equipos y selección de parámetros

### Análisis químico de elementos mayoritarios

En las [tablas 2 y 3](#) se muestran los parámetros de operación del equipo ICP-OES que se utilizó para las determinaciones químico-elementales de las muestras seleccionadas y posterior cálculo de los índices de alteración máfico-ultramáfico (UMIA) y lateritización (IOL), respectivamente.

**Tabla 2.** Parámetros de operación seleccionados para el espectrómetro ICP - OES del laboratorio "Elio Trincado" de la Empresa Geominera Oriente

Parámetro	Valor
Modo de observación	Axial
Modelo del nebulizador	Lichte modificado
Tipo cámara de nebulización	Ciclónica, vidrio
Antorcha cuarzo (Ø interior)	2.5 mm
Tiempo de lectura	28 segundos
Generador de radiofrecuencia	27.12 MHz
<b>Potencia radiofrecuencia incidente</b>	
Alta Mg II/ Mg I	1400 W
Baja Mg II/Mg I	900 W
Flujo de Argón (plasma)	12 L /min
Flujo Argón (nebulizador)	
Alta Mg II/ Mg I	0.8 L/min
Baja Mg II/Mg I	1.3 L/min
Flujo Argón (auxiliar)	1.0 L/min
Velocidad aspiración muestra	2.0 mL/min

**Tabla 3.** Índices de meteorización utilizados en la investigación

Índice	Fórmula de cálculo	Referencia
Alteración Ultramáfico UMIA	$100 * [(Al_2O_3 + Fe_2O_3(t)) / (Al_2O_3 + MgO + CaO + Na_2O + Fe_2O_3_T)]$	Aiglsperger et al. (2015)
Lateritización (IOL)	$100 * [(Al_2O_3 + Fe_2O_3 \text{ total}) / (Al_2O_3 + SiO_2 + Fe_2O_3_T)]$	Babechuk et al. (2014)

## Composición mineral

Los parámetros de operación del difractómetro de polvos, así como del termoanalizador que se empleó durante la investigación se muestran en las [tablas 4 y 5](#), respectivamente.

**Tabla 4.** Parámetros instrumentales de operación del difractor X'Pert PRO (CEDINIQU, Moa)

Geometría del goniómetro	Vertical
Sistema de focalización	Bragg-Brentano
Radiación (K $\alpha$ )	Cu
Filtro	Ni
Diferencia de potencial	40 kV
Corriente anódica	30 mA
Calibración del equipo	Silicio (pastilla)
Registro angular	4 - 80°C (2 $\theta$ )
Constante de tiempo	5 segundos

**Tabla 5.** Parámetros de operación del termoanalizador NETZSCH STA 449 - F3 (CIPIMM)

Régimen de calentamiento	Dinámico
Masa de muestra (mg)	Se consigna en cada termograma
Masa del material de referencia	60.00 mg ( $\alpha$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )
Tipo de crisoles	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (tamaño estándar)
Material del horno	SiC (T <sub>amb</sub> - 1500°C)
Gas en cámara de calentamiento	Aire
Flujo gas inerte protector	200 ml/min (Ar)
Velocidad de calentamiento	10.0 K /min
Sensibilidad de la termobalanza	0.001 mg - 35.0 g
Sensibilidad termogramas ATD y TG	0.001 - 5000 $\mu$ V/mg
Tiempo de medición	1h 37 min y 10 seg.
Intervalo de temperatura	27-1000°C

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Análisis químico

En las [tablas 6 y 7](#), se reportan los resultados del quimismo de mayores en las siete muestras de regolita seleccionadas y sus respectivos cálculos de los índices de lateritización y máfico - ultramáfico (IOL, UMIA).

**Tabla 6.** Resultados del análisis químico de elementos mayores en las muestras de la regolita de gabro del Sector "Centeno". Fuente: [Lavaut-Copa et al., \(2022\)](#)

Desde (m)	Hasta (m)	Mtra	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	MgO (%)	Na <sub>2</sub> O (%)	FeO (%)	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	PPI (%)
0,00	0,80	a - 7	9.12	6.44	67.80	0.74	0.69	< 0.1	0.10	1.24	13.45
0,80	2,00	a - 6	18.30	22.60	41.00	0.84	0.96	< 0.1	1.03	1.21	13.11
2,00	4,50	a - 5	24.17	31.32	28.91	0.85	0.74	< 0.1	0.15	0.55	12.41
4,50	11,50	a - 4	27.59	43.80	13.87	0.78	0.76	< 0.1	0.10	0.07	12.53
11.50	13.50	a - 3	15.53	41.50	12.83	4.79	9.74	< 0.1	2.88	0.25	10.66
13,50	13,70	a - 2	1.39	85.50	7.21	0.79	2.04	< 0.1	0.10	0.47	2.92
13.70	16.70	a - 1	15.62	49.60	6.37	9.98	9.37	0.43	2.62	0.07	5.24

Los resultados de la [tabla 7](#) confirmaron la elevada intensidad del proceso de meteorización que se generó en la regolita (grado VI), motivado por los valores notables del índice de alteración máfico-ultramáfico desde la zona de saprolita fina alumínica (UMIA=91.05%), hasta la zona superficial de laterita típica ferricrética (UMIA=94.41%). De igual manera, el valor del índice de lateritización (IOL=82,76%) se justificó por la abundancia relativa de minerales oxidados de hierro (III) que se identificaron por DRX y Análisis Térmico en contenidos de significación (ver [tabla 6](#)), resultado que se considera similar al que reportaron [Alonso-Pérez et al., \(2024\)](#) en una muestra de la zona final de regolita en el sector "Cayo Guam" de la propia región de Moa (IOL: 79,21%).

