

Caracterización geoelectrica de cortezas lateríticas a partir de sondeos eléctricos verticales de polarización inducida (SEV-PI)

Alfredo de Jesús Hernández-Ramsay
Emilio R. Escartín-Sauleda

Resumen

La cuantificación de los recursos meníferos en las cortezas de intemperismo ferrolateríticas se ve afectada, entre otros factores, por la gran variabilidad en su espesor, lo que exige del uso de redes de perforación muy densas que resultan muy costosas. Este trabajo expone resultados de la aplicación del método geofísico de sondeo eléctrico vertical de polarización inducida (SEV-PI) en las ofiolitas cubanas donde se desarrollan cortezas de intemperismo ferroniquelíferas-cobaltíferas, con el fin de determinar sus espesores y contribuir al aumento de la precisión en el cálculo de recursos. Los resultados constatan que el método posee buen poder resolutivo para estimar los espesores de la corteza laterítica y mapear las irregularidades del contacto corteza-basamento.

Palabras clave: depósitos lateríticos; cortezas de intemperismo; geofísica aplicada; SEV-PI; ofiolitas.

Geoelectric characterization of lateritic crusts from vertical polarized induced electrical probes (SEV-PI)

Abstract

The quantification of the mineral resources in the iron-weathering crusts is affected, among other factors, by the great variability in their thickness, which requires the use of very dense drilling nets that are very expensive. This work presents results of the application of the geophysical method of induced electric polarization induced vertical (SEV-PI) in the Cuban ophiolites where iron-cobaltiferous weathering crusts are developed, in order to determine their thicknesses and contribute to the increase of the precision in the calculation of resources. The results show that the method has good resolution power to estimate the thickness of the lateritic crust and to map the irregularities of the laterites-basement contact.

Keywords: lateritic deposits; weathering crust; applied geophysics; sev-pi; ofiolites.

1. INTRODUCCIÓN

En la industria cubana del níquel la mena que alimenta las fábricas productoras se extrae de la corteza de intemperismo ferroniquelífera-cobaltífera que se origina sobre las ofiolitas. El espesor de esa corteza es tan variable que puede aumentar o disminuir entre dos pozos contiguos de la red de perforación, lo que altera los valores del cálculo de recursos.

Esta alta variabilidad y complejidad geológica en los depósitos incluye una gran irregularidad en el relieve del piso de la corteza, la existencia de bloques no intemperizados dentro de los ocreos y presencia de cuerpos de composición no ultramáfica que disminuyen el contenido de níquel y provocan la no confirmación de las reservas; ello conduce a invertir cuantiosos recursos en la realización de trabajos geológicos complementarios.

Las irregularidades químicas, geológicas y mineralógicas en las rocas de la corteza laterítica niquelífera-cobaltífera provocan variaciones en sus características físicas, las que pueden ser detectadas mediante la aplicación de métodos geofísicos, en particular de métodos eléctricos, como SEV-PI (Peric 1981; Barongo & Palacky 1991; Acosta-Breal 2007; Hernández-Ramsay 2007, 2009; Hernández-Ramsay *et al.* 2005; Sosa 2007; Fon, Che & Suh 2012; Hafiz 2015; Vieira *et al.* 2016).

Los autores del presente trabajo se propusieron estudiar las cortezas de intemperismo sobre las ofiolitas con SEV-PI y contribuir a la determinación, con mayor precisión, de parámetros geométricos (tales como los espesores de la corteza) y de algunas de sus propiedades. Esto favorece los cálculos de recursos, al proceder de una fuente independiente de las redes de perforación e incluir datos observados en puntos entre los pozos.

Como resultados de los primeros trabajos de perfilaje de polarización inducida (gradiente medio) y SEV-PI en la Sierra de Puriales de Caujerí, provincia de Guantánamo; Sierra Maestra (yacimientos El Cobre, Infierno y los sectores El Roble y San Pablo de Yao), provincias de Santiago de Cuba y de Granma, así como en Aguas Claras, provincia de Holguín, se observó como regularidad que sobre las ofiolitas los valores de la polarizabilidad y la cargabilidad aparente son mucho mayores, en comparación con los valores sobre los esquistos, las calizas y las secuencias vulcanógeno-sedimentarias de la formación El Cobre.

