

Análisis euclidiano de agrupación aplicado al estudio del yacimiento Yagrumaje Oeste

Applying the Cluster Euclidian Analysis to Study Yagrumaje West

Rosa María Valcarce Ortega¹, Isabel Sosa Rojas²

¹Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Cujae, La Habana, Cuba

²Empresa Geominera de Santiago de Cuba, Cuba

Correo electrónico: rosy@tesla.cujae.edu.cu

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento/No Comercial 4.0 Internacional](#)



Recibido: 27 de diciembre del 2016 Aprobado: 15 de febrero del 2017

Resumen

Cuba posee el 34,4 % de las reservas minerales de níquel a nivel mundial. Sus principales yacimientos de menas lateríticas se ubican a lo largo de 150 km de su costa nororiental y se contabilizan hoy en más de 3 000 millones de toneladas de menas niquelíferas, de las cuales el 25 % están en la categoría de reservas probadas. Caracterizar los depósitos minerales de níquel es objetivo prioritario en el estudio de estos recursos minerales y para ello constituye un elemento fundamental la diferenciación de las litologías presentes en la corteza laterítica. En esta investigación, aplicando el Análisis Euclidiano de Agrupación sobre las variables susceptibilidad magnética, contenido de hierro, níquel y cobalto, fue posible realizar la diferenciación litológica del yacimiento laterítico Yagrumaje Oeste, ubicado en Pinares de Mayarí, Cuba. El modelo de clasificación obtenido permitió diferenciar las litologías que constituyen la corteza laterítica de las que integran el basamento, separar la roca madre, los ocres estructurales iniciales, los ocres estructurales finales y los ocres finales con concreciones ferruginosas. La información aportada hace posible cartografiar heterogeneidades en la corteza laterítica y contribuir a la mejor prospección y explotación de níquel y cobalto. La metodología empleada puede extenderse a otros yacimientos lateríticos.

Palabras claves: yacimientos lateríticos, análisis euclidiano de agrupación

Abstract

Cuba has 34,4 % of nickel ore reserves worldwide. Its main deposits of lateritic ores are located along 150 km of its northeastern coast and are now recognized by more than 3,000 million tons of ore nickeliferous, of which 25 % are in the category of proven reserves. Characterize the mineral deposits of nickel is a priority objective in the study of these mineral resources and for this, some prospecting geologic-geophysical methods are used together with effective techniques of mathematical statistical processing. In this research, applying the Cluster Euclidian Analysis about the magnetic susceptibility, iron content, nickel and cobalt ones, were possible to obtain the lithological classification on the Yagrumaje West located in Pinares of Mayarí, Cuba. The classification model obtained allowed clearly differentiate the lateritic crust lithology and those one make up the base, separating the bedrock, the initial structural ochres, the final structural ochres and ochres with ferruginous concretions. The information provided makes possible to map inhomogeneity in the lateritic crust and better contribute to the exploration and exploitation of nickel and cobalt. The methodology can be extended to other laterite deposits.

Key words: lateritic deposits, cluster euclidian analysis

INTRODUCCIÓN

Cuba posee una de las mayores reservas de níquel y cobalto del mundo. Sus principales campos de menas lateríticas se ubican a lo largo de 150 km de su costa nororiental, con reservas probadas de 800 millones de toneladas y reservas probables de 2 000 millones de toneladas. Las reservas de cobalto alcanzan aproximadamente el 26 % de las reservas mundiales constituyendo la segunda a nivel mundial.

Las lateritas son yacimientos de origen sedimentario formados por la acumulación de productos residuales de la roca primaria que han logrado escapar de la acción de la meteorización. En Cuba este proceso de meteorización ocurre en las rocas serpentínicas, las que se descomponen formando cortezas lateríticas que tienen gran interés económico porque en ellas se concentran cantidades importantes de níquel (Ni), cobalto (Co) y hierro (Fe).

Los yacimientos lateríticos de la región de Moa, parte nororiental de Cuba, comenzaron a ser estudiados en la década del 50 del siglo pasado por compañías norteamericanas que a finales de ese decenio comienzan su explotación con la instalación de una moderna industria de proceso ácido.