**Tabla 7.** Resultados de los índices de meteorización (IOL, UMIA) en muestras de regolita de gabro de la localidad "Centeno". Fuente: Lavaut-Copa et al. (2022)

Muestra	Intervalo de Profundidad (metros)	Zonalidad Litológica	IOL (%)	UMIA (%)
OMoa a-7	0.00 - 0.80	Laterita típica ferricrética	82,76	94,41
OMoa a-6	0.80 - 2.00	Saprolita ferroaluminica nodular	54,04	91,78
OMoa a-5	2.00 - 4.50	Saprolita aluminica no-nodular	44,56	92,42
OMoa a-4	4.50 - 11.50	Saprolita fina aluminica	32,94	91,05
OMoa a-3	11.50 - 13.50	Saprolita gruesa típica	26,64	43,40
OMoa a-2	13.50 - 13.70	Silcreta masiva	4,01	47,81
OMoa a-1	13.70 - 16.70	Saproca de gabro	20,26	33,44

Por otra parte, en la **tabla 8** los resultados obtenidos a partir de los 11.50m hasta 2.00m de profundidad de la regolita, incrementan las potencialidades de uso y explotación de la regolita en este caso no solo para su empleo como materia prima en la industria de cerámica roja refractaria y materiales cementicios suplementarios (MCS) para la producción de Cemento Bajo Carbono LC<sup>3</sup>, según indica la Norma Cubana correspondiente (NC TS 528: 2013).

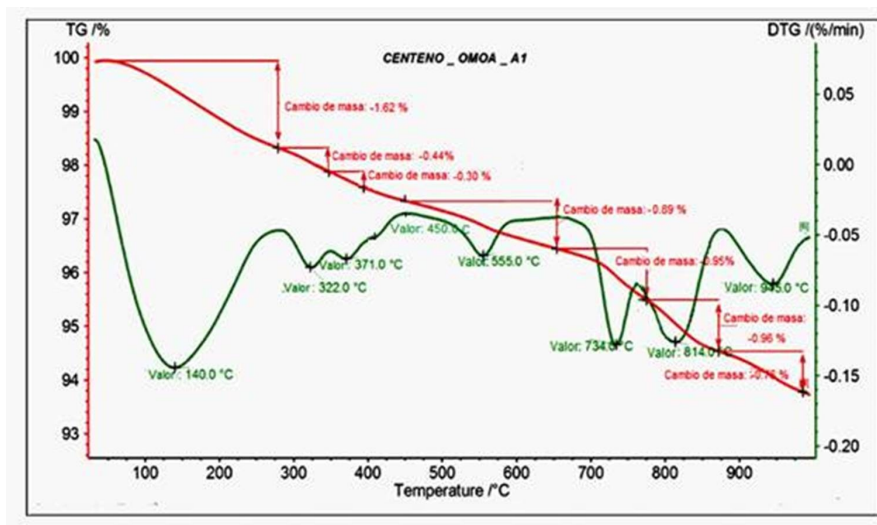
**Tabla 8.** Intervalos de muestreo de la regolita del sector "Centeno" que cumplen la Norma Cubana (NC TS 528: 2013) para su posterior empleo como fuente de Materiales Cementicios Suplementarios (MCS)

Muestra	Profundidad (m)	% Caolinita	% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiO <sub>2</sub>	% PPI	% Na <sub>2</sub> O	% CaO	% SO <sub>3</sub>
Omoa-a5	2.00 - 4.50	61	24.17	0.77	12.41	< 0.1	0.85	n. d
Omoa-a4	4.50 - 11.50	64	27.59	0.63	12.53	< 0.1	0.78	n. d
NC TS 528: 2013 (MCS)		40	> 18.0	> 0.3	> 7.0	< 3.0	3.0	3.0

## Composición mineral de las muestras

### Saproca de gabro (Omoa a-1; prof.: 13.70 -16.70 m)

En la **figura 2** se muestran los termogramas combinados de termogravimetría (TG) y la derivada termogravimétrica (DTG) que se lograron en la muestra de mayor profundidad, constatándose la elevada complejidad de las fases que de naturaleza tanto endotérmica como exotérmica se identificaron.



**Figura 2.** Termogramas TG - DTG de la saproca de gabro (Omoa a-1); prof.: 13.7-16.7m

En la **tabla 9** los endoefectos que aparecen en el termograma DTG en:  $T_{m\acute{a}x.} = 555^{\circ}\text{C}$  y  $814^{\circ}\text{C}$ , indican presencia de la arcilla del grupo de esmectitas trioctaédricas con sustitución isomórfica de iones hierro por magnesio (2:1:1) saponita de hierro; fórmula global;  $(\text{Na}, \text{Ca})_{0,3}(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+})_3(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4(\text{H}_2\text{O})$ . Ambos se consideran en cuanto a intensidades y magnitud de sus respectivas pérdidas de masa, similares a los que se reportaron en una muestra de cantera de la localidad "Prága Hill" en Hungría (Földvari, 2011). Como aspecto de interés se señala que dicha esmectita constituyó el primer reporte para este tipo de esmectita en el complejo cumulativo de gabros del macizo Sagua - Moa - Baracoa.

Por otra parte, la mezcla de serpentina lizardita, arcilla magnesial y talco, caracterizó el primer producto de alteración "bowlingita" formado durante el metasomatismo que transcurrió en el gabro olivínico de la localidad (Adobe System, 2022). De igual forma la mezcla de saponita y goethita señala además la presencia del producto final del propio proceso conocido como "iddingsita" según plantean Churchman et al., (2012) a través de la siguiente secuencia de neoformaciones:

(- $\text{Mg}^{2+}$ , $\text{Fe}^{2+}$ )		
Olivino, piroxeno protolito gabro	→	serpentina, clorita-Fe y/o talco "bowlingita"
	→	saponita de hierro + goethita (1) "iddingsita"