Se estableció como hipótesis de trabajo que si las secuencias ofiolíticas del basamento rocoso tienen valores de polarizabilidad y cargabilidad aparente más altos que las rocas friables de la corteza de intemperismo ferroniquelífera-cobaltífera, entonces es posible cartografiar el contacto

entre corteza y basamento y determinar los espesores de corteza en cada punto de SEV-PI. Los resultados prácticos reportados en este trabajo confirman la veracidad de esta hipótesis.

1.1. Cortezas de intemperismo ferroniquelíferas-cobaltíferas de Cuba

En las áreas de estudio se encuentran rocas ultrabásicas del cinturón ofiolítico que bordea la isla de Cuba por su costa norte, por aproximadamente 900 km (Cuador-Gil 2002); el cual es uno de los más largos en todo el mundo y tiene asociados grandes yacimientos de corteza de intemperismo de menas lateríticas ferruginosas, niquelíferas y cobaltíferas. La distribución de rocas ultrabásicas no es homogénea en todo el cinturón, sus relaciones con las rocas de cobertura platafórmica a veces son muy complejas.

El perfil litológico de las cortezas lateríticas ferroniquelíferas-cobaltíferas, está formado por zonas (capas u horizontes) resultantes de los procesos de intemperismo. Existen diversas clasificaciones de esos horizontes, pero en Cuba la más utilizada es la de Lavaut-Copa (2005) que se muestra en la Figura 1.

1. Zona de ocre inestructurales con concreciones ferruginosas u ocre inestructurales con perdigones (OICP)
2. Zona de ocre inestructurales sin concreciones ferruginosas u ocre inestructurales sin perdigones (OISP)
3. Zona de ocre estructurales finales (OEF)
4. Zona de ocre estructurales iniciales (OEI), (llamada también saprolita fina o saprolita blanda)
5. Zona de rocas madres lixiviadas (RML), (llamada también saprolita gruesa, saprolita dura o basamento)
6. Zona de rocas madres agrietadas o roca madre alterada (RMA), (llamada también basamento).

COLUMNA		CLASIFICACION DEL PERFIL LITOLOGICO	
		PERFIL DE INTEMPERISMO	ZONAS LITOLOGICAS
1	*	OICP	L A T E R I T I C O
	*		
2	-V-	OI	
	V		
3	V	OEF	
	V		
4	V @	OEI	S A P R O L I T I C O
	V		
5	@	RML	
6	V	RMA	
	V		
A) PERFILES LATERITICOS :			
		INESTRUCTURAL COMPLETO	1 y 2
		INESTRUCTURAL INCOMPLETO	1 ó 2
		ESTRUCTURAL COMPLETO	1, 2 y 3
		ESTRUCTURAL INCOMPLETO	1 ó 2 y 3
B) PERFILES LATERITICO-SAPROLITICOS			
		ESTRUCTURAL COMPLETO	1, 2, 3, 4 y 5
		ESTRUCTURAL INCOMPLETO	1 y/o 2 y/o 3 y 4 y/o 5
C) PERFILES SAPROLITICOS:			
		ESTRUCTURAL COMPLETO	4 y 5
		ESTRUCTURAL INCOMPLETO	4 ó 5

Figura 1. Clasificación del perfil litológico de la corteza de intemperismo, según Lavaut-Copa (2005).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Trabajos de campo. Elaboración y procesamiento de los datos

Las investigaciones comenzaron en el año 1997 en la meseta de Cajálbana, provincia de Pinar del Río; meseta de San Felipe, Camaguey; meseta Pinares de Mayarí (este y oeste); Nicaro (Luz Norte, Vega Grande y Martí Grupo VII); Moa (en los yacimientos Punta Gorda, Yagrumaje Norte, Yagrumaje Sur, Yagrumaje Oeste, Camarioca Este, Camarioca Oeste, Punta Gorda, Zona A, Yamanigüey) (Figura 2).