Durante años, estos yacimientos han sido objeto de muchas investigaciones y de manera especial se han dedicado esfuerzos a estudiar el espesor de la corteza laterítica, las irregularidades del relieve del basamento, la presencia de xenolitos, la potencia de las menas níquelíferas-cobaltíferas y las variaciones bruscas que presenta la composición química de la corteza mineral en profundidad [1]. La gran variabilidad de estos parámetros ha determinado una densificación cada vez mayor de las redes de perforación para realizar el cálculo de recursos según las exigencias de normas establecidas, lo que origina un alto costo de los trabajos de prospección de dichos yacimientos.

La gran variabilidad en la composición mineralógica de estos yacimientos en todas las direcciones y fundamentalmente en la dirección vertical, genera dificultades en su modelación matemática para pronosticar el comportamiento del mineral en el proceso fabril. En los últimos años se han aplicado técnicas de clasificación estadística multivariada y reconocimiento de patrones con este objetivo; ejemplo de ello son las investigaciones de Peña-Abreu y Vera-Sardiñas [2] que aplicando estas técnicas proponen 11 clases en los yacimientos de lateritas de Punta Gorda, Yagrumaje Norte y Yagrumaje Sur para satisfacer los requerimientos de la modelación matemática aplicada a la utilización industrial de las menas.

El objetivo de la presente investigación fue evaluar el poder resolutivo de la susceptibilidad magnética, del contenido de hierro, níquel y cobalto para realizar la diferenciación litológica y contribuir a la mejor prospección y explotación del yacimiento laterítico Yagrumaje Oeste, ubicado en Pinares de Mayarí, Cuba. Para ello se aplicó un método de reconocimiento de patrones no supervisado, el Análisis Euclidiano de Agrupación.

MATERIALES Y MÉTODOS

En este apartado se resumen los aspectos esenciales relacionados con la clasificación y zonalidad de las cortezas de meteorización en Cuba, las características geológicas del yacimiento estudiado y la metodología de trabajo empleada.

Clasificación y zonalidad litológica de las cortezas de meteorización en Cuba

La clasificación de las cortezas de meteorización utilizada en Cuba se basa en criterios estructuro-genéticos claves: su zonalidad litológica vertical y el tipo litológico de perfil.

La zonalidad litológica según Lavaut [3], permite diferenciar el corte laterítico en seis zonas:

1. Ocre inestructurales con concreciones ferruginosas (OICP).
2. Ocre inestructurales sin concreciones ferruginosas (OI).
3. Ocre estructurales finales (OEF).
4. Ocre estructurales iniciales (OEI).
5. Rocas madres lixiviadas (RML).
6. Rocas madres agrietadas (RMA).

A su vez, la clasificación de tipos litológicos de perfiles de meteorización aplicada actualmente en Cuba agrupa los perfiles primeramente en tres grandes familias que luego se subdividen en ocho dominios como se muestra a continuación:

Perfiles lateríticos, con cuatro tipos de perfiles litológicos:

1. Inestructural completo.
2. Inestructural incompleto.
3. Estructural completo.
4. Estructural incompleto.

Perfiles laterítico-saprolíticos, con dos tipos de perfiles:

5. Estructural completo.
6. Estructural incompleto.

Perfiles saprolíticos, con dos tipos de perfiles:

7. Estructural completo.
8. Estructural incompleto.

La figura 1 presenta un esquema que resume la zonalidad litológica y los perfiles de meteorización anteriormente explicados.

La clasificación industrial de las menas según límites del contenido de níquel y hierro se presenta en la tabla 1 [4].



Fig. 1. Clasificación del perfil litológico [3]

Características geológicas del yacimiento

El yacimiento Yagrumaje Oeste está ubicado en el macizo montañoso Moa-Baracoa al noreste de la provincia Holguín, municipio Moa, alcanzando un área total de 7,5 km². La figura 2 muestra la ubicación geográfica de este yacimiento.

Las rocas madres que dieron origen a la corteza de meteorización y a los cuerpos minerales del yacimiento Yagrumaje Oeste pertenecen a las ofiolitas del Cinturón Septentrional.