**Tabla 9.** Interpretación de los resultados de Análisis Térmico (Omoa a-1)

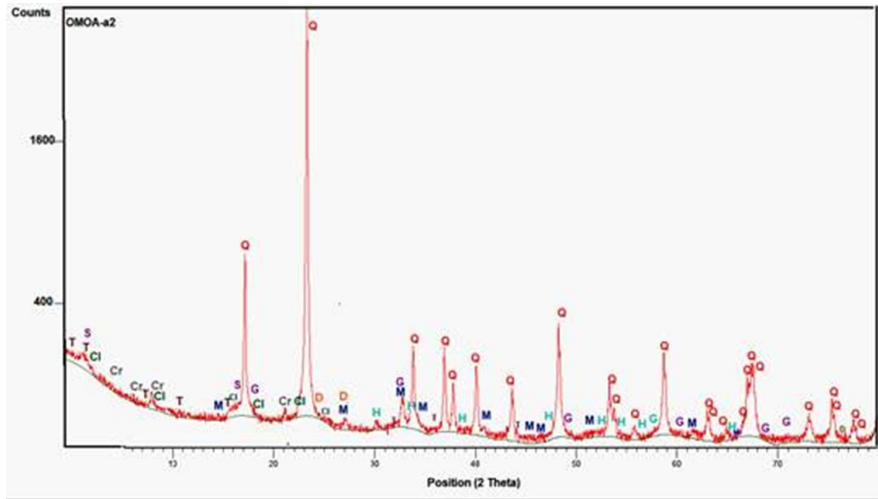
Tipo de efecto	Temp. máx. D1TG ( $^{\circ}\text{C}$ )	Pérdida de masa TG (%)	Proceso térmico asociado	Factor Esteq. cálculo	% Mineral*
End.	140	1.62	Pérdida de agua interlaminar, arcilla saponita de hierro	---	---
End.	322	0.44	Pérdida de agua estructural ( $\text{OH}^-$ ) alumogoethita; 10% mol Al	9.70	4
End.	371	0.30	Pérdida de agua estructural alumogoethita; 20% mol Al	9.23	3
Exot.	450	0.40	Oxidación de iones $\text{Fe}^{2+}$ --- $\text{Fe}^{3+}$ saponita	---	---
End.	555, 814	1.85	Pérdida de agua estructural saponita [enlaces $\text{Fe}^{3+}$ --- $\text{OH}^-$ y $\text{Mg}^{2+}$ --- $\text{OH}^-$ ]	27.0	50
End.	734	0.95	Pérdida de agua estructural serpentina antigorita	13.19	12
End.	945	0.76	Pérdida de agua estructural arcilla talco	21.05	16

\* Resultados semicuantitativos; Error relativo:  $\pm 10\%$

## Silcreta masiva (Omoa a-2; prof.: 13.50 -13.70 m)

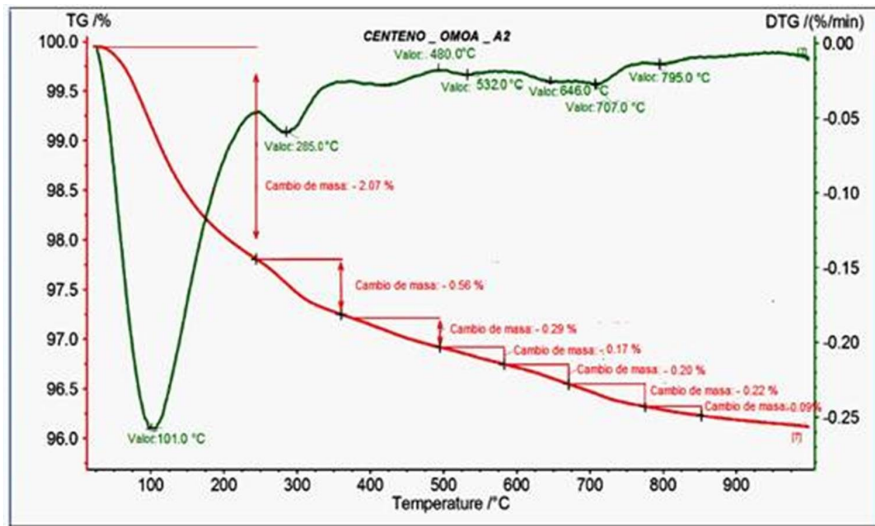
En las **figuras 3 y 4** se presentan el difractograma de polvo (DRX) y los termogramas combinados de termogravimetría (TG) y primera derivada termogravimétrica (DTG) del conjunto de fases minerales térmicamente activas que se identificaron en la muestra. Como aspecto de interés se detectó por DRX posible presencia de una arcilla interstratificada regular del tipo montmorillonita-clorita (nombre: tosudita), dado por la aparición de un pequeño máximo de difracción en el intervalo angular entre  $4.00 - 5.00^{\circ}$  ( $2\theta$ ).

Por otra parte, los resultados que se lograron mediante Análisis Térmico (Tabla 10), confirmaron la presencia de ambos productos de alteración metasomática reportados con anterioridad pero en menores cuantías presentes en dicha muestra, dado por la menor intensidad de los endoefectos que se detectaron, asimismo se señala que la goethita presenta muy bajo orden cristalino debido al desplazamiento de la temperatura máxima del endoefecto de pérdida de agua estructural desde  $310^{\circ}\text{C}$  hasta  $285^{\circ}\text{C}$ , respectivamente (Földvari, 2011).



Leyenda: Q-cuarzo; M- magnetita; T-tosudita (arcilla interstratificada montmorillonita-clorita) S-saponita; A-serpentina (crisotilo); H- hematita; G-goethita; D-piroxeno (diópsido); Cl- clorita (clinocloro)

**Figura 3.** Difractograma de silcreta masiva (Omoa a-2); prof.: 13.5 - 13.7m



**Figura 4.** Termogramas combinados TG - DTG de silcreta masiva (omoaa-2); prof.: 13.5 - 13.7m

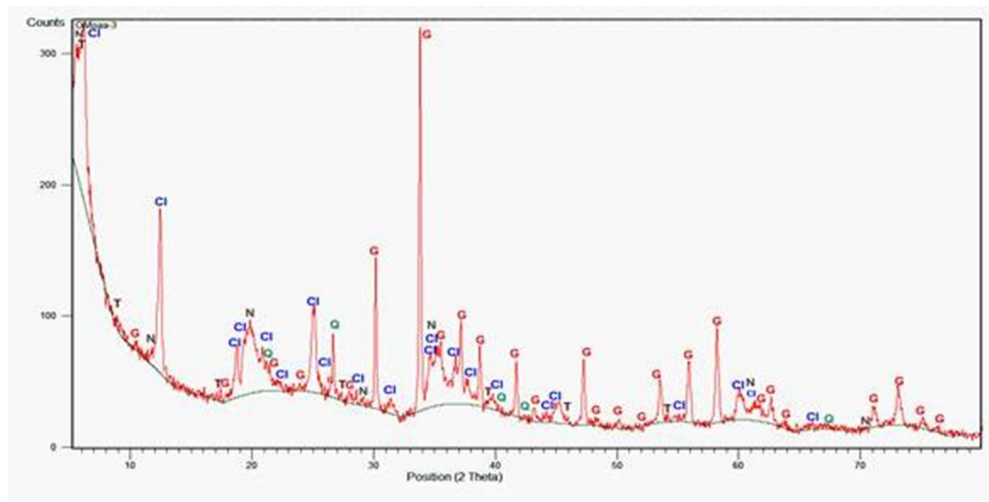
**Tabla 10.** Interpretación de los resultados de Análisis Térmico (muestra Omoa a-2).