Se utilizaron varios equipos de medición: Complejo Diapir E, receptor; Diapir T, transmisor, de fabricación húngara, con un motor generador Honda; e IPR-12, de fabricación canadiense, que proporcionan el valor de la resistividad aparente, ρ_a y cargabilidad aparente, C_a , con un dispositivo de cuatro electrodos tipo Schlumberger. El error de las mediciones no sobrepasó el límite permisible, el cual fue de 5 % para la cargabilidad aparente C_a y de 10 % para la resistividad aparente ρ_a ; fue evaluado con la expresión del error relativo, sobre la base de repeticiones en el 10 % de las mediciones.

se obtuvo que la profundidad de estudio en estas condiciones resultó igual a la abertura $AB/2$ máxima (Telford, Geldart & Sheriff 1990).

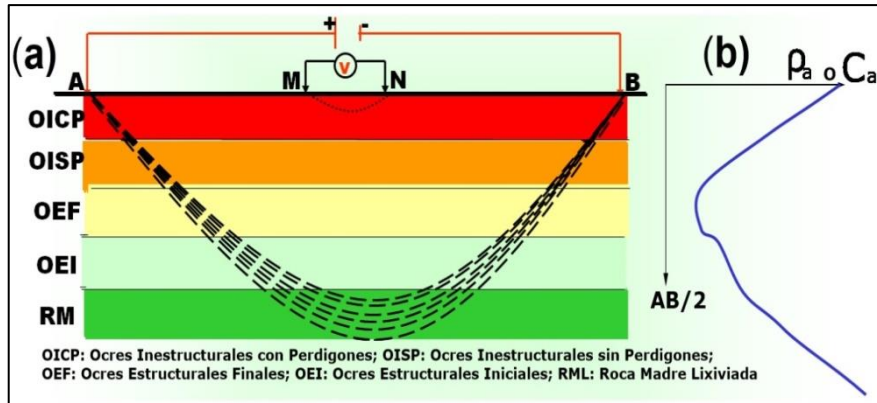


Figura 4. (a) Dispositivo de medición de cuatro electrodos tipo Schlumberger. (b) Forma de la curva correspondiente a cada horizonte o capa en la corteza de intemperismo sobre ofiolitas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con los datos adquiridos en los levantamientos se confeccionaron tablas, curvas de variación de las dos propiedades físicas: ρ_a y C_a , con la profundidad en cada punto físico estudiado, mapas de tipos de curvas, cortes de curvas de nivel de resistividad aparente ρ_a (iso-ohmas) y cortes de curvas de nivel de cargabilidad aparente C_a (Danko & Azze 1972).

Atendiendo a las formas de la variación de la ρ_a y C_a con la profundidad, es posible identificar patrones geométricos específicos o formas específicas de dichas curvas. Esos patrones se identifican con los nombres de curvas tipo "H" (Figura 5), tipo "A" (Figura 6), tipo "Q" (Figura 7) y tipo "K", que se muestra en la Figura 8 (Danko & Azze 1972).

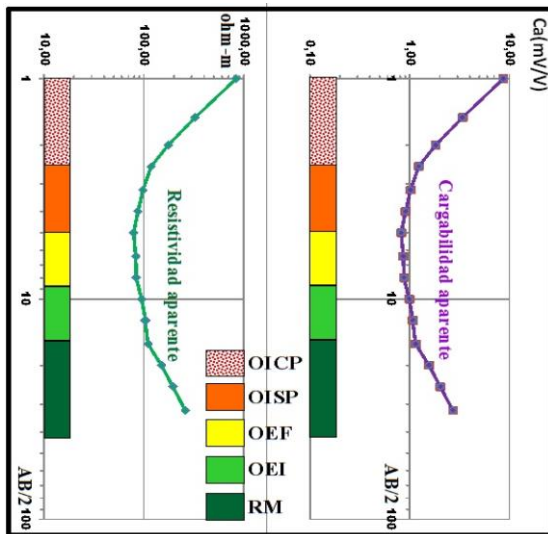


Figura 5. Curvas de tipo "H" de resistividad y cargabilidad aparente, con litología asociada a un mismo punto de SEV-PI, yacimiento Punta Gorda, bloque PQ 50.

