

COMITÉ EDITORIAL

Presidente:

Manuel A. Iturralde Vinent.
Academia de Ciencias de Cuba

Secretaria:

Kenya E. Núñez Cambra
Instituto de Geología y Paleontología

Miembros:

Eric M. Escobar Pérez
Sociedad Cubana de Geología

Mirella Pérez Rodríguez
Instituto Superior Politécnico "José A. Echevarría"

Osvaldo Rodríguez Morán
Centro de Investigaciones del Petróleo

Reinaldo Rojas Consuegra
Museo Nacional de Historia Natural

Carlos M. Pérez Pérez
Instituto de Geología y Paleontología

Orlando R. Carraz Hernández
Instituto Superior Politécnico "José A. Echevarría"

Carlos A. Sacasas León
Instituto Superior Politécnico "José A. Echevarría"

Redacción y corrección:

Anabel Oliva Martín
Instituto de Geología y Paleontología

SUMARIO

- 3-12 | Resultados de la exploración complementaria del cuerpo mineral asociado a la veta El Limón Nuevo del sistema vetítico Jacinto
| E. C. PIÑERO PÉREZ, E. YURIEVNA MISHEKURINA y P. DONET CARRILLO
- 13-18 | Columna ilustrada del registro macrofósil de Cuba
| R. ROJAS CONSUEGRA
- 19-25 | Asociaciones de minerales de placeres de rendimiento económico y su vinculación a las estructuras geológicas de Cuba
| D. DE LA NUEZ COLÓN, K. SUKAR SASTROPUTRO, G. AGUIRRE GUILLOT, E. LISABET SARRACEN, W. SUÁREZ BÁRCENAS, A. I. LLANES CASTRO y D. GARCÍA JIMÉNEZ
- 27-50 | Estratigrafía de las cuencas sinorogénicas del Campaniano tardío al Daniano desarrolladas sobre rocas de arco volcánico y retroarco en Cuba
| M. A. ITURRALDE-VINENT
- 51-58 | Metodología para la interpretación sísmica 3D estructural en la faja septentrional cabalgada de Cuba
| A. H. DOMÍNGUEZ GÓMEZ y M. JUARA ZULUETA
- 59-65 | Evaluación de adquisiciones sísmicas marinas realizadas en Cuba
| R. J. OJEDA CÉSAR
- 67-73 | El Georradar en la exploración de las cortezas saprolíticas. Caso de estudio yacimiento Yamanigüey, región de Moa
| J. ACOSTA BREAL, M. M. GENTOIU, J. L. MOURLOT y O. CARRAZ HERNÁNDEZ
- 75-78 | Evaluación de la aplicación de un complejo de métodos geofísicos para la cartografía de estructuras relacionadas con menas de cromitas
| O. DUSSAC TAMAYO, J. ACOSTA BREAL y M. GENTOIU
- 79-90 | Prospección de arena aluvial en sistemas fluviales de los ríos Jobabo y Tana con utilización de métodos geólogo – geofísicos
| L. E. FUENTES SALAS, A. BARROSO BETANCOURT, J. PÉREZ ACOSTA y F. PEREIRA ECHEMENDÍA
- 91-99 | Utilización de los datos de georradar en la estimación de recursos minerales con el empleo de la geoestadística, en yacimientos ferroniquelíferos
| M. M. GENTOIU y J. ACOSTA BREAL
- 101-106 | Metodología de rehabilitación biológica para la recuperación paulatina de los terrenos minados
| M. DEL C. RABILERO FERNÁNDEZ
- 107-116 | Uso de Ondas Ultrasónicas (OU) para mejorar los índices en el proceso de extracción de oro
| A. N. HERNÁNDEZ MARTÍNEZ, M. FIGUEROA, E. MÉRIDA LA O, M. PÉREZ PÉREZ, J. CASTELLANOS, J. A. ALONSO, I. CABRERA, A. DE LA CRUZ, I. HERNÁNDEZ y I. SALGADO
- 117-129 | Procedimiento para la rehabilitación de canteras abandonadas de materiales para la construcción
| R. I. FUENTES SARDIÑA y A. HERNÁNDEZ ÁLVAREZ
- 131-136 | Investigación geofísica con fines de abasto con agua subterránea a Bayamo
| R. FERNÁNDEZ ENRÍQUEZ
- 137-141 | Termodinámica de la lixiviación ácida de los residuales sólidos de la tecnología carbonato amoniacal
| E. GARCÍA PEÑA y A. PALACIOS RODRÍGUEZ
- 143-149 | Validación del método *Ensayo al Fuego Combinado con Espectrofotometría de Absorción Atómica* (EF-EAA)
| Y. RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ, I. VALENTÍN RODRÍGUEZ, J. O. PRIETO GARCÍA, J. B. DE LA TORRE y F. ACOSTA MARTÍNEZ
- 151-156 | Desarrollo de membranas a partir del empleo de minerales cubanos
| B. C. DELGADO DIÉZ, J. MARCHESE, A. FERNÁNDEZ RODRÍGUEZ, T. LUBIAN MARTÍNEZ y I. SALGADO MACHÍN

RESULTADOS DE LA EXPLORACIÓN COMPLEMENTARIA DEL CUERPO MINERAL ASOCIADO A LA VETA EL LIMÓN NUEVO DEL SISTEMA VETÍTICO JACINTO

ENRIQUE CLOALDO PIÑERO PÉREZ ⁽¹⁾, ELENA YURIEVNA MISHEKURINA y PABLO DONET CARRILLO

Empresa Geominera Camagüey

Carretera Central Este km 5 ½, Camagüey, Cuba.

Correo: (1) enriquepp@gmcmg.gms.minem.cu

RESUMEN

El Limón Nuevo es una de las vetas que conforman el depósito aurífero Jacinto en la provincia de Camagüey. Su exploración se realizó con el objetivo de poner en marcha una planta de beneficio, que iniciaría su funcionamiento con la mena extraída de esta veta y luego procesaría las menas del resto de las vetas del sistema vetítico Jacinto.

Se ofrecen los resultados del procesamiento de la información obtenida con la exploración complementaria del cuerpo mineral asociado a la veta El Limón Nuevo.

Se constata además que las condiciones hidrogeológicas del sector son simples, determinadas por un acuífero freático pobre y mínima afluencia de aguas subterráneas. Las condiciones geotécnicas no constituyen una complejidad para la minería a cielo abierto y se podrá acceder al mineral de forma rápida y segura. Las investigaciones tecnológicas demostraron que la mena responde al proceso de lixiviación con cianuro y posterior adsorción de oro con carbón en pulpa.

ABSTRACT

The Jacinto gold deposit, located in Camagüey province, is built up of some veins. One of them is the vein named El Limón Nuevo. Its exploration is carried out with the purpose of commissioning a processing plant that would begin its operation with the mined ore from this vein and later it would process the ores from the other veins of Jacinto system.

In this article are exposed the results of the interpretation of the information obtained from the complementary exploration of the ore body associated to El Limón Nuevo vein.

The researches carried out concluded that the hydrogeological conditions of the sector are simple, determined by a poor phreatic and minimum affluence of underground waters. The geotechnical properties don't lead to a complicated open pit mining and through an appropriate mining projection it will be able to accede to the mineral in a quick and safe way.

The technological investigations demonstrated that the ore responds to the heap leaching process with cyanide and later adsorption of gold with coal in pulp.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo recoge los resultados de la exploración complementaria de la veta El Limón Nuevo, una de las diez vetas de cuarzo con mineralización aurífera que conforman al sistema vetítico Jacinto, en la provincia de Camagüey. La exploración realizada tuvo como objetivo el incremento de recursos y reservas de oro con vista a la construcción y puesta en operación de una mina y planta de procesamiento, lo cual reviste gran importancia para la economía nacional.

Para lograr el objetivo propuesto, se desarrollaron trabajos topográficos, laboreos mineros (trincheras, raspados, pozo criollo, galería) y perforaciones en una red de 25 * 25 m. Además, se tomaron muestras para análisis químicos de oro, análisis petrográficos, mineralógicos y ensayos tecnológicos. Se realizaron también estudios hidrogeológicos e ingeniero - geológicos.

Los resultados obtenidos permiten evaluar la factibilidad técnico - económica del cuerpo mineral El Limón Nuevo para poner en producción una planta de beneficio.

DESARROLLO

Ubicación geográfica

La veta El Limón Nuevo, que se localiza en la porción más occidental del sistema vetítico Jacinto, se encuentra ubicada a unos 2,5 Km al SE de la loma Jacinto y a unos 30 Km al NNE del pueblo de Guáimaro, por la carretera que va a San Miguel de Bagá, en la provincia de Camagüey (Figura 1).

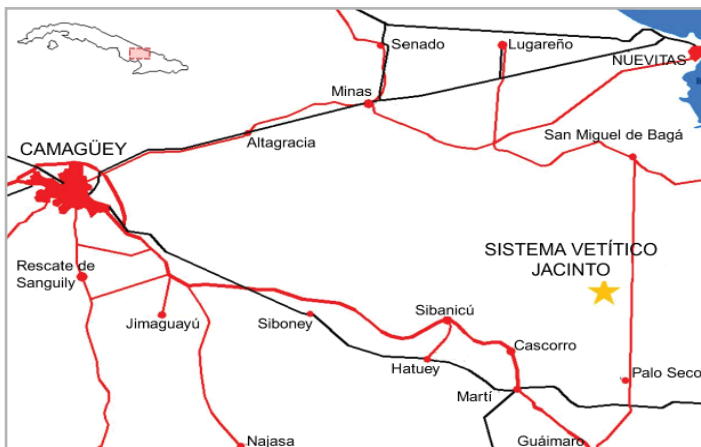


Figura 1. Ubicación geográfica del sistema vetítico Jacinto

Características geológicas regionales

El sistema vetítico Jacinto (Figuras 2 y 3) se encuentra ubicado dentro de la sección del Arco de Islas del Cretácico, caracterizada por un buen desarrollo de la Formación Camujiro de edad Cretácico Superior (Cenomaniano – Turoniano), representada mayoritariamente por lavobrecha andesito – dacítica, psamítica – aglomerática hasta de bloques, de color verde grisáceo, escasas lavas andesito – dacíticas y muy escasas tobas de granulometría

media a fina, que aparecen como capas de pequeños espesores. En general, las rocas se encuentran más o menos propilitizadas y tectonizadas. Llegan a formar brechas de color verde, sin mineralización, que alcanzan un amplio desarrollo. Estas rocas de la Fm. Camujiro son las que sirven de caja a las vetas de cuarzo con una predominante textura brechosa y en menor grado masiva, con mineralización epitermal aurífera del tipo adularia – sericítica; mientras que en la porción N - NW del sector aparece la Fm. La Sierra, del Cretácico Superior Campaniano, constituida por lavas riolíticas de color violáceo, en partes alteradas (argilitizadas), que aparecen como cuerpos cortantes, con una dirección NW. Se supone que estas intrusiones crearon condiciones o conductos para el sistema hidrotermal Jacinto.

La parte N – NE del área está cubierta por sedimentos clásticos aluvio – deluviales del Holoceno, que alcanzan hasta 30 metros de espesor (Figura 2).

Las rocas intrusivas que provocaron alteraciones a toda la secuencia de la Fm. Camujiro están representadas por granodioritas, granitos biotíticos – hornbléndicos y diques de diorita del Cretácico Superior (Campaniano) (Piñero *et al.*, 1992), que se aprecian en la porción S – SE del sector, con un escaso desarrollo, ya que el límite del sector pasa por el borde superior del gran plutón Sibanicú – Cascorro – Rincón (Figura 2).

Las alteraciones hidrotermales han afectado las rocas de la Fm. Camujiro, y han originado zonas de alteración argilítica y propilitica a las cuales pueden asociarse los sistemas de vetas epitermales de metales preciosos, como en el caso del sistema vetítico Jacinto.

El sector yace en un bloque moderadamente elevado, en el cual las rocas vulcanógenas presentan potencias de hasta 1000 m y donde se localizan fallas de carácter regional con dirección N -S (falla Las Piedras) y otras de rumbo 50° (falla Cascorro), que delimitan bloques que complican las estructuras de la región.

Los rumbos controladores de la mineralización en la zona son los sistemas NW - SE 330° - 340° y E - W 270° - 290°, que son los que alojan las vetas de cuarzo con mineralización aurífera; mientras que los sistemas N - S y NE - SW (posiblemente más jóvenes, post mineralización) son los que desplazan los sistemas mineralizados y crean un sistema de bloques (Figura 2).

En este sistema vetítico se reconocen 10 vetas. Entre ellas, las más importantes son El Limón Nuevo, Beatriz, Sur de Elena, Elena y la Ceiba, que afloran en un área de unos 5 Km². Las vetas rellenan lo que al parecer es un sistema conjugado de fracturas, que pueden ser divididas en dos grupos basados en la dirección de su rumbo: las vetas Beatriz y Sur de Elena tienen un rumbo del 320° - 330° y son generalmente más largas y potentes que las vetas Elena, El Limón Viejo y La Ceiba, estas últimas con rumbo 280°-290° (Figura 4).

Caracterización geólogo - tectónica del área

La veta El Limón Nuevo tiene su centro delimitado por la trinchera TE – 18, ubicada en una ligera elevación donde se aprecia una veta de cuarzo blanco, ligeramente bandeado y muy

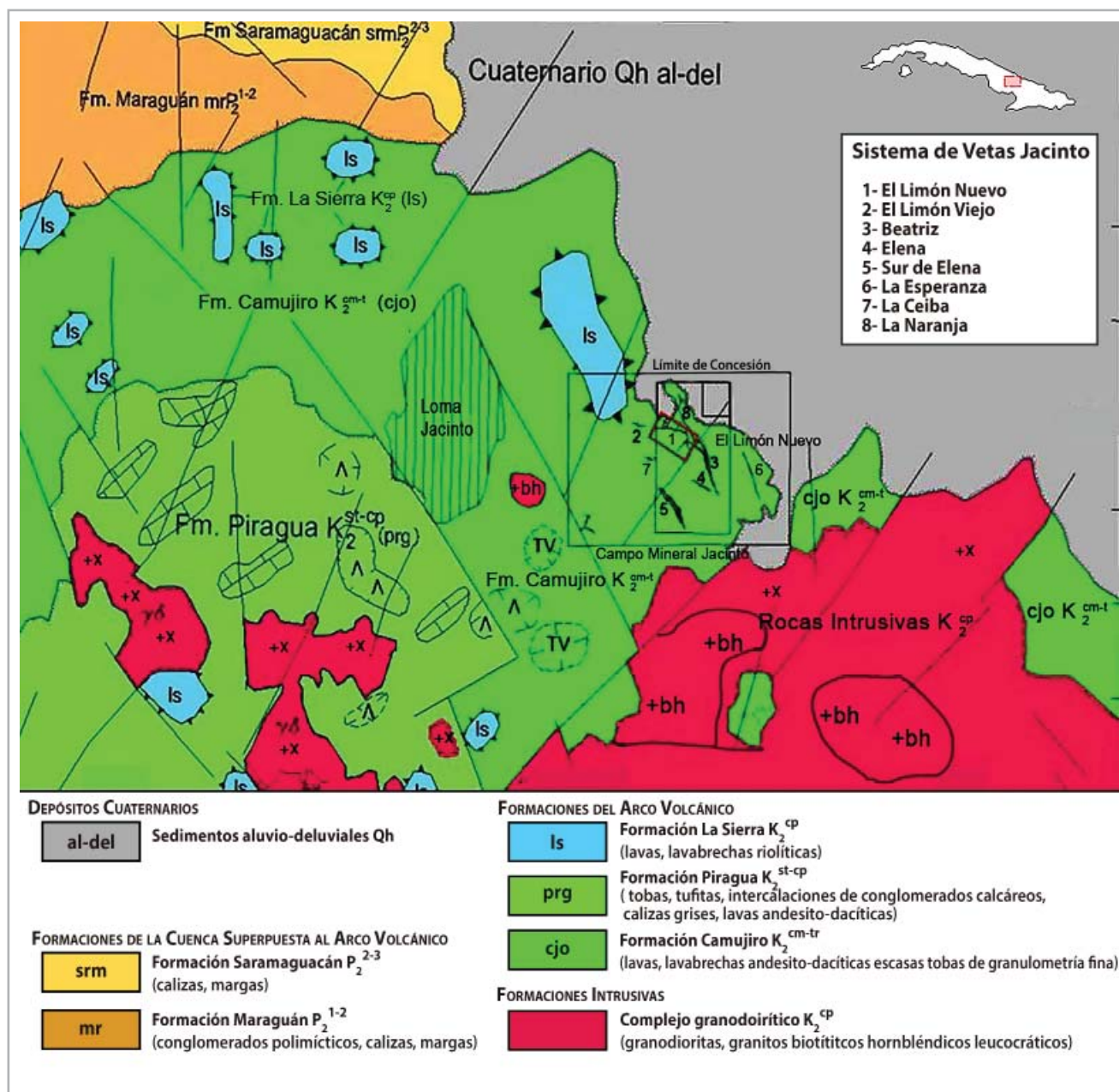


Figura 2. Esquema geológico regional. Tomado del Informe sobre los resultados del levantamiento geológico complejo a escala 1:50 000 del polígono Camagüey III. Sector Loma Jacinto.

tectonizado, con escasa limonitización, en la que se realizó una intercepción de 10 m de longitud con 7,10 g/t de oro. La veta es zigzagueante y se caracteriza por un rumbo promedio NW - SE (283°), en diferentes tramos su rumbo varía desde 246° hasta 316° . Alcanza aproximadamente unos 258 m (eje máximo), con ángulo de buzamiento promedio de 37° hacia el S - SW y una pendiente hacia el SE.

Estas características representan la parte noroccidental de la veta que constituye el cuerpo mineral principal, con una morfología homogénea y continua, afectado solo en sus extremos SE y NW por dos fallas (Figuras 5 y 6).

La porción oriental, por donde supuestamente este cuerpo mineral debe unirse a la veta Beatriz, se encuentra afectada por una situación tectónica más compleja. Allí solo aparecen lentes mineralizados aislados. Además, en la superficie fue seguida por unos 250 m, mediante trincheras y raspados, una zona de alteración cuarzo - sericitica que, según el muestreo realizado, no porta mineralización. En esta parte del sector aparecen tres fallas supuestas verticales de desplazamiento horizontal con direcciones N y NE, que pueden haber cortado a la veta y a la zona mineral en diferentes bloques y haberlos desplazado, debido a lo cual las perforaciones realizadas en esta zona no resultaron satisfactorias al tratar de dar continuidad al cuerpo mineral en esta dirección (Figura 5).

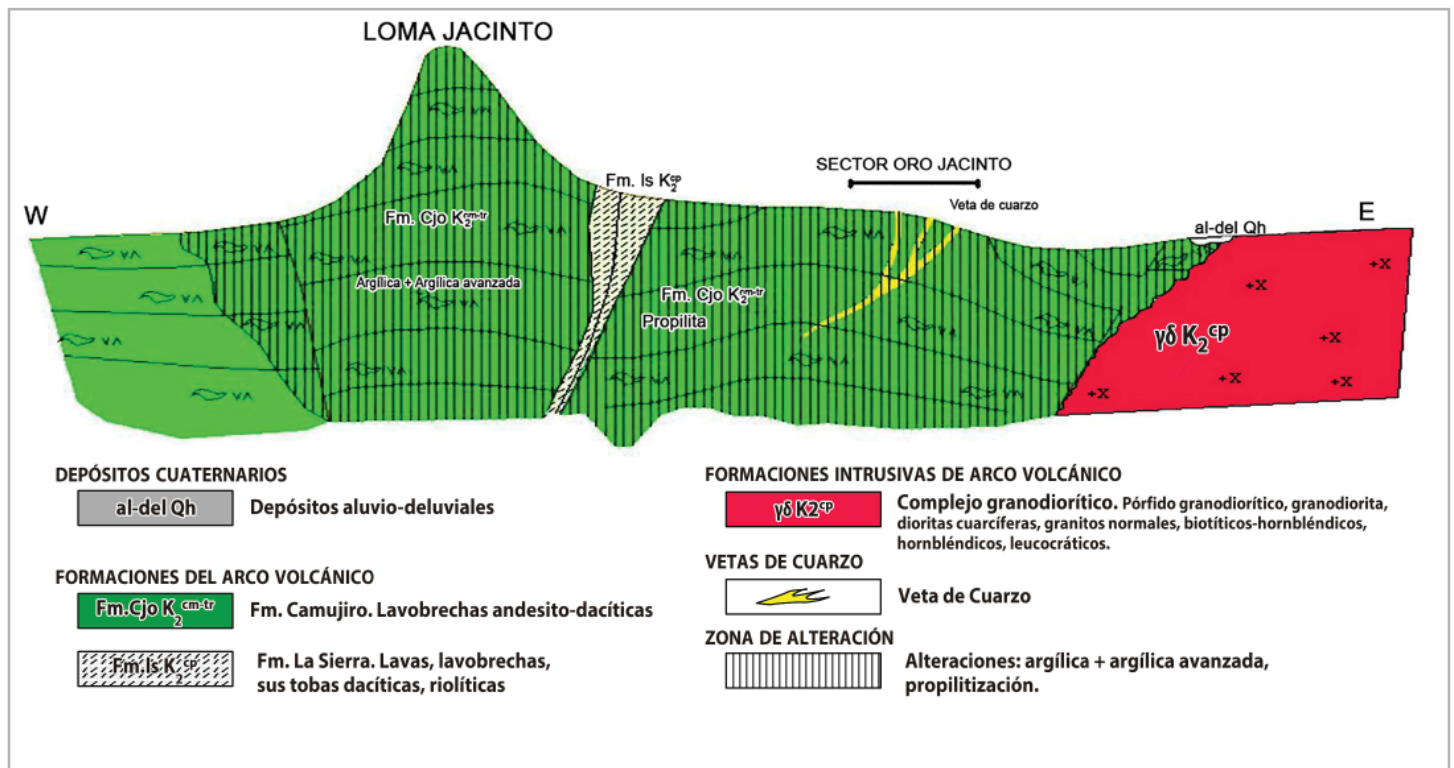


Figura 3. Perfil geológico esquemático W - E.

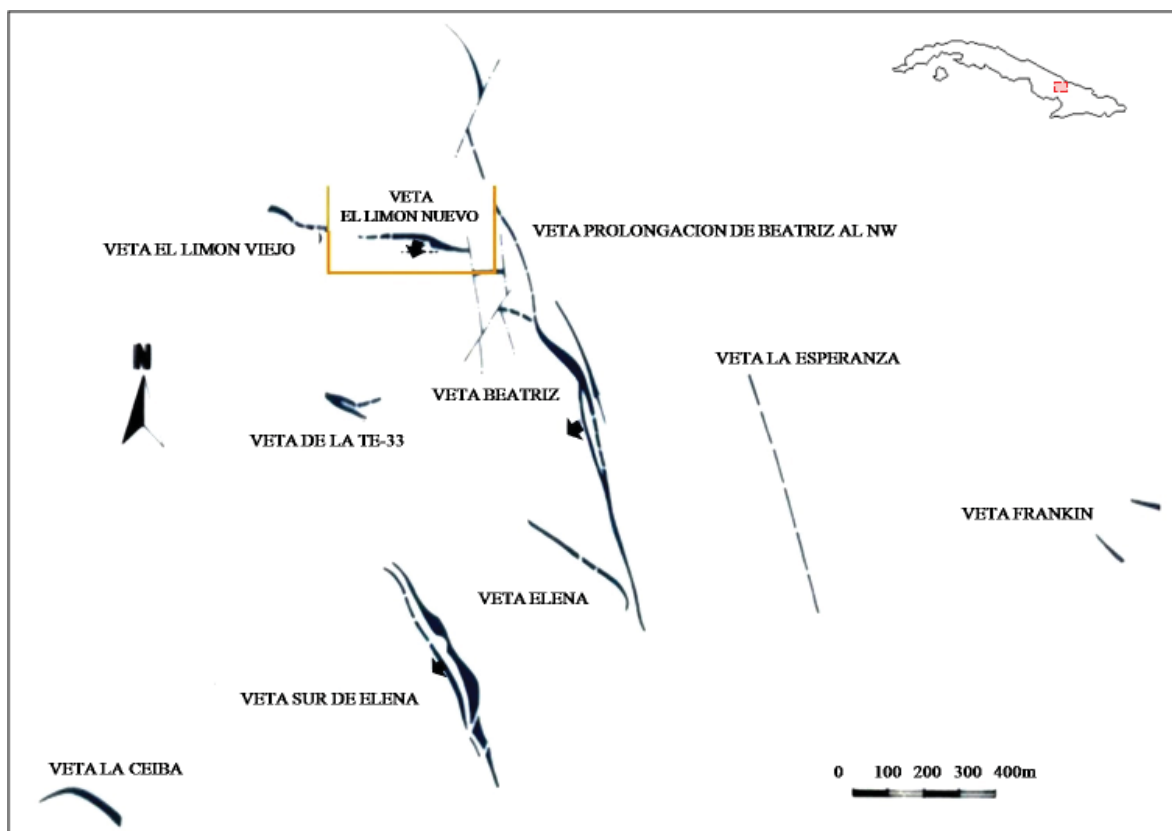


Figura 4. Esquema de distribución de las vetas en el sistema vetítico Jacinto.

La parte NW del área es cubierta discordantemente por los sedimentos terrígenos del Cuaternario datado del Holoceno, constituido por material aluvio – deluvial que alcanza espesores de hasta tres metros.

Las alteraciones hidrotermales han afectado las rocas de la Fm. Camujiro. A las zonas de alteración cuarzo - sericítica y propilítica originadas a partir de estas afectaciones está asociada la veta objeto de estudio de los autores. Los principales índices y criterios

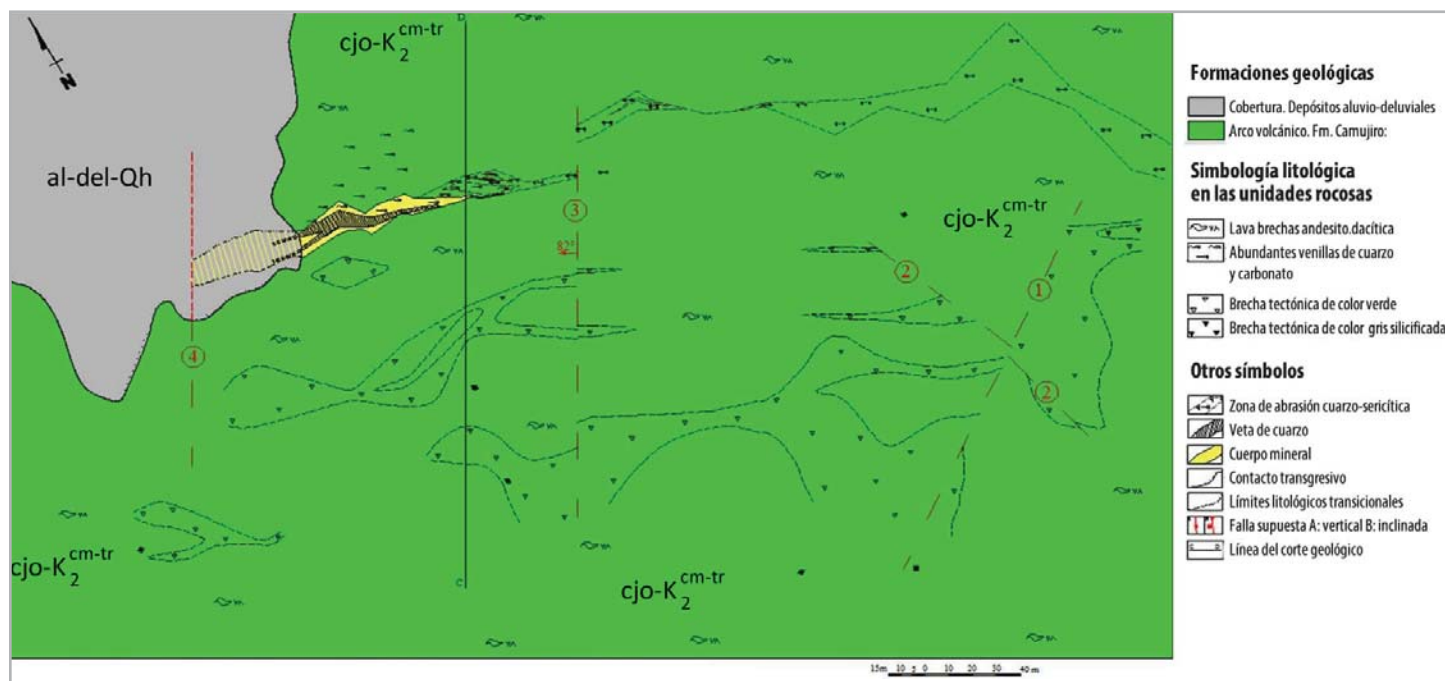


Figura 5. Veta El limón Nuevo. Mapa geológico.