En la región de estudio las rocas ígneas presentan los mayores valores de susceptibilidad magnética, en orden les siguen las rocas volcánico-sedimentarias y sedimentarias [5]. Esta propiedad magnética aumenta con el grado de serpentinización de las rocas ígneas, de lo cual se infiere que las mayores intensidades positivas del campo magnético deben estar relacionadas con las características geológicas y estructurales de las rocas ultrabásicas serpentinizadas, teniendo en cuenta que ocupan la mayor parte del territorio. En áreas muy restringidas pueden estar provocadas por piroxenitas y diabasas.

Tabla 1. Clasificación de la corteza de lateritas cubanas según límites industriales [4]

Horizontes	Descripción	Código	Contenido limite (%)	
Horizonte de materiales no meníferos	Material ferroso fuera de balance	FF	Ni<0,70	20≤Fe<30
	Material ferroso de balance	FB	Ni<0,70	Fe≥30
	Material laterítico niquelífero fuera de balance	LF	0,70≤Ni<0,90	Fe≥35
Horizonte de menas	Mena laterítica de balance	LB	Ni≥0,90	Fe≥35
	Mena serpentinitica niquelífera friable de balance	SB	Ni≥0,90	12≤Fe<35
	Mena serpentinitica dura de balance	SD	Ni≥0,90	Fe<12
Horizonte de la roca madre	Mena serpentinitica niquelífera fuera de balance	SF	0,70≤Ni<0,90	12≤Fe<35
	Roca estéril	RE	Ni<0,70	Fe>20



Fig. 2. Ubicación geográfica del yacimiento Yagrumaje Oeste

El área se compone de:

- Perfiles litológicos lateríticos, con amplia difusión de perfiles inestructurales no perspectivas para la minería que rellenan el espacio entre los cuerpos minerales, constituyendo áreas prácticamente estériles.
- Perfiles laterítico-saprolíticos que se ubican casi totalmente en la parte periférica oriental del yacimiento contribuyendo notablemente al potencial menífero de los cuerpos minerales correspondientes. En el resto del área, estos se presentan aisladamente en forma de manchas pequeñas de forma irregular, por lo que no juegan un papel preponderante en el tonelaje menífero.

El horizonte laterítico se subdivide en tres zonas litológicas que son: Ocre Inestructurales con concreciones ferruginosas (OICP), Ocre Inestructurales sin concreciones ferruginosas (OI) y Ocre Estructurales Finales (OEF). A continuación se resumen las características generales de estas zonas litológicas [5], [6].

a) **OICP**: Los perdigones ocupan como promedio el 35 % de la masa mineral, en ocasiones se observan fragmentos de coraza de hierro, presentan óxidos e hidróxidos de hierro y escasa mineralización de manganeso. La fase mineralógica principal es la goethítica, en menor proporción la gibbsita y espinelas cromíferas. La sílice presente está asociada a los minerales de serpentina y del tipo arcilloso, el Al_2O_3 se relaciona con la gibbsita, la espinela cromífera y en menor proporción con los minerales arcillosos, el MgO está asociado a los minerales del grupo de la serpentina. Cuando las cortezas de meteorización son maduras, los valores de susceptibilidad magnética (SM) por lo general son bajos, menores de $12,5 \cdot 10^{-3}$ SI. Cuando los procesos de meteorización no han tenido un desarrollo intenso se describen cristales de minerales no intemperizados y magnéticos tales como magnetita, maghemita, etc., que presentan valores de SM mucho más altos.

b) **OI**: La fase mineralógica principal es la goethítica, en menor proporción la gibbsita, espinelas cromíferas y minerales del tipo arcilloso. La sílice presente está asociada a los minerales de serpentina y del tipo arcilloso, el Al_2O_3 se relaciona con la gibbsita, la espinela cromífera y en menor proporción a los minerales arcillosos, el MgO está asociado a los minerales del grupo de la serpentina. En este horizonte son comunes los incrementos de Si_2O , MgO, Cr_2O_3 , Ni, Co, Al_2O_3 . Los valores de SM por lo general son bajos, menores que $12,5 \cdot 10^{-3}$ SI pero más altos que en los OICP cuando las cortezas de meteorización son maduras. En cortezas jóvenes los valores de SM son mucho más altos. Con este horizonte está relacionada la mineralización del tipo FF y LB, con predominio de LB.