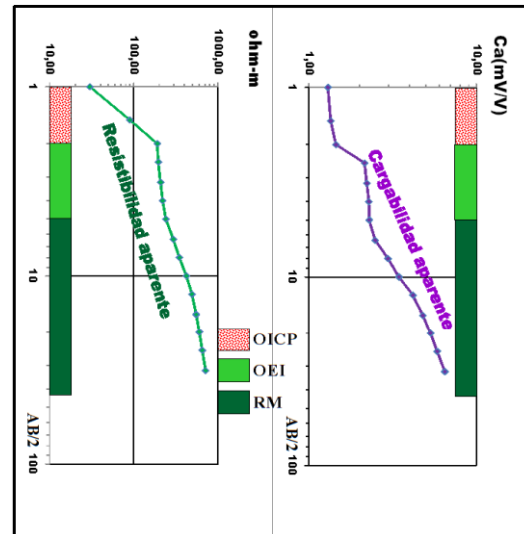


Figura 6. Curva de tipo "A" de resistividad y cargabilidad aparente, con litología asociada en un mismo punto de SEV-PI, yacimiento Punta Gorda, bloque PQ 50, perfil 3333

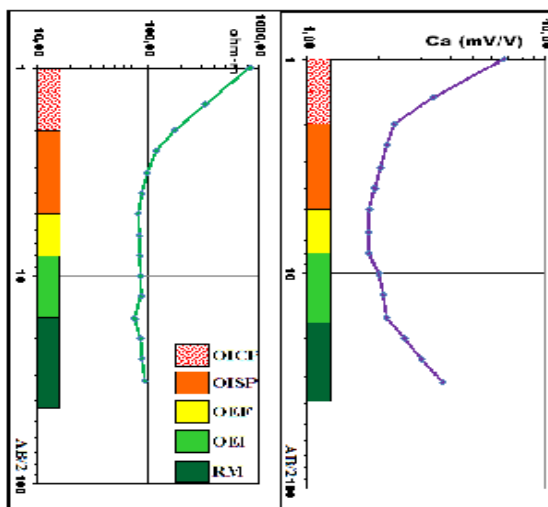


Figura 7. Curva de resistividad aparente de tipo "Q" y de cargabilidad aparente de tipo H con litología asociada, yacimiento Punta Gorda, bloque PQ, pozo 17.

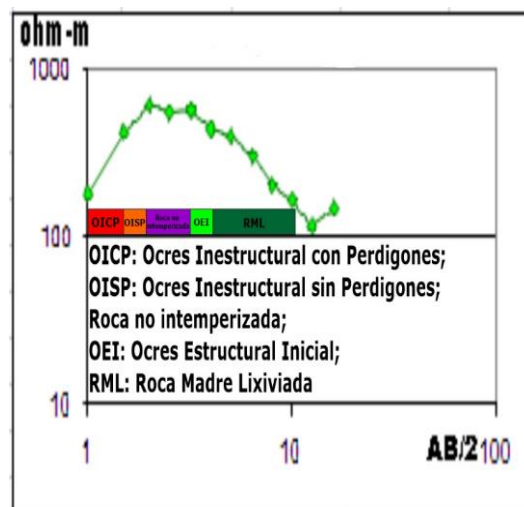


Figura 8. Curva de resistividad aparente pa de tipo "K" con litología asociada, yacimiento Yagrumaje Norte, bloque 0758, pozo 05.

En los datos de más de 19 000 puntos físicos de SEV-PI, realizados en cortezas de intemperismo o en áreas de roca ofiolítica intemperizada, se identificaron estos cuatro tipos de curvas y combinaciones de ellas, que fueron utilizadas para la construcción de los mapas locales de tipos de curvas, en cada uno de los sectores objeto de estudio (Hernández-Ramsay

et al. 2005). Este trabajo se refiere solamente a las curvas de tipo "H" porque reflejan con mayor detalle el perfil laterítico completo.

Curvas de tipo "H": Presentan valores de resistividad aparente (ρ_a) y cargabilidad aparente (C_a) que cumplen las condiciones siguientes: $\rho_{a1} > \rho_{a2} < \rho_{a3}$ y $C_{a1} > C_{a2} < C_{a3}$ (Danko & Azze 1972); la curva presenta tres ramas (superior, intermedia e inferior) bien definidas.