Tipo de efecto	Temp. máx. D1TG (°C)	Pérdida de masa TG (%)	Proceso térmico asociado	Factor Esteq. cálculo	Mineral* %
End.	101	2.07	Pérdida de agua adsorbida (H <sub>2</sub> O)	---	---
End.	285	0.56	Dehidroxilación red goethita mal cristalizada	9.90	5
Exot.	480	---	Oxidación de iones Fe <sup>2+</sup> ↔ Fe <sup>3+</sup>	---	---
End.	532, 795	0.38	Dehidroxilación red dioctaédrica saponita [Fe <sup>3+</sup> -- OH <sup>-</sup> ; Mg <sup>2+</sup> -- OH <sup>-</sup> ]	27.0	3
End.	646	0.17	Dehidroxilación red dioctaédrica arcilla clorita	7.50	1
End.	707	0.22	Dehidroxilación red octaédrica serpentina (lizardita)	7.70	2

\*Resultados semicuantitativos; Error relativo: ± 10%

## Saprolita gruesa típica (Omoa a-3; prof.: 11.50 -13.50 m)

En el difractograma de polvos correspondiente a dicha muestra (Figura 5), la arcilla nontronita constituye la fase cristalina fundamental, acompañada de granate (variedad grosularia), clorita (variedad; clinocloro) y goethita en contenidos de significación, no obstante, no se descarta al igual que en la muestra anterior, la presencia de una arcilla interstratificada de estructura regular tosudita debido al máximo contiguo que se observó a valores angulares entre 4.00°- 5.00° (2θ).



Leyenda: N- esmectita dioctaédrica (nontronita); G-granate grosularia; Cl- clorita; Q- cuarzo; Go-goethita T-tosudita (arcilla interstratificada montmorillonita-clorita)

**Figura 5.** Difractograma de saprolita gruesa típica (muestra omoaa-3); prof.: 11.5-13.5m

Con respecto a lo anterior, Corona-Rodríguez et. al. (2014) reportaron en rodingitas vinculadas a rocas de diques de gabro de la zona de "Yaguaneque" en la propia región de Moa, ausencia del granate grosularia, resultado que justificaron por la transformación retrógrada de dicho mineral en clorita, sin embargo, en la zona de "Centeno" sí se detectó presencia del granate grosularia en el difractograma, hecho que por tanto explicaría la ocurrencia del evento de metasomatismo cálcico contemporáneo a la serpentinización del gabro-olivínico y los minerales característicos de la facies de esquistos verdes según plantea Ortíz-Hernández (1999) entre otros especialistas.

Por su parte, los resultados que se lograron mediante el empleo de las variantes de Análisis Térmico (Figura 6) indican presencia de la arcilla esmectítica nontronita y clorita de hierro como minerales térmicamente activos fundamentales, acompañados de muy poca goethita (Tabla 11).

**Tabla 11.** Interpretación de los resultados de Análisis Térmico (Omoa a-3)

Tipo de efecto	Temp. máxima D1TG (°C)	Pérdida masa TG (%)	Proceso térmico asociado	Factor de cálculo	% Mineral*
Endotérmico	127	8.58	Pérdida de agua interlamina arcilla nontronita	---	---
Endotérmico	310	0.24	Dehidroxilación red estructural de goethita	9.90	2
Endotérmico	495	1.98	Dehidroxilación red dioctaédrica nontronita	27.0	53
Endotérmico	568	2.38	Dehidroxilación red dioctaédrica clorita-Fe	10.5	25
Endotérmico	802	0.58	Reorganización red dioctaédrica nontronita	---	---

\*Resultados semicuantitativos; Error relativo ± 10%

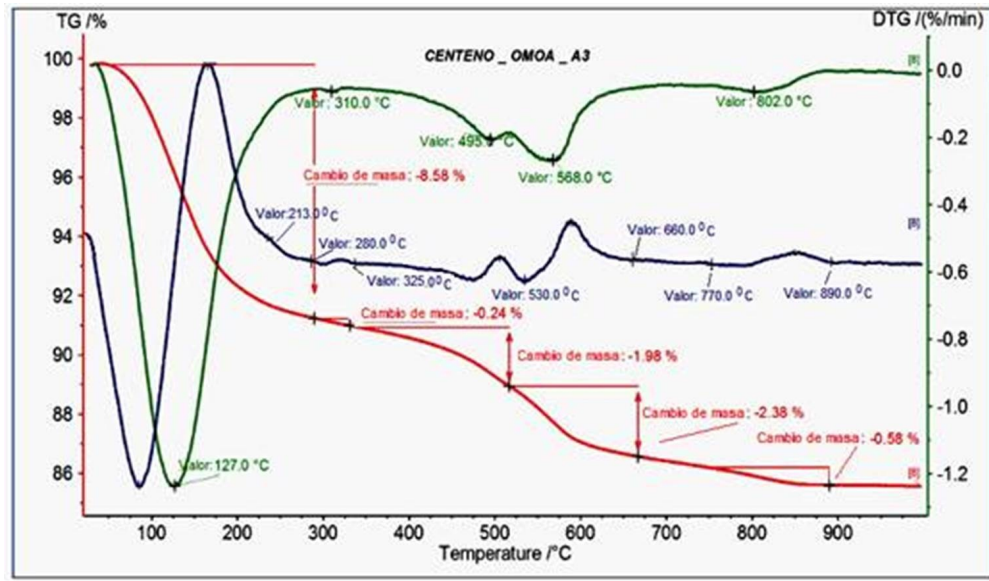
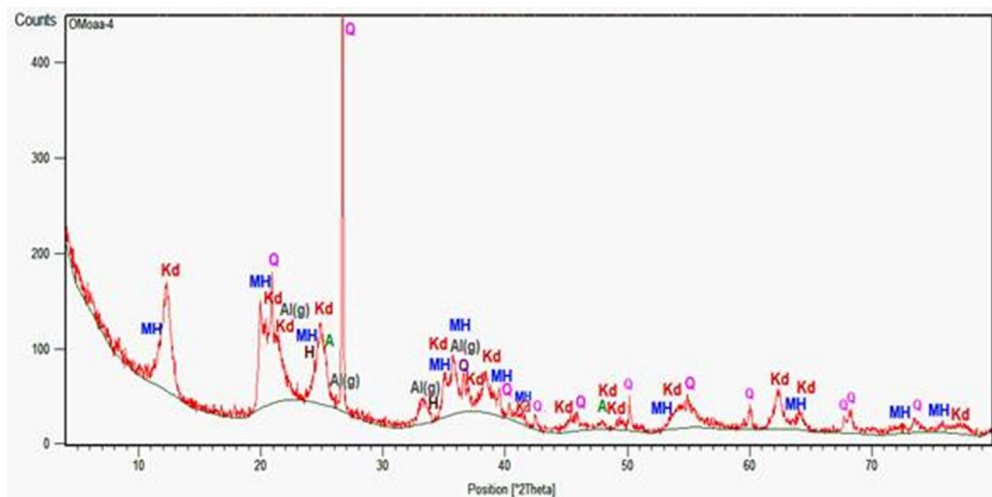