c) **OEF**: En ellos se observa de forma muy discreta la estructura relictica de la roca madre, finas vetillas de minerales de manganeso, óxidos e hidróxidos de hierro. Es el horizonte de granulometría más fina. La fase mineralógica principal es la goethítica, en menor proporción la gibbsita y minerales arcillosos. La sílice presente está asociada a los minerales de serpentina y del tipo arcilloso, el Al_2O_3 se relaciona con la gibbsita, la espinela cromífera y en menor proporción con los minerales arcillosos, el MgO está asociado a los minerales del grupo de la serpentina. Es usual encontrar porcentajes significativos de hierro, níquel y cobalto. Los valores de SM por lo general son altos, mayores que $12,5 \cdot 10^{-3}$ SI. Cuando las cortezas de meteorización son maduras la mediana de la SM alcanza su valor más alto. En este horizonte está relacionada la mineralización del tipo FF, LB y mena laterítica niquelífera fuera de balance (LF), con predominio de LB.

El horizonte saprolítico internamente se subdivide en tres zonas litológicas de la corteza de meteorización que son: Ocre Estructurales Iniciales (OEI); Roca Madre Lixiviada (RML) y Roca Madre Alterada (RMA).

d) **OEI**: Se observan relictos de la estructura de la roca madre, en ocasiones presentan intercalaciones de serpentinita desintegrada y fragmentos de serpentinita dura, vetillas de minerales de manganeso, óxidos e hidróxidos de hierro. La fase mineralógica principal portadora de níquel es la goethítica, en menor proporción minerales arcillosos y minerales del grupo de la serpentina. En este horizonte, la sílice presente es fundamentalmente constitucional y está asociada a los minerales de serpentina y del tipo arcilloso, el Al_2O_3 se relaciona con los minerales arcillosos y en menor proporción

con las espinelas cromíferas y la gibbsita, el MgO tiene aquí sus mayores concentraciones y está asociado a los minerales del grupo de la serpentina. Los valores de SM por lo general decrecen bruscamente alcanzando valores menores que $12,5 \cdot 10^{-3}$ SI. En este horizonte están relacionadas mineralizaciones del tipo FF, LB, LF con predominio de la mena serpentinitica niquelífera de balance (SB).

e) **RML y RMA:** Los valores de SM por lo general son más bajos que en los OEI alcanzando valores menores que $12,5 \cdot 10^{-3}$ SI. Se relacionan con mineralización del tipo mena serpentinitica niquelífera fuera de balance (SF) y roca estéril (RE).

Metodología de trabajo empleada

En las últimas décadas se ha producido un incremento notable con respecto al tratamiento de la información geológica por métodos lógico-numéricos. Esto ha sido motivado por diferentes razones; tal vez la más importante sea el reconocimiento de que el alto grado de variación de los atributos estudiados exige, en mayor o menor extensión, el empleo de los métodos estadísticos de diagnóstico matemático y de modelación, a pesar de las limitaciones prácticas que en ocasiones impone el insuficiente muestreo. Otra razón importante, es la necesidad de realizar generalizaciones y predicciones a partir de un número limitado de datos, en muchos casos debido a la imposibilidad de acceso directo a los objetivos investigados [7].

En general en las disciplinas de las Geociencias, al estudiar un sistema se usan parámetros cuyo comportamiento es el resultado de la superposición de muchas causas, posiblemente no simultáneas, y el conocimiento de estas causas es incompleto. Ello exige que el parámetro estudiado deba ser descrito empleando métodos de la estadística aplicada con un enfoque estocástico.

El empleo de los métodos estadísticos en esta investigación se justifica por la gran variabilidad espacial de los parámetros físicos (SM) y los elementos químicos (contenido de hierro, níquel y cobalto). Entonces cada parámetro debe ser interpretado como una variable aleatoria que puede adoptar un conjunto infinito de valores de acuerdo con su distribución de probabilidad.

Resumiendo; cada uno de los parámetros estudiados son variables regionalizadas, que adoptan un valor para cada punto del espacio, y en ellas pueden ser observados dos aspectos complementarios y aparentemente contradictorios:

a) Un comportamiento aleatorio, asociado con las variaciones erráticas e impredecibles de estas variables regionalizadas.

b) Un comportamiento general estructurado, que en cierta forma, refleja las características más generales del comportamiento del sistema en estudio.