De los 19 000 sondeos realizados se tomó como ejemplo ilustrativo un sondeo paramétrico realizado en el yacimiento Punta Gorda, bloque PQ 50, en un punto correspondiente con el pozo número 15. En este punto el perfil es laterítico saprolítico, como lo muestran las Figuras 1 y 5.

Este tipo de curva H (Figura 5) es una de las más difundidas en las cortezas de intemperismo de Cuba oriental. La rama superior de la curva presenta valores altos, localizados geológica y espacialmente sobre materiales lateríticos con zonas de cuarcificación, sílice y los ocres inestructurales (OI), en general, debido a la existencia de oxi-hidróxidos de Fe (perdigones), los cuales se polarizan y a la vez ofrecen una alta resistencia al paso de la corriente por el medio. La intensidad de los valores depende de la abundancia y diseminación de ellos y de la forma en que están interconectados, así como de la presencia o no de agua.

En algunas ocasiones ha sido posible identificar el material de ocres inestructurales con perdigones (OICP) respecto al de los ocres inestructurales sin perdigones (OISP), material laterítico. En este caso, la primera rama presenta un ligero a muy ligero punto de inflexión que indica el final (piso) de los OICP y el inicio (techo) de los OISP (Figura 5).

En la rama intermedia se observan los valores más bajos de la curva, posiblemente por la abundancia de material arcilloso, presencia de agua y la homogeneidad del tamaño de los granos de los minerales. Esta rama coincide geológica y espacialmente con los ocres estructurales finales (OEF). La experiencia demuestra que el ancho de esta rama depende de la potencia de las capas lateríticas.

Cuando las potencias de los OICP, OISP y OEF (secuencias lateríticas) son pequeñas (menores que tres metros, aproximadamente) el SEV-PI los refleja como una sola capa y la curva adopta la forma del tipo "A" que se ilustra en la Figura 6.

La existencia de buen desarrollo de los OEI (o capa de saprolita blanda) provoca la aparición en la curva de tipo "H" de una rama de valores medios entre la rama de valores intermedia y la de los valores inferiores altos, asociada a esta litología, cartografiando dicha capa, y su tamaño está en

dependencia del espesor de la misma; entonces, en este caso la curva de tipo "H" presenta cuatro ramas (Figura 5).

En la rama inferior los valores vuelven a ser altos y se asocian geológica y espacialmente con zonas de cuarcificación (sílice) de las rocas del basamento, posiblemente por la gran variedad y heterogeneidad del tamaño de los granos de los minerales, el grado de alteración, fracturación y serpentización (Milovski & Kónonov 1988).

El contacto entre las secuencias lateríticas y el basamento se cartografía entre el valor mínimo y el valor siguiente donde cambia la pendiente de la curva, y mientras mayor sea la pendiente de la rama inferior, más brusco será el contacto entre las lateritas o los ocreos y el basamento, de saprolitas duras (Figura 5). Esta regularidad se manifiesta en los SEV-PI de todos los yacimientos estudiados y se confirma con los datos de los SEV-PI paramétricos en los puntos de las perforaciones.

En el caso de la cargabilidad aparente los valores altos probablemente son originados por el fenómeno llamado de "polarización de membrana" (Danko & Azze 1972), por la gran heterogeneidad y diversidad de tamaño de los fragmentos de rocas y granos de minerales de varias composiciones y diferentes intensidades de cargabilidad aparente en el medio geológico. Para el caso de la resistividad aparente, estos valores altos están revelando la presencia de roca dura o ligeramente agrietada, zonas de cuarcificación, sílice, rocas compactas, poco alteradas física y mecánicamente (Figura 5). Son los casos, por ejemplo, de la presencia de gabro olivínico, peridotitas o serpentinitas presentes en los pozos, revelada por estudios petrográficos (Rodríguez-Crombet 2007) en puntos coincidentes con sondeos de SEV-PI paramétricos.