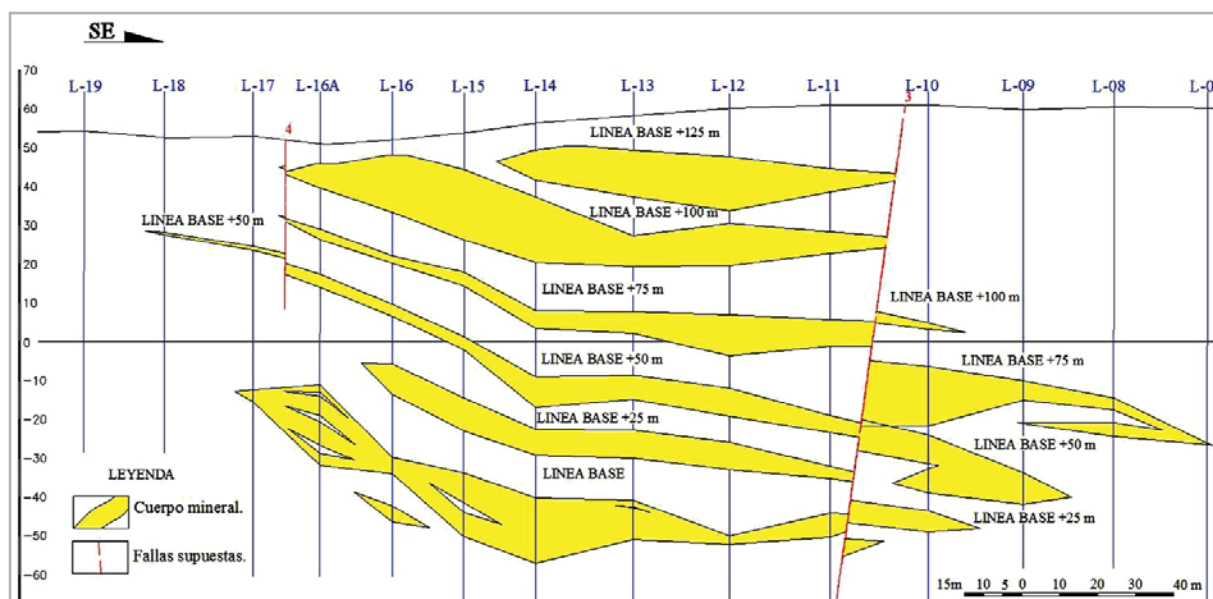


Figura 6. Cuerpo mineral El Limón Nuevo. Sección longitudinal combinada donde se presentan secciones realizadas cada 25 m.

de la mineralización han sido los afloramientos (cuarzo con textura brechosa y masiva, en partes bandeado) y las zonas de alteración.

La situación tectónica del área se encuentra controlada por el sistema con dirección NW – SE que aloja las vetas de cuarzo con mineralización aurífera. Además, aparecen otros sistemas como el NE – SW y N – S, pero sin mineralización, los cuales desplazan a los sistemas antes mencionados, formando una estructura de bloques que complican la situación tectónica de la veta y su cuerpo mineral asociado. Este hecho es corroborado por una reinterpretación (Figuras 7 y 8) a partir de la cual se confirma que el control estructural en el depósito viene dado por la conjunción de fallas syn - arco WNW, NE y N - S, las cuales estuvieron activas hasta la misma extinción del arco. Este nudo estructural favoreció la extrusión del vulcanismo representado por la Fm. La Sierra, portador de la mineralización del depósito.

La Figura 8 muestra una roseta en la que se pueden notar las direcciones del fallamiento syn-arco total fotointerpretado dentro del sector de desarrollo del sistema de vetas Jacinto, coincidentes con las direcciones de las rupturas principales mostradas en el mapa resumen.

En la situación particular del área de desarrollo de la veta El Limón Nuevo se pudieron definir cuatro estructuras disyuntivas, con categoría de supuestas, que se reflejan muy bien en las secciones longitudinales (ver Figura 6) y el mapa geológico (ver Figura 5). Dichas estructuras se describen a continuación:

-Falla 1: se desarrolla en el extremo E del área atravesando los perfiles L - 03 hasta L - 05, su rumbo es 338° y su buzamiento es vertical.

-Falla 2: otra falla vertical que atraviesa perfiles L - 02 hasta L - 04 al E del sector con el rumbo 234°.

-Falla 3: afecta el cuerpo mineral principal, se ubica entre los perfiles L - 10 y L - 11 paralela al perfil, su rumbo es 30° y buzamiento 82° al NW.

-Falla 4: es una falla vertical que se ubica entre los perfiles L - 16A y L - 17 paralela al perfil (rumbo 30) afectando el extremo NW del cuerpo mineral.

Es posible apreciar que, de los complejos rocosos presentes en el área, el más afectado por la situación tectónica es la asociación vulcano – plutónica, mientras que la secuencia terrígena del Cuaternario sólo sufre afectaciones tectónicas recientes.

Mineralización

Macroscópicamente, la mineralización aurífera del cuerpo mineral El Limón Nuevo se puede asociar a la veta de cuarzo con textura brechosa y textura masiva, en partes bandeada, sin preferencias. Se puede observar que en las salbandas aparece una zona con abundantes vetillas finas en forma de malla rellenas de cuarzo y calcita, las cuales tienen contenidos de oro que en ocasiones pueden ser altos, aunque casi siempre son de baja ley. También puede aparecer algún contenido de oro asociado

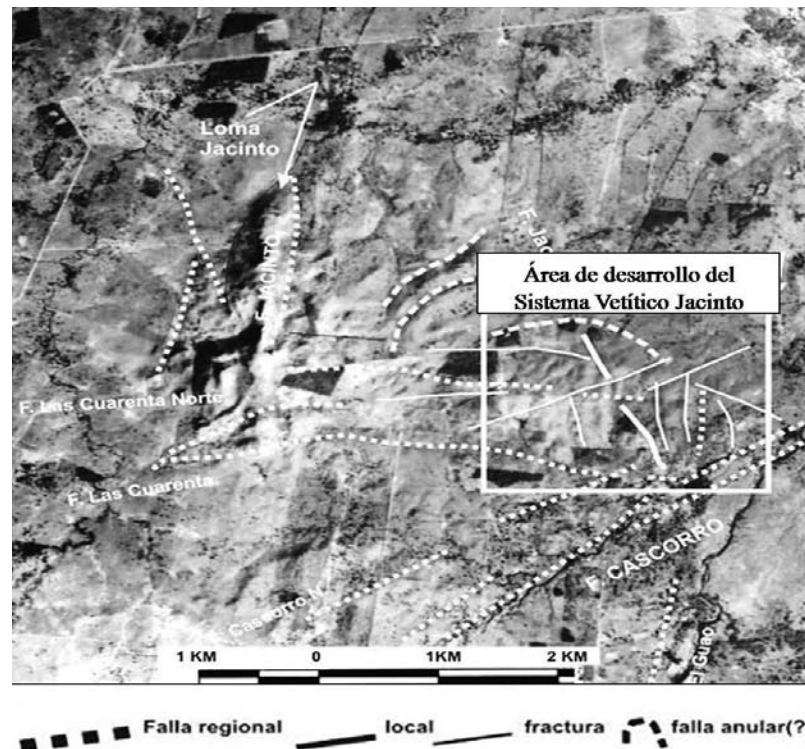


Figura 7. Foto pancromática (año 1956) donde están trazados algunos lineamientos sin arco en el área de desarrollo del sistema vetítico Jacinto y sus alrededores. Tomado de Capote, 2002.

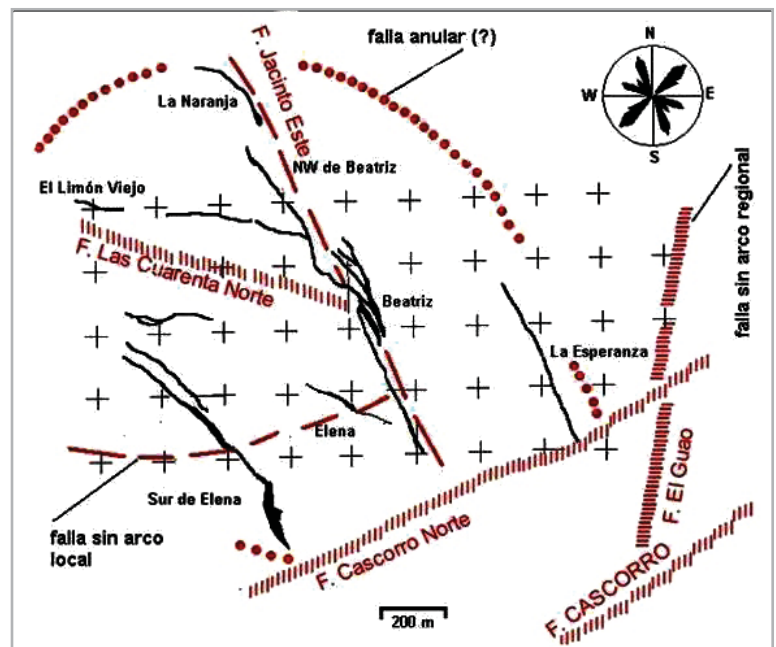


Figura 8. Esquema resumen de la situación tectónica del sistema vetítico Jacinto.

a una brecha de color gris a gris blancuzco, que se forma a partir de una roca cuarzo sericitica en partes silicificada y tectonizada, con sulfuros hasta un 5 %, la cual siempre está estrechamente relacionada con la veta de cuarzo (Figuras 9 y 10).



Figura 9. Cuerpo mineral El Limón Nuevo. Veta de cuarzo con textura brechosa.



Figura 10. Cuerpo mineral El Limón Nuevo. Veta de cuarzo con textura masiva.

No obstante, los contornos del cuerpo mineral o zona mineralizada se definen con seguridad por los resultados del análisis químico.

El cuerpo mineral El Limón Nuevo se caracteriza por un rumbo promedio de 283° y buzamiento hacia el SW con ángulos variables, con un valor promedio de 37° (Figura 11). La continuidad de la mineralización por buzamiento alcanza unos 198 m. La potencia real del cuerpo mineral varía entre 0,4 m y 16,7 m. La potencia real promedio del cuerpo mineral es de 5,26 m.

La variabilidad de los parámetros del cuerpo mineral, tales como potencia real, contenido de metal y el metro – gramo, puede observarse en la Figura 12. En esta se aprecia una zona

de enriquecimiento que presenta un “hundimiento” o *plunge* hacia el SE y en su parte NW está limitada por la superficie, lo cual indica que la misma se encuentra ya destruida por la erosión. Dentro de esa zona, la potencia disminuye en dirección del hundimiento, el contenido aumenta hasta la cota cero aproximadamente y luego disminuye hacia la profundidad. Otra zona de enriquecimiento, aunque con un contenido menos pronunciado, se aprecia en la porción central inferior del cuerpo, y está acompañada por un aumento de potencia.

Los contenidos de los elementos nocivos y acompañantes de las menas fueron estudiados en la campaña de 1995 – 2000. Dicho estudio arrojó valores bajos para Ag (promedio: 2,79 ppm) y elementos cianicidas, que pudieran resultar nocivos para el proceso de beneficio. Esta información fue corroborada durante la caracterización química de las muestras tecnológicas, realizada en el CIPIMM. En el ensayo de laboratorio ampliado se reportó que las concentraciones obtenidas para los cianicidas (Fe, Cu y Zn) fueron muy bajas, lo cual resulta beneficioso para los procesos posteriores de elución – electrólisis y fundición (Figueredo *et al.*, 2011 a).

Características mineralógicas de la mena

Los minerales de mena están representados por escasos sulfuros (pirita, calcopirita, esfalerita, galena, tetraedrita) y oro. El más observado es la pirita (hasta 7% en cuatro muestras, en el resto oscila entre < 1 y 2%), el resto de los sulfuros apenas aparecen. Los minerales de ganga más comunes son cuarzo y carbonato, entre los que predomina el primero. La roca de caja es lava andesítica (lavobrecha), como fue reportado por Simón *et al.* en 1999.

Según las observaciones y estudios realizados, el proceso de mineralización puede ser dividido en dos fases. La primera es la fase endógena, en la cual se asocia inicialmente la magnetita con la roca de caja - lava andesítica (lavobrecha) y, posteriormente, se presenta la mineralización epitermal donde aparecen la pirita, calcopirita, esfalerita, galena, oro y tetraedrita. La segunda fase es la hipergénica, representada por goethita, hematita y otros óxidos e hidróxidos de hierro.

La pirita es el mineral metálico más frecuente, se observa en forma de granos euhedrales, subhedrales y anhedrales dispersos en la ganga. Es posible distinguir dos variedades. Una de ellas es idiomórfica, con poros, en algunos casos, rellenos de tetraedrita y esfalerita, con tamaños que oscilan entre 0,003 y 0,165 mm, y en algunas muestras puede alcanzar 0,400 mm. Esta pirita en ocasiones se altera a goethita y hematita. La otra variedad de pirita observada presenta formas anhedrales y tamaño mucho más fino, de alrededor de 0,088 mm (Torres *et al.*, 2011).

La calcopirita se presenta dispersa en la ganga o corroe a la pirita. Tiene formas anhedrales y tamaños que oscilan entre 0,0380 y 0,1485 mm. La esfalerita aparece en forma de granos anhedrales que bordean a la pirita generalmente, aunque se pudo observar algunos que la incluyen. Sus dimensiones alcanzan 0,05 a 0,28 mm. La galena es escasa, presenta formas xenomórficas y se observa bordeando a la pirita. Su tamaño oscila entre 0,022 y 0,165 mm.

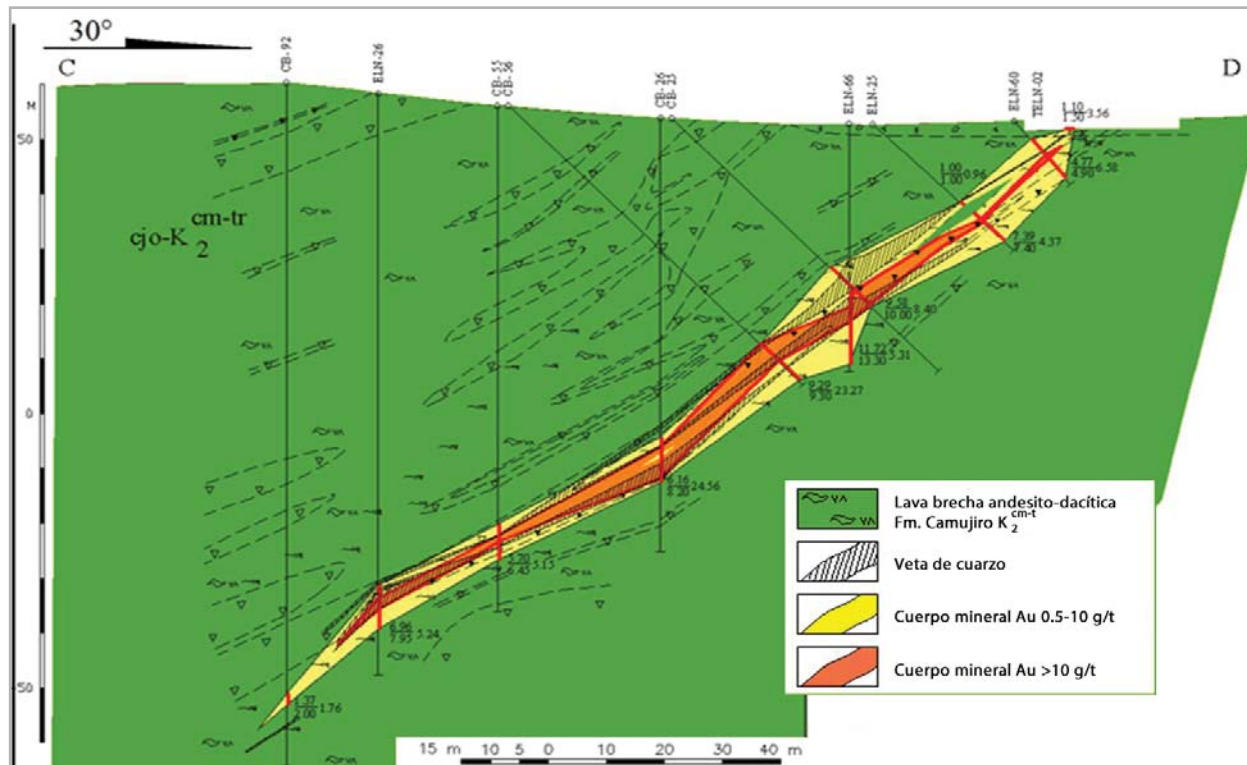


Figura 11. Cuerpo mineral El Limón Nuevo. Perfil geológico.

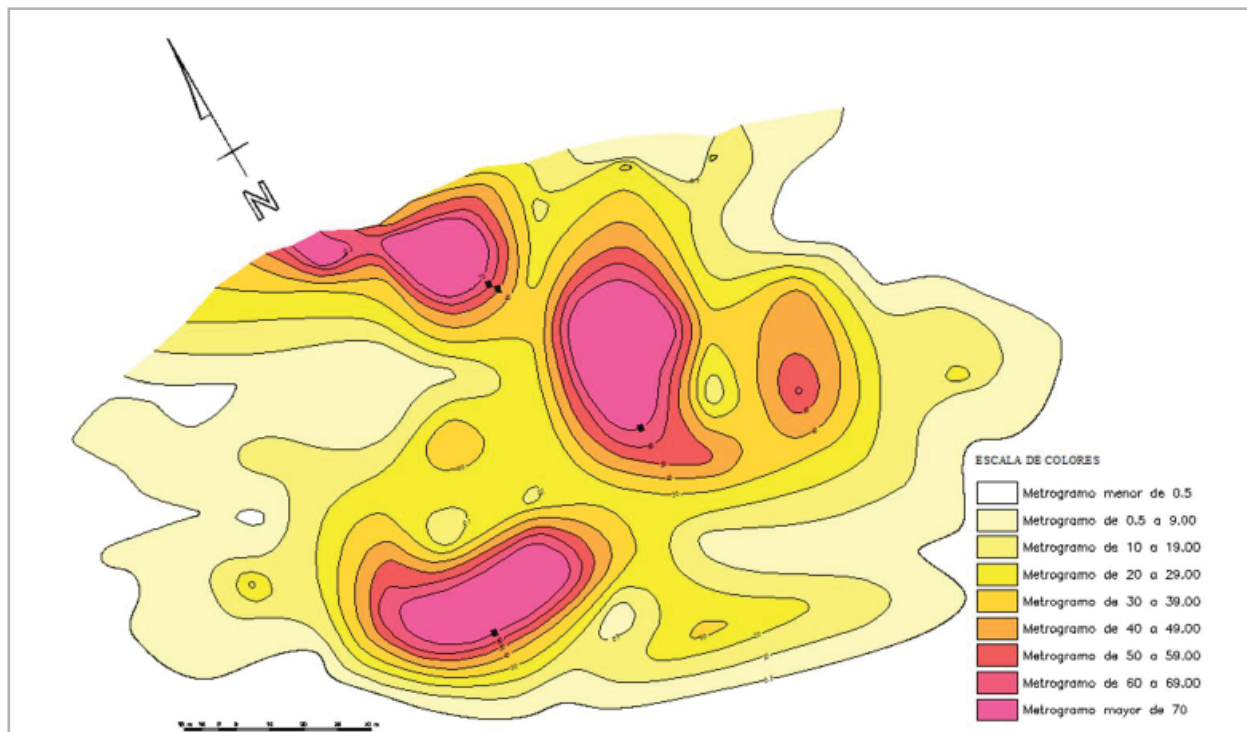


Figura 12. Cuerpo mineral El Limón Nuevo. Proyección horizontal con isolíneas de metro / gramo.

En el caso de la tetraedrita, se reportan raros granos anhedralmente rellenando poros de pirita, con tamaños que oscilan entre 0,006 y 0,0165 mm.

La mineralización sulfurosa en las muestras tomadas es muy escasa, en ocasiones llega a ser nula. Cuando aparece, se observa diseminada mayoritariamente, aunque en raras muestras de trincheras aparece un ligero desarrollo de vetillas.

El oro se encuentra en forma nativa, en estado libre. En las secciones pulidas se observó en diseminaciones anhedralmente principalmente (Figura 13), aunque pudieron verse algunas partículas ganchudas (Figura 14), alargadas (Figura 15), subangulosas y subredondeadas, raras veces redondeadas.

Su granulometría es muy fina, su tamaño oscila entre < 0,003 mm y 0,0275 mm. Aunque se ha reportado un grano alargado con $0,088 \times < 0,003$ mm, la mayoría de las partículas poseen tamaños menores de 0,02 mm. Se observaron dos variedades de oro con diferentes tonalidades, una más amarillenta y otra más rojiza. En ocasiones aparece el oro con inclusiones de pirita, fragmentos de rocas, calcopirita, cuarzo y otros (Torres *et al.*, 2011).

Características petrográficas de las rocas encajantes

En el área de trabajo, las lavobrechas son las rocas predominantes. Son igualmente las encajantes de la veta de cuarzo El Limón Nuevo, con mineralización aurífera.

Se describió una lavobrecha andesítica, en la cual se observan claramente raros fragmentos de lava de otra composición y textura. También fueron descritas andesita brechada, andesita hornbléndica de textura fina y gruesa, raro andesito - basalto, pocos espesores de toba vitrocrystalina, vitrocrystalolítica, escasa toba litocrystalina lapílica y roca subvolcánica andesito - dacítica (Torres *et al.*, 2011). En escasos pozos y una trinchera, en la lava andesítica se observaron además fragmentos de diorita.

Las lavobrechas han sido descritas con relativa abundancia en la Fm. Camujiro. En muestra de mano estas rocas no se observan fragmentarias, pero bajo el microscopio es posible identificar en estas raros fragmentos de lava con textura microlítica algo orientada sin incremento de sílice secundaria en la matriz; además de pórfido andesítico y listones finos y alargados, de textura microlítica gruesa y fina de listones entrecruzados cristalinos.

En los análisis petrográficos realizados a muestras de pozos de la veta El Limón Nuevo se observaron zonas con minerales predominantes del conjunto de alteración propilítica, como el cuarzo, carbonato, sericita, clorita y epidota. En algunas muestras se detectó el feldespato potásico adularia (Torres *et al.*, 2011). Todo esto confirma la interpretación de los diferentes eventos de alteración que fueron planteados por Simón y colaboradores en 1998, y califica el yacimiento genéticamente como epitermal de baja sulfidación con adularia.

Condiciones hidrogeológicas e ingeniero - geológicas

Los trabajos hidrogeológicos realizados concluyen que las condiciones hidrogeológicas del sector El Limón Nuevo están determinadas por un acuífero freático de baja acuosidad, por lo que son simples para someterlo a una explotación minera.

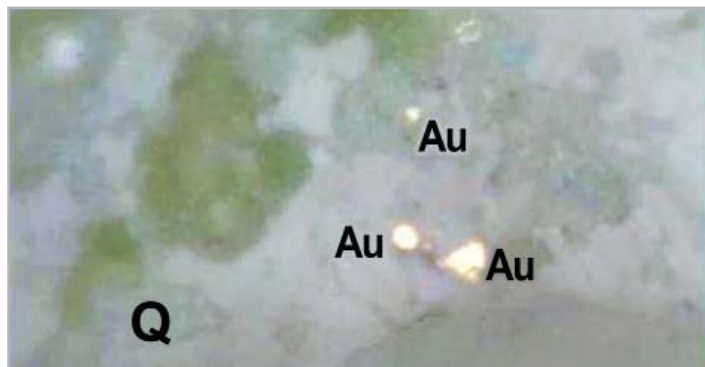


Figura 13. Granos de oro (Au) anhedralmente en cuarzo (Q). 400x. Tomado de Torres *et al.*, 2011.

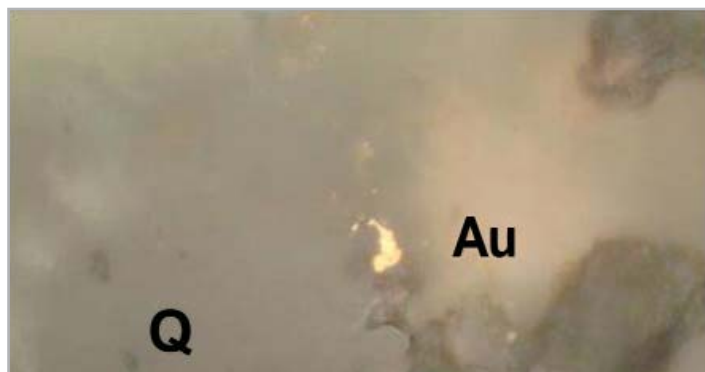


Figura 14. Grano de oro (Au) con forma ganchuda, en cuarzo (Q). 400x. Tomado de Torres *et al.*, 2011.



Figura 15. Grano de oro (Au) con forma alargada, en cuarzo (Q). 400x. Tomado de Torres *et al.*, 2011.

Sobre las propiedades de filtración de las rocas, es posible afirmar que estas son muy bajas. Los cálculos arrojaron un coeficiente de filtración de 0,03689 m/día y las afluencias de aguas subterráneas son mínimas.

Las condiciones geotécnicas del área estudiada no constituyen una complejidad para una minería a cielo abierto como está planificado. Las rocas son de fácil extracción, y con una proyección adecuada de los trabajos mineros se podrá acceder al mineral de forma rápida y segura.

Las condiciones ingeniero geológicas del área de estudio están subordinadas a las condiciones geológicas, así como a los procesos tectónicos y de intemperismo que han tenido lugar. Se aprecia que las características geotécnicas de las rocas poseen una anisotropía determinada por la gran variabilidad de los parámetros mecánicos. Quedaron definidos tres Tipos Ingeniero Geológicos con parámetros mecánicos similares, en general bajos y cualitativamente diferentes (Piñero *et al.*, 2011).

Recursos estimados

La estimación de los recursos se efectuó basándose en la interpretación geológica, utilizando el sistema automatizado Datamine Studio versión 3.19.4135.0 y las herramientas que este proporciona para el modelado, análisis exploratorio de datos, variografía, estimación y clasificación de los recursos geológicos. Dicha estimación abarcó desde la superficie hasta la cota -78.00 m.

Las condiciones utilizadas fueron las siguientes:

- Ley de borde de Au:	0,5 g/t
- Potencia mínima industrial:	1,0 m
- Potencia máxima de intercalaciones estériles:	2,0 m

La interpretación de los límites físicos del modelo geológico se efectuó basándose en las secciones verticales transversales y en los planos por niveles, teniendo en cuenta el diseño de perímetros o polígonos que envuelven la zona mineral en cada perfil o sección y en cada plano de nivel. De este modo se elaboraron 20 secciones verticales transversales, con dirección al noroeste, espaciadas aproximadamente 25 m y 26 planos de nivel cada 5 m.

CONCLUSIONES

El mineral de oro se observó en diferentes granulometrías como inclusiones en el mineral portador (cuarzo y el feldespato muy fino), con un tamaño que oscila entre 3 y 10 μm . Además, en todas las fracciones analizadas tiene una distribución casi uniforme.

Las investigaciones mineralógicas reportaron que los contenidos de SiO_2 en las muestras estudiadas fueron significativos (86%), lo que confirmó la presencia de las fases mayoritarias como el cuarzo (53%) y el feldespato. Otro tanto sucede con el aluminio que se encuentra asociado a las hidrómicas, plagioclasas, feldespatos y, en menor proporción, arcillas.

Los elementos tales como Cu, Fe, Zn y As se encuentran en concentraciones muy bajas, lo cual es muy favorable al proceso de cianuración.

Las condiciones hidrogeológicas del cuerpo mineral y su entorno son simples y las propiedades de filtración de las rocas son muy bajas, lo que resulta favorable para someterlo a un proceso de explotación.

Las características geotécnicas del área estudiada no constituyen una complejidad para una minería a cielo abierto. Las rocas son de fácil extracción, por lo que se podrá acceder al mineral de forma rápida y segura.

BIBLIOGRAFIA

- Capote, C., 2002. *Evaluación del potencial de metales preciosos y base del Arco Cretácico en el territorio Ciego – Camagüey – Tunas.* (I+D 224), IGP. Inédito
- Figueredo, M., Bugallo, F., Castellanos, J., Dennis, H., Pérez, M., Alcalá, R., Montejo, E., 2011 a. *Proyecto I & D 602066. Investigación Tecnológica Detallada de laboratorio del Depósito Oro Jacinto, Veta El Limón Nuevo. Fase III del CIP 09-116.* CIPIMM. Inédito
- Figueredo, M., Montejo, E., Castellanos, J., Pérez, M., Bugallo, F., 2011 b. *Pruebas de planta piloto de una muestra representativa del depósito Oro Jacinto veta El Limón Nuevo.* CIPIMM. Inédito
- Piñero, E., et al., 1992. *Informe sobre los resultados del levantamiento geológico complejo a escala 1:50 000 del polígono Camagüey III. Sector Loma Jacinto.* (Inédito). Geominera Camagüey.
- Piñero, E., Mishekurina, E., Donet, P., 2011. *Informe final sobre la Exploración Complementaria Oro Jacinto.* Veta El Limón Nuevo. Geominera Camagüey. Inédito
- Simón, G., Piñero, E., Russell, N., Kesler, S. E., Bell, D., Halls, C. M., 1998. *Epithermal Mineralization in our Volcanic Arc: The Jacinto Deposit, Camagüey District, Cuba.*
- Torres, M., de la Nuez, D., Suárez, W., Lisabet, E., 2011. *Informe mineralógico, minerográfico y petrográfico de la exploración complementaria "Oro Jacinto".* IGP. Inédito

COLUMNA ILUSTRADA DEL REGISTRO MACROFÓSIL DE CUBA

REINALDO ROJAS CONSUEGRA

Museo Nacional de Historia Natural de Cuba

Obispo 61, Plaza de Armas, Habana Vieja, CP10100, La Habana, Cuba.