Por este motivo, dada la naturaleza del problema estudiado que difícilmente puede ser representado mediante funciones determinísticas, se aplican técnicas de procesamiento estadístico con el fin de identificar intervalos de composición relativamente homogénea a partir de las regularidades del conjunto de variables usadas para su descripción. A continuación se resumen los aspectos teóricos de las técnicas estadísticas de clasificación.

Las técnicas estadísticas de clasificación permiten identificar grupos de elementos de composición relativamente homogénea, estudiando las regularidades del conjunto de atributos usados para su descripción. A partir de la información a priori disponible, estas técnicas pueden dividirse en supervisadas y no supervisadas.

Las técnicas supervisadas emplean una muestra de aprendizaje o patrón, que representa a los diferentes objetos geológicos de interés y que permitirá clasificar elementos de origen desconocido, según determinada regla de decisión. En este caso, el resultado de la clasificación tiene un sentido geológico aportado por la muestra de aprendizaje.

Las técnicas no supervisadas, no emplean muestra de aprendizaje, ellas se utilizan cuando no existe información a priori sobre los objetos geológicos, o cuando esta información sea muy reducida. En estas técnicas la muestra a clasificar se subdivide en grupos a partir del grado de semejanza de los elementos, y el resultado de la clasificación no posee un significado geológico directo: se requiere realizar la correlación geológica de dichos resultados posteriormente. En esta investigación fue empleado el Análisis Euclidiano de Agrupación (AEA) como técnica de clasificación no supervisada. Esta es una de las técnicas de clasificación no supervisadas más simple y efectiva. En esta se asume que puede existir un número finito de grupos discretos, los cuales están definidos en el espacio euclidiano p dimensional (E_p) por medio de sus centroides. La dimensión del espacio euclidiano queda determinada por el número de atributos usados para describir los elementos de la muestra. El centroide de un grupo es el punto en E_p cuyas coordenadas son los valores medios de los atributos de los puntos pertenecientes a ese grupo. El método parte de la posible existencia de un grupo máximo de grupos ($N_{m\acute{a}x}$). Este número máximo de grupos siempre debe tomarse superior al posible número de grupos que, en términos geológicos, se espera que existan. Además, se especifica el número mínimo ($N_{m\acute{i}n}$) hasta el cual se debe tratar de realizar la agrupación. Para comenzar el proceso, deben definirse los centroides de los $N_{m\acute{a}x}$

grupos de partida. En la práctica por lo general, no se conocen, y el problema puede resolverse de la forma siguiente [8]:

a) Se realiza una preubicación de los centroides para el número máximo de grupos, generando sus coordenadas aleatoriamente en el recorrido correspondiente a cada atributo de la muestra.

b) Se realiza una preasignación de todos los elementos i de la muestra en aquellos k grupos para los cuales se obtiene el menor valor de la distancia al cuadrado punto-centroide.

c) Cuando los n elementos de la muestra se han preasignado a los distintos $N_{\text{máx}}$ grupos, se reevalúan las coordenadas de los centroides.

A partir de este punto comienza propiamente el proceso de agrupación euclidiano según el siguiente algoritmo:

1. Se calculan los cuadrados de las distancias entre cada punto i y cada uno de los nuevos centroides, moviendo el punto hacia aquel grupo para el cual se obtiene el mínimo valor del cuadrado de la distancia punto-centroide, al mismo tiempo se modifican las coordenadas de cada centroide para tomar en cuenta la reubicación del punto. Este procedimiento se repite hasta que la composición de los $N_{\text{máx}}$ grupos permanezca constante. Cuando se ha alcanzado esta situación se dispone de:

- Las coordenadas de cada centroide.
- La distribución de los elementos para cada grupo.
- La distancia de cada elemento al centroide de su grupo.
- La desviación cuadrática media puntos-centroides.

2. El número de grupos N se reduce en uno, a menos que $N = N_{\text{mín}}$. Esto se realiza fusionando el par de grupos para los cuales la distancia entre sus centroides sea mínima. Posteriormente se calculan las coordenadas de los centroides del grupo recién formado.