Figura 6. Termogramas TG - DTG - DDTG de sapolita gruesa típica (Omoaa-3); prof.: 11.5 - 13.5m

### Sapolita fina alumínica (Omoa a-4; prof.: 4.50 - 11.50m)

En la Figura 7, el difractograma de los minerales presentes en dicha muestra resultó representativa del proceso inicial de caolinización que tuvo lugar en la regolita del sector, dado por el predominio de mezclas de minerales caoliníticos de estructura desordenada y halloysita respectivamente. A su vez, el comportamiento térmico de la muestra (Figura 8, Tabla 12) corroboró el resultado que también arrojó la difracción, al unísono justificaron las pruebas satisfactorias que ejecutó Brocard-Rivera (2011) a escala semindustrial en la Empresa de Cerámica Roja Refractaria de Moa a partir de muestras representativas de la regolita del sector.



Leyenda: Kd-caolinita desordenada (Md); MH-metahalloysita (halloysita 7Å); Al(G)-alumogothita; Q-cuarzo; H-hematita; A-anatasa

Figura 7. Difractograma de sapolita fina alumínica (Omoa a-4); prof.: 4.5 -11.5m

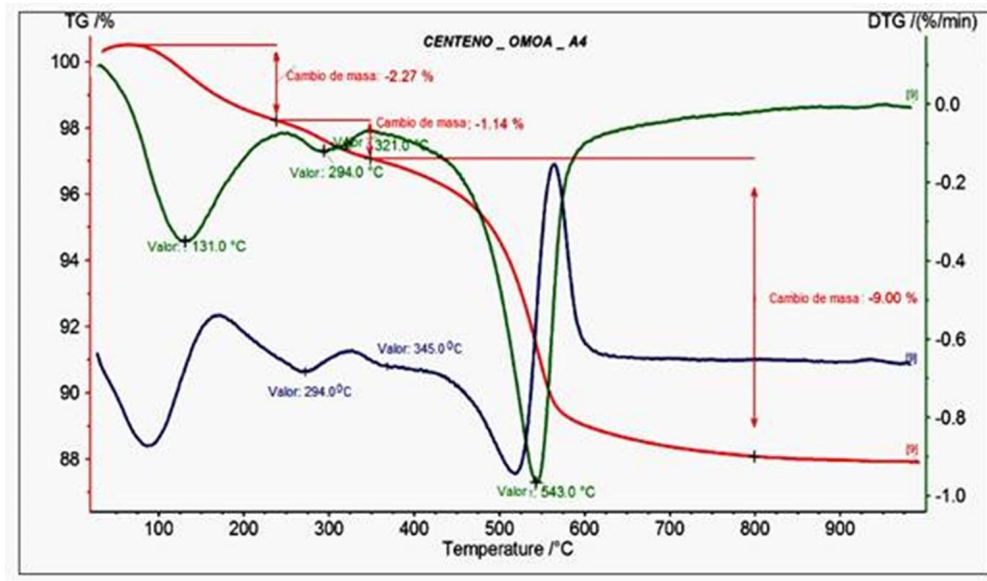


Figura 8. Termogramas TG - DTG - DDTG de saprolita fina alumínica (Omoa a-4); prof.: 4.5 - 11.5m

Tabla 12. Interpretación de los resultados de Análisis Térmico (Omoa a-4)

Tipo de efecto	Proceso térmico asociado	Temp. Máxima D1TG (°C)	Pérdida masa TG (%)	Factor de cálculo	% Mineral*
Endotérmico	Pérdida de agua de composición arcilla halloysita	131	2.27	---	---
Endotérmico	Dehidroxilación red goethita	294	0.74	9.90	7
Endotérmico	Dehidroxilación red alumogoethita; 10% mol Al	321	0.40	9.70	4
Endotérmico	Dehidroxilación red mezclas de caolinitas	543	9.00	7.17	64