Cuando la pendiente de la curva es igual o mayor que 45° , el contacto entre las lateritas o los ocreos y las saprolitas duras se encuentra en el mínimo o punto de inflexión. Los valores de la última rama de la curva de tipo "H" - rama inferior- describen características del estado físico-mecánico de las rocas del basamento rocoso, o saprolitas duras, diferenciándose cada estado físico-mecánico de la roca de otro, por un cambio brusco de la pendiente de la curva. Este hecho está relacionado proporcionalmente y se cumple que a mayor pendiente de la curva, el material rocoso es más compacto y menos alterado física y mecánicamente. La descripción realizada por los geólogos metro a metro en cada pozo y en los diferentes sectores confirman esta regularidad mencionada.

Con estos materiales se construyeron mapas del relieve del basamento (Figura 9) y cortes geólogo-geofísicos, con los que se pudo determinar una

voluminosa información, como la cartografía de la tectónica del área, los cambios de composición litológica, los espesores de los horizontes de la corteza, la profundidad del nivel freático y la profundidad a que se encuentra el basamento de roca dura no alterada. Con los cortes interpretados, incluyendo también los datos arrojados por la red de perforaciones, se hicieron cálculos de recursos, los cuales fueron evaluados positivamente por los especialistas de la Oficina Nacional de Recursos Minerales de Cuba, quienes han emitido los correspondientes avales de aceptación satisfactoria.

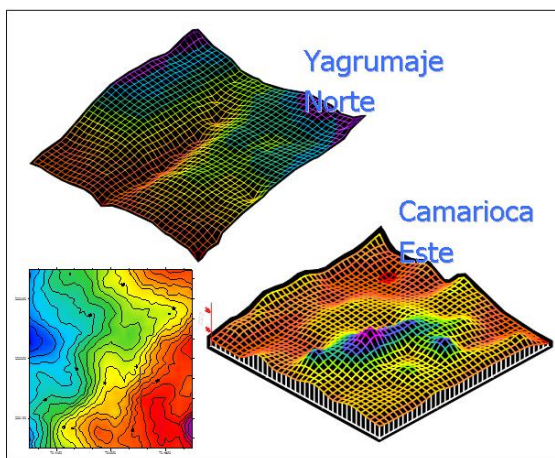


Figura 9. Relieve del basamento determinado por los SEV-PI.

La Figura 10 representa un corte de cargabilidad aparente donde predominan las curvas de tipo "H". Los tonos amarillos simbolizan los valores bajos, los cuales se asocian geológica y espacialmente con los ocres estructurales finales; mientras que los tonos magenta se asocian a valores altos de cargabilidad aparente, cartografiando los OI en la parte superior del corte y el basamento en la parte inferior del corte. Los triángulos rojos, en la superficie, señalan la ubicación de cada SEV-PI en el perfil. Los símbolos en forma de estrellas, alineados verticalmente, con su valor de resistividad aparente a la derecha, indican las aberturas $AB/2$.

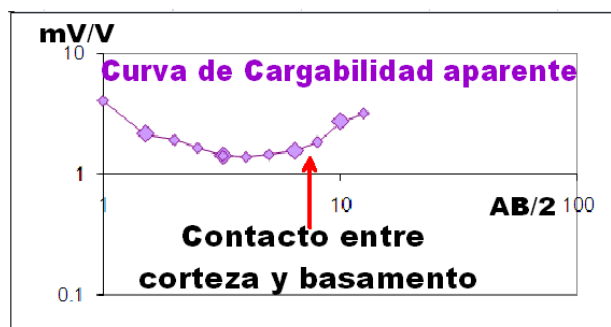


Figura 10. Puntos característicos de la curva de tipo "H" de cargabilidad aparente C_a , yacimiento Pinares de Mayarí Oeste, bloque I19115, pozo 03.

Las Figuras 11 y 12 representan, respectivamente, un mismo corte de cargabilidad y de resistividad aparente, donde predominan las curvas de tipo "H". En la Figura 11 el color magenta representa los valores bajos de C_a , los cuales se asocian geológica y espacialmente con los ocres inestructurales en el tope del corte y con la roca madre en la base del corte y los colores amarillos, los valores bajos de cargabilidad aparente, que cartografían los OEF en la parte central del corte. En la Figura 12 el color azul fuerte representa los valores bajos de ρ_a , los cuales se asocian geológica y espacialmente con los ocres estructurales finales y el magenta y el amarillo, los valores altos de resistividad aparente, que cartografían los OI en la parte superior del corte, y el basamento en la parte inferior del corte.