3. Una vez realizadas las agrupaciones para $N_{\text{mín}} \leq N \leq N_{\text{máx}}$, es posible realizar una prueba de hipótesis de Fisher secuencialmente, para definir los modelos de agrupaciones que producen mejoras significativas, en términos estadísticos, a los ajustes puntos-centroides.

Es necesario aclarar, que se debe ser muy cauteloso al establecer los modelos de clasificación a utilizar, pues no siempre los mejores modelos de agrupaciones en términos estadísticos son los que poseen un sentido geológico concreto. Ello implica, que todos los modelos resultantes deben ser analizados y correlacionados con datos geológicos disponibles.

Para separar y caracterizar las litologías presentes en el yacimiento Yagrumaje Oeste se aplicó el análisis euclidiano de agrupación (AEA) a los datos de susceptibilidad magnética (SM), contenido de hierro (Fe), de níquel (Ni) y de cobalto (Co) medidos a 6 906 muestras. A continuación se presentan los resultados obtenidos según el modelo de clasificación más representativo.

RESULTADOS

La tabla 2 resume el modelo de clasificación obtenido al aplicar el AEA sobre las muestras a las que se midió SM, contenido de hierro, níquel y cobalto.

El Grupo 1 está compuesto por muestras que han sido descritas como OICP, OI y OEF, caracterizadas por altos valores de susceptibilidad magnética (SM), contenido de hierro, níquel y cobalto.

El Grupo 2 está integrado predominantemente por muestras descritas como OICP, donde son bajos los valores de SM y el contenido de cobalto, y son elevados los contenidos de hierro y níquel.

Las muestras descritas como OEF están presentes fundamentalmente en el Grupo 3, en el cual los valores de SM, contenido de hierro, níquel y cobalto son elevados.

El Grupo 4 lo forman los OEI que se caracterizan por bajos valores de SM y contenido de cobalto, mientras que son elevados los valores de contenido de hierro y níquel.

Por último, el Grupo 5 lo integran la RMA y la RML, con los menores valores de SM, contenido de hierro, níquel, cobalto.

Tabla 2. Modelo de clasificación con cinco grupos al aplicar el AEA sobre muestras del yacimiento Yagrumaje Oeste

Clasificación	Número de muestras	Valores Medios de:			
		SM ($\cdot 10^{-3}$ SI)	Fe (%)	Ni (%)	Co (%)
Grupo 1	1 787	21,4	48,3	0,87	0,162
Grupo 2	1 801	9,4	47,6	0,75	0,098
Grupo 3	2 255	37,2	48,7	0,99	0,19
Grupo 4	146	13,3	34,8	0,99	0,11
Grupo 5	917	4,9	6,9	0,25	0,01

DISCUSIÓN

El modelo de clasificación obtenido al aplicar el análisis euclidiano de agrupación a muestras caracterizadas por la susceptibilidad magnética, el contenido de hierro, níquel y cobalto en el yacimiento Yagrumaje Oeste demuestra que:

- Es posible separar los perfiles lateríticos de los perfiles saprolíticos, o sea, diferenciar las litologías que constituyen la corteza laterítica de las que integran el basamento.
 - Se identifica un grupo integrado por muestras de OICP, OI y OEF caracterizadas por altos valores de susceptibilidad magnética y también elevados valores de contenido de hierro, níquel y cobalto, con predominio de la mineralización del tipo mena ferrrosa fuera de balance (FF). Los altos valores de SM en zonas de OICP y OI expresan la presencia de cortezas de meteorización jóvenes e indican que los procesos de meteorización no han tenido un desarrollo intenso, y por ello pueden encontrarse cristales de minerales magnéticos no intemperizados, tales como magnetita, maghemita, etc. En este grupo predomina la mineralización del tipo mena laterítica niquelífera fuera de balance (LF).
 - En el Grupo 2 predomina la presencia de OICP y de menas lateríticas niquelíferas fuera de balance (LF).
 - En el Grupo 3 integrado por OEF, el incremento de hierro con el incremento de la SM indica la presencia de hierro magnético; y el incremento de níquel con el incremento de la SM está indicando que el mineral portador de níquel es magnético y en este caso se asocia a la maghemita. Predomina la mineralización del tipo mena laterítica de balance (LB).
 - Los OEI se localizan en el Grupo 4 con predominio de mineralización del tipo Mena Serpentinítica Niquelífera de Balance (SB).
 - Es posible separar la roca madre, los ocres estructurales iniciales (OEI), los ocres estructurales finales (OEF) y los ocres iniciales con concreciones ferruginosas (OICP).
 - No se logra separar los ocres inestructurales sin perdigones (OI). Tampoco se logra separar las rocas madres lixiviadas (RML) y las rocas madres agrietadas (RMA).
 - La variación de la susceptibilidad magnética permite caracterizar la intensidad de los procesos de meteorización.
- La información aportada con esta metodología de trabajo facilita cartografiar cambios y heterogeneidades en la corteza laterítica del yacimiento Yagrumaje Oeste y contribuir a la mejor prospección y explotación de níquel y cobalto.
- El valor de los resultados obtenidos permite recomendar extender esta metodología de trabajo a otros yacimientos lateríticos en Cuba.