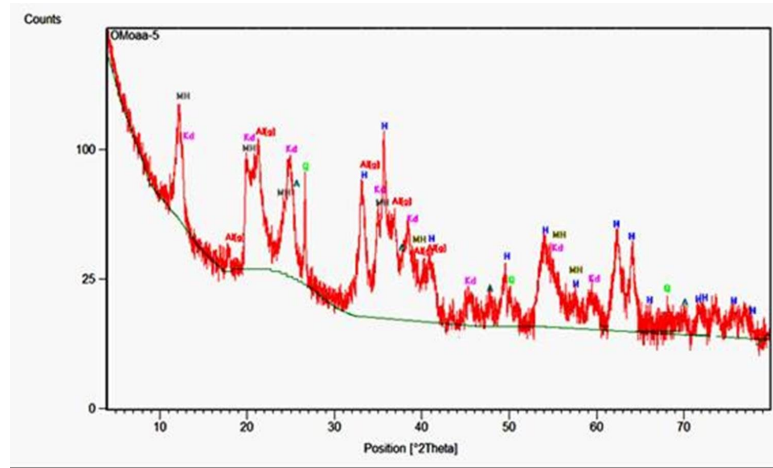
\* Resultados semicuantitativos; Error relativo ± 10%

### Saprolita alumoferrosa no-nodular (Omoa a-5; prof.; 2.00 - 4.50m)

El difractograma de polvos (Figura 9) mostró un comportamiento cualitativo similar al de la muestra anterior en lo que se refiere a las fases cristalinas identificadas, con diferencias en relación con el cálculo del contenido de caolinita, la cual se obtuvo en este caso por vía química y posterior recálculo mineralógico a partir del contenido de aluminio de la muestra (% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 24.17) y el de la propia caolinita monomineral (% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 39.50). Dicho resultado arrojó 61% (m/m) de caolinita, hecho que incrementa el intervalo útil de explotación de la regolita para su posterior empleo en las mencionadas aplicaciones industriales.

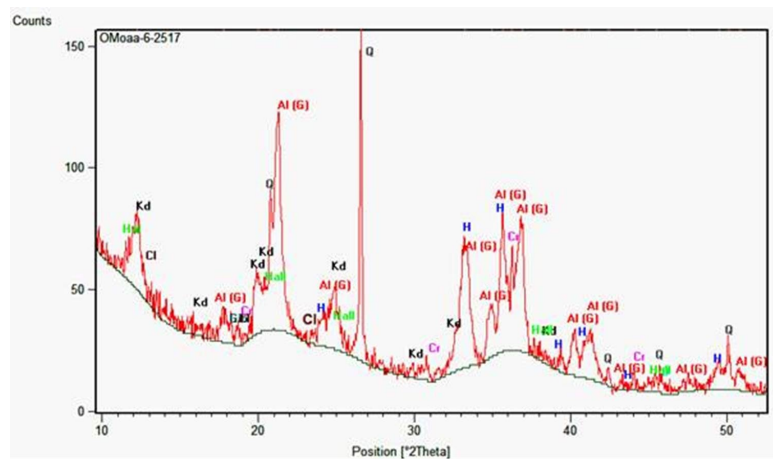
### Saprolita ferroalumínica nodular (Omoa a-6; prof.: 0.80 - 2.00 m)

Los resultados que se lograron por DRX (Figura 10) indican el predominio de hematita y alumogoethita como fases fundamentales, mezclas de halloysita (7Å) y caolinita desordenada, con cromita, gibbsita, cuarzo y rutilo en bajos contenidos, mientras que los que se reportaron por Análisis Térmico (Figura 11) confirmaron que las fases térmicamente activas principales lo constituyen la alumogoethita y caolinita respectivamente.



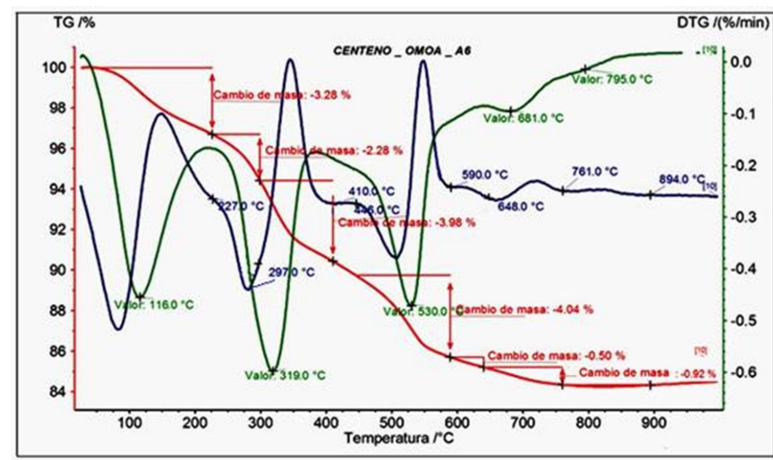
**Leyenda:** Kd-caolinita desordenada (Md); MH-metahalloysita (halloysita 7Å); Al(G)-alumogoethita; Q-cuarzo; H-hematita; A-anatasa

**Figura 9.** Difractograma de saprolita alumoferrosa no nodular (mtra. Omoa a-5); prof.: 2.00 - 4.50m



**Leyenda:** Al(g)- alumogoethita; H- hematita; Kd- caolinita desordenada; Hal (halloysita); Cr- cromita; Q- cuarzo; Cl- clorita

**Figura 10.** Difractograma de saprolita ferroaluminica nodular (mtra omoaa-6); prof.: 0.8 - 2.0m



**Figura 11.** Termogramas combinados TG-DTG-DDTG de saprolita ferroaluminica nodular (Omoa a-6); prof. 0.8 - 2.00 m

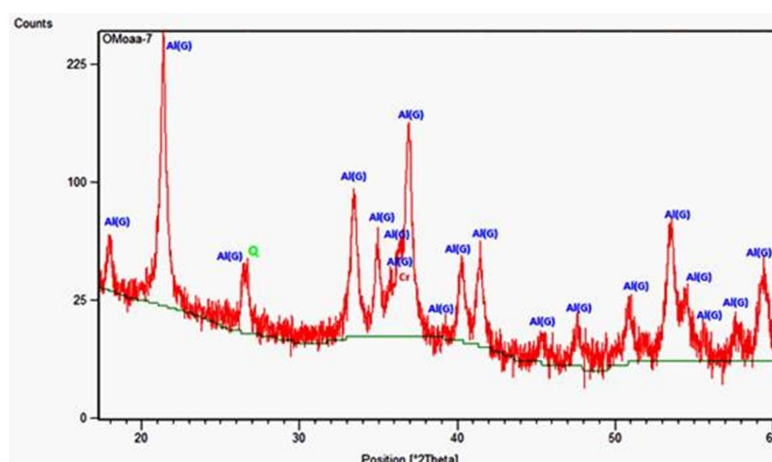
**Tabla 13.** Resultados de los resultados de Análisis Térmico (Omoa a-6)