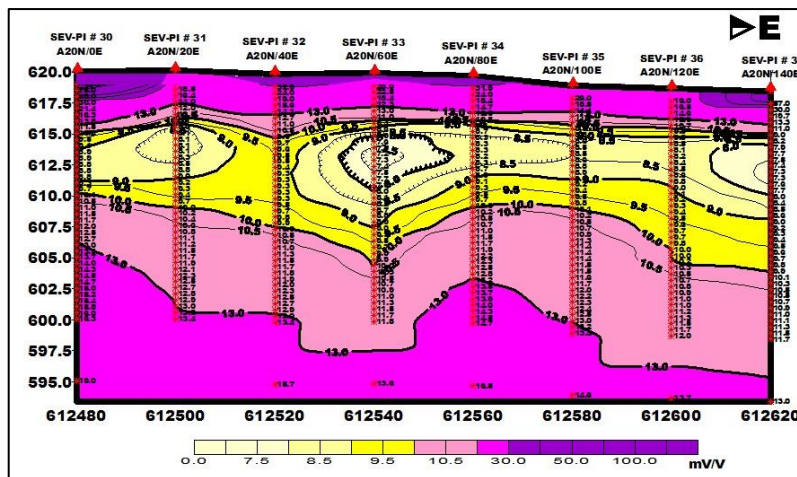


Figura 11. Corte de cargabilidad aparente C_a con curvas de tipo "H", Pinares de Mayarí Este, sector A perfil A20N.

Corte de Isohommas

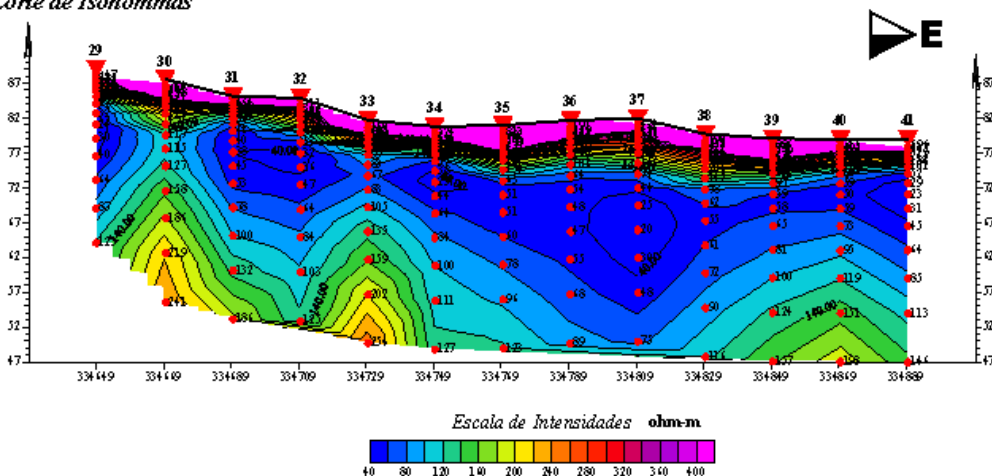


Figura 12. Corte de resistividad aparente ρ_a con curvas de tipo "H", meseta de Cajálbana, Pinar del Río, perfil 1.

4. CONCLUSIONES

- El método geofísico de SEV-PI logra cartografiar el espesor de la corteza de intemperismo en yacimientos lateríticos y seguir las irregularidades del contacto entre corteza y basamento.
- El método posee buen poder resolutivo para estimar los espesores de la corteza laterítica, atendiendo a la diferencia promedio entre el espesor de la corteza interpretado con los SEV-PI paramétricos y los observados en los pozos perforados.
- El 50 % de las curvas de C_a son del tipo "H", lo que revela la presencia de todas las litologías (OICP; OISP; OEF; OEI; RML, RMA) en el corte laterítico, correspondiendo los valores altos de la primera rama a los OI, mientras que a los OEF se asocian los valores más bajos de la curva. La última rama de la curva, donde los valores vuelven a ser altos, se asocian geológica y espacialmente con los OEI y la RML, RMA. El 30 % de las curvas de C_a son del tipo "A", las cuales indican un corte con potencia de OI menor que 5 m o incluso nula.