Correo: rojas@mnhnc.inf.cu

RESUMEN

El registro fósil cubano puede considerarse adecuadamente conocido, lo que permite su representación gráfica. Con tal objetivo, este trabajo presenta, por primera vez para la Paleontología cubana, la columna ilustrada completa del registro macrofósil de Cuba. Mediante líneas de diferentes grosores, de acuerdo a una escala adecuada, se grafica la distribución cronoestratigráfica de los grupos de macrofósiles más destacados presentes en el substrato geológico del país. Es así que aparecen representados los registros de plantas, animales (invertebrados y vertebrados) e icnofósiles. Se recogen gráficamente en total 29 líneas de presencia - abundancia y distribución temporal, tanto de invertebrados (17 grupos) como de vertebrados (20), icnofósiles (1) y plantas (1). En general, la columna evidencia la correlación entre el registro fósil y la evolución del paleoambiente en la región durante los últimos 200 millones de años. El presente resultado es de amplio uso práctico en diferentes niveles de enseñanza, así como para la valoración y protección del patrimonio paleontológico y la contribución a la formación de una cultura científica en la sociedad cubana.

ABSTRACT

The Cuban fossil record could be considered enough well known, allowing its graphic representation. With that aim, in the present work is represented, for the first time for Cuban Palaeontology, the complete illustrated column of the Cuban macrofossil record. Throughout lines with different width, in the adequate scale, it is represented the chronostratigraphic distribution of the most important macrofossils groups, presented in the geological substrate of the country. This way, are represented: plants, animals (invertebrate and vertebrate) and the icnofossils. It is graphically given a total of 29 lines of present - no present and temporal distribution of the invertebrate (17 groups), as well as the vertebrate (20), icnofossils (1) and plants (1). The column, in general, made evident the correlation between the fossil record and the evolution of the palaeoenvironment in the region, along the last 200 millions years. The present result has a wide practical use in the different education levels, in the patrimonial valuation, and in the formation of a scientific culture about nature.

INTRODUCCIÓN

El registro fósil cubano puede considerarse apropiadamente conocido, lo cual permite su representación gráfica. Con tal objetivo, en este trabajo se presenta la columna ilustrada completa del registro macrofósil de Cuba.

Cientos de trabajos dispersos en la literatura geológica y paleontológica del país fueron revisados en la última década para conformar el sitio web de la Paleontología de Cuba (Rojas Consuegra y Alabarreta Pérez, 2009 - 2014). Los resultados se fueron dando a conocer de forma cuantitativa y cualitativa, anterior y posteriormente a su publicación (e.g. Rojas Consuegra, 2007, 2009; Rojas Consuegra y Viñola López, 2013), principalmente en las convenciones cubanas sobre geociencias.

El estudio del registro fósil del país, tanto de invertebrados como de vertebrados, es un proceso sistemático y continuo, con nuevas aportaciones a su conocimiento. En relación con los invertebrados fósiles, han sido descritos nuevos taxones de crustáceos decápodos, lo que representa un significativo impulso en esa dirección (e.g. Schweitzer *et al.*, 2006; Varela y Rojas Consuegra, 2010, 2011 a, b, c; Varela y Schweitzer, 2011). Además, se han registrado nuevos taxones de ammonites (Barragán *et al.*, 2011), entre otros aportes.

Los icnofósiles pasaron de ser un grupo desconocido a tener un grado de conocimiento general muy elevado (Villegas Martín y Rojas Consuegra, 2008, 2012; Rojas Consuegra y Villegas Martín, 2009). De la misma forma, se han descrito recientemente nuevas especies relacionadas con perforaciones en madera fósil, para el límite Cretácico - Paleógeno (Villegas Martín y Rojas Consuegra, 2011, 2012) y el Jurásico Superior (Villegas Martín *et al.*, 2012), lo cual representa un conocimiento totalmente nuevo para Cuba.

En el caso de los vertebrados, se han realizado revisiones importantes y también nuevos aportes taxonómicos. La información de los saurios marinos jurásicos es relativamente bien conocida (Iturralde Vinent, 2007, 2011). Los tiburones fósiles, rayas y otros peces son revisados continuamente y se han descubierto en las colecciones nuevos taxones para el Caribe (e.g. Aranda Manteca *et al.*, 2011; Rojas Consuegra y Viñola López, 2013). Los mamíferos extintos de Cuba también han sido objeto de revisiones (Silva *et al.*, 2007) y se han aportado datos sobre otros yacimientos (Rojas Consuegra *et al.*, 2012).

Este trabajo es una contribución al proyecto de investigación *Registros paleontológicos y paleoclimáticos de Cuba: una visión integradora* (2014 - 2016), del MNHNC (AMA - CITMA).

MATERIALES Y MÉTODOS

La información reflejada en la columna proviene de la nutrida literatura paleontológica, que desde el siglo XVIII se ha ido aportando a la ciencia por varias generaciones de especialistas cubanos y extranjeros.

Una síntesis de ésta puede ser consultada, en la sección de Anexos, dentro del sitio web sobre Paleontología de Cuba (www.redciencia.cu/webpaleo, Rojas Consuegra y Alabarreta Pérez, 2009 - 2014). También se agrega la información recopilada de la Colección de Paleontología del MNHNC y de los trabajos de

campo realizados por los autores.

El reflejo gráfico de esta información se muestra mediante líneas de diferentes grosores, de acuerdo a una escala adecuada. Con estas se representa la distribución cronoestratigráfica de los grupos de macrofósiles más destacados, presentes en el substrato geológico del país.

Las líneas contempladas poseen diferente "expresividad" cada una, en correspondencia con la abundancia del grupo dado en el lapso de tiempo abarcado (periodo, en la mayoría de los casos). No obstante, han sido reflejados incluso los grupos representados al menos por un taxorregistro (entidad identificada hasta algún nivel taxonómico, incluso solo a nivel de grupo biológico).

En el caso de ammonites y rudistas se hace una excepción, pues la representación gráfica está hecha en base su distribución estratigráfica a escala de piso o edad, correspondiente al Cretácico. Esto se debe a que explícitamente se pretende mostrar el patrón de extinción que exhiben ambos grupos, devenidos extintos en el límite Cretácico - Paleógeno (K - Pg), y a que estos poseen una abundancia relativamente alta, pero de una duración temporal corta.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Aunque en el registro fósil de Cuba deben existir elementos y entidades conservadas (fósiles) pertenecientes a los cinco reinos básicos definidos en la actualidad (Bacteria, Archaea, Fungi, Plantae y Animalia), en la columna solo se reflejan aquellos que han sido reconocidos de forma explícita. Así, aparecen representados plantas, animales (invertebrados y vertebrados) e icnofósiles.

En general, se contabiliza un total de 1272 taxorregistros en el registro macrofósil de Cuba, de ellos 986 invertebrados, 182 vertebrados, 38 icnofósiles y 55 plantas; la mayor parte de estas últimas son deducidas del estudio paleopalínológico de sedimentos. Estas cifras cambian constantemente, a medida que aumenta el grado de estudio de los diferentes grupos fósiles.

Se recogen gráficamente en total 29 líneas de presencia - abundancia y distribución temporal, tanto de invertebrados (17 grupos) como de vertebrados (20), icnofósiles (1) y plantas (1). Algunos taxorregistros no han sido graficados, por contarse con escasos datos de su distribución o por su pobreza (belemnites, sepoideos, *rhyncholites*, etc.). Obviamente, tampoco se representan los microfósiles, donde se incluirían las algas, esponjas y otros tipos de elementos o entidades conservadas de tamaños menores de un milímetro (microscópicas) y hasta de micrones.

Registro de invertebrados, icnofósiles y plantas

El esquema presentado en la Figura 1 refleja la diversidad del registro macrofósil de Cuba y la abundancia de cada grupo de organismos en los diferentes periodos geológicos. La distribución general de los diferentes grupos por periodos queda como muestra la Tabla I.

Tabla I. Distribución general de los grupos de macrofósiles por periodos geológicos.

PERÍODO	GRUPOS	TAXORREGISTROS
Jurásico	12	118
Cretácico	16	282
Paleógeno	12	141
Neógeno	12	171
Cuaternario	11	269

Aunque la cantidad de grupos registrados puede resultar cercana en cada periodo, evidentemente los grupos presentes no son los mismos en su totalidad. Por su parte, la cantidad de taxoregistros sí es muy variable y desigual.

Quedaron graficados 19 grupos de mega o macrofósiles presentes en el registro estratigráfico cubano, que aportan información valiosa para su interpretación y uso. Los grupos recogidos en la columna son: corales, briozoos, braquiópodos, moluscos (gasterópodos, rudistas, escafópodos y otros bivalvos, cefalópodos ammonioideos y nautiloideos), anélidos, equinodermos (equinoideos, crinoideos y asteroideos), crustáceos (decápodos y cirrípedos), icnofósiles y plantas.

Interpretación

La distribución cronoestratigráfica de los grupos reflejados, junto a su abundancia, evidencia tendencias y regularidades que pueden ser interpretadas, al menos de modo general.

No obstante, para algunos grupos solo tiene valor su presencia (braquiópodos, nautiloideos, anélidos, escafópodos, asteroideos y cirrípedos), ya que se registran de uno a tres taxones como máximo por cada uno. Por otro lado, las plantas se representan a partir de la recogida de datos que los autores interpretan durante los estudios paleopalínológicos fundamentalmente, y más raramente paleobotánicos, sobre taxobiotemas vegetales.

Los corales, gasterópodos y bivalvos exhiben una presencia positiva (ascendente) del pasado lejano al reciente (Jurásico a Holoceno). Este patrón es consistente con la evolución del geoambiente regional, donde ocurrió una diversificación de los biotopos marinos someros, asociados a la ampliación de las plataformas marinas, más marcadamente del Neógeno al Cuaternario.

Por su parte, los equinodermos, braquiópodos e icnofósiles son más significativos en el registro del Paleógeno, posiblemente influenciado por el establecimiento de cuencas de fondos blandos, arenosos arcillosos y margosos, con mayor aporte continental. Las turbiditas de esta etapa, de posible influencia climática (Rojas Consuegra y Denis Valle, 2011), contienen un

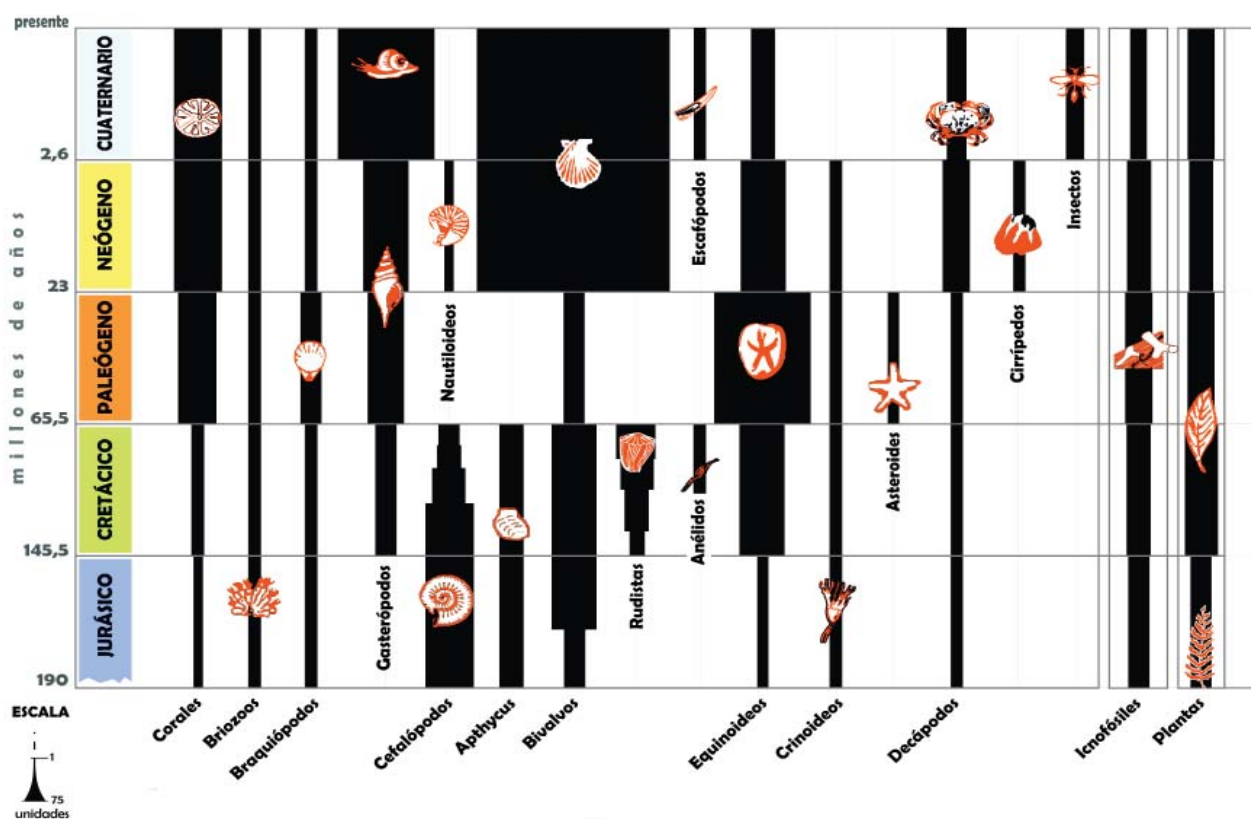


Figura 1. Grupos de macrofósiles conocidos en Cuba (excluyendo los vertebrados) y cantidad de taxoregistros de cada uno en los diferentes periodos geológicos.

abundante y diverso conjunto de icnofósiles (Villegas Martín y Rojas Consuegra, 2008, 2012; Rojas Consuegra y Villegas Martín, 2009). Estas especiales huellas o trazas brindan una valiosa información sobre organismos que no pasaron a la litósfera, al menos como cuerpos fósiles, aunque sí como sustancias e información, según el enfoque tafonómico moderno (Fernández López, 2000).

Se observa con nitidez la desaparición de los ammonites y los ruditas en el límite K - Pg. Se reflejan dos diferentes patrones de extinción para estos grupos de organismos, de amplia presencia en el Cretácico. Los ammonites evidencian una tendencia a su disminución del Jurásico al final del Cretácico, mientras que en contraposición, los rudistas exhiben una especiación creciente hasta el K - Pg. Ambos grupos, entre muchos otros, incluidos los famosos dinosaurios, fueron víctimas de la extinción en masa inducida por el catastrófico impacto meteorítico de Chicxulub, en los terrenos de la hoy península de Yucatán, México.

Registro de vertebrados

En la Figura 2 se observan graficados 20 grupos (aunque de diferentes niveles taxonómicos) de vertebrados fósiles reportados en el registro estratigráfico cubano. De ellos, al menos seis grupos corresponden al Jurásico. Los registros son escasos

en el Cretácico con solo cuatro grupos; lo mismo ocurre en el Paleógeno, con tres grupos. En el Neógeno hay representados nueve grupos; y corresponde al Cuaternario la mayor cantidad de taxoregistros, con unos 12 grupos registrados.

Según la cantidad de taxoregistros por periodos, la abundancia se manifiesta como sigue: Jurásico, 22; Cretácico, 4; Paleógeno, 10; Neógeno, 38; y Cuaternario, 178. Los taxoregistros corresponden principalmente a entidades paleobiológicas acuáticas y que en su mayoría fueron marinas. En cambio, las cuaternarias corresponden principalmente a taxobiotemas terrestres.

Interpretación

Para el periodo Jurásico están registrados saurios marinos (plesiosaurios e ictiosaurios), pterosaurios, peces ganoideos, reptiles metrorrinquidos y tortugas (Iturralde Vinent y Ceballos, 2013). En general, continúan en el Cretácico los peces óseos (inédito) y uno cartilaginoso (Schweitzer *et al.*, 2006); y además se han conocido recientemente restos de tetrápodos indeterminados (Rojas Consuegra, 2015) y un mosasaurio (inédito). En el Paleógeno está comprobada la presencia de los peces (tanto óseos como los cartilaginosos u osteíctios) (Iturralde Vinent *et al.* 1996), y se conoce el hallazgo de una

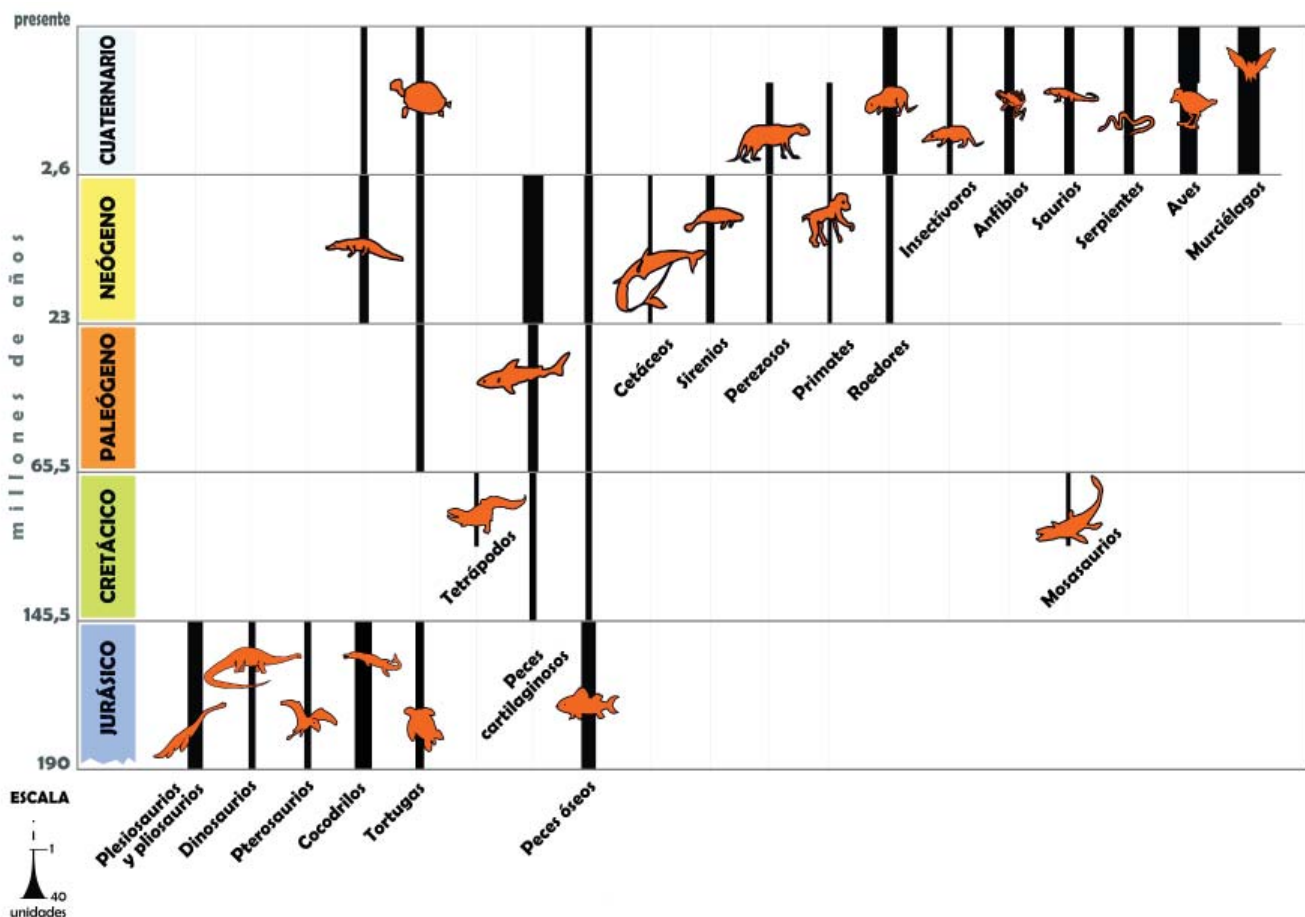


Figura 2. Grupos de vertebrados fósiles en Cuba y cantidad de taxoregistros de cada grupo según el tiempo geológico.

tortugas marinas (inédito). Como se revela, el registro macrofósil del Jurásico al Paleógeno es de naturaleza marina, aunque la reconstrucción paleogeográfica (Iturralde Vinent, 2012) sugiere la presencia de terrenos emergidos en la región donde podrían haber habitado vertebrados terrestres. Estos últimos no han sido encontrados hasta el momento.

En Cuba solo hay un registro de dinosaurio del ambiente continental (Gasparini e Iturralde Vinent, 2006). Este resto posiblemente fue aportado al ambiente marino somero, desde alguna tierra emergida (Torre, 1949); por lo que resultaría una entidad resedimentada (Fernández López, 2000).

El registro de entidades conservadas del ambiente terrestres en el Neógeno de Cuba ha sido un hallazgo de una profunda trascendencia para la biogeografía antillana. De esta edad aparecen los primeros mamíferos terrestres: perezosos, primates y roedores, representante de tres de los cuatro órdenes de animales que constituyeron la fauna cubana del Cuaternario. Además, se registran dos mamíferos marinos: un dugón y un cetáceo (Iturralde Vinent, 2007, 2012).

La fauna cuaternaria exhibe una mayor diversidad de entidades paleobiológicas correspondiente a vertebrados terrestres: primates, perezosos, roedores, murciélagos, aves, insectívoros, anfibios y reptiles (Silva et al., 2007).

Para el periodo Cuaternario se registran nueve grupos de vertebrados mamíferos, siete de los cuales poseen representantes en la fauna cubana actual. Dos de los grupos neogénicos, primates y perezosos, al parecer resultaron extinguidos recientemente; sobre los últimos, hay datos de su existencia hasta hace alrededor de mil años (MacPhee et al., 2007).

CONCLUSIONES

En general, la columna ilustrada evidencia la correlación entre el registro fósil y la evolución del paleoambiente en la región durante los últimos 200 millones de años.

El presente resultado es de amplio uso práctico en los diferentes niveles de enseñanza, así como para la valoración del patrimonio paleontológico y la formación de una cultura científica sobre la naturaleza en la sociedad cubana.

BIBLIOGRAFÍA

- Aranda Manteca, F. J., Rojas Consuegra, R., Jiménez, O., 2011. *Carcharhinidae de Cuba y Haití, en la Colección del Museo Nacional de Historia Natural de Cuba*. XII Congreso Nacional de Paleontología (SOMEXPAL), 22-25 de Febrero 2011, Benemérita Universidad de Puebla. Resumen.
- Barragán, R., Rojas Consuegra, R., Szives, O., 2011. *Late Albian (Early Cretaceous) ammonites from the Provincial Formation of central Cuba*. *Cretaceous Research*, 32: 447 - 455.
- Fernández López, S., 2000. *Temas de Tafonomía*. Madrid: Dpto. Paleontología, Universidad Complutense de Madrid. P. 167.
- Gasparini, Z., e Iturralde -Vinent, M., 2006. *Cuban Jurassic Oxfordian herpetofauna in the Caribbean Seaway*. *N. Jb. Geol. Paläont., Abhandlungen*, 240 (3): 343-371.
- Iturralde Vinent, M., Hubbell, G., y Rojas Consuegra, R., 1996. *Catalogue of Cuban fossil Eslamobranchii (Paleocene-Pliocene) and paleogeographic implications of their Lower to Middle Miocene occurrence*. *The journal of the Geological Society of Jamaica*, 31: 7-21. Iturralde Vinent et al. 1996
- Iturralde Vinent, M. A. (Ed.), 2007. *Origen y evolución del Caribe y sus biotas marinas y terrestres* (CD - ROM). La Habana: Centro Nacional de Información Geológica (IGP).
- Iturralde Vinent, M. A. (Ed.), 2012. *Compendio de Geología de Cuba y del Caribe*. DVD. La Habana: CITMATEL y RTV Comercial.
- Iturralde Vinent, M., y Ceballos Izquierdo, Y., 2013. *Reptiles Gigantes del Caribe Primitivo*. Editorial Gente Nueva, Cuaderno de dibujo, 22 pág., La Habana.
- MacPhee, R.D.E., Iturralde -Vinent, M., y Jiménez -Vázquez, O., 2007. *Prehistoric sloth extinctions in Cuba: implications of a new "last" occurrence date*. *Caribbean Journal of Science*, 43 (1): 94-98.
- Rojas Consuegra, R., 2007. *Síntesis del Registro Fósil de Cuba*. En: *II Congreso Cubano de Geología, GEOCIENCIAS' 2007. Resúmenes* (CD - ROM) La Habana: Centro Nacional de Información Geológica.
- Rojas Consuegra, R., 2009. *"Paleobiodiversidad": una evaluación de los macro invertebrados en el registro fósil de Cuba*. *Memorias del III Congreso Cubano de Geología GEO2-02: 369 - 381, GEOCIENCIAS' 2009* (CD - ROM).
- Rojas Consuegra, R., 2015. *San Vicente (Ciego de Ávila) primera localidad de vertebrados cretácicos para Cuba y Las Antillas*. En *Memorias, Trabajos y Resúmenes, VI Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, Sociedad Cubana de Geología, La Habana*, 36pp.
- Rojas Consuegra, R., Alabarreta Pérez, N., 2009. *Sitio Web sobre Paleontología de Cuba*. Disponible en: <http://www.redciencia.cu/webpaleo/>.
- Rojas Consuegra, R., Villegas Martín, J., 2009. *Iconofósiles e Iconofacies en algunas formaciones geológicas cubanas*. *Memorias del III Congreso Cubano de Geología, GEO2 - P14: 397 - 424, GEOCIENCIAS' 2009* (CD - ROM).
- Rojas Consuegra, R., Denis Valle, R., 2011. *Influencia climática en los sistemas turbidíticos del Paleógeno cubano*. *Memorias del VI Congreso Cubano de Geología, GEOCIENCIAS' 2011, GEO1 - P4*.
- Rojas Consuegra, R., Jiménez Vázquez, O., Condís Fernández, M., Díaz Franco, S., 2012. *Tafonomía y paleoecología de un yacimiento paleontológico del Cuaternario en la cueva del Indio, La Habana, Cuba*. *Espeleología digital*, 12: 1 - 12.
- Rojas Consuegra, R., Viñola López, L. (2013). *La Región Paleontológica Matanzas: un caso patrón*. *Savia* (III) 18: 2 - 5.
- Schweitzer, C. E., Iturralde Vinent, M., Hetler, J. L., Velez Juarbe, J., 2006. *Oligocene and Miocene decapods (Thalassinidea and Brachyura) from the Caribbean*. *Annals of Carnegie Museum*, 75 (2): 111 - 136.
- Silva, G., Suárez, W., Díaz, S., 2007. *Compendio de los Mamíferos terrestres autóctonos de Cuba, vivientes y extinguidos*. La Habana: Editora Boloñas. P. 465.
- Torre y Callejas, A. de la, 1949. *Hallazgo de un hueso de dinosaurio terrestre en el Jurásico de Viñales, Pinar del Río*. Universidad de La Habana, Departamento de Geología y Paleontología, 19 pág.
- Varela, C., Rojas Consuegra, R., 2010. *Crustáceos fósiles de Cuba. Resultados preliminares*. *Memorias del III Simposio de Museos y Salas de Historia Natural* (CD - ROM). La Habana.
- Varela, C., Rojas Consuegra, R., 2011 a. *El registro fósil de los crustáceos decápodos (Arthropoda, Crustacea) marinos de Cuba*. *Memorias del VI Congreso Cubano de Geología, GEO2 - P7, GEOCIENCIA' 2011* (CD - ROM). La Habana.