Naturaleza del efecto	Proceso térmico asociado	Temp. máxima DTG (°C)	Pérdida masa TG (%)	Factor de cálculo	% Mineral*
Endotérmico	Pérdida de agua adsorbida (H <sub>2</sub> O)	116	3.28	---	---
Endotérmico	Dehidroxilación red gibbsita	297 (D2TG)	2.28	2.89	7
Endotérmico	Dehidroxilación red alumogoethita; 10% mol Al	319	3.98	9.71	39
Endotérmico	Dehidroxilación red octaédrica caolinita	530	4.04	7.17	29
Endotérmico	Dehidroxilación red octaédrica clorita	648, 681	1.42	7.50	11
Endotérmico	Reorganización estructural arcillas	795	---	---	---

\*Resultados semicuantitativos; Error relativo: ± 10%

### Laterita típica ferricrética (Omoa - 7, prof.: 0,00-0,80 m)

El difractograma que corresponde a la zona superficial de regolita (Figura 12), señaló la presencia de alumogoethita como fase mayoritaria, motivado por el desplazamiento del máximo de difracción fundamental desde  $d = 2.45$  hasta  $2.43 \text{ \AA}$ . Por su parte, los endoeftos que se identificaron en los termogramas TG-DTG-DDTG (Figura 13), confirmaron la especiación de minerales que se reportaron por DRX (Tabla 14).



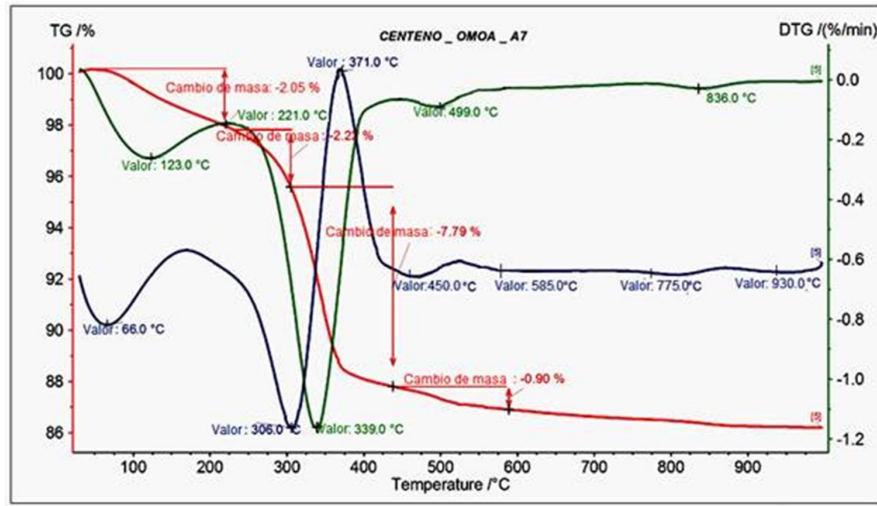
Leyenda: Al(G)-alumogoethita; Q-cuarzo; Cr-cromita

**Figura 12.** Difractograma de laterita típica ferricrética (mtra. Omoaa-7); prof.: 0-0.8 m

**Tabla 14.** Interpretación de resultados de Análisis Térmico (Omoa a-7)

Naturaleza del efecto	Proceso térmico Asociado	Temp. máxima D1TG (°C)	Pérdida de masa TG (%)	Factor de cálculo	% Mineral*
Endotérmico	Pérdida de agua adsorbida (H <sub>2</sub> O)	123	2.05	---	---
Endotérmico	Dehidroxilación red alumogoethita, 18% mol Al	339	7.79	9.20	72
Endotérmico	Dehidroxilación red octaédrica caolinita	499	0.90	7.17	6
Endotérmico	Reorganización estructural caolinita	836	---	---	---

\* Resultados semicuantitativos; Error relativo: ± 10%



**Figura 13.** Termogramas combinados TG - DTG - DDTG de laterita típica ferricrética (mtra. OMOA-7); prof.: 0.0-0.8 m

## CONCLUSIONES

Los valores del índice de meteorización reportados en muestras de regolita de la localidad de “Centeno”, confirmaron la elevada intensidad del proceso (grado VI), mientras que el incremento del índice de lateritización en la zona superficial justificó el predominio de alumo-goethita y hematita como fases principales de hierro (III) presentes en su composición mineral.

La abundancia relativa de minerales caolínicos de estructura desordenada que se identificaron en el intervalo entre 2.00 - 11.5m de profundidad, posibilita la diversificación de usos de la regolita del sector como fuentes de materia prima para su empleo en la industria de cerámica roja refractaria y MCS para la obtención de cemento LC<sup>3</sup> en el municipio de Moa.

El empleo de tres variantes combinadas de Análisis Térmico en las muestras de saproca, silcreta masiva y saprolita gruesa (prof.: 11.50 - 16.70m), confirmaron la neoformación de tres productos de alteración metasomática en la regolita de gabro del sector: bowlingita (serpentina crisotilo + arcilla + talco); iddingsita (saponita de hierro + goethita) y rodingita (granate grosularia + clorita) respectivamente.