5. REFERENCIAS

- ACOSTA-BREAL, J. E. 2007: Prospección con georradar en los yacimientos lateríticos de Yagrumaje Sur. En: II Convención de Ciencias de La Tierra. La Habana.
- BARONGO, J. O. & PALACKY, G. J. 1991: Investigations of electrical properties of weathered layers in the Yala area, western Kenya, using resistivity soundings. *Geophysics* 56(1): 133-138.
- CUADOR-GIL, J. Q. 2002: *Estudios de estimación y simulación geoestadística para la caracterización de parámetros geólogo-industriales en el yacimiento laterítico Punta Gorda*. Tesis doctoral. Universidad de Pinar del Río, Pinar del Río.
- DANKO, J. & AZZE, A. 1972: *Geoelectricidad*. Editorial Universidad de La Habana, La Habana.
- FON, A. N.; CHE, V. B. & SUH, C. E. 2012: Exploration of Electrical Resistivity and Chargeability Data on a GIS Platform in Delineating Auriferous Structures in a Deeply Weathered Lateritic Terrain, Eastern Cameroon. *International Journal of Geosciences* 3(05): 960-971.
- HAFIZ, B. 2015: *Subsurface electrical resistivity investigation at the nysc proposed permanent orientation camp, Paiko, Niger state, Nigeria*. Tesis doctoral. Lambert Academic Publishing (LAP).
- HERNÁNDEZ-RAMSAY, A. D. J. 2007: Determinación de material saprolítico dentro de la corteza con el uso del sev-pi en el yacimiento Yagrumaje

- Norte. En: II Convención de Ciencias de La Tierra, La Habana.
- HERNÁNDEZ-RAMSAY, A. D. J. 2009: Informe de las Lateritas de Moa. Geominera Oriente.
- HERNÁNDEZ-RAMSAY, A. D. J.; GUERRA, M.; SOSA, I.; ACOSTA-BREAL, J. E.; DUSSAC, O.; GENTOIU, M. M. & LAVAUT-COPA, W. D. 2005: Algunas características geoelectricas de la corteza de intemperismo y su basamento en Nicaro. La Habana.
- LAVAUT-COPA, W. D. 2005: Clasificador para modelación litológica de lateritas. Consulta: 25 feb 2012. Disponible en: http://www.ismm.edu.cu/R_Geociencias%20y%20Quimica/volumen1.htm
- MILOVSKI, A. V. & KÓNONOV, O.V. 1988: *Mineralogía*. Mir, Moscú, 168 p.
- PERIC, M. 1981: Exploration of Burundi Nickeliferous Laterites by Electrical Methods. *Geophysical Prospecting* 29(2): 274-287.
- RODRÍGUEZ-CROMBET, R. 2007: Características petrologo-geoquímicas del yacimiento Camarioca Norte, macizo Moa-Baracoa. La Habana.
- SOSA, I. 2007: Efectividad de los métodos geofísicos en la evaluación del yacimiento Yagrumaje Oeste. En: II Convención de Ciencias de La Tierra, La Habana.
- TELFORD, W. M.; GELDART, L. P. & SHERIFF, R. E. 1990: *Induced Polarization*. United Kingdom. Press Syndicate of the University of Cambridge.
- VIEIRA, L. B.; MOREIRA, C. A.; CORTES, A. R. P. & LUVIZOTTO, G. L. 2016: Geophysical modeling of the manganese deposit for Induced Polarization method in Itapira (Brazil). *Geofísica Internacional* 55(2): 107-117.

Alfredo de Jesús Hernández-Ramsay, aramsay@geominera.co.cu
ahr_amsay@yahoo.es

Máster en Geofísica Aplicada.

Empresa Geominera Oriente. Santiago de Cuba, Cuba

Emilio R. Escartín-Sauleda. escartin@civil.cujae.edu.cu

Ing. Geofísico. Doctor en Ciencias Geológicas

Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, CUJAE. La Habana, Cuba