- Varela, C., Rojas Consuegra, R., 2011 b. *Crustáceos fósiles (Decapoda: Brachyura) de la Formación Colón, Matanzas, Cuba*. *Solenodon*, 9: 66 - 70.
- Varela, C., Rojas Consuegra, R., 2011 c. *Nueva especie de Eriosachila Blow y Manning, 1996 (Crustacea: Decapoda), de la Formación Colón, Cuba*. *Novitates Caribbea*, 4: 17 - 20.
- Varela, C., Schweitzer, C. E., 2011. *A new genus and new species of Portunidae Rafinesque, 1815 (Decapoda, Brachyura) from the Colón Formation, Cuba*. *Bulletin of the Mizunami Fossil Museum*, 37: 13 - 16.
- Villegas Martín, J., Rojas Consuegra, R., 2008. *Algunas icnitas presentes en el registro estratigráfico cubano*. *Memorias del II Simposio de Museos y Salas de Historia Natural, Museo Nacional de Historia Natural (CITMA) (CD ROM)*.
- Villegas Martín, J. Rojas Consuegra, R., 2011. *Ichnogénero Teredolites en megabloques del límite Cretácico – Paleógeno (K/Pg), Formación Peñalver, Cuba occidental*. *Rev. Paleontología Española*, 46 (1): 45 - 52.
- Villegas Martín, J., Rojas Consuegra, R., 2012. *Ichnology of Cuba: present state of knowledge*. En: Guimaraes, R. N., et al. (Ed.). *Ichnology of Latin America. Selected papers*. *Monografías da Sociedade Brasileira de Paleontologia*, 2: 99 - 106.
- Villegas Martín, J., de Gibert, J. M., Rojas Consuegra, R., Belaústegui, Z., 2012. *Jurassic Teredolites from Cuba: new trace fossil evidence of early wood - boring behavior in bivalves*. *Journal of South American Earth Sciences* 38: 123 - 128.

ASOCIACIONES DE MINERALES DE PLACERES DE RENDIMIENTO ECONÓMICO Y SU VINCULACIÓN A LAS ESTRUCTURAS GEOLÓGICAS DE CUBA

DEYSY DE LA NUEZ COLÓN, KUSTRINI SUKAR SASTROPUTRO, GRACIELA AGUIRRE GUILLOT, EVELIO LISABET SARRACEN, WALQUIRIA SUÁREZ BÁRCENAS, ANGÉLICA ISABEL LLANES CASTRO, DANYER GARCÍA JIMÉNEZ

Instituto de Geología y Paleontología

Vía Blanca No. 1002 e/ Río Luyanó y Prolongación de Calzada de Güines, Reparto Los Ángeles, San Miguel del Padrón. La Habana, Cuba.

Correo: deysy@igp.minem.cu

RESUMEN

Un método fundamental en el estudio de los depósitos friables (placeres) es el de batea o "jagua", mediante el cual se obtiene un concentrado pesado, para el estudio de su composición mineralógica.

En las condiciones geológicas y ambientales (de paisajes y clima) del territorio de Cuba, revisten especial importancia para los estudios geológicos los minerales de placeres. Sin embargo, es notable que muchos geólogos no acostumbren a aprovechar la valiosa información que se obtiene a través de este sencillo y relativamente económico método. En particular, no se presta atención a la distribución de los minerales formadores de rocas y accesorios, teniendo en cuenta la estructura geológica fuente de aporte (o los eventos magmáticos y post - magmáticos).

Las asociaciones minerales de jagua pueden ser utilizadas como indicadores de búsqueda de diferentes acumulaciones minerales de interés económico para el país. En los placeres, la composición mineralógica depende fundamentalmente de la constitución geológica de la región, así como de los procesos de intemperismo. En este sentido, se considera que las jaguas más relevantes son las vinculadas a Ofiolitas, Arcos Volcánicos Cretácicos y Macizos Metamórficos (Terrenos Escambray, Pinos y Mabujina). Un ejemplo ilustrativo de las ventajas de este método es su uso en el reconocimiento mineral de los terrenos Escambray y Mabujina. Aquí se distinguen cinco tipos mineralógicos principales de jaguas: anfibólico, epidótico, piroxénico, granático y lawsonítico. De estos, el granático es el tipo más vinculado a las zonas de mineralización de *skarn*.

ABSTRACT

A fundamental method for studying friable deposits (placers) to know their mineralogical composition is that of panning or washing ("jagua"), from which a heavy concentrate is obtained.

Under the geologic and environmental conditions, particularly landscape and climate of the Cuban territory the study of the mineral ores in placers is of prime importance. However, it is remarkable the trend in many geologists for not taking advantage of the valuable information provided by the above so simple and relatively economic method. Moreover, sufficient attention is not paid to the distribution of those forming rock and accessories minerals keeping in mind the source geologic structure or the magmatic and post-magmatic events.

The mineral associations of placer deposits can be used as indicators for the search of different mineral accumulations of economic interest to the country. Mineralogical composition in placers mainly depends on the geologic constitution of the region, as well as of the weathering processes. Thus, the most outstanding placer deposits in Cuba are those linked to Ophiolites, Cretaceous Volcanic Arcs, and Metamorphic Massifs (mostly in Escambray, Pinos and Mabujina terrains). An illustrative example of the advantages of this method is the mineralogical recognition applied to the Escambray and Mabujina terrains where five main mineralogical types of placer deposits were distinguished: amphiboles, epidotes, pyroxenes, garnets, and lawsonites, being the garnet type the more linked to the *skarn* areas.

INTRODUCCIÓN

El método de batea para las búsquedas de minerales con interés económico se utiliza ampliamente en Cuba. Fue de vital importancia durante los trabajos geológicos de levantamiento y de búsquedas a grandes escalas (1: 100 000; 1: 50 000), en combinación con otros métodos, desde el año 1965. Quedó establecido que, en las condiciones geológicas de paisajes – climáticos del territorio de Cuba, este método es muy efectivo para la búsqueda de yacimientos de distintos minerales útiles sólidos, en especial el oro y la plata.

Fueron reveladas numerosas aureolas de dispersión de oro y plata y de otros minerales metálicos de distintos elementos (cobre, plomo, zinc, molibdeno, manganeso, antimonio, mercurio, arsénico, bario y otros), vinculados con los yacimientos y las manifestaciones meníferas. Los resultados de la utilización del método de jagua se señalan en un gran número de informes geológicos.

Sin embargo, los geólogos no suelen utilizar completamente las posibilidades del método de jagua. En particular, no se presta atención a la distribución de los minerales formadores de rocas y accesorios, específicos para las regiones de desarrollo del magmatismo alcalino, ácido, ultrabásico - básico, de los complejos volcánogenos y sedimentarios y de las facies del metamorfismo regional.

En sentido general, se reconocen dentro del límite de las regiones antes señaladas diferentes elementos geológicos que fueron constituidos por distintos tipos de formaciones rocosas, lo que atestigua la presencia de placeres con composiciones mineralógicas muy diversas. Fueron establecidas además las diferentes composiciones mineralógicas de los placeres que se corresponden a las áreas de desarrollo de los Macizos Metamórficos (Terrenos Escambray, Pinos y Mabujina) y de las Ofolitas, así como de los Arcos Volcánicos Cretácicos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Este estudio se confeccionó sobre la base de los resultados obtenidos a partir de los muestreos de jagua que fueron realizados en diferentes regiones del territorio cubano durante la ejecución de los trabajos de mapeo (levantamiento) geológico y de prospección.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como se conoce, la composición mineralógica en los placeres depende fundamentalmente de la constitución geológica de la región y de los procesos de intemperismo. En sentido general, en Cuba, se reconocen los componentes geológicos siguientes (Iturralde - Vinent, 2012):

- Cinturón plegado norte de Cuba
- Complejo máfico - ultramáfico (Ofolitas, Metaofolitas y Mélange serpentinitica de subducción)
- Arcos Volcánicos del Cretácico
- Arco Volcánico del Paleógeno
- Macizos Metamórficos de diferentes ambientes geotectónicos:

Rocas de un fundamento siálico, Terreno Cangre, Terreno Pinos, Terreno Escambray y Terreno Asunción)

- Neoplataforma

Teniendo en consideración que las jaguas más relevantes son las vinculadas a Ofolitas, Arcos Volcánicos Cretácicos y Macizos Metamórficos (Terrenos Escambray, Pinos y Mabujina), en este estudio los autores muestran con más detalle las asociaciones mineralógicas en cada uno de estos ejemplos. Además, se caracteriza brevemente el margen continental de la provincia de Pinar del Río.

Composición de las jaguas en el Macizo Metamórfico Terreno Pinos

El territorio Isla de la Juventud fue abarcado por el levantamiento geológico sistemático y por la búsqueda a escala 1:100 000, en los años 1971 a 1974 (Garapko *et al.*, 1974). En el complejo de los métodos de jaguas, se utilizó el levantamiento de jagua. En un área de 1 200 km², fueron seleccionadas 1 000 muestras, en especial del aluvión de los ríos jóvenes y de sus afluentes.

Del total de muestras, se analizaron 83 jaguas, lo que representa más del 8%. Se deduce que en esta región se han desarrollado dos tipos mineralógicos por contrastes de jaguas:

1. Disteno - estaurolítico con sillimanita
2. Rutilo - circónico

El tipo disteno - estaurolítico con sillimanita se caracteriza por el predominio de la distena (cianita) en la fracción pesada y de la estaurolita en la fracción electromagnética, además de la presencia de almandina, sillimanita y andalucita. El último mineral no fue revelado durante el estudio petrográfico de las rocas y se determinó solo en las jaguas. Este tipo de jagua se encuentra desarrollada al norte de la falla La Fe y se identifica por las zonas disténicas, estaurolíticas y sillimaníticas, así como por las metamórficas del complejo terrígeno - carbonatado (Eguipko *et al.*, 1975).

El tipo rutilo circónico de jaguas se caracteriza por la acumulación de circón y de rutilo en la fracción pesada, con un escaso desarrollo en las jaguas (y en las rocas) de la distena. Asimismo, se identifica con la presencia de epidota, anfíbol, piroxeno, esfena, clorita y pirita en la fracción electromagnética y con un insignificante desarrollo de la estaurolita. La ilmenita y la turmalina son los minerales "continuos" en ambos tipos. El tipo rutilo - circonio se desarrolla más al sureste de la falla La Fe y caracteriza a las zonas moscovítica, biotítica (Eguipko *et al.*, 1975), metamórficas (de la secuencia Victoria, Lomo, Cisterna) del complejo terrígeno - carbonatado y también a las formaciones volcánogeno - sedimentarias.

No se descarta la posibilidad de que estudios más detallados, puedan revelar tipos mineralógicos más "estrechos".

En la Tabla I se muestran los principales minerales que componen cada uno de los grupos mineralógicos de jaguas del Terreno Pinos. La composición mineralógica se mostrará en las tablas I - V (tomada de Sukar *et al.*, 1992).

Tabla I. Composición mineralógica en el Macizo Metamórfico Terreno Pinos (En negritas se señalan los minerales más característicos del grupo disteno estaurólítico con sillimanita. Subrayados se señalan los minerales del grupo rutilo circónio).

FRACCIÓN				MINERALES LIGEROS
MAGNÉTICA	ELECTROMAGNÉTICA	DIAMAGNÉTICA		
Magnetita	<u>Piroxeno</u>	<u>Rutilo</u>	Esfalerita	Cuarzo
Pirrotina	<u>Anfibol</u>	Anatasa	Covelina	Mica
	Turmalina	Brookita	Antimonita	Escapolita
	Granate	<u>Circón</u>	<u>Pirita</u>	
	Estauroлита	Arsenopirita	<u>Distena</u>	
	Espinela	Aragonito	Andalucita	
	Ilmenita	Siderita	Sillimanita	
	<u>Epidota</u>	Malaquita	<u>Esfena</u>	
	<u>Clorita</u>	Almandina	Corindón	
	Hematita	Oro	Leucoxeno	
	Hidróxidos de hierro			

Tabla II. Composición mineralógica de las jaguas en los placeres vinculados al Macizo Metamórfico Terreno Escambray.

FRACCIÓN					MINERALES LIGEROS
MAGNÉTICA	ELECTROMAGNÉTICA		DIAMAGNÉTICA		
Magnetita	<u>Piroxeno</u>	<u>Epidota</u>	<u>Circón</u>	<u>Distena</u>	Cuarzo
	Clinopiroxeno	Zoisita	<u>Rutilo</u>	Apatito	Calcita
	Onfacit	Clinozoisita	Anatasa	Leucoxeno	<u>Moscovita</u>
	<u>Hornblenda</u>	<u>Granate</u>	Brookita	Corindón	Clorita
	<u>Tremolita</u>	Turmalina	Esfena	Oro	Talco
	<u>Glaucofana</u>	Nefrita	Lawsonita	Cinabrio	Colofana
	<u>Ilmenita</u>	Hematita	Pirita	Aragonito	
	Ocres				

Tabla III. Composición mineralógica de las jaguas en los placeres vinculados al Macizo Metamórfico Terreno Mabujina.

FRACCIÓN			
MAGNÉTICA	ELECTROMAGNÉTICA		PESADA
Magnetita	Clinopiroxeno	Clinozoisita	Circón
	Hornblenda	Prehnita	<u>Rutilo</u>
	Actinolita	<u>Granate</u>	Esfena
	Tremolita	<u>Ilmenita</u>	Apatito
	Biotita	Clorita	Leucoxeno
	Epidota	Limonita	Pirita
	Zoisita	Hematita	

Composición de las jaguas en los Macizos Metamórficos Terrenos Escambray y Mabujina

En los años 1966 a 1967, durante el levantamiento geológico (Maximov *et al.*, 1968), fueron incluidas en el análisis las pendientes norte de los macizos Trinidad y Sancti Spiritus, en un área de 475 km². En calidad de trabajos experimentales se seleccionaron 60 muestras de jaguas. Posteriormente, en los años 1969 a 1970 se realizaron trabajos análogos en un área de 666 km² (Pavlov, 1970) en dirección norte y este, límites del terreno Escambray y Mabujina, donde fueron seleccionadas 649 muestras de jaguas. Finalmente, a partir del año 1975, geólogos checos realizaron un levantamiento que abarca un área de 4 000 km² entre las ciudades de Trinidad, Sancti Spiritus y Santa Clara.

En estos complejos metamórficos (Terrenos Escambray y Mabujina) se distinguen cinco tipos mineralógicos generalizados de jaguas: anfibólico, epidótico, piroxénico, granático y lawsonítico.

El tipo anfibólico de jagua se caracteriza por la presencia de grandes cantidades de anfíbol (más del 50 % del promedio), epidota, ilmenita, plagioclasa saussuritizada y granate, así como por la presencia de biotita en la fracción electromagnética y el predominio de la esfena sobre el circón en la fracción pesada.

Este tipo de jagua está ampliamente desarrollado en todas las áreas de los levantamientos y representa desde el 55 hasta el 76 % de la cantidad total de todas las jaguas. Naturalmente, esto se debe a que los anfíboles existen en todas las formaciones geológicas. Sin embargo, tienen el mayor desarrollo en las rocas de los complejos anfibolítico, volcánico - sedimentario y granitoide y en el complejo de intrusiones metamorizadas, de composición básica y ultrabásica, es decir, en las rocas de los complejos que forman casi toda la región.

La composición de los anfíboles de las jaguas permite que se llegue a un juicio sobre la composición de los complejos geológicos que los producen. Por ejemplo: la glaucofana es característica para las secuencias de esquistos y la tremolita para la secuencia carbonatada del complejo terrígeno carbonatado. La actinolita, en asociación con la epidota, se encuentra desarrollada en las ortoanfibolitas y en los ortoquistos. La hornblenda corriente caracteriza la intrusión granitoide del Escambray, el gabro y las anfibolitas, y también los pórfidos andesíticos del complejo volcánico sedimentario.

El tipo esencialmente epidótico se caracteriza por el predominio en las jaguas de los minerales del grupo de la epidota (más del 50 %), por la presencia de grandes cantidades de ilmenita, en ocasiones, de plagioclasa saussuritizada, anfíboles y granates en la fracción electromagnética. En la fracción pesada, el circón predomina sobre la esfena.

Entre los tipos anfibólico y epidótico se traza convencionalmente un límite, ya que ambos tipos de minerales se encuentran espacial y genéticamente vinculados, tienen una idéntica composición mineral y se diferencian solo por la cantidad de minerales.

Los minerales del tipo epidota (clinozoisita, epidota, zoisita) se forman en las etapas progresivas y regresivas del metamorfismo dinámico del complejo volcánico sedimentario, en los ortoesquistos y ortoanfibolitas del Escambray. De esta manera, la distribución del tipo epidótico tiene un carácter más local que la del tipo anfibólico de jaguas y representa del 12 al 32% del número total para las distintas áreas de los levantamientos.

El tipo piroxénico se diferencia por el predominio (más del 50 %) del piroxeno sobre otros minerales. Fue especialmente establecido dentro de los límites de las pendientes noroeste del sistema montañoso del Escambray, donde se encuentra asociado con la zona de distribución de las porfiritas basálticas y andesíticas, de las diabasas y espilitas del complejo volcánico sedimentario y de las zonas de contacto del último con la intrusión Escambray (con los sectores de desarrollo de los skarn granate - piroxénicos). Además del piroxeno, aquí se encuentran desarrollados la epidota, la ilmenita, el anfíbol, la hematita, el circón, la esfena, el leucoxeno y la pirita. A diferencia de otros tipos, en el lugar existen cantidades considerables de apatito, que se arrastran a la zona de acumulación de rocas de la intrusión granitoide Escambray.

El tipo granático fue establecido en la zona sur, cerca del contacto de la intrusión Escambray, donde está vinculado con las zonas de tipo *skarn*, a juzgar por la presencia de grandes cantidades (más del 69 %) de granate de la serie grosularia andradítica. En menor cantidad se encuentra la almandina, que existe en los esquistos y los gneis de la serie Escambray y también en las anfibolitas. La epidota, el anfíbol, la ilmenita, la esfena y el circón se encuentran también distribuidos en este tipo de jaguas.

El tipo lawsonítico de jagua está asociado con las rocas metamórficas del complejo terrígeno carbonatado en Trinidad, en el que se encuentran desarrollados la epidota, el granate, la moscovita y la glaucófana.

En las Tablas II y III se muestran los minerales que componen las jaguas del Macizo Metamórfico de los Terrenos Escambray y Mabujina. En ambas tablas aparecen subrayados los minerales característicos de estos tipos mineralógicos.

Composición de las jaguas en los Arcos Volcánicos Cretácicos

En la zona de los Arcos Volcánicos Cretácicos de la región central, el muestreo de las jaguas se concentró más en la zona de mineralización. En el aluvión del río Boca Toro y de sus afluentes, en las jaguas es notable el aumento de la barita, la pirita, la calcopirita, el circón, la esfena, el rutilo, y la ilmenita. La presencia de este complejo de minerales se encuentra vinculada con el desarrollo de efusivos ácidos en la región.

En la zona menífera San Fernando – Los Cerros se revelaron más de 20 anomalías de jaguas de oro, principalmente en los campos meníferos de San Fernando, Antonio, Independencia, Guachinango II, Loma Venturilla y en la regiones de Boca Toro, Regidor y otras.

En el campo menífero de San Fernando y en sectores adyacentes, además de oro existe en las jaguas calcopirita, esfalerita, y cobre nativo. La calcopirita, la esfalerita y el oro están establecidos también en el campo menífero del depósito Antonio. En la región de la manifestación menífera Independencia, además de esfalerita, cobre nativo y oro, fue descubierto cinabrio. En el sector La Arena, conjuntamente con el oro, fue establecida la plata nativa.

La mayoría de estas jaguas de oro están asociadas hacia el oeste del río Arimao. Su acumulación se observa en las partes inferiores, en los guijarros y en las arenas de las primeras terrazas altas.

En sectores como El Oya, La Moca, La Moca Alta y el Jardín Botánico se realizaron trabajos de búsquedas detalladas para el oro aluvial. Como fuente de oro, según la opinión de Pavlov (1970), figuran los pequeños filones cuarzosos y las zonas de cuarcificación.

Por todo lo anteriormente mencionado, los hallazgos de esfalerita y cinabrio, minerales en extremo inestables durante la transportación, conjuntamente con el oro y la plata, permiten señalar la alta efectividad y perspectiva del método de jagua para ser usado en las búsquedas.

Por otro lado, en el período comprendido entre 1974 y 1976, en la región de Guáimaro - Las Tunas se realizaron trabajos complejos de búsqueda - levantamiento, a escala 1:100 000, en un área de 2 200 km² (Shevchenko *et al.*, 1976).

De las 2 075 muestras de jaguas, seleccionadas en el área de los trabajos de búsqueda - levantamiento, el análisis mineralógico de la fracción pesada se realizó en 1 653 y el análisis electromagnético y de la fracción pesada en las 131 muestras restantes. Las últimas estaban distribuidas irregularmente por el área. La mayoría de ellas se seleccionó del grupo de las manifestaciones meníferas del oro, denominado Jobabo.

Este análisis permitió determinar los tipos mineralógicos de jaguas ilmenito - epidótico, piroxénico, limonítico y plagioclasa - anfibólico.

El tipo mineralógico ilmenito - epidótico se caracteriza por la presencia predominante, en todas las muestras de jaguas, de minerales como epidota, ilmenita, circón, esfena, pequeñas cantidades de anfíbol, piroxeno, granate, rutilo, anatasa y apatito. Este tipo de jagua se halla distribuido en las zonas cercanas al contacto de la intrusión Sibanicú - Las Tunas y del stock Guáimaro, y se le vincula una gran cantidad de oro.

El tipo piroxénico se diferencia por el predominio de piroxeno y circón, además existen otros minerales, en pequeñas cantidades. El tipo piroxénico caracteriza a la zona de distribución de las rocas del complejo volcánico - sedimentario, principalmente del complejo basáltico.

El tipo plagioclasa - anfibólico contiene elevadas cantidades de anfíbol, de plagioclasa saussuritizada, piroxeno, circón y esfena. En el área de trabajo, su desarrollo caracteriza a la formación de la secuencia volcánico - sedimentaria y al macizo granodiorítico. En realidad constituye el tipo mixto de jagua.

El tipo limonítico contiene considerables cantidades de hidróxidos de hierro, hematita y pirita limonitizada. Aquí coexisten de manera estable piroxeno y epidota, si bien esporádicamente se encuentran otros minerales. Este tipo de jagua no tiene desarrollo en el área y está relacionada con los sectores de la mineralización sulfúrica (piríticos), con los "sombremos de hierro" (o *Gossan*), en las metasomatitas del tipo "Jobabo" y otros.

En la Tabla IV se muestran algunos de los minerales característicos para las jaguas de los Arcos Volcánicos Cretácicos.

Composición de las jaguas en las ofiolitas en la parte central – oriental de Cuba

En los años 1968 a 1969, en la parte noreste de la región central del país, entre los poblados de Buena Vista al oeste y Florencia al este, en un área de 662 km², se realizaron trabajos especiales de búsquedas para asfaltita, a escala 1: 50 000 (Kolomichenko y Riumin, 1970). Estos trabajos fueron acompañados con el muestreo de jagua (118 muestras). Dicho muestreo se realizó en la parte sur del área, donde se encuentran ampliamente desarrolladas las rocas intrusivas y efusivas (la zona de cuarcificación y de alteración hidrotermal de las rocas). En la parte norte del área no se realizó muestreo.

El análisis de la extracción (79 jaguas, que representan el 67 % de su número total) demuestra que en el área de los trabajos el tipo

mixto mineralógico cromítico – piroxeno – anfíbol – epidota es el más desarrollado; rara vez se encuentra el tipo barito – ilmenítico.

El tipo mixto mineralógico se caracteriza por la presencia en las jaguas de los minerales tipomórficos, para las rocas de distintos complejos geológicos. En cantidades aproximadamente iguales en el tipo se desarrollan la cromita, el anfíbol, el piroxeno y el circón. De manera estable existen la ilmenita, el granate y el rutilo.

Una gran parte del área de los trabajos se encuentra ocupada por macizos de rocas ultrabásicas y básicas. Esto explica el amplio desarrollo en las jaguas de las cromoespinelas, en asociación con serpentinita, talco, tremolita, uvarovita, espinela, plagioclasa saussuritizada y prehnita.

La epidota, el anfíbol, la clorita, la plagioclasa saussuritizada, la esfena y el leucoxeno, desarrollados en las rocas del complejo volcánico – sedimentario, ocupan cerca de la tercera parte del área.

Los esquistos y gneis del complejo metamórfico – terrígeno – carbonatado caracterizan la distena, la glaucófana, la ilmenita, el rutilo y el almandino. El piroxeno está desarrollado en las rocas corneanas, de composición piroxeno – anfíbol – plagioclasa.

El tipo barito – ilmenítico se diferencia por las grandes cantidades de barita en la fracción pesada, y también por la presencia de

Tabla IV. Composición mineralógica de las jaguas en los placeres vinculados a los Arcos Volcánicos Cretácicos (Se subrayan los más característicos para la zona menífera de la región central. En negritas aparecen los correspondientes a la región de Guáimaro – Las Tunas).

FRACCIÓN					MINERALES LIGEROS
MAGNÉTICA	ELECTROMAGNÉTICA		PESADA		
Magnetita	Enstatita	Lawsonita	Galena	<u>Circón</u>	Cuarzo
Pirrotina	Augita	Espinela	Esfalerita	Malacón	Plagioclasa
	Hornblenda	Clorita	<u>Cinabrio</u>	<u>Rutilo</u>	Alunita
	Actinolita	Hematita	<u>Pirita</u>	Anatasa	Zeolita
	Tremolita	Limonita	<u>Calcopirita</u>	<u>Esfena</u>	Zunyita
	Biotita	Pirolusita	Arsenopirita	Thorita	
	Olivino	Psilomelano	<u>Molibdenita</u>	Baddeleyita	
	Epidota	Saussurita	Bornita	Apatito	
	Zoisita	Jarosita	Smithsonita	Monacita	
	Clinozoisita	Piroxeno	<u>Barita</u>	Scheelita	
	Piamontita	Ortita	Malaquita	Leucoxeno	
	Tulita	Turmalina	Azurita	Distena	
	Granate	Ilmenita	Querargirita	Andalucita	
			Pumpellyita	Corindón	
			<u>Oro</u>	Diásporo	
			<u>Plata</u>	<u>Cobre nativo</u>	
			Plomo		

Tabla V. Composición mineralógica de las jaguas en los placeres vinculados a las ofiolitas en la región centro oriental de Cuba.

FRACCIÓN				
MAGNÉTICA	ELECTROMAGNÉTICA		PESADA	
Magnetita	<u>Clinopiroxeno</u>	<u>Uvarovita</u>	<u>Esfena</u>	Oro
	<u>Ortopiroxeno</u>	Grossularia	<u>Rutilo</u>	Plomo
	Enstatita	<u>Piroxeno</u>	Brookita	Pirita
	Broncita	<u>Espinela</u>	Anatasa	Arsenopirita
	<u>Hornblenda</u>	<u>Ilmenita</u>	<u>Circón</u>	Barita
	Actinolita	<u>Epidota</u>	Apatito	Moissanita
	<u>Tremolita</u>	Zoisita	<u>Leucoxeno</u>	Corindón
	Grunerita	Lawsonita		
	Glaucófana	<u>Clorita</u>		
	Olivino	Hematita		
	<u>Serpentina</u>	Limonita		
	Antigorita	Granate		
	Garnierita	<u>Cromita</u>		



Figura 1 Mapa de los tipos mineralógicos de jaguas, sobre la base del mapa geológico de Cuba (modificado de Iturralde-Vinent, 2012)

considerables cantidades de ilmenita, epidota y cromita, así como por los contenidos más altos de minerales metálicos: galena, esfalerita y calcopirita. Este tipo es característico del complejo menífero pirítico-polimetálico, cuyas manifestaciones no han sido reveladas en la región.

En los trabajos de levantamiento 1: 100 000 (Nikolaiev *et al.*, 1981) en la Sierra del Purial, se estudiaron principalmente el depósito cuprífero Elección y las pequeñas manifestaciones cupríferas de Mal Nombre, Olga, Macambo, y África, entre otros. En esta área se establecieron dos tipos mineralógicos de jaguas: serpentinitico-cromoespinélico y anfibólico. Se aprecia un tipo mineralógico de jagua mixto.

Las anomalías de las jaguas dieron perspectiva para oro, plata, electrum, cobre, calcopirita, malaquita y cinabrio. En la región, el oro se encuentra en las manifestaciones meníferas de Olga, en el depósito Elección y los ríos Toa, Jaguaní y Maya.

La plata se encuentra cerca de la manifestación menífera Olga y el electrum en el depósito Elección.

En la Tabla V se muestra la composición mineralógica de las jaguas en los placeres vinculados a las ofiolitas de la región centro oriental de Cuba. Se destacan subrayados los minerales más característicos de la región.

Composición de las jaguas en el Margen Continental

En la región menífera de Pinar del Río, los trabajos de levantamiento a escala 1: 50 000 fueron realizados alrededor del polígono San Cayetano por Abakumov y colaboradores (1968), Biriukov y colaboradores (1969), y Cherepanov y colaboradores (1979). Durante la realización de estos trabajos fueron recogidas 622 muestras de jagua. En el año 1975, en la misma escala, en la región de Júcaro - Bahía Honda, se recogieron 460 muestras de jagua.

El análisis de las muestras de jagua seleccionadas indica que todas se caracterizan por el desarrollo de la fracción electromagnética de hidróxidos de hierro (a partir de pirita), serpentina, clorita y cromita. Las muestras seleccionadas pertenecen al tipo mineralógico limonítico-serpentinitico-cromoespinélico.

La Figura 1 muestra un resumen de los tipos mineralógicos de jaguas, caracterizados en relación con los principales ambientes geotectónicos estudiados. Estas distintas acumulaciones de minerales pueden ser utilizadas como indicadores de búsqueda y prospección para mineralizaciones con interés económico para el país.

CONCLUSIONES

El análisis de la distribución de los minerales formadores de rocas y accesorios de los diferentes complejos volcánicos y sedimentarios, de las regiones de desarrollo del magmático alcalino, ácido, ultrabásico-básico y de las facies del metamorfismo regional, ha permitido distinguir los siguientes tipos mineralógicos de jaguas:

- 1- Serpentino - cromoespinélico de jagua, relacionado con las rocas ultrabásicas y básicas.
- 2- Piroxénico, relacionado con las rocas basálticas de composición básica y media de los complejos volcánicos - sedimentarios cretácicos y paleógenos.
- 3- Anfibólico, característico para las intrusiones granitoides de Cuba.
- 4- Epidótico, característico para las zonas del contacto con las intrusiones granitoides. Con este tipo de jagua están relacionadas las más altas concentraciones del oro.

- 5- Granítico, que se desarrolla en las zonas de skarnificación del Escambray y otras intrusiones granitoides.
- 6- Disteno-estauroolítico, característico para las rocas metamórficas regionales del complejo terrígeno-carbonatado prejurásico. Se desarrolla en el Macizo Metamórfico del Terreno Pinos.
- 7- Limonítico, característico para las zonas de oxidación de los yacimientos sulfurados y las cortezas lateríticas de intemperismo.

BIBLIOGRAFÍA

- Abakumov, S., Stepanov, V., Fernández, A., 1968. *Estructura geológica y minerales útiles de la región Viñales en la provincia de Pinar del Río. Informe sobre el Levantamiento en escala 1: 50 000 y sobre la Búsqueda Detallada Esc. 1: 10 000, parte Central de la Prov. Pinar del Río, efectuados en 1965 - 67.* La Habana: Instituto de Geología y Paleontología. Inédito
- Biriukov, B., Messina, V., Ponce, N., Navarro, N., 1969. *Informe sobre los resultados de los trabajos de búsqueda y levantamiento a escala 1: 50 000 realizados en los años 1967 - 1968 en la parte oriental de la provincia Pinar del Río (región La Palma).* La Habana: Instituto de Geología y Paleontología. Inédito
- Cherepanov, V., Koller, A., Glevov, O. 1979. *Informe de los trabajos de búsqueda y levantamiento a escala 1:50 000 realizados en la parte noroeste de Pinar del Río.* Pinar del Río: O.T.R.M. P. 425. Inédito
- Eguipko O. I., Garapko, I., Sukar, K., Saunders, E., 1975. *Zonación metamórfica y otros aspectos geológicos de Isla de Pinos.* Rev. La Minería en Cuba, 1 (1): 4 - 10.
- Garapko I., Sorokin, B., 1974. *Informe sobre el Levantamiento Geológico y las Búsquedas a escala 1: 100 000 realizados en los años 1971 - 1974. Composición geológica y minerales útiles de la Isla de Pinos.* ONRM. Inédito
- Iturralde - Vinent, M. A. (Ed.), 2012. *Compendio de Geología de Cuba y del Caribe.* Segunda Edición. DVD - ROM. La Habana: CITMATEL.
- Kolomichenko V., Riumin, V. G., 1970. *Informe sobre los trabajos geológicos de Búsqueda para asfaltitas realizados en 1968 - 69 en la parte noroeste de la provincia de Las Villas.* Archivo ONRM. Inédito
- Maximov, A., Grachev, G., Sosa, R., 1968. *Geología y minerales útiles de las pendientes nor - occidentales del sistema montañoso Escambray. Informe sobre los trabajos de búsqueda - levantamiento a escala 1: 50000 realizados en la parte sur de la provincia Las Villas.* Archivo ONRM. Inédito
- Nikolaiev A., Núñez, A., Sánchez, R., et al., 1981. *Informe geológico sobre los trabajos de levantamiento y búsqueda a escala 1: 100.000 y los resultados de los trabajos de búsqueda a escalas 1: 50.000 y 1: 25.000 ejecutados en la parte este de la provincia de Guantánamo.* La Habana: Dirección General de Geología y Geofísica, Empresa Geológica Santiago de Cuba. Archivo IGP. Inédito
- Pavlov, I., 1970. *Informe sobre los trabajos de búsqueda y levantamiento realizados en el área comprendida entre las ciudades de Cumanayagua y Fomento (provincia Las Villas).* Archivo ONRM. Inédito
- Shevchenko, I. 1976. *Informe final sobre los trabajos de búsqueda y mapeo a escala 1: 100 000, en la parte suroriental del anticlinorio Camagüey (región Guáimaro - Las Tunas).* Archivo ONRM. Inédito
- Sukar, K., Domínguez, E., Yurevna, E., Hernández, R., Mainegra, V., Rivero, E., et al., 1992. *Atlas de los minerales de placeres de Cuba.* IGP. Inédito



- **Boletines de la Sociedad Cubana de Geología:**
<http://www.redciencia.cu/boletin.php?idtipo=18>
- **Geología de Cuba para todos.**
http://www.redciencia.cu/cdorigen/arca/paper/2009_Iturralde_GeoCubaParaTodosFormat_preview.pdf
- **Memorias. Trabajos y Resúmenes de las Convenciones Cubanas de Ciencias de la Tierra. CD-ROM**
 (desde I a la VI)
<http://www.cubacienciasdelatierra.com>
- **Compendio de Geología de Cuba y del Caribe. DVD-ROM**
http://www.bazar-virtual.com/prod_detalle.php?id_dpto=102&id_producto=2477&ddonde=1
- **Serie educativa Protege a tu familia de... (Números del 1 al 9)**
www.redciencia.cu/cdorigen/arca/protegefam.html
- **Anuario de la Sociedad Cubana de Geología**
<http://www.redciencia.cu/geobiblio/inicio.html>



ESTRATIGRAFÍA DE LAS CUENCAS SINOROGÉNICAS DEL CAMPANIANO TARDÍO AL DANIANO DESARROLLADAS SOBRE ROCAS DE ARCO VOLCÁNICO Y RETROARCO EN CUBA

MANUEL A. ITURRALDE-VINENT

Academia de Ciencias de Cuba

Correo: iturralde@ceniai.inf.cu

RESUMEN

La geología de los depósitos del Campaniano tardío al Eoceno Superior representa un momento muy importante de la evolución geológica de Cuba, pues coincide con la consolidación del orógeno y su acreción contra el margen meridional de Las Bahamas. Durante este proceso, sobre los terrenos de arco volcánico extinto del Cretácico y el conjunto máfico-ultramáfico de retroarco se formaron cuencas sedimentarias en dos ciclos superpuestos, uno del Campaniano tardío al Daniano y otro del Daniano al Eoceno Superior temprano. En general, estos ciclos se caracterizan por una sección inferior clástica que transiciona en una superior clástica fina a carbonatada. En este trabajo se describen las unidades litoestratigráficas de las cuencas del primer ciclo.

ABSTRACT

The geology of the late Campanian to Upper Eocene deposits represents an important time interval in the evolution of Cuba, as it coincides with the consolidation of the orogen and its accretion against the Bahamian margin. During this process, above the extinct Cretaceous volcanic arc and the back-arc mafic-ultramafic suite (Caribbean plate) evolved basins superimposed in two subsequent cycles, one of late Campanian to Danian and another of Danian to early Upper Eocene age, generally represented by a lower clastic unit and an upper fine clastic to carbonate section. In this paper the lithostratigraphy of the basins representing the first cycle is described.

INTRODUCCIÓN

Generalidades

El complejo de las cuencas postvolcánicas de Cuba se desarrolla sobre los restos deformados de los arcos volcánicos del Cretácico y sobre las rocas máfico-ultramáficas de retroarco. En estas cuencas se distinguen dos ciclos de desarrollo, uno del Campaniano tardío al Daniano y otro del Daniano al Eoceno Superior temprano. Entre ambos ciclos en ocasiones puede existir un hiato erosivo que abarca parte del Paleoceno, pero localmente la sección es continua e incluye el límite K - Pg. Cada ciclo sedimentario comienza con una transgresión y acumulación de clastitas y termina con rocas carbonatadas que a menudo concluyen con una regresión. Los depósitos en estas cuencas están relativamente poco deformados y contienen detritos provenientes principalmente de la erosión de los arcos volcánicos y las rocas máfico-ultramáficas de back - arc (Kleschov *et al.*, 1977; Iturralde - Vinent, 1995).

Para caracterizar la estratigrafía se han propuesto varias unidades litoestratigráficas, muchas de las cuales no se publicaron o se basaron en una definición incompleta e inadecuada. Sin embargo, en el proceso de levantamiento geológico 1:250 000 de las Academias de Ciencias de Cuba, Unión Soviética, Polonia, Bulgaria y Hungría (Kantchev *et al.*, 1978; Pushcharovskiy, 1988) y en los posteriores trabajos de cartografía detallada a escala 1:50 000 realizados por acuerdo con varios países del CAME (Alemania, Hungría, Checoslovaquia y Unión Soviética), se utilizaron una serie de unidades que podían ser expresadas en los mapas, cuyo uso se fue introduciendo en la literatura científica cubana (Jakus, 1983; Albear e Iturralde - Vinent, 1985; Pszczolkowski *et al.*, 1987). Sin embargo, en los años posteriores a estos trabajos, algunas de las formaciones y miembros sufrieron cambios de nombre (Franco Álvarez *et al.*, 1992), dando lugar a que ahora existan dos y más denominaciones para una misma unidad. En este trabajo por lo general se acepta la nomenclatura utilizada en los levantamientos mencionados, por considerar

que las unidades litoestratigráficas descritas fueron definidas correctamente y pueden servir de base para investigaciones más detalladas en el futuro.

A continuación, se definen las características esenciales de las cuencas del primer y segundo ciclo, formadas en el intervalo del Campaniano Superior al Eoceno Superior tardío.

Cuencas del primer ciclo

Las cuencas del ciclo Campaniano tardío al Daniano Inferior cubrieron los restos erosionados del territorio de los arcos volcánicos y retroarco del Cretácico. Después de su extinción, los terrenos de los arcos se exhumaron, al punto de que la erosión profunda en algunos segmentos provocó el afloramiento de la parte superior de los cuerpos plutónicos. En algunos segmentos la erosión fue menor y los depósitos vulcanógeno-sedimentarios más jóvenes del Campaniano Inferior a Medio están cubiertos, con una leve disconformidad, por la sección inferior de las cuencas del Campaniano tardío-Paleoceno. Por lo general, los estratos de estas cuencas presentan deformaciones moderadas, a excepción de las que yacen sobre las rocas de retroarco (máfico-ultramáficas) en el entorno del contacto tectónico con el margen continental.

El desarrollo de estas cuencas está vinculado a los movimientos verticales que sucedieron a la extinción del magmatismo del Cretácico, de ahí que los espesores y facies de estos sedimentos presenten muchas variaciones laterales. Pushcharovskiy (1989) dibujó las isopacas y ofreció una breve caracterización de estas cuencas. En la Figura 1 se ilustran las principales áreas donde están presentes las rocas del intervalo estratigráfico en cuestión y la denominación de las mismas.

La mayoría de los cortes de estas cuencas comienzan con clastitas ricas en componentes derivados de la erosión de los arcos volcánicos y las rocas máfico-ultramáficas. Dichas clastitas son menos abundantes en la segunda mitad del Maastrichtiano, cuando predominaron las calizas y margas de banco carbonatado.

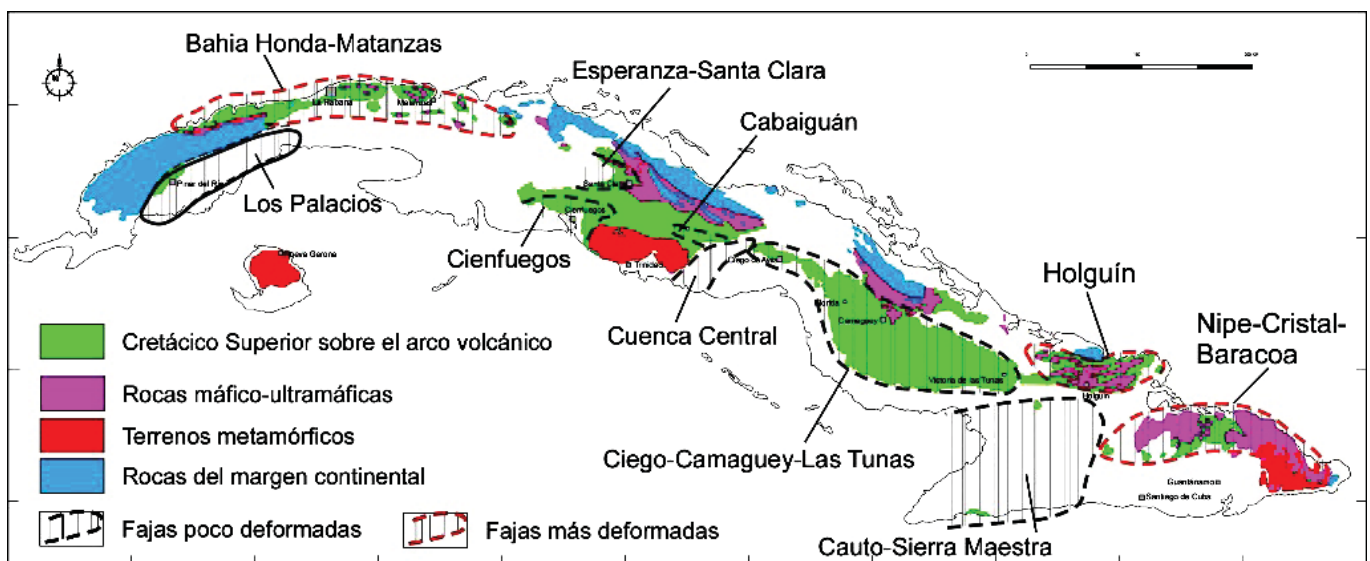


Figura 1. Mapas de la distribución de los depósitos del Campaniano tardío al Daniano, sobre los arcos volcánicos y retroarco (rocas máfico-ultramáficas) del Cretácico.

En los fondos marinos someros de estas cuencas dominaron los ambientes con rudistas, gasterópodos, equinodermos y, en menor grado, ammonites y corales (Rojas Consuegra *et al.*, 1995), así como algas calcáreas, foraminíferos (sobre todo orbitoidales) y ostrácodos. También se encuentran restos fósiles de polen y esporas de plantas superiores, que sugieren la existencia de vegetación en las tierras emergidas. En la parte más profunda de las cuencas los ambientes batiales contienen foraminíferos planctónicos, calcisferúlidos, fitoplancton y radiolarios, así como diatomeas en menor grado.

En estas cuencas están presentes depósitos del límite KT (Tada *et al.*, 2003). Una excepción es la cuenca al norte de Cuba oriental, donde el corte es siliciclástico desde el Campaniano tardío (incluido el límite K-Pg) y culmina con el emplazamiento de un potente manto de rocas máfico-ultramáficas antes del Daniano Medio (Cobiella - Reguera, 1974, 1977, 1978, 1983; Iturralde-Vinent *et al.*, 2006).

Entre las secciones del Campaniano tardío al Eoceno es posible reconocer estilos estructurales distintos.

La faja Bahía Honda-La Habana-Matanzas y la faja Holguín se caracterizan por un sistema plegado-sobrecorrido con una serie de pliegues recumbentes y napes-escamados, que yacen sobre las rocas del margen continental. Las rocas de los arcos volcánicos, las máfico-ultramáficas y las secciones del Campaniano tardío al Daniano temprano están imbricadas en los cortes y presentan deformaciones considerables. Al observar el mapa geológico, es evidente que las estructuras están verticalizadas, a causa de una compresión tardía, de manera que las distintos tipos de rocas afloran como bandas estrechas que siguen el rumbo del eje de las estructuras (Figura 2).

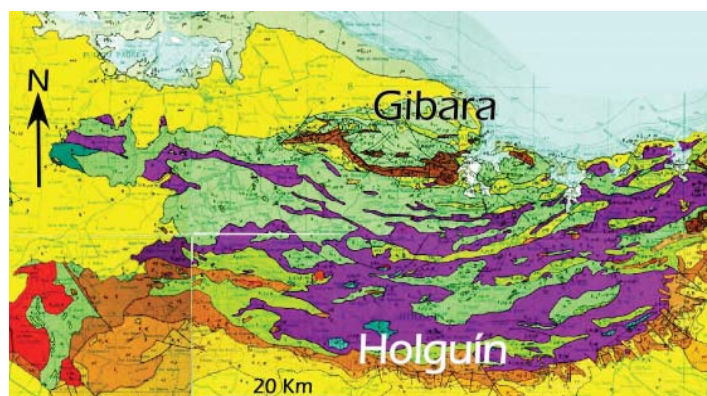


Figura 2. Mapa geológico de la región de Holguín (Pushcharovskiy, 1988), donde se observa el carácter bandeado de los afloramientos, los cuales describen grandes arcos convexas hacia el Sur, representados por un conjunto de mantos alóctonos con napes imbricados de rocas de arco volcánico (verde), sedimentarias (verde claro y pardo) y máfico-ultramáficas (color violeta).

La faja Nipe – Cristal-Baracoa está muy deformada, con una ligera imbricación de los elementos tectónicos. Los mantos alóctonos de rocas máfico-ultramáficas y en menor grado de vulcanitas cretácicas son subhorizontales, de modo que las rocas del Campaniano tardío al Paleoceno a menudo yacen en ventanas tectónicas que coinciden con los valles erosivos. En este aspecto, esta faja se distingue de la antes descrita, pues los elementos alóctonos forman grandes olistoplasas de contorno irregular

que sobreyacen a los depósitos olistostrómicos (Fms. La Picota y Micara) del Maastrichtiano al Paleoceno temprano (Figura 3).

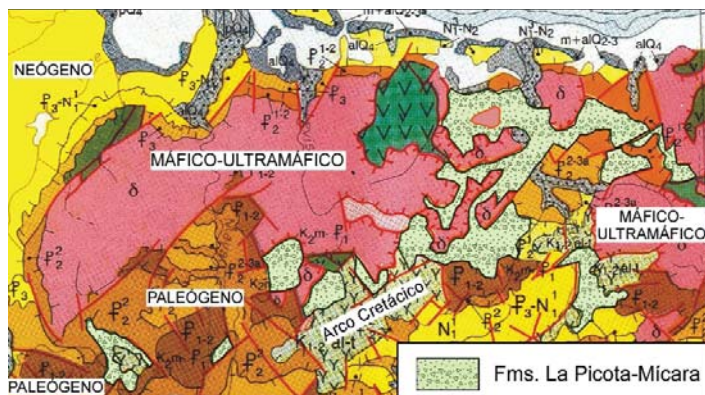


Figura 3. Mapa geológico de la región de Nipe-Cristal, donde se observan los afloramientos del olistostroma (Fms. La Picota y Micara), los mantos alóctonos máfico-ultramáficos (rojo con δ y verde con v), vulcanógenas (verde con Y) y las rocas autóctonas poco deformadas del Paleógeno (pardo, P) y Eoceno Superior a Mioceno (amarillo, $P_2^2-N_1$), que sobreyacen al conjunto anterior.

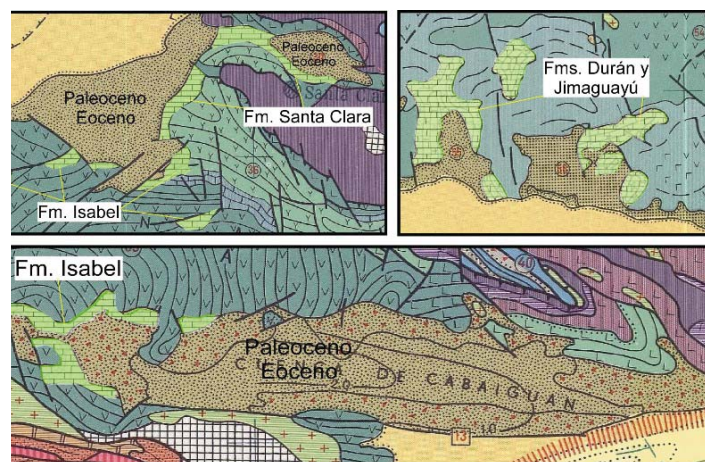


Figura 4. Detalles del mapa tectónico (Pushcharovskiy, 1989) donde se observa la limitada deformación de las cuencas del primer ciclo (verde claro con ladrillos) y segundo ciclo (carmelita con puntos: flysch; triángulos rojos: olistostroma). Compárese con las deformaciones más intensas hacia el norte, en las secciones situadas cerca de la articulación con las cuencas de foredeep (Figura 6). Es notable que los depósitos del primer ciclo (Fms. Isabel, Santa Clara, Durán, Jimaguayú) están interrumpidos a lo largo de su rumbo, lo cual sugiere que hubo un evento de deformación y/o erosión antes de la acumulación de las secciones del segundo ciclo. Las rocas con símbolos (+, Y, V, L, L invertida, retina cuadrículada y coloreadas de rosado y violeta) constituyen el sustrato pre Campaniano tardío de estas cuencas.

Secuencias menos deformadas que las fajas anteriores yacen en depresiones erosivo-tectónicas y como parches residuales sobre los restos denudados de los arcos volcánicos extintos del Cretácico, tanto en condiciones autóctonas como paraúctonas. La extensión de los afloramientos de estos depósitos no reflejan los límites originales de las cuencas sedimentarias, pues la erosión ha arrancado las secciones donde el espesor era menor o donde la inversión tectónica fue muy activa. Como se observa en la Figura 4, las secciones del Campaniano tardío al Daniano normalmente constituyen bandas interrumpidas que yacen debajo de los afloramientos de las rocas del Paleoceno tardío-

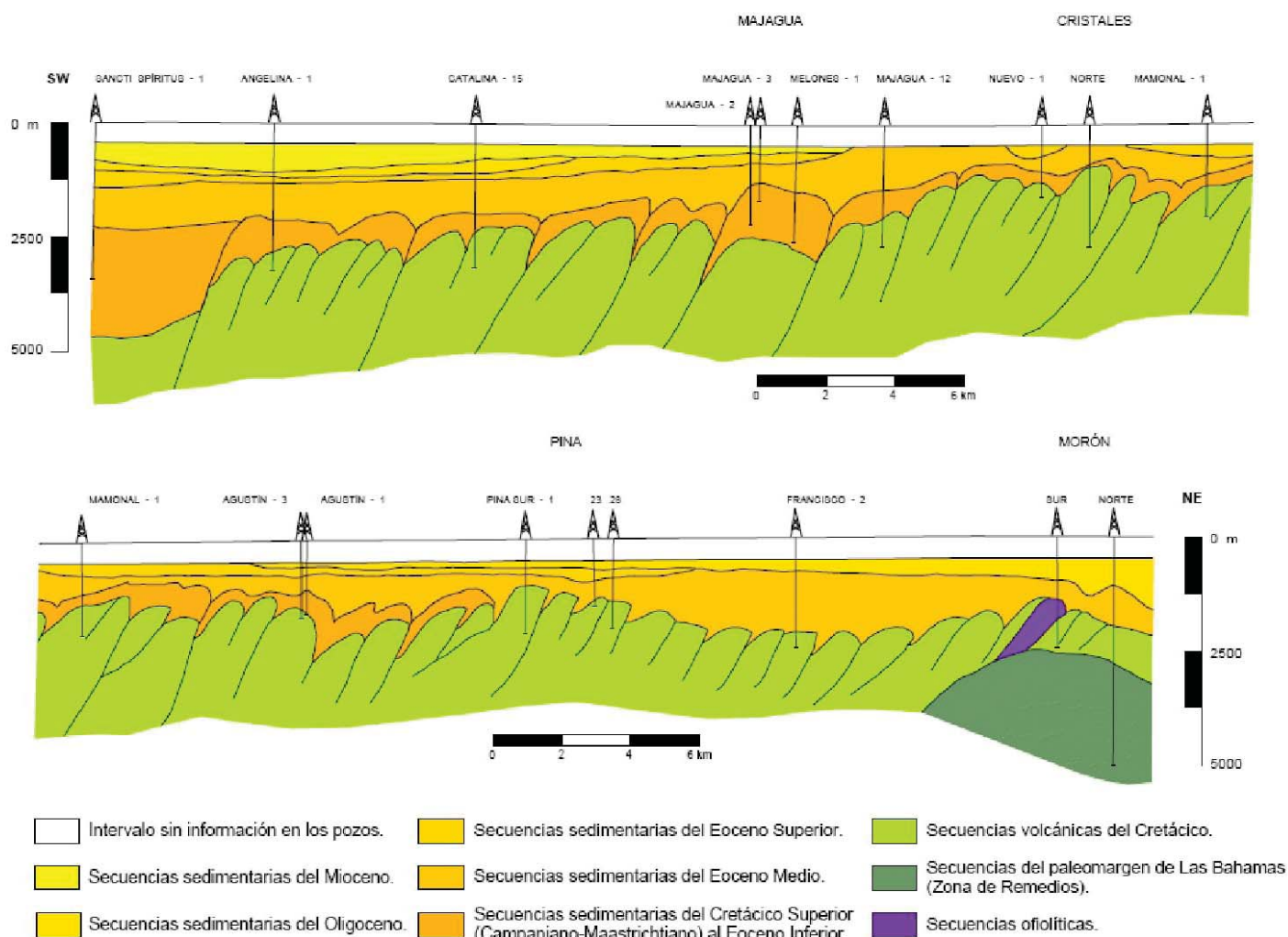
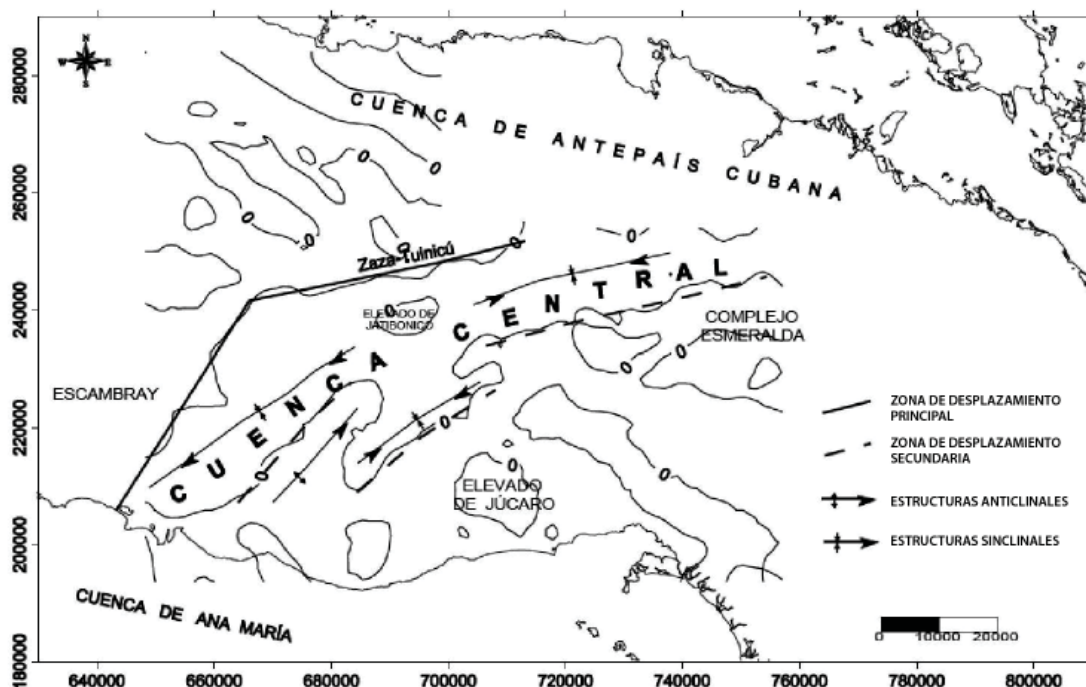


Figura 5. Mapa estructural y perfiles de la Cuenca Central, según Cruz - Oroza y Blanco - Moreno (2007) y Cruz Oroza et al. (2012 a, b). Obsérvese que los depósitos de las cuencas del primer ciclo yacen discordantes sobre el basamento más antiguo y pueden faltar localmente.



Eoceno o forman parches aislados sobre las rocas de arco volcánico extinto. Se evidencia que los depósitos del Paleoceno tardío al Eoceno con frecuencia presentan una orientación diferente y distinto grado de onlapping sobre las rocas del Campaniano tardío al Daniano y su substrato vulcano-plutónico.

Dentro de este conjunto de cuencas se destacan la Cuenca Central y Los Palacios, depresiones estructurales más profundas que cortan con distinto ángulo la lineación general NW-SE de Cuba (Cruz - Oroza y Blanco - Moreno, 2007; Cruz - Oroza *et al.*, 2012 a, b). De acuerdo a los depósitos que contienen, se puede asegurar que estuvieron activas desde finales del Cretácico hasta el Eoceno, por lo que son típicamente cuencas postvolcánicas sinorogénicas. La Figura 5 ilustra la posición de la Cuenca Central y su estructura interna.

Cuencas del segundo ciclo

Durante el lapso desde el Daniano superior hasta el Eoceno Superior, en Cuba se pueden reconocer tres elementos principales: las cuencas de *foredeep*, el arco volcánico

paleogénico y las cuencas post volcánicas (*piggy back* o “a cuestras”), cuya distribución se ilustra en la Figura 6 y su posición en la Figura 7 (Iturralde-Vinent, 2011).

Las cuencas *piggy back* del Paleoceno y Eoceno se desarrollaron sobre las del primer ciclo, a veces como una transición y un cambio de facies. En la mayoría de los casos, media entre ellas un hiato erosivo y una reestructuración de la orientación tectónica de las mismas. En la sección inferior de estos cortes dominan las areniscas y conglomerados, que se sustituyen hacia arriba por margas y calizas arcillosas de ambientes marinos de aguas profundas. Estas facies transicionan lateralmente hacia calizas de aguas someras y, ocasionalmente, paleosuelos y aluvios propios de tierras emergidas. En contraste, en las partes de las cuencas de este segundo ciclo situadas hacia la vertiente nor-noreste, es notable la presencia de olistostromas del Paleoceno al Eoceno Inferior (Formaciones Taguasco, Hatillo, y otras), depositados en los frentes de cabalgamiento, que a menudo se asocian al contacto tectónico entre las rocas de arco volcánico cretácico suprayacentes y las rocas de retroarco (máfico-ultramáficas) subyacentes.

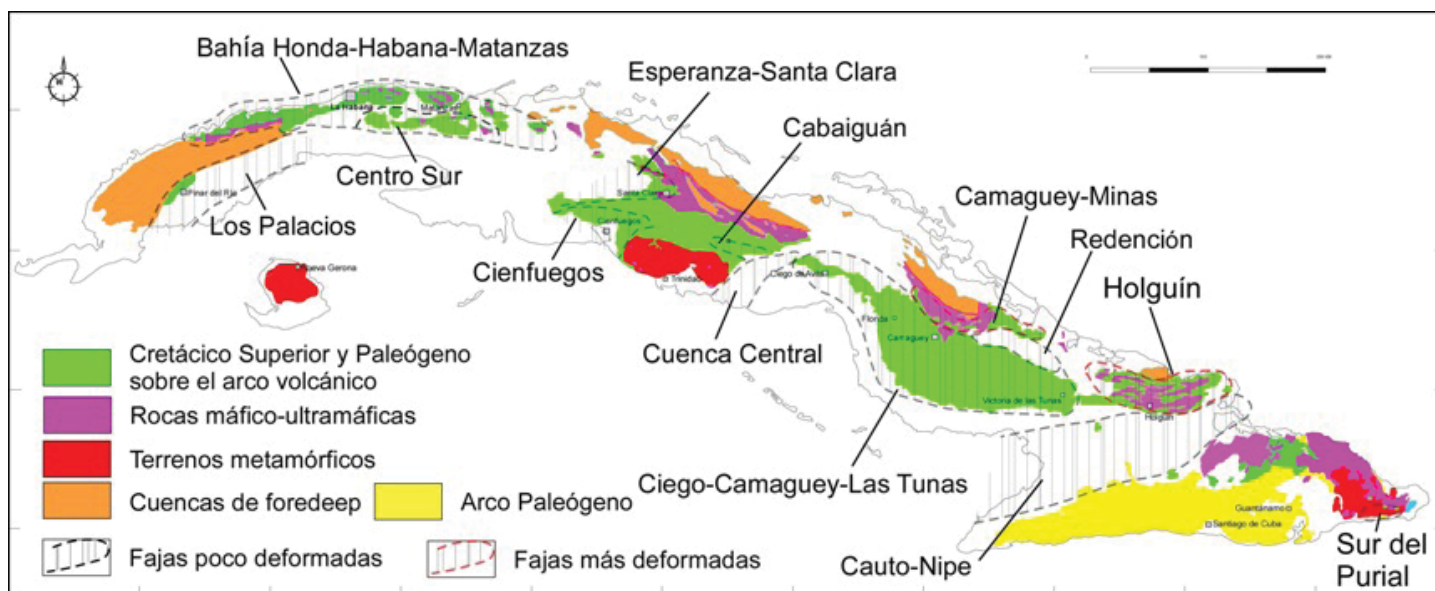


Figura 6. Mapa de las áreas de afloramiento de las cuencas del segundo ciclo, donde se destacan las fajas más deformadas.

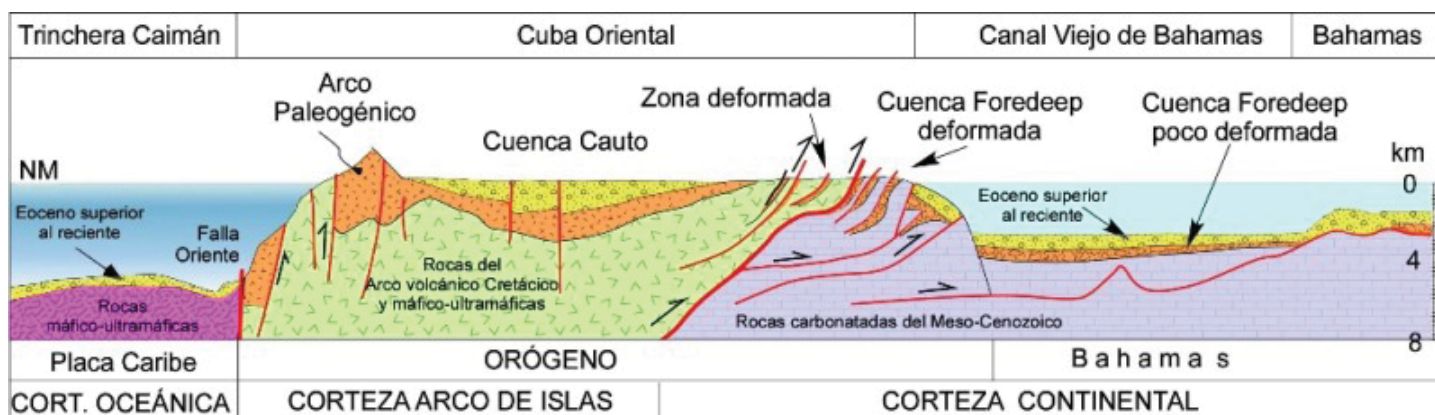


Figura 7. Perfil geológico esquemático norte-sur entre Holguín, Cauto-Nipe, el arco paleogénico y la fosa de Caimán.

En el mapa de la Figura 6 se distinguen varias fajas por su grado de deformación. Las más deformadas se encuentran siempre donde los mantos desmembrados de rocas máfico-ultramáficas y de vulcanitas cretácicas están acrecionados contra la faja deformada del norte de Cuba, sobreyaciendo a los depósitos de foredeep. En los ejemplos de Holguín y Camagüey-Minas, estas rocas del Paleógeno están representadas por un olistostroma, que yace imbricado entre las rocas más antiguas, intensamente trituradas. En el perfil de la Figura 8 se ilustra la posición del olistostroma debajo de los mantos de rocas volcánicas del Cretácico en Camagüey.

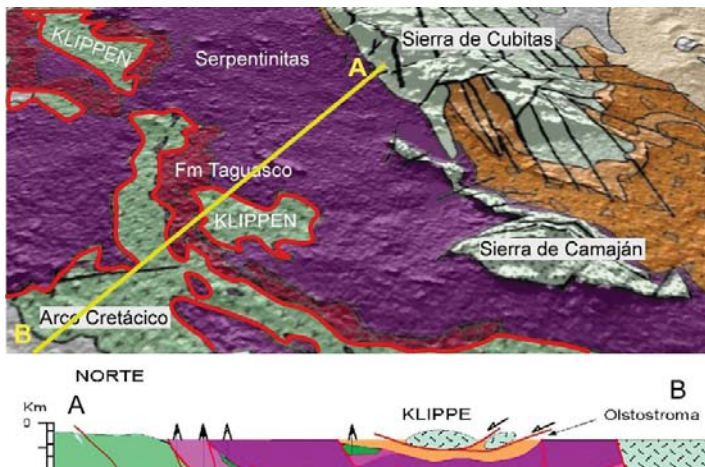


Figura 8. Mapa y perfil del centro norte de Camagüey, donde se ilustra la faja deformada Camagüey-Minas. En rojo se marcan los contactos tectónicos del manto alóctono de arco volcánico Cretácico.

En las áreas poco deformadas, los depósitos del Paleoceno-Eoceno usualmente yacen en el interior de las depresiones estructurales, donde se encuentran pliegues de orden métrico, usualmente a lo largo de dislocaciones disyuntivas. Fuera de la zona de influencia de las fallas, las capas tienen buzamientos suaves, generalmente hacia el eje central de las depresiones.

Origen de las cuencas post volcánicas

Las cuencas del primer ciclo surgen al extinguirse el magmatismo de arco cretácico, asociado a las deformaciones tectónicas del Campaniano tardío-Daniano. Las del segundo ciclo se inician a partir del Daniano tardío y se vinculan a los movimientos de transporte de las unidades oceánicas sobre el margen continental. Esta segunda etapa concluye entre el Eoceno Medio y Superior con la colisión/obducción de los mantos de arco volcánico y las rocas máfico-ultramáficas contra el margen continental norteamericano. Las cuencas sedimentarias del segundo ciclo son mayormente de tipo transportadas o a cuestas (*piggy back*). Estas constituyen depresiones sintectónicas que se formaron sobre los mantos de corrimiento. Algunas yacen sobre el alóctono máfico-ultramáfico y cubren a los olistostromas del Paleoceno al Eoceno Inferior. Otro conjunto de estas cuencas yacen sobre las secciones de arco cretácico extinto y están representadas por depósitos del Paleoceno al Eoceno Medio-Superior. Estas últimas se desarrollaron esencialmente sobre las del primer ciclo, aunque sus contornos no coinciden debido probablemente a las rotaciones y traslación de los ejes de subsidencia y a procesos de levantamiento y erosión.

Ya en la mitad del Eoceno Superior se había formado el cinturón plegado cubano, cuando el extremo occidental del Caribe quedó adosado a la placa Norteamericana (NOAM), y el límite entre las placas pasó al entorno del sistema de las fallas Swan-Oriente-Septentrional (Iturralde-Vinent, 1978, 2011). A partir de entonces, las cuencas sinorogénicas dejan de estar activas y se desarrolla un nuevo sistema estructural, con sus propias depresiones y elevaciones.

ESTRATIGRAFÍA DE LAS CUENCAS SINOROGÉNICAS DEL PRIMER CICLO

En los párrafos siguientes se caracterizarán las unidades litoestratigráficas de las regiones donde están presentes las rocas del intervalo Campaniano tardío al Daniano (Figuras 1 y 9), propias de las cuencas del primer ciclo, tomando como base los datos de Iturralde – Vinent (2011). Para encarar este tema, la descripción de las secciones litoestratigráficas se lleva a cabo por cuencas, sectores o fajas plegadas, de acuerdo a la manera en que estas rocas afloran actualmente.

Cuenca Los Palacios

En esta depresión estructural, los depósitos del Campaniano y Maastrichtiano afloran en su borde septentrional y han sido cortados por algunos pozos profundos bajo los sedimentos más jóvenes (Figura 10). Son numerosas las unidades litoestratigráficas descritas, pero no fueron publicadas adecuadamente. Por esta razón, se adopta en superficie la Formación San Juan y Martínez y se compara sintéticamente con sus equivalentes en los pozos.

Los pozos San Diego, Remedios, Palacios 3 y Taco Taco, perforados en la depresión, incluyen areniscas muy finas con intercalaciones de margas y calizas. En la parte más baja aparecen conglomerados con abundante clastos de rocas ígneas de arco volcánico (Echevarría *et al.*, 1988). Contienen microfósiles (*Globotruncana lapparentii*, *G. fornicata*, *G. contusa*, *G. stuarti*, *Vaughanina* spp.) que abarcan el Campaniano tardío y el Maastrichtiano (García – Sánchez, 1978).

Formación San Juan y Martínez Herrera, 1961

Los depósitos del Cretácico Superior, al sur de la falla Pinar, están representados por la Formación San Juan y Martínez (Herrera, 1961; Pszczółkowski *et al.*, 1975). Piotrowski (1978) la describe en cuatro perfiles: 1) oeste de San Juan y Martínez, 2) El Guayabo, 3) en el río Guamá (cerca de La Guabina) y 4) cerca de San Diego de los Baños (Figura 11).

Las secciones de mayor espesor se encuentran en el perfil del río Guamá, aunque las calizas con rudistas están más desarrolladas cerca de San Juan y Martínez. En los respectivos perfiles de la formación es notable la acentuada diferenciación y los rápidos cambios litológicos tanto laterales como verticales. Predominan las calizas bioclásticas con abundantes rudistas, corales, algas, ostras, y briozoarios. Los rudistas aparecen de forma individual o como biostromas, con individuos en posición de vida. Los paquetes de calizas transicionan en calizas conglomeráticas y en clastitas, principalmente areniscas y conglomerados. Los conglomerados contienen clastos de traquibasaltos, shoshonitas, traquiandesita-basaltos, dacitas, ignimbritas,

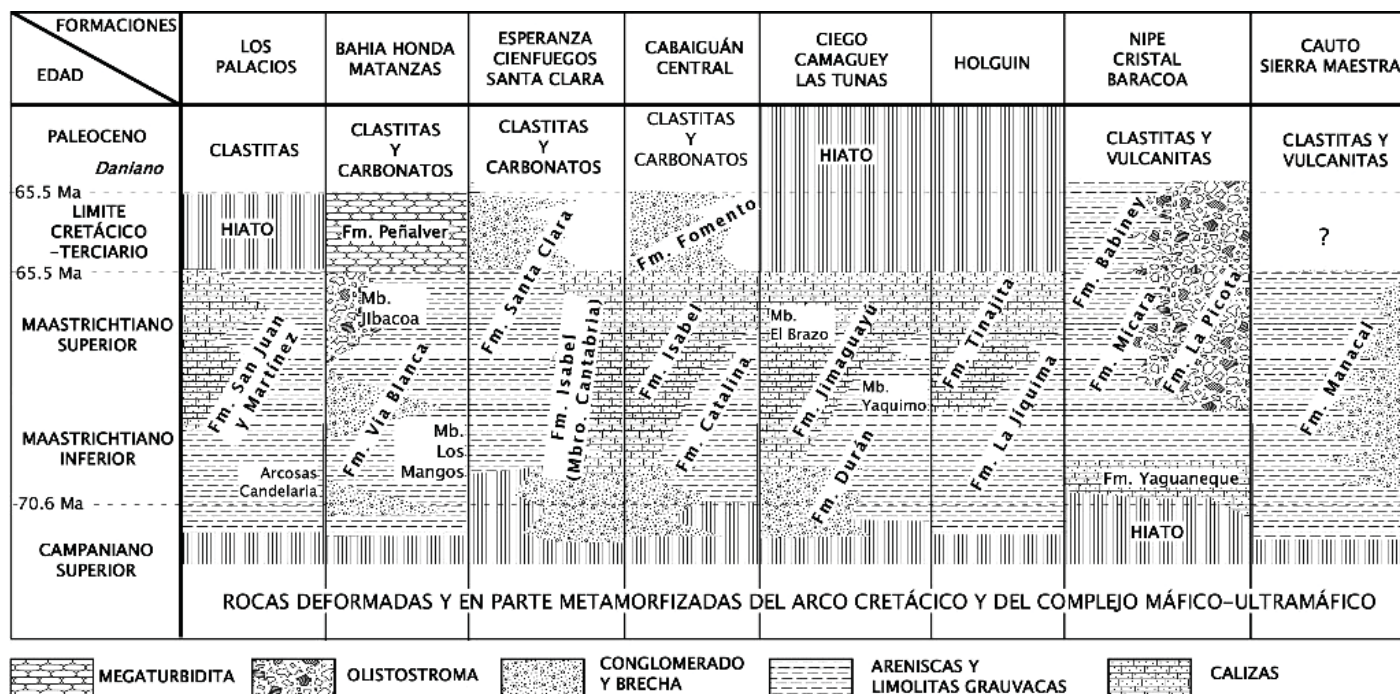


Figura 9. Columnas estratigráficas del Campaniano tardío al Paleoceno. En la Figura 1 se encuentra la localización de las secciones.

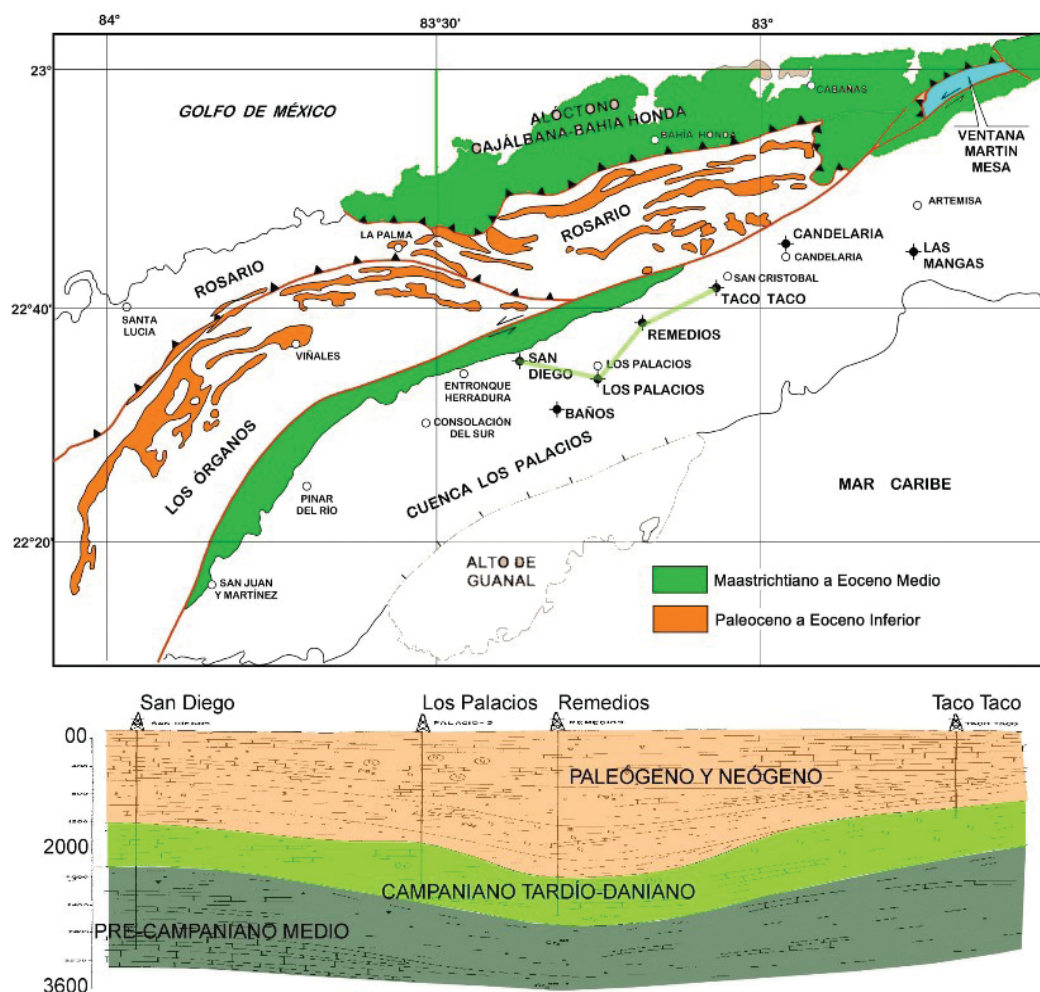


Figura 10. Mapa del occidente de Cuba, donde se observan los afloramientos de las rocas de las cuencas del primer ciclo y la estructura de la depresión de Los Palacios. Modificado de García-Sánchez (1978).

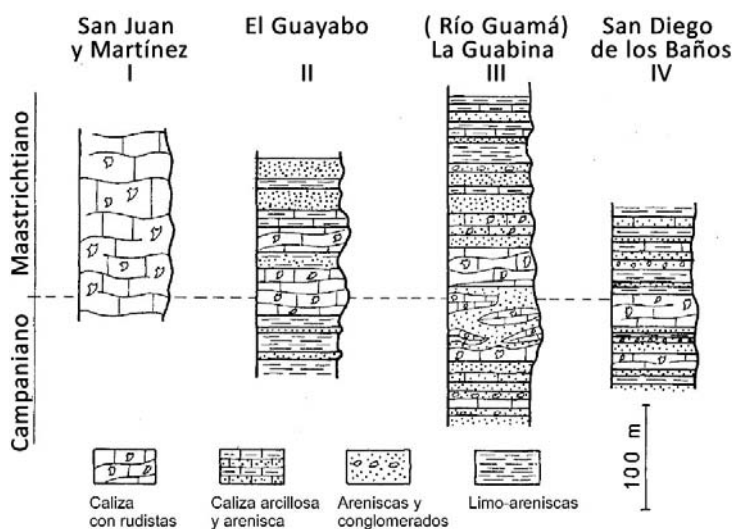


Figura 11. Columnas litológicas de la Formación San Juan y Martínez, según Piotrowski (1978). Las calizas de la sección I son realmente conglomeráticas y probablemente representen la parte superior de la formación.

distintas piroclastitas, granodioritas, tonalitas, granófiros y calizas grises con rudistas pre Maastrichtiano. Estas rocas ígneas han sido comparadas según su litología y geoquímica con aquellas de arco vulcanoplutónico cretácico (Echevarría *et al.*, 1988). El diámetro de los guijarros llega hasta decenas de centímetros. Elementos más escasos son las areniscas cuarcíferas, el cuarzo y las silicitas. También están presentes algunos clastos en las calizas y sedimentos arcillosos, por lo general bien redondeados. Tanto los conglomerados como las calizas aparecen generalmente en forma de lentes. Los horizontes litológicos que se extienden una larga distancia son más escasos.

Gil (2007) describe como Formación Los Negros una secuencia que no se puede distinguir de la Formación San Juan y Martínez. Según esta autora:

(...) se extiende (...) desde la localidad de La Majagua (al N del pueblo de San Juan y Martínez) hasta el Río Ajiconal, al E de la carretera Pinar del Río- Viñales (...) en forma de una franja alargada y estrecha, que se interrumpe a trechos, a veces por causas tectónicas o por su completo acunamiento estratigráfico. (...) se distingue principalmente por calizas biohémicas masivas o groseramente estratificadas. El componente biógeno principal son los grandes fragmentos hasta individuos completos de paquiodontos (rudistas). Abundan mucho los restos de equinodermos, moluscos varios y algas. Las capas libres de macrofósiles se componen de intrasparitas, biolititas-bioesparitas, intraparruditas de moluscos y otras variedades. El color es gris claro, carmelita claro, raramente blanco crema. En algunos cortes aparecen lechos terrígenos de lutitas arenosas y grauvas carbonatadas entre los bancos calcáreos. Su espesor oscila entre 20 y 40 m.

Tanatocenosis y edad

La edad de los depósitos de la Formación San Juan y Martínez se ha determinado sobre la base de los foraminíferos y los rudistas. No han sido tomados en cuenta otros organismos que aparecen

en grandes cantidades en las calizas biógenas, debido a su pobre grado de conservación y a la escasa utilidad estratigráfica que brindan. Sobre la base de los rudistas (*Titanosarcoclitus giganteus*, *Bournonia* sp., *B. thiadensis*, *B. cf. B. africana*, *Chiapasella pauciplicata*, *Præbarrettia sparsilirata*, *Antillocaprina* cf. *A. annulata*, *Hippurites mullerriedi*; según Rojas Consuegra *et al.*, 1995) y los foraminíferos (*Smoutina bermudezi*, *Orbitoides apiculata*, *Sulcoperculina dickersoni*, *Sulcoperculina angulata*, *Sulcoperculina diazi*, *Pseudorbitoides israelskyi*, *Pseudorbitoides kozaryi*, *Pseudorbitoides rutteni*) reportados para la sección de calizas, su edad se puede establecer como Maastrichtiano. No se ha logrado comprobar la edad paleocénica de la parte más alta, postulada por Herrera (1961).

Ambiente sedimentario

Las observaciones anteriores sobre la composición litológica de los sedimentos cretácicos en los distintos perfiles, indican que han tenido lugar grandes y rápidos cambios faciales, tanto horizontales como verticales. Un tipo de sedimento es sustituido lateralmente por otro que pudo haberse acumulado en un ambiente sedimentario muy distinto.

Un papel predominante en la formación de los sedimentos calcáreos biógenos lo representaron los rudistas y en menor escala los corales, pelecípodos, briozoarios y algas. Los fragmentos de fauna bentónica son con frecuencia muy finos y constituyen los principales componentes del sedimento. Esta fauna, que es abundante, indica el ambiente poco profundo de la sedimentación de los depósitos carbonatados. Los horizontes de conglomerados que aparecen en grandes cantidades indican la cercanía de alguna costa con ambientes de transición marino-terrestre.

Piotrowski (1978) expuso que la sedimentación tuvo lugar en una plataforma insular parálisis, cuyo material provino de áreas montañosas formadas, en lo fundamental, de rocas volcánicas. De norte a sur, según las perforaciones profundas, disminuye el tamaño de los clastos en los conglomerados, así como la cantidad de material bioclástico, mientras aumenta mucho la proporción de material fino (arcilla calcárea). Esto sugiere que esta cuenca de algún modo es alóctona, pues al norte de ella, actualmente, no hay estos tipos de rocas (Ver Figura 1).

Conglomerados Arcósicos Candelaria García Sánchez, 1978.

En el registro de los pozos perforados en la depresión de Los Palacios (Ver Figura 1) aparecen rocas que reflejan la profunda erosión de los arcos volcánicos del Cretácico antes del Campaniano tardío, como demuestra el Pozo Candelaria (García - Sánchez, 1978). Este pozo cortó areniscas arcósicas de granitoides de arco, intercaladas con capas de conglomerados y gravelitas, que aquí se nombran informalmente como Conglomerados arcósicos Candelaria. Hacia arriba en el corte disminuye el componente arcósico y aumenta el de rocas vulcanógenas que presentan cemento calcáreo. Es posible encontrar ejemplares de *Vaughanina cubensis*, *Sulcorbitoides* sp. y *Pseudorbitoides* sp.

En el occidente de Cuba no hay afloramientos de rocas plutónicas de arco, aunque en Los Palacios está la arcosa Candelaria y en la

región de La Habana, Mayabeque y Matanzas hay abundantes clastos y olistolitos de granitoides en el Olistostroma Jibacoa de la Formación Vía Blanca.

Faja deformada Bahía Honda - La Habana - Matanzas

En este territorio (Ver Figura 1) se pueden reconocer las rocas del Campaniano tardío al Daniano temprano que afloran extensamente y se han cortado por numerosas perforaciones, pero la deformaciones del final del Eoceno han desarticulado la configuración original los depocentros. En esta faja se han descrito las formaciones Vía Blanca y Peñalver (Brönnimann & Rigassi, 1963), que fueron adoptadas en la literatura subsiguiente, aunque en informes inéditos se utilizaron muchas otras unidades inválidas. Albear e Iturralde-Vinent (1985) introdujeron algunas precisiones a la descripción de estas unidades y, posteriormente, Takayama *et al.* (2000), Tada *et al.* (2003) y Goto *et al.* (2008) fecharon la Formación Peñalver del límite Cretácico-Terciario (Ver Figura 3).

Formación Vía Blanca Brönnimann & Rigassi, 1963

Brönnimann y Rigassi (1963) no designaron una, sino varias localidades representativas de la formación. Como área tipo, aunque no de manera explícita, designaron la región al este de la ciudad de La Habana. Además, señalaron que los mejores afloramientos se encuentran en la Vía Blanca y en la Avenida Monumental, lo que puede aceptarse como una localidad tipo.

En sentido general se compone de argilitas, limo-areniscas y areniscas de composición grauvaque de color rojizo-verdoso y carmelitoso, con intercalaciones finas de margas blancas y horizontes de conglomerados, calcarenitas y clastitas caóticas. Brönnimann y Rigassi (1963) distinguieron por su composición peculiar un horizonte intercalado de carbonatos que denominaron Bacuranao y varios horizontes de conglomerados. Albear e Iturralde-Vinent (1985) distinguieron adicionalmente el Flysch Los Mangos y el Olistostroma Jibacoa. La Formación Vía Blanca yace en discordancia sobre las secuencias vulcanógenas pre-Campaniano de las cuales contiene abundantes clastos así como de rocas máfico-ultramáficas. La Formación Peñalver del K-Pg sobreyace a Vía Blanca. Otras formaciones más jóvenes la cubren con evidente concordancia. Su espesor, medido en los pozos para la exploración petrolera, alcanza valores de 500, 800 y hasta 1 200 m, aunque con seguridad este último valor reflejan duplicidad del corte por fallas y plegamientos, pues en la superficie se detectan pliegues tumbados y napes escamadas, que complican la sucesión natural de las capas.

Tanatocenosis y edad

Según Brönnimann y Rigassi (1963), existen dos niveles estratigráficos en la formación. Takayama *et al.* (2000), Tada *et al.* (2003) y Gil *et al.* (2009) han reportado además otro conjunto que alcanza el final del Maastrichtiano.

Los microfósiles del Campaniano tardío incluyen *Pithonella ovalis*, *Calcisphaerula innominata*, *Globotruncana fornicata*, *G. stuarti*, *G. linneiana*, *G. lapparenti*, *Rugoglobigerina rugosa*, *Pseudotextularia*

elegans, *Orbitocyclina minima*. Para el Maastrichtiano Inferior se reportan *Globotruncanella havanensis*, *Globotruncana mariei*, *G. stuarti*, *G. tricarinata*, *G. arca*, *G. gansseri*, *Pseudotextularia elegans*, *Pseudoguembelina excolata*, *P. siriaca*, *Planoglobulina glabrata*, *Gublerina ornatissima*, *G. acuta robusta*, *Heterohelix pulchra*, *H. globulosa*, *H. carinata*; y, para el Maastrichtiano Superior, *Abathomphalus mayaroensis*. Fueron identificados radiolarios por Flores - Albin (1986) y otros foraminíferos por Díaz Otero (1985), que corresponden a la misma edad.

Ambiente sedimentario

La formación se depositó sin dudas en un ambiente marino a profundidad mayor de los 600 m (Brönnimann & Rigassi, 1963), en un fondo situado en la base del talud insular contiguo a una plataforma submarina litoral. La fuente de aportes de estos materiales era un terreno ondulado y surcado por una red fluvial bien desarrollada, dada la presencia de clastos bien rodados del material erosionado desde la Formación Vía Blanca y de rocas del arco volcánico. Los biotritos de grano medio a grueso incluye foraminíferos grandes, algas, rudistas y biohermas, que pueden haber sido retrabajados desde los conglomerados propios de esta unidad o trasladados desde ambientes más someros. En la fuente de aportes afloraban principalmente tobos, areniscas tobáceas y grauvas, así como diabasas, andesitas, granitoides y algunos cuerpos de gabros y serpentinitas, además de calizas y silicitas. Tales características sugieren que las tierras se encontraban en el sur de la cuenca deposicional, pues hacia el norte se encontraban secciones de carbonatos y evaporitas.

Los depósitos del flysch Los Mangos, que conforman el mayor volumen del relleno de la paleocuenca, son el resultado de la sedimentación rítmica por corrientes turbias en una época de fuerte inestabilidad tectónica y sísmica. Las etapas de levantamiento más activo de las tierras emergidas coinciden, probablemente, con la sedimentación de los conglomerados. Movimientos tectónicos más activos en la localidad coincidieron en tiempo con la acumulación del Olistostroma Jibacoa, que pudieron haberse asociado a los frentes de avance de pequeños napes gravitacionales epidérmicos, así como de origen profundo.

A continuación se describen estas unidades componentes de la Formación Vía Blanca (Albear e Iturralde-Vinent 1985):

Flysch Los Mangos Albear e Iturralde-Vinent 1985

Albear e Iturralde-Vinent (1985) nombraron así la litología predominante que Brönnimann y Rigassi (1963 p. 247-252) reconocen como característica de la parte superior de la Formación Vía Blanca. Aflora muy bien en la Avenida Monumental (Hoja Jaruco, coordenadas: x 371 91; y 363 93), cercana al caserío Los Mangos.

La secuencia se compone de limo-areniscas, argilitas y areniscas flyschoides, con gradación y limitados jeroglifos. Buenos afloramientos se encuentran por el terraplén desde Figueras hasta la estación San Adrián (Hoja Matanzas x 428 35; y 362 50), donde afloran areniscas y limo-areniscas de color carmelita claro, con cemento calcáreo a arcilloso, con granos de cuarzo,

mica, plagioclasas, minerales oscuros, calcita y fragmentos de rocas. La secuencia está estratificada en estratos grado descendentes hacia arriba, en capas de 5 a 10 cm, y alcanza un espesor mayor de 100 m donde se ha medido. También aflora en los contornos de Campo Florido y en las regiones de Madruga, Mariel y Cabañas.

Miembro Bacuranao Albear e Iturralde-Vinent 1985

Albear e Iturralde-Vinent (1985) elevaron al rango de miembro las "calizas" Bacuranao de Brönnimann y Rigassi (1963 p. 240-247), pues estas rocas se pueden cartografiar a lo largo de unos 30 km, entre la bahía de La Habana y Campo Florido (Figura 12). Este miembro aparece como intercalaciones lenticulares en la formación, con una potencia de unos 20 m cada una. Se asemeja mucho a la Formación Peñalver, de la cual difiere por faltarle la base rudítica y por ser Campaniano tardío. La localidad tipo del miembro es la cantera San José, 4 km al este suroeste de Guanabacoa, (Hoja La Habana coordenadas: x 370 00; y 364 92).

Litológicamente se compone de limo-areniscas calcáreas, que pasan hacia arriba, a margas calcáreas y llegan hasta arcillas. En las limo-areniscas hay granos de rocas ígneas. Las rocas son gris-amarillentas a gris-blancuzcas y contienen nannofósiles y foraminíferos planctónicos típicos del Campaniano tardío (Brönnimann y Rigassi 1963).

Olistostroma Jibacoa Albear e Iturralde – Vinent, 1985

Dentro del área de desarrollo de la formación Vía Blanca se encuentran paquetes olistostrómicos muy difíciles de

cartografiar por separado. En el futuro, durante levantamientos más detallados, será de gran importancia independizar estas unidades y elevarlas al rango de formación. Aquí se les asigna el nombre informal de Olistostroma Jibacoa, pues en dicha región es donde mejor afloran.

Por la carretera secundaria entre Jibacoa y Canasí, en el área de coordenadas: x 413 650; y 365 800 de la Hoja Santa Cruz del Norte, hay un excelente afloramiento de unos 200 m de largo. En el mismo se observa un amasijo de diversos elementos litológicos mezclados de forma complicada (Figura 13). La litología que parece hacer el papel de matriz es una arenisca muy fina, carmelita oscura, algo arcillosa, con una estratificación poco evidente. Contiene granos de mica, magnetita, plagioclasa, minerales oscuros y testas de foraminíferos planctónicos. La edad de la matriz es Maastrichtiano. En esta se engloban bloques y olistolitos desde pocos centímetros de diámetro hasta la centena de metros. Los pequeños y hasta de 5 m de diámetro se componen de diorita muy alterada y fragmentos de secuencias del tipo flysch Los Mangos, las cuales están fuertemente replegadas en su interior. Estos pliegues se formaron durante el deslizamiento submarino de paquetes de estratos mientras se iniciaba su consolidación. Las mismas rocas se encuentran como secciones concordantes no replegadas de 15 a 20 m de espesor. Algunos bloques están constituidos por fragmentos de pliegues de marga calcárea estratificada en capas de 10 a 15 cm, parecidas las rocas propias del flysch Los Mangos. El corte termina en un apilamiento de olistolitos gigantes de granitoides del Cretácico superior (~ 85 Ma mediante el fechado de los circones, según Rojas Agramonte, 2009, Com. pers.) (Figura 14). El espesor total del olistostroma supera los 100 m.

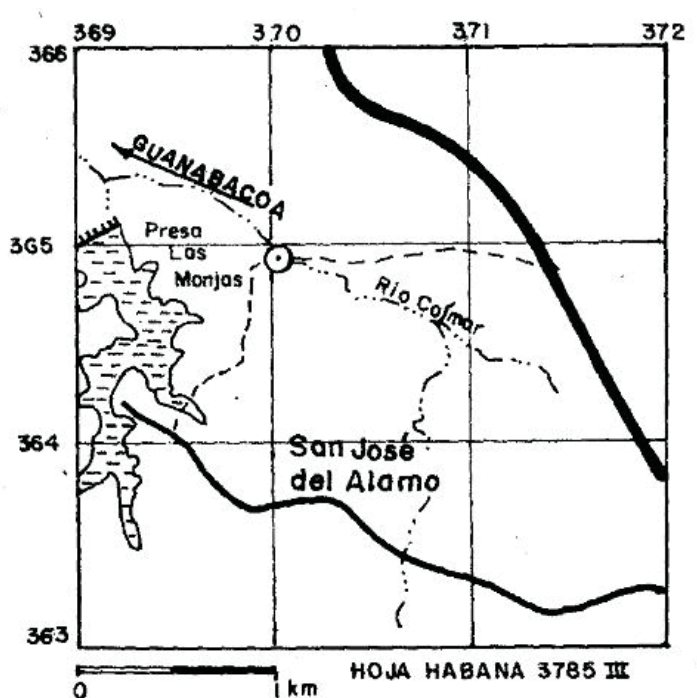
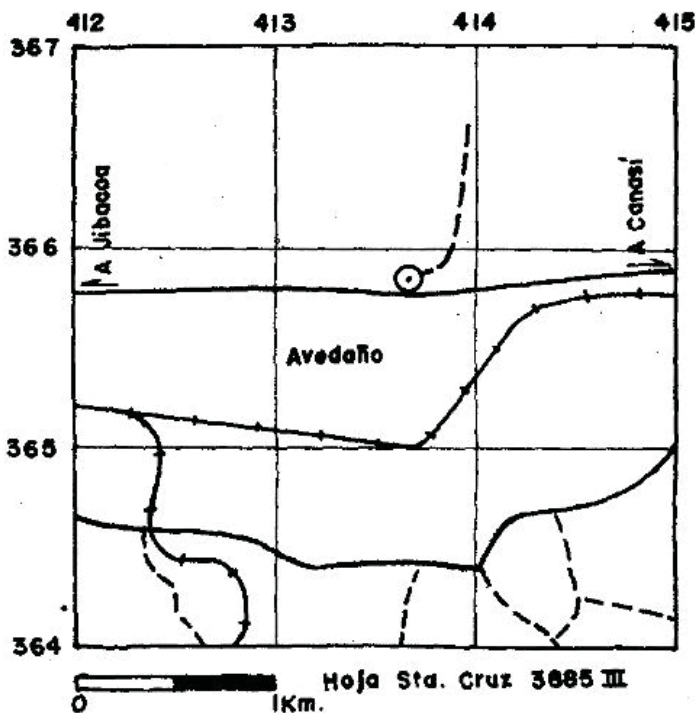


Figura 12. Ubicación de la localidad tipo de los miembros Bacuranao (izquierda) y Jibacoa (derecha).



Figura 13. Arriba: Vista general de la sección tipo del olistostroma Jibacoa. Abajo: Detalle de la Formación Vía Blanca deformada por los deslizamientos sinsedimentarios (sección inferior).

Otros afloramientos del olistostroma se encuentran a 150 m al oeste del entronque de la Vía Blanca con la carretera de Canasí, por la carretera entre la Vía Blanca y Arroyo Bermejo, y por la Avenida Monumental en los alrededores de Guanabo Viejo. En la prolongación del camino de Tumba Cuatro hacia el sur (x 389,85; y 364,61 de la Hoja Jaruco) aflora un corte del olistostroma debajo de la Formación Peñalver. Con estos datos, es posible aceptar su edad como Maastrichtiano Superior.

En la región de San Francisco (x 304 750; y 343 300 de la Hoja Cabañas), al sur de Cabañas, hay excelentes afloramientos del olistostroma. Aquí, entre capas no disturbadas del flysch Los Mangos se intercalan paquetes de 50 a 100 m de espesor, constituidos por un apilamiento de bloques menores de 10 m de diámetro que contienen serpentinitas, gabros, porfiritas, tobas, dioritas, aptitas, calizas y limoareniscas tipo Martín Mesa, y areniscas y conglomerados tipo Vía Blanca.

En sentido general, la Formación Vía Blanca yace en discordancia sobre las secuencias pre Campaniano, de las que contiene abundantes clastos. A su vez es cubierta por la Formación Peñalver del Límite K-Pg. Otras formaciones más jóvenes la cubren con evidente concordancia. Su potencia, medida en los pozos de petróleo, alcanza valores de 500, 800 y hasta 1 200 m, aunque con seguridad estos valores están exagerados y reflejan duplicidad del corte por plegamientos, pues en la superficie se detectan pliegues tumbados y nappes escamados, que complican la sucesión natural de las capas.

Horizontes de conglomerados descritos por (Brönnimann y Rigassi 1963):

Conglomerado Bahía

Al oeste de Guanabacoa, en el área de coordenadas x 365 500; y 367 000, de la Hoja La Habana, aflora este conglomerado. Contiene clastos de calizas, areniscas y limoareniscas grauvacas,



Figura 14. Sección superior del Olistostroma Jibacoa, donde hay enormes olistolitos y bloques de granitoides de arco volcánico.

radiolaritas, peridotitas, gabro serpentizado, porfiritas andesíticas, aglomerado, lavas, entre otros elementos. Algunos de estos contienen fósil del Campaniano. Los clastos presentan diámetros entre 4 y 6 cm, y alcanzan 1 m en casos extremos. La matriz es de composición grauvacca de grano medio a grueso. Asociado al conglomerado se encuentran capas finas de arcillas bentónicas de color rojo carmelitoso y tufitas de color blanco. Yace aparentemente en discordancia sobre la Formación La Trampa y constituye un conglomerado basal local de Vía Blanca.

Conglomerado Vía Túnel

Aflora a unos 2,5 km al este noroeste de Casa Blanca, en el área de coordenadas x365 350; y 369 340 de la Hoja La Habana. Los clastos son en su mayoría fragmentos de rudistas y caliza fragmentaria. Son raros los componentes ígneos. La matriz está compuesta de arcillas carmelitas, arenas grauvacas carmelitas con estratificación gradacional, aleurolita y calizas fragmentarias. La edad del conglomerado es Maastrichtiano Inferior, la misma de algunos clastos.

Conglomerado Casa escuela

Aflora en la Avenida Monumental, en el área de coordenadas x 371,41; y 364,84 de la Hoja Jaruco. Contiene clastos de calizas, grauvacas, margas e ígneos andesíticos. Hay capas donde predominan los clastos de caliza, en tanto que en otras, los de rocas ígneas. La matriz es de areniscas grauvacas y arcillas carmelitosas. Los clastos más jóvenes son del Maastrichtiano, lo mismo que la matriz.

Conglomerado Río Piedras

Se encuentra en la Avenida Monumental, en el área de coordenadas x 374 370; y 359 750 en la Hoja de Jaruco. Incluye clastos de calizas del Cenomaniano-Turoniano, grauvacas, calizas del Campaniano y rocas ígneas en una matriz de arenisca grauvacca. La matriz tiene fauna del Campaniano.

Otros afloramientos de conglomerados se encuentran en la ventana tectónica al sur de Puerto Escondido, donde predominan los del tipo Bahía, ricos en clastos bien rodados de diámetro variable desde pocos centímetros hasta 60 cm, compuestos de rocas ígneas (tobas, gabros, serpentinitas, porfiritas) y sedimentarias (grauvacas y ocasionalmente calizas organógenas del Campaniano-Maastrichtiano). La matriz es de arenisca grauvacca parda oscura, deleznable. Forman capas de 10 a 20 cm. En la región de los alrededores de Madruga afloran conglomerados que contienen clastos de tobas, porfiritas, diabasas y granitoides en una matriz arcillosa o calcárea. Son también frecuentes los conglomerados del tipo Vía Túnel.

Formación Peñalver Brönnimann & Rigassi, 1963

Se reconoce muy bien por su litología muy peculiar, que a menudo sobreyace a la Formación Vía Blanca. Takayama *et al.* (2000) y Tada *et al.* (2003) fecharon esta formación del límite K-Pg y la asociaron a la caída de un meteorito hace 65 millones de años, posibilidad que había sido indicada antes por Pszczółkowski (1986).

Localidad tipo. La localidad tipo de esta formación es un corte en la Avenida Monumental, en la cantera situada en las coordenadas x 374 140; y 362 850, en la Hoja La Habana (Figura 15).

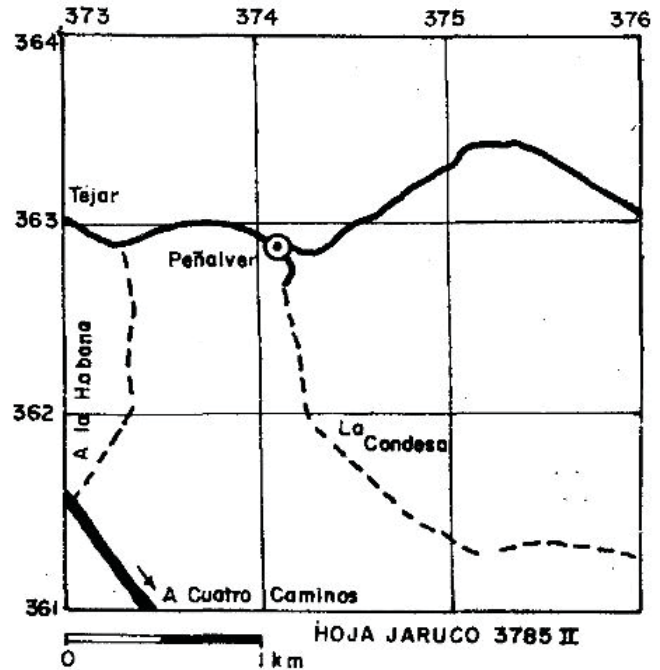


Figura 15. Localidad tipo de la Formación Peñalver.

Descripción

Yace en discordancia erosiva sinsedimentaria sobre la Formación Vía Blanca. Se trata de una megaturbidita clástico-calcárea de gradación singular. La porción basal es de grano grueso (rudítica), masiva, y la porción superior es de grano muy fino (limolítica), algo estratificada. El material clástico en general es biógeno o constituido por fragmentos de calizas y rocas ígneas en menor grado, y varía desde redondeado hasta subangular. El color de la formación es blancuzco cuando está alterada, gris-azulosa cuando está fresca. La porción basal tiene, generalmente, abundantes inclusiones de fragmentos subangulares de arcilla derivadas de la erosión submarina de la Formación Vía Blanca, que llega a componer bloques olistolíticos de varias decenas de metros de extensión. En la base la granulometría varía entre 5 mm y varios centímetros. En el tope encontramos calcilimolita de color blanco. Su espesor es de 20 a 210 m. En algunas áreas falta el techo de la formación, producto de la erosión subsecuente. Para una descripción más detallada consulte los trabajos de Takayama *et al.* (2000) y Goto *et al.* (2008). La Figura 16 muestra detalles de algunos afloramientos de la formación.

En la Figura 17 se pueden observar las variaciones del espesor de las distintas partes de la sección lateralmente, como en Cidra (Matanzas), donde falta la homogenita (mitad inferior de la subunidad A) y la sección inferior es más gruesa.

Tanatocenosis y edad

La Formación Peñalver contiene fósiles redepositados de varios niveles del Cretácico (*Globotruncana stuarti*, *G. lapparenti*, *G. contusa*, *G. arca*, *G. linneiana*, *Pseudotextularia elegans*, *Omphalocyclus macroporus*, *Vaughanina cubensis*, *Asterorbis macei*, *A. cubensis*, *Kathina jamaicensis*) y algunos del final del Cretácico (*Abathomphalus mayaroensis*, *Micula murus*, *Micula*

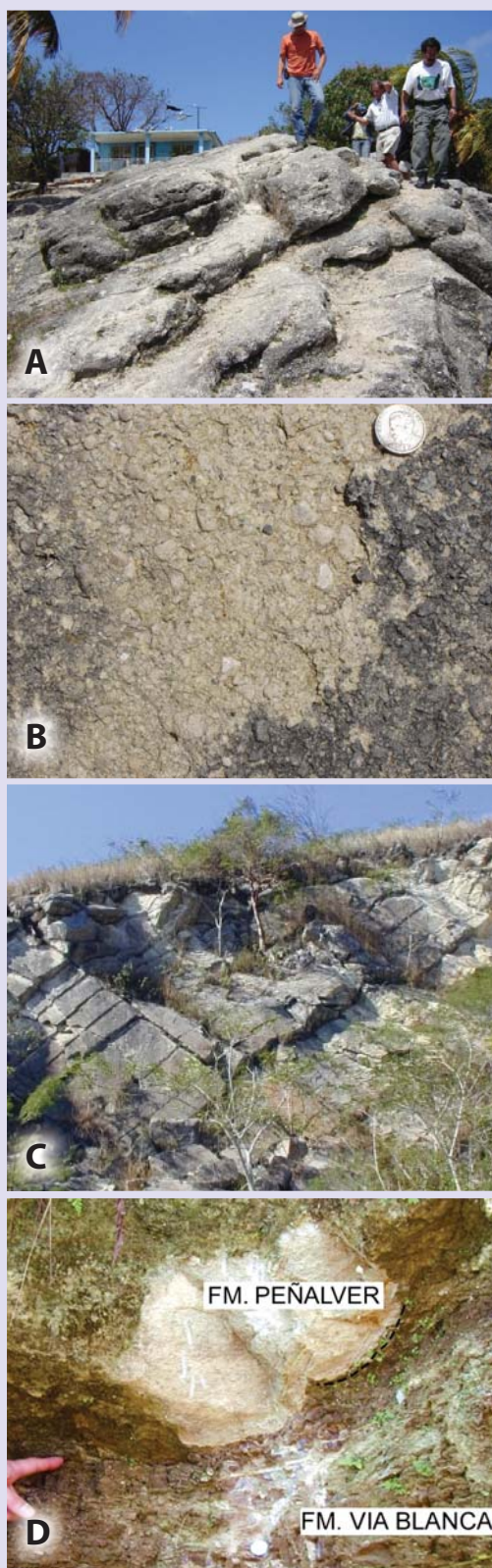


Figura 16. Detalles de la Formación Peñalver. A: Afloramiento de las biocalcuditas de la sección inferior a la entrada de Cabañas. B: Detalle de las biocalcuditas con fragmentos de rudistas. C: Afloramiento de las homogenitas en la cantera justo al este de la localidad tipo en Peñalver, La Habana. D: Contacto erosivo en la base de la localidad tipo.

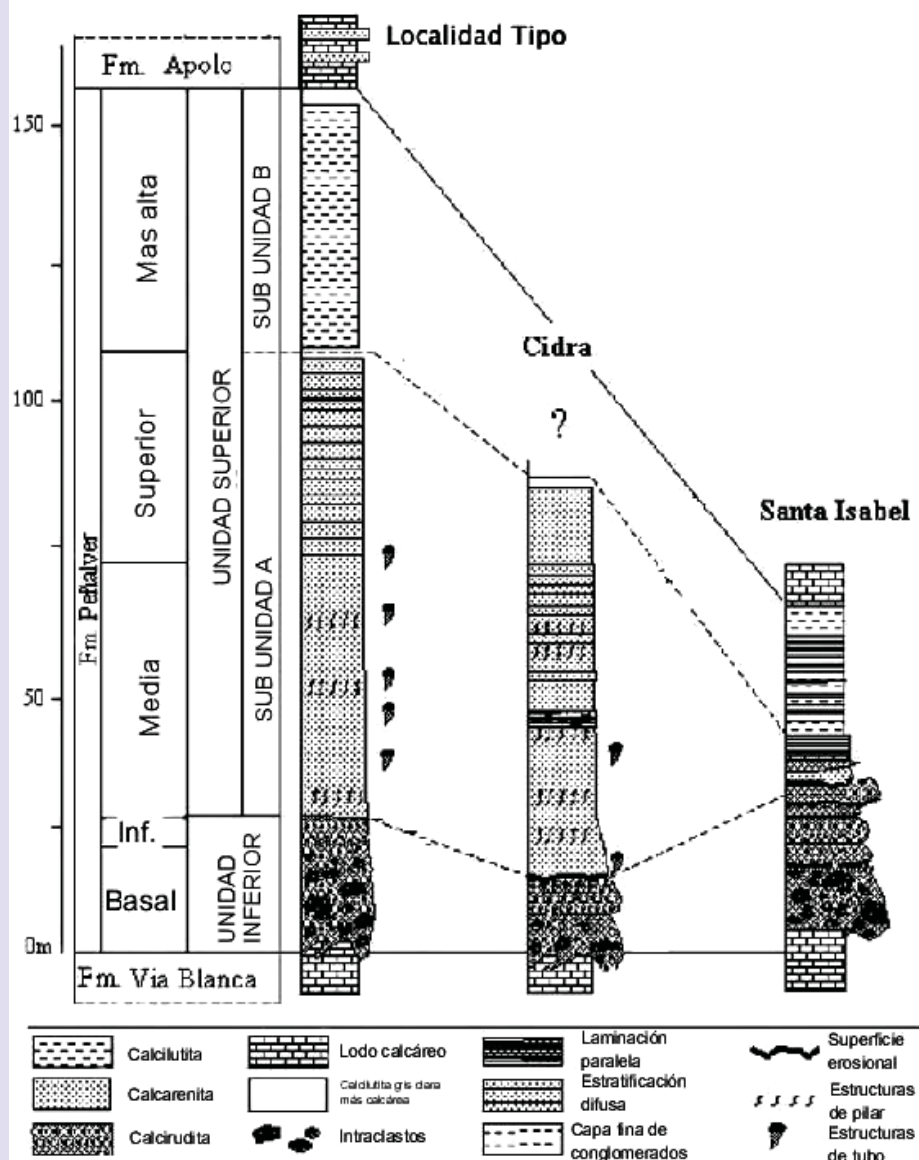


Figura 17. Variabilidad de las secciones propias de la Formación Peñalver en La Habana y Matanzas. Tomado de Goto et al. (2008).

prinsii), ninguno propio del Paleoceno. Los rudistas, todos redepositados, incluyen *Titanosarcolites giganteus*, *Titanosarcolites* sp., *Biradiolites* spp., *Biradiolites mooretownensis*, *B. cancellatus*, *M. nicholasi*, *P. porosa*, *P. sparcilirata*, *Durania*. cf. *D. palmeri*, *T. adhaerens*, *Parastroma sanchezi*, *Radiolites* sp., *Tampsia* sp., *Parastroma* sp. y *Barrettia* sp. (Rojas Consuegra, 2004). Su edad se definió como del límite Cretácico- Paleógeno (Takayama et al., 2000).

Ambiente sedimentario

Brönnimann y Rigassi (1963) consideran correctamente que la Formación Peñalver es una megaturbidita y corresponde con un gran deslizamiento submarino de una masa clástica carbonatada. Posteriormente, Puszczowski (1986), Takayama et al. (2000) y Tada et al. (2003) asociaron su origen a megatsunamis provocados por el impacto de un meteorito con nuestro planeta hace 65 millones de años.

Cuenca Esperanza - Santa Clara

En el territorio de Esperanza a Santa Clara (Ver Figura 1) está presente, bastante bien preservada, la cuenca sedimentaria original, pero en ciertos tramos la erosión la ha reducido hasta afloramientos aislados. Entre sus límites se han descrito las formaciones Isabel y Santa Clara, que aflora limitadamente al norte de Santa Clara (Figura 4). Es notable la existencia de una discordancia entre las rocas del Cretácico-Daniano y las del Paleoceno-Eoceno.

Formación Isabel Truitt y Pardo (citado en Kantchev *et al.*, 1978).

Redefinida por Kantchev *et al.* (1978) y publicada por Pushcharovskiy (1988).

Se desarrolla en Cuba central, desde la provincia de Matanzas hasta Cienfuegos y Sancti Spiritus, con sección tipo en un corte del camino viejo de Fomento a Placetas, en la Loma El Burro, provincia de Sancti Spiritus. La parte baja de la formación aflora en una barranca al NW del pueblo de Fomento, en la localidad La Gloria, al N del terraplén Fomento - Agabama, en las coordenadas x 630 600 y 255 000 (Kantchev *et al.*, 1978).

Descripción

Se compone de una brecha-conglomerado basal, de pocos metros de espesor, que transiciona hacia arriba en calizas biodetríticas, calizas biógenas, calciruditas y calcarenitas, cuyo espesor oscila entre 100 y 150 m. Yace sobre las vulcanitas cretácicas y se cubre por las formaciones del Paleoceno. De hecho, es un equivalente parcial isócrono de la Formación Jimaguayú de Camagüey, pues incluye las clastitas de la base que fueron distinguidas en la provincia como Formación Duran.

Tanatocenosis y edad

Las calizas contienen foraminíferos (*Omphalocyclus macroporus*, *Orbitoides apiculata*, *Sulcoperculina diazi*, *Vaughanina cubensis*) y los rudistas (*Sauvagesia* sp., *Antillocaprina annulata*, *Titanosarcolites giganteus*, *Bournonia planasi*, *Macgillavryia nicholasi*, según Rojas Consuegra, 2004). Esta asociación señala una edad Maastrichtiano superior.

Ambiente de sedimentación

Se depositó en condiciones de plataforma carbonatada marina de aguas poco profundas.

Formación Santa Clara Truitt (citado en Kantchev *et al.*, 1978). Redescrita por Kantchev *et al.*, 1978).

Localidad tipo

Aflora en Loma Capiro, al norte de Santa Clara, donde existen dos canteras.

Descripción

La formación aflora como una faja estrecha al norte de Santa Clara, pero probablemente se extiende al oeste bajo el subsuelo. Se compone de calizas arcillosas y margas bien estratificadas, blancas, grises y crema, con estratos finos de limolitas, donde se intercalan capas de tobas, tufitas y calcarenitas a calciruditas. Las margas son de color blanco y crema amarillento, microgranulares. Algunas contienen cierta cantidad de arena muy fina. Las calizas son microgranulares, arcillosas, a veces detríticas y fragmentarias. Hay capas de calizas calcareníticas hasta brechas calcáreas (con fragmentos de calizas maastrichtianas, foraminíferos grandes y rocas volcánicas), que alcanzan desde pocos centímetros hasta 5 y 10 metros de espesor. Las tufitas calcáreas contienen vidrio volcánico más granos de plagioclasa y escamas de biotita probablemente redepositadas. Las capas de rocas tufíticas son de color gris claro, blanco y verde claro, están poco cementadas, constituidas por una masa microgranular de zeolitas y minerales arcillosos (producto de la alteración del vidrio volcánico).

Hacia la parte media a alta, la formación presenta una turbidita intercalada, compuesta de conglomerados y masas deslizadas de rocas conglomerático-arenosas del límite KT. La formación puede alcanzar un espesor de 250 m. Yace discordantemente sobre las formaciones cretácicas y está cubierta por la Formación Ochoa del Paleoceno.

La descripción del corte, según Alegret *et al.* (2005), es como sigue (Figura 19):



Figura 18. Aspectos de la sección inferior maastrichtiana de la Formación Santa Clara en Loma Capiro.

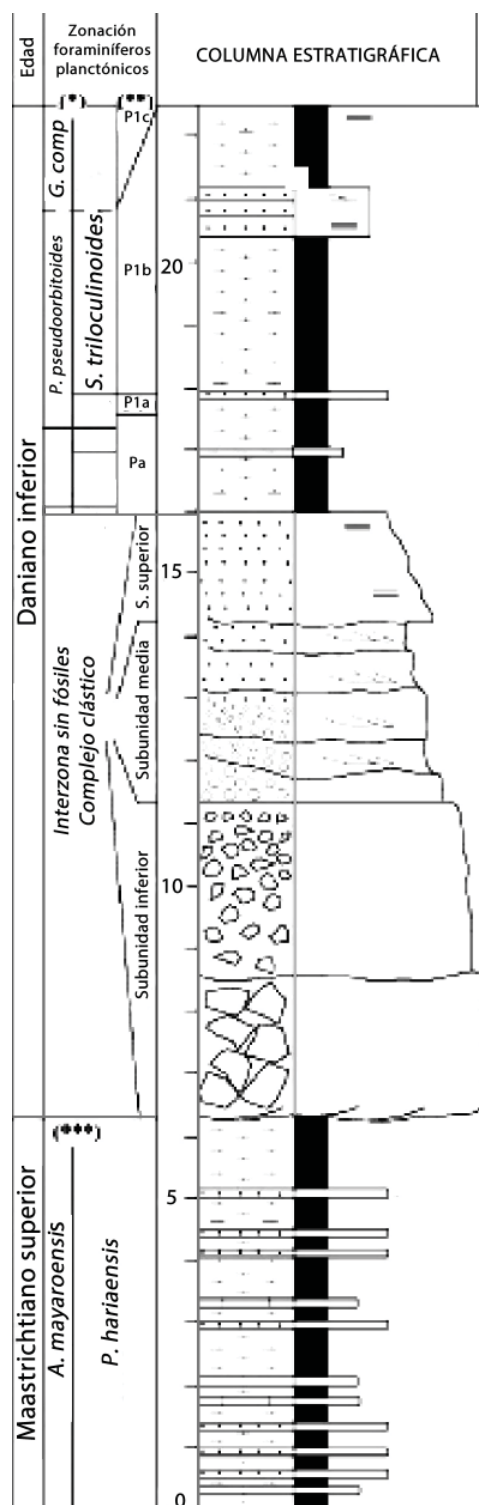


Figura 19. Sección de la Formación Santa Clara. Tomada de Alegret et al. (2005).

Los sedimentos debajo del complejo clástico (KTB) consisten de cuerpos tabulares con espesor hasta de 1 metro, compuestos por margas masivas grises ricas en foraminíferos con abundantes calizas intercaladas, y niveles de areniscas de grano fino a medio color ocre. Las calizas tienen textura de lodolita y se colocan en niveles tabulares de 10 a 30 cm con laminación paralela. Los cuerpos tabulares de 2 a 15 cm de areniscas presentan una evolución grano descendiente hacia arriba y laminación paralela (Fig. 18).

Los 9.6 metros del complejo clástico (KTB) consiste de una secuencia grano descendente hacia arriba donde se identifican tres subunidades (Fig. 19).

- (1) La subunidad inferior corresponde a 5 metros de una brecha grano descendente hacia arriba con una matriz arcilloso-lutítica y clastos angulosos a subredondeados con diámetro de 2 a 40 cm, entre los que dominan rocas ígneas. La fábrica varía entre grano soportada en la base hasta matriz soportada hacia la parte superior de este cuerpo. Litologías típicas de un complejo ofiolítico forman el 64% de la composición litoclástica de la brecha basal mientras que los sedimentos vulcanoclásticos forman el 30% del conjunto. Se identificaron deslizamientos que afectan localmente la parte basal de la brecha y las calizas y margas del Cretácico infrayacentes.
- (2) Más arriba en la sección se identificó un microconglomerado y arenisca de grano grueso de 3 metros de espesor. Contiene clastos de volcánicos y carbonatos de hasta 1 cm de longitud y muestra marcas internas de erosión en paquetes de 20-30 cm con laminación paralela y cruzada.
- (3) La unidad más alta consiste de una secuencia con espesor de 1.8 metro a gruesos de areniscas de grano fino, materiales propios del impacto como cuarzo impactado, cóndrulos terrestres y abundante lapilli accrecionario y microesferas de vidrio calcificado (microtectitas alteradas). Los granos de cuarzo impactado son escasos, aunque se encontraron granos con estructura que se asemeja un set de deformaciones planares. El lapilli accrecionario son esferas formadas por la acresión de fragmentos minerales y líticos y consisten de una corteza fina exterior y un núcleo de grano grueso. Los cóndrulos tienen formas esféricas, de gotas y de campana. Las esferas de vidrio están alteradas a calcita, son esféricas y normalmente vesiculares.

El complejo clástico está cubierto por una secuencia daniana de cuerpos tabulares de hasta 2 metros de espesor de limolitas masivas a ocasionalmente laminares de color ocre a gris, intercaladas con niveles de areniscas con 0,25 a 0,8 m de espesor. Las areniscas son de grano fino con laminación paralela y cruzada de bajo grado.

Tanatocenosis y edad

Kantchev et al. (1978) reportan foraminíferos bentónicos (*Orbitoides tissoti*, *O. apiculata*, *O. apiculata browni*, *Asterorbis rooki*, *Lepidorbitoides* spp., *Omphalocyclus* spp.) y planctónicos de la parte alta del Maastrichtiano, que incluyen a *Abathomphalus mayaroensis*. De acuerdo con Alegret et al. (2005) la unidad

abarca el intervalo del Maastrichtiano superior (subzona *Pseudoguembelina hariaensis*) al Daniano (zonas *Guembelitra cretacea* a *Globanomalina compressa*).

Cuenca Cienfuegos

En el territorio que rodea la bahía de Cienfuegos (ver Figura 1) se encuentra una depresión estructural bastante bien conservada con un corte estratigráfico del Cretácico Superior que incluye la Formación Isabel y su miembro Cantabria. Este territorio afloran rocas de mar poco profundo, con finas capas de clastitas en su base, que transicionan hacia arriba en una plataforma carbonatada del Maastrichtiano. Kantchev *et al.* (1978) definieron varias formaciones para las distintas áreas de afloramientos de la sección del Maastrichtiano, pero las diferencias entre estas secciones son sutiles y no merecen ser elevadas al nivel formacional.

Formación Isabel Truitt y Pardo (citado en Kantchev *et al.*, 1978).

Redefinida por Kantchev *et al.* (1978), publicada por Pushcharovskiy (1988). Ver descripción anterior.

En esta cuenca se desarrolla también el siguiente miembro.

Miembro Cantabria Popov en Kantchev *et al.*, 1978.

Publicado por Pushcharovskiy (1988).

Aflora en la mitad meridional del territorio de Cienfuegos, tanto en elevaciones (lomas de Cantabria), como en las zonas llanas hacia el oeste. Se distingue de la Formación Isabel s.s. por el predominio del color rojo en las calizas.

Área tipo

Lomas de Cantabria, a unos 15 km al E de la ciudad de Cienfuegos, provincia de Cienfuegos. La sección tipo es un corte a unos 5 km al NE del poblado de Los Guaos, a través de las Lomas de Cantabria, provincia de Cienfuegos. Hojas Cienfuegos 4182 III y Palmira, 4182 IV, desde x 574 100 y 260 850 hasta x 572 950 y 262 200.

Descripción

Las calizas son de color rojo a rojo ladrillo, biógenas, rudistitas, foraminiferitas, a veces nodulares, biógeno-detriticas, con abundantes organismos marinos de ambiente de aguas someras, muchos en posición de vida. Se intercalan con capas de calizas arcillosas. En general los estratos son masivos o muy gruesos, con espesor total que alcanza los 120 m. En algunas localidades yace concordante sobre la sección inferior de la Formación Vaquería (Iturralde – Vinent, 2011) y discordante sobre las formaciones del arco volcánico. Está cubierta por formaciones del Eoceno y más jóvenes.

Tanatocenosis y edad

Contiene abundantes foraminíferos (*Abathomphalus mayaroensis*, *Contusotruncana contusa*, *Chubbina cardenasensis*, *Lepidorbitoides macgillavryi*, *Orbitoides apiculata*, *O. villasensis*, *Sulcoperculina vermunti*, *Vaughanina cubensis*), rudistas

(*Titanosarcolites giganteus*, *Macgillavryia nicholasi*, *Antillocaprina stellata*, según Rojas Consuegra, 2004), equinodermos, corales y otros restos. Esta representa una asociación del Maastrichtiano Superior.

Ambiente de sedimentación

Constituyó una plataforma carbonatada típica.

Cuencas Cabaiguán y Central

Las rocas de la depresión estructural de Cabaiguán se extienden en el subsuelo hasta la Cuenca Central (ver Figura 1; Figura 20), de manera que constituyen un mismo conjunto, aunque tienen actualmente una orientación distinta producto de las deformaciones del final del Eoceno, que en la Cuenca Cabaiguán se asocian a los pliegues y fallas inversas de rumbo NW-SE y en la Cuenca Central al sistema de la falla La Trocha de rumbo NE- SW (Cruz – Orosa y Blanco – Moreno, 2007; Cruz - Orosa *et al.*, 2012 a, b). En este territorio se reconocen, de oeste a este, la Formación Isabel de aguas poco profundas y la Formación Catalina, de aguas más profundas.

Formación Catalina Sánchez Arango, 1977; Millán, 1986

Esta formación fue reconocida en el pozo Catalina 5, donde representa los ambientes de cuenca marina abierta, con profundidad variada, que se hace más somera hacia arriba, al final del Maastrichtiano. La descripción del corte es la siguiente:

- 2 144 a 2 842 m, con un espesor de 700 m. Se compone de areniscas muy finas (lutitas) carbonatadas gris claro a oscuro, con intercalaciones de arenisca calcarenítica. Contiene foraminíferos (*Heterohelicidae*, *Lagemidae*, *Globotruncana* spp., *Nodosaria* sp., *Ammodiscus* sp., *Dorothia* sp.) y ostrácodos (*Argilloecia subcylindrica*, *Cytherella* sp., *Cypridea* sp.) del Campaniano tardío.
- 1 719 a 2 143 m, con un espesor de 423 m. Se compone de areniscas muy finas, carbonatadas grises, que desde 1 755 m hasta 1 947 m presentan intercalaciones de caliza amarillenta dura. Contiene foraminíferos (*Globotruncana* spp., *Sulcoperculina* spp.) y ostrácodos (*Argilloecia harrisiana*, *Argilloecia subcylindrica*, *Cytherella dozyi*, *Cythereis* aff. *semiplicata*) del Maastrichtiano.

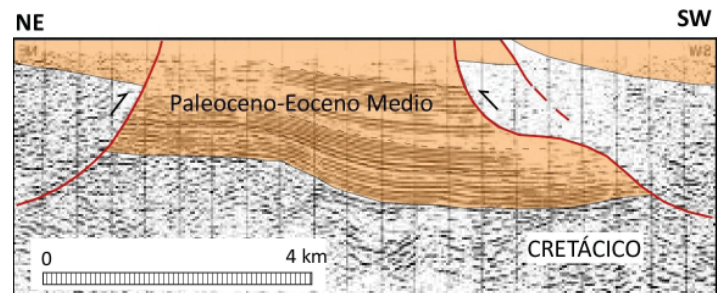


Figura 20. Perfil transversal de la Cuenca de Cabaiguán, que ilustra la posición de los depósitos del primer ciclo (Formación Isabel), en relación con los del Paleógeno. Adaptados de Pushcharovskiy (1989) y Cruz - Orosa *et al.* (2012 a, b).

Sector Ciego – Camagüey - Las Tunas

Los afloramientos de los depósitos del Cretácico Superior al este de la falla La Trocha están conservados como relictos de erosión sobre las rocas del Arco Volcánico Cretácico y debajo de las capas del Eoceno y más jóvenes. Las deformaciones y la inversión del relieve han desmontado la estructura de cuencas. En general, las rocas de este intervalo presentan deformaciones muy leves, representadas por pliegues amplios, disconformes con el rumbo de las depresiones estructurales donde están contenidos los depósitos del Paleógeno (Pushcharovskiy, 1989) (ver Figura 4).

En este territorio se reconocen las formaciones Durán y Jimaguayú, del Campaniano y Maastrichtiano, sin embargo, no se han detectado rocas del Paleoceno, cuyos fósiles aparecen extensamente redepositados en el Eoceno (Iturralde-Vinent, Tchouneuv y Cabrera 1981). Esto sugiere una discontinuidad erosiva entre las cuencas del finicretácico y aquellas del Paleógeno temprano, lo cual es evidente en el mapa de la Figura 4.

Formación Durán Iturralde - Vinent en Iturralde – Vinent *et al.*, 1981

Fue descrita y cartografiada en el área que abarca desde Ciego de Ávila hasta Las Tunas (ver Figura 1). De este mismo territorio se definió la Formación Yáquimo (Ianev *et al.* en Iturralde – Vinent *et al.*, 1981), la cual está contenida en las variaciones litológicas propias de la Formación Durán, de modo que se considera un miembro de ésta. La sección tipo de Durán es un corte en la cantera abandonada en el lado Sur de la carretera Camagüey-Vertientes, provincia de Camagüey, en las coordenadas x 369 890 y 291 250, pertenecientes a la Hoja Vertientes 4579 I (Figura 21).

Descripción

La sección inferior está bien representada en la localidad tipo, donde está compuesta, de abajo hacia arriba, de la siguiente manera:

- Vulcanitas cretácicas.
- Areniscas grauvacas de grano fino a medio, intercaladas con conglomerados polimícticos, con gradación irregular entre ellas, cuyos clastos redondeados y subredondeados son de origen aluvio - marino. Espesor 11m. Carece de fósiles.
- Areniscas y gravelitas polimícticas, de origen aluvio - marino, con limitado cemento calcáreo con capas que no están bien definidas. Algunas areniscas son ricas en cuarzo y minerales máficos, probablemente derivadas de los granitoides. Espesor 10 m. Carece de fósiles.
- Hacia arriba, en localidades cercanas, transicionan en la sección turbidítica de grauvacas del Miembro Yáquimo.

Miembro Yáquimo Ianev en Iturralde – Vinent *et al.*, 1981

Es una sección bien estratificada de turbiditas arenoarcillosas, en capas de pocos centímetros de espesor, compuesta por margas arenosas y limolitas arenosas y arcillosas, areniscas calcáreas y polimícticas, a menudo vulcanomícticas, con intercalaciones subordinadas de arcillas, argilitas y conglomerados. Las turbiditas contienen microfósiles planctónicos y algunos bentónicos acarreados desde ambientes más someros. La secuencia presenta transiciones lateral con las calizas con rudistas de la Formación Jimaguayú,

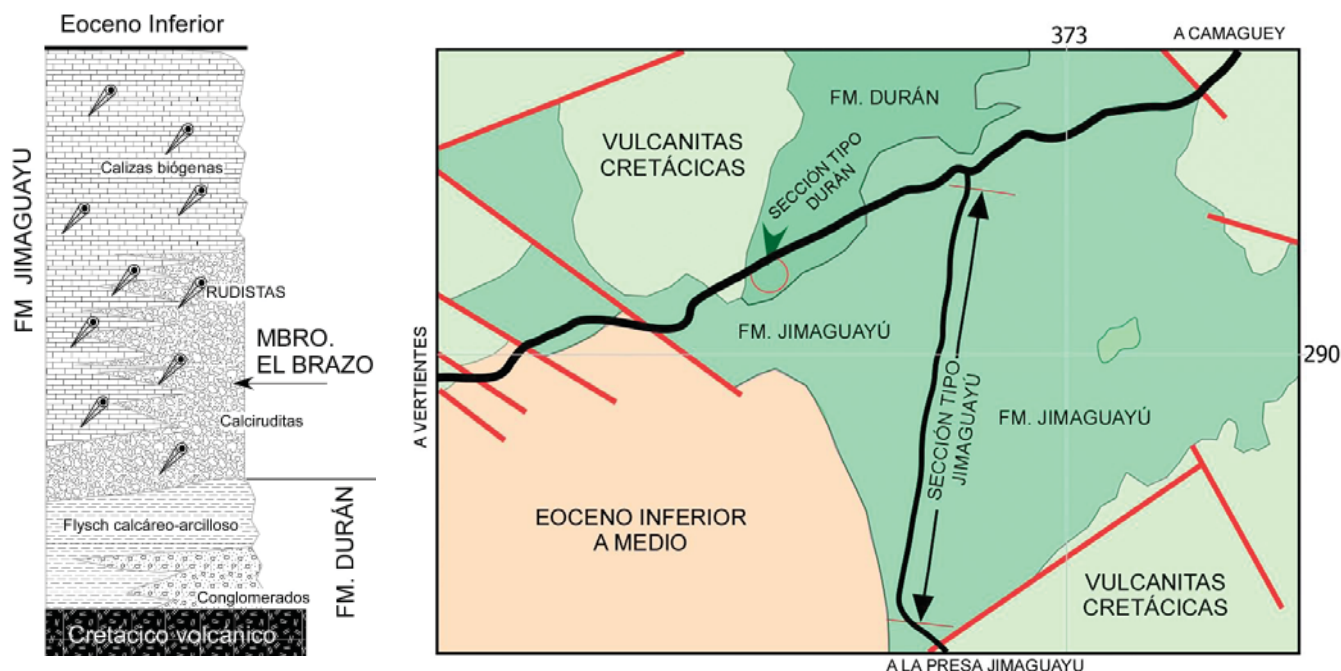


Figura 21. Sección tipo de las formaciones Durán y Jimaguayú al sureste de Vertientes y su columna estratigráfica.

de manera que son parcialmente isócronas, pero hacia arriba transiciona en dicha formación del Maastrichtiano (Jimaguayú) o se cubre directamente por secuencias del Eoceno (formaciones Vertientes y Florida). Su espesor alcanza los 600 m. Descripciones detalladas se encuentran en Iturralde – Vinent *et al.* (1981).

Tanatocenosis y edad

Las rocas del Miembro Yáquimo son fosilíferas y contienen foraminíferos (*Globotruncana arca*, *G. rosseta*, *G. linneana tricarinata*, *G. stuarti*, *G. conica*, *Radotruncana calcarata*, *Contusotruncana fornicata*, *Sulcoperculina dickersoni*, *Vaughanina cubensis*) del Cretácico Superior (Campaniano tardío a Maastrichtiano inferior).

Ambiente sedimentario

Estas rocas se acumularon sobre un paleopaisaje irregular, donde había ambientes emergidos hasta de aguas poco profundas que colindaban con depresiones marinas profundas. La abundancia de material clástico derivado de las rocas volcánicas y plutónicas infrayacentes demuestra que la fuente de aportes eran las rocas del arco volcánico extinto del Cretácico.

Formación Jimaguayú Iturralde- Vinent en Iturralde – Vinent *et al.*, 1981

Está constituida por rocas calcáreas presentes en el área que abarca desde Ciego de Ávila hasta Las Tunas (ver Figura 1). Conforman una serie de elevaciones (Sierra de Najasa, Sierra de Chorrillo) y aflora en zonas llanas, en la misma área de desarrollo de las formaciones del arco volcánico del Cretácico. Su sección tipo aflora a los lados del camino, entre el entronque de La Magdalena y el cruce de la presa Jimaguayú, al sur de Vertientes, provincia de Camagüey (Hoja Vertientes 4579 I; coordenadas iniciales x 373 300 y 292 800, coordenadas finales x 372 500 y 285 350) (ver Figura 24). En la formación se ha distinguido el miembro de brechas calcáreas El Brazo.

Descripción

Las calizas de Jimaguayú son biógenas, biógeno – detríticas, detríticas y micríticas, con intercalaciones de calciruditas, margas y en menor grado, areniscas polimícticas y limolitas, que constituyen la transición lateral con la Formación Durán. Las calizas, que forman el volumen principal de las secciones, son masivas o de estratos gruesos poco definidos, con abundantes macrofósiles, entre los cuales predominan los rudistas. El espesor del corte varía entre 200 y 300 m. Rojas Consuegra (2004) ha descrito en detalle los ambientes sedimentarios de esta formación en sus afloramientos de Ciego de Ávila. En dicha localidad las rocas son un poco más margosas, lo cual es una variabilidad común de la formación. Descripciones detalladas se encuentran en Iturralde-Vinent *et al.* (1981).

Otro corte de la facies de calizas y margas con rudistas, propia de la formación, fue descrito en la cantera Cayojo, en la provincia de Las Tunas.

Tanatocenosis y edad

Los microfósiles incluyen foraminíferos (*Katrina jaimaicensis*, *Meandropsina rutteri*, *Orbitoides apiculata*, *Rugoglobigerina*

scotti, *R. macrocephala*, *Sulcoperculina diazi*, *S. dickersoni*, *S. globosa*, *Vaughanina cubensis*, *V. globosa*); rudistas (*Biradiolites lombricalis*, *Titanosarcolites giganteus*, *Macgillivrayia nicholasi*, *Parastroma quitarti*, *Praebarrettia* sp., *Mitrocprina* sp., *Apricardia* sp., *Bournonia* cf. *B. excavata*). Asimismo aparecen bivalvos (*Chama cubana*, *Arctostrea aguilerae*) y gasterópodos (*Nerinea* sp., Turritellidae indet.), corales y raros equinodermos (*Goniopygus supremus*). Su edad se puede definir del Cretácico Superior (Maastrichtiano Superior), según Rojas Consuegra *et al.* (1995) y Rojas Consuegra (2004).

Ambiente sedimentario

Estas calizas son típicas de una plataforma carbonatada, depositadas sobre las partes altas del relieve post Campaniano medio, producto del levantamiento y erosión profunda del arco volcánico.

Miembro El Brazo Iturralde- Vinent en Iturralde – Vinent *et al.*, 1981.

Estas rocas afloran en la depresión Vertientes (ver Figura 1 y 4), en las provincias de Camagüey y Ciego de Ávila. Su sección tipo está en el cruce situado a 1,5 km al NW del poblado de El Brazo, provincia de Camagüey, Hoja Aguilar 4579 II, en las coordenadas x 374 200 y 268 500.

Descripción

Son secciones de estratos gruesos mal definidos, compuestos por calciruditas, biocalciruditas, calizas biotriticas y en menor grado biógenas, que constituyen una facies lateral de las calizas biógenas típicas de Jimaguayú. Descripciones detalladas se encuentran en Iturralde – Vinent *et al.* (1981).

Tanatocenosis y edad

Se han reportado foraminíferos (*Orbitoides apiculata*, *O. media*, *Pseudorbitoides* cf. *P. rutteri*, *Sulcoperculina globosa*, *Vaughanina barkeri*, *V. cubensis*) y rudistas fragmentarios, del Maastrichtiano Superior.

Faja Deformada Holguín

Esta es una faja muy deformada donde la estructura de los depocentros ha sido completamente desmontada. Entre sus límites (ver Figuras 1 y 2) se encuentran afloramientos alargados del Cretácico Superior, representados por las formaciones La Jíquima y Tinajita. La secuencia es semejante a la mayoría de las cuencas finicretácicas cubanas, que comienzan con rocas clásticas y termina en carbonatos de plataforma.

Formación La Jíquima Nagy en Nagy *et al.*, 1983

Aflora en distintas localidades del área de Holguín. Su sección tipo está al N del caserío de La Jíquima (Hoja Buenaventura, 4878 I, coordenadas x 530 200 y 253 750).

Descripción

La formación están constituida por areniscas vulcanomícticas, bien estratificadas, de grano fino a medio, con intercalaciones de limolitas y argilitas, a veces carbonatadas, en capas de 2 a 20 cm, con una gradación granulométrica propia de las turbiditas.

Su espesor se calcula en unos 300 m. Yace discordante sobre las rocas de arco volcánico cretácico y está cubierta discordantemente por las formaciones del Paleógeno, aunque usualmente sus relaciones están oscurecidas por las intensas deformaciones y el intemperismo.

Tanatocenosis y edad

Según Nagy *et al.* (1983), contiene foraminíferos (*Globotruncanita stuarti*, *Gyroidina* sp., *Sulcoperculina* sp.), nannoplancton (*Arkhangelskiella cymbiformis*, *Broinsonia parca*, *Ceratholithoides aculus*, *Cuadrum gothicum*, *Eiffelithus eximius*, *Micula decussata*, *Tethralithus trifidus*), así como restos de plantas terrestres. Su edad corresponde al Cretácico Superior (Campaniano tardío y Maastrichtiano).

Ambiente de sedimentación

Se depositó en aguas de mediana profundidad, en un medio reductor que posibilitó la conservación de restos de plantas carbonizadas.

Formación Tinajita Kozary y Brönnimann, 1955 (citado en Nagy *et al.*, 1983)

Aflora en distintas localidades del territorio holguinero y fue definida formalmente como miembro de la Formación Iberia por Nagy *et al.* (1983). Sin embargo, debe ser elevada a categoría de formación, pues sus relaciones con las vulcanitas cretácicas de la Formación Iberia son tectónicas. Su localidad tipo es el Cerro Tinajita, 12 km al ESE de la ciudad de Gibara (Hoja Gibara, coordenadas x 263 000 y 567 000).

Descripción

Se compone de calizas masivas o de estratos gruesos, biodetríticas y oolíticas, de colores blanco, gris y crema claro. Entre sus principales afloramientos se encuentran el cerro Tinajitas y el cerro Yabazón. Alcanza varias decenas de metros de espesor. Aparentemente yace sobre la Formación La Jiquima.

Tanatocenosis y edad

Según Nagy *et al.* (1983), contiene foraminíferos (*Orbitoides tissoti*, *Pseudorbitoides israeli*, *Sulcorbitoides pardoi*, *Actinorbitoides browni*, *Sulcoperculina globosa*, *S. dickersoni*, *S. diazi*, *Torreina torrei*, *Vaughanina cubensis*, *V. barkeri*, *Globotruncana linneiana*, *G. calciformis*, *G. lapparenti*, *Globotruncanita conica*, *Contusotruncana fornicata*, *C. contusa*) y el alga *Solenopora piai* del Maastrichtiano, posiblemente con redepósito del Campaniano. Rojas Consuegra (2004) identificó una asociación de rudistas del Maastrichtiano Superior (*Titanosarcolites giganteus*, *Macguillavryia nicholasi*, *Praebarretia sparcilirata*, *?Mitrocaprina* sp., *?Antillocaprina* sp., *Biradiolites* spp.).

Sector Nipe – Cristal – Baracoa

En este sector afloran las formaciones Yaguaneque, Mícara, La Picota y Babiney, en lo que fuera una cuenca frontal, actualmente desmembrada, que se desarrolló durante el proceso de emplazamiento de mantos tectónicos subhorizontales, constituidos por rocas máfico-ultramáficas y metavulcanitas

cretácicas. Este proceso fue descrito originalmente por Cobiella – Reguera (1974) y posteriormente estudiado por Iturralde-Vinent (1977) e Iturralde-Vinent *et al.* (2006). La Figura 3 muestra la posición geológica de las formaciones Mícara y La Picota, que a menudo afloran en los valles, bajo los cuerpos alóctonos subhorizontales de rocas máfico-ultramáficas, pero que de hecho se encuentran imbricadas con estos mantos (Figura 22).

Formación Yaguaneque Nagy *et al.* 1983. Redescrita por Iturralde