CONCLUSIONES

Aún cuando los yacimientos lateríticos presentan gran heterogeneidad y anisotropía en su composición mineralógica es posible caracterizar su perfil litológico empleando técnicas de clasificación estadística multivariada. El análisis euclidiano de agrupación ha demostrado su efectividad para diferenciar el corte laterítico logrando un modelo de clasificación de cinco grupos compuesto por:

- Ocres inestructurales con perdigones, ocres inestructurales sin perdigones y ocres estructurales finales, con altos valores de susceptibilidad magnética que indican la presencia de corteza de meteorización joven.
- Ocres inestructurales con perdigones.
- Ocres estructurales finales.
- Ocres estructurales iniciales.
- Roca madre alterada y roca madre lixiviada.

No es posible separar los ocres inestructurales sin perdigones. Tampoco se logra separar la roca madre alterada y la roca madre lixiviada. No obstante estas limitaciones, los resultados obtenidos demuestran el alto poder resolutivo del método de clasificación estadística aplicado sobre las variables susceptibilidad magnética, contenido de hierro, níquel y cobalto para caracterizar el perfil laterítico del yacimiento Yagrumaje Oeste, contribuyendo a la mejor prospección y explotación del níquel y el cobalto.

Se recomienda aplicar esta metodología en otros yacimientos lateríticos cubanos incorporando al modelo de clasificación otras variables que expresen propiedades físicas y geoquímicas. Esto podría permitir la obtención de una mejor diferenciación y caracterización del perfil laterítico.

REFERENCIAS

1. Valdivia G, Alonso JA, Cabrera I, et al. Actualización del conocimiento mineralógico de menas lateríticas y residuos sólidos de las industrias niquelíferas cubanas. INFOMIN. 2014;6(1):70-100.
2. Peña Abreu RE, Vera Sardiñas LO. Identificación de clases patrones para la modelación matemática en yacimientos de níquel cubanos. Revista Ciencias de la Tierra y el Espacio. 2013;14(2):154-69.

3. Lavaut Copa W. Una aproximación a la lexicografía de la meteorización. In: Memorias de Geociencias, VII Congreso de Minería, GEOMIN 2017; La Habana, Cuba: 2017.
4. Lavaut Copa W. Patrones de meteorización de rocas ofiolíticas de Cuba Oriental: su importancia para la minería. Minería y Geología. 2004;3(4):3-14.
5. Hernández Ramsay AJ. Resultados de la medición de la susceptibilidad magnética en la exploración detallada yacimiento CE, Etapa II. In: Memorias de Geociencias, V Congreso de Minería, GEOMIN 2013; La Habana, Cuba: 2013.
6. Rojas Purón A. Evidencias a favor de que la Goethita es la principal portadora de Níquel en los horizontes lateríticos de las cortezas ferroniquelíferas. Minería y Geología. 2001;XVIII(3):21-31.
7. Díaz Monroy LG, Morales Rivera MA. Estadística multivariada: inferencia y métodos. Bogotá, Colombia: Editorial Universidad Nacional de Colombia; 2012.
8. Cuadras CM. Nuevos métodos de análisis multivariante. Barcelona, España: CMC Editions; 2014.