Como novedad de la investigación se consideró el primer reporte de la esmectita trioctaédrica saponita de hierro en regolitas del complejo cumulativo de gabros del macizo “Sagua - Moa - Baracoa”, cuyos termogramas TG-D1TG resultaron en cuanto a la magnitud de sus respectivos endoeftos, similares a los que se reportaron en una muestra de cantera en Hungría.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adobe Systems. (2022). Olivine.pdf. Adobe Acrobat Pro DC. URL. <https://www.ufrgs.br/minmicro/Olivine.pdf>
- Aiglsperger, T., Proenza, J.A, Lewis, J.F, Labrador, M, Svojtka, M, Rojas, Purón A, Longo, F, Đurišová, J. (2015). Critical metals (REE, Sc, PGE) in Ni laterites from Cuba and the Dominican Republic. *Ore Geology Reviews*. <https://doi.org/10.1016/oregeorev.2015.10.010>
- Alonso, Pérez, J.A., Lavaut, Copa, W.D, Valdivia, García, G, Torres, La Rosa, M, Milia, González, I, Capote, Marrero, C.R, Casañas, Díaz, X, Alonso, Rodríguez, R. (2024). Valoraciones acerca del avance de la meteorización en la regolita del sector “Cayo Guam” en Moa (prov. Holguín). *Geoinformativa*, (17) enero - diciembre. <https://cu-id.com/2277/v17e02>

- Babechuk, M.G., Widdowson, M., Kamber, B.S. (2014). Quantifying chemical weathering intensity and trace element release from two contrasting basalt profiles, Deccan Traps, India. *Chemical Geology*, 363. 56-75.
- Benítez, Frómeta, P de J., Estévez Cruz, E., Peñalver, L.L (2023). Cartografía de los depósitos cuaternarios a partir de datos de pozos en el NNW de la Cordillera de Guaniguanico, Cuba. *Cuaternario y Geomorfología*. ISSN: 0214-1744, ISSNc: 2695-8589, [www.rediris.es/CuaternarioGeomorfologia/](http://www.rediris.es/CuaternarioGeomorfologia/)
- Brantley, S L., Lohse K.C., Green, J.W., Mehta, A.T., White, T., Richter, D.L., Bacon, A.R., Conklin, M.H., Chorover J.P., Duffy C.J., Dietrich, W.E (2007). Regolith as a critical zone: Integrating Soil Science and Hydrogeology, *Vadose Zone Journal*. 6(1). 2-11, <https://doi.org/10.2136/vzj2006.0135>
- Brocard, Rivera, Y. (2011). *Evaluación de mezclas de arcillas de la región de "Centeno" y arena sílice residual para su utilización en la industria cerámica*. [Tesis de Diploma, Instituto Superior Minero-Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez". Facultad de Metalurgia-Electromecánica. Especialidad de Metalurgia].
- Capote, Marrero, C.R., Lavaut Copa, W. (2019). *Mapa de los tipos y subtipos de regolita sobre las rocas pre-orogénicas de Cuba a escala 1:250000'*. [sesión de conferencia, CD-Room]. Geociencias La Habana.
- Chardon, D (2023). Landform-regolith patterns of Northwestern Africa: Deciphering Cenozoic surface dynamics of the tropical cratonic geosystem Earth Sci. Rev., Vol. 242, Article 104452, <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104452>
- Chardon, D., Sawadogo, B., Bamba, O (2025). Relationships between African landforms, regolith materials, and Cenozoic climate change: Implications for sedimentary source-to-sink systems. *Earths Sci. Reviews*, Vol. 269. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2025.105187>
- Churchman, G. J., Lowe, D. J. (2012). Alteration, formation, and occurrence of minerals in soils. In: *Handbook of Soil Sciences: Properties and Processes*. 1-72. CRC Press. ISBN 9781439803059.
- Corona, Rodríguez, A., Orozco, Melgar, G., Rodríguez, Vega, A. (2014). Presencia de rodingitas en las rocas de dique asociadas a gabros de la zona de Yaguaneque, Moa, Holguín. *Minería y Geología*, 30(2) . abril-junio. 1-18ISSN 1993 8012.
- Földvári M. (2011). *Handbook of thermogravimetric system of minerals and its use in geological practice*. Copyright Geological Institute of Hungary (Magyar Állami Földtani Intézet), Budapest. ISBN 978-963-671-288-4.
- Lavaut, Copa, W. (2018). A Geological Classification for the Rocks of Weathering". *Petroleum Science and Engineering*. 2 (1). 1-6. <https://doi.org/10.11648/j.pse.20180201.11>
- Lavaut, Copa, W. D., Capote, Marrero, C.R., Cobiella, Reguera, J.L., Alonso, Pérez, J.A., Torres, Rodríguez, D., Milia González, I., Torres La Rosa, M., de la Paz Marrero, D., Revé Barrio, L., González Castellano, D., San Jorge, W, A. (2022). "Mapas Mineragénicos 1:250 000 de Cuba". *Anales de la Academia de Ciencias de Cuba*. 12(2). ISSN 2304-0106.
- Mcqueen, K, G., Scott, K (2009). Rock weathering and structure of the regolith. In book: *Regolith Science*, 105-126. <https://doi.org/10.1071/9780643098268.ch06>
- Njila T., Díaz Martínez, R. (2016). Estudio químico-mineralógico de los perfiles lateríticos ferrosialíticos en los sectores Téneme, Farallones y Cayo Guam, en el noreste de Cuba". *Geológica América Central*. 54: 67-83. <https://doi.org/10.15517/rgac.v54i0.21149>
- NC. TS 528. *Cemento hidráulico-Puzolanas-Especificaciones*. Oficina Nacional de Normalización (NC); 2013:8
- Ortiz Hernández, L. E. (1999): Petrogénesis de la rodingita del Cretácico Inferior de la Sierra de Guanajuato, México. *Ciencias Geológicas, México*, 16(2): 147-154.
- Proenza, J.A (2015). Mineralogía y Geoquímica de Ni, Co, EGP, Sc, ETR en yacimientos lateríticos. *Macla, Revista de la Sociedad Española de Mineralogía*. No.20. 3-9.

- Schroeder, P.A., Austin, J.C., Thompson, A., Richter, D.D (2022). Mineralogical and Elemental Trends in Regolith on Historically Managed Sites in the southeastern United States Piedmont. *Clays and Clay Minerals*. 70(4). 539-554. [c10.1007/s42860-022-00202-8](https://doi.org/10.1007/s42860-022-00202-8)
- Sergeev, D, Collins, T (2024). Regolith-Hosted Rare Earth Element Mineralization in the Esperance Region, Western Australia: Major Characteristics and Potential Controls. *Minerals*. 14(8). 847. <https://doi.org/10.3390/min14080847>
- Taylor, G., Eggleton, R. A (2001). *Regolith Geology and Geomorphology*. VIII. 375 pp. ISBN 0 471 97454 4. Geol. Mag. 138, 2001, <https://doi.org/10.1017/S0016756801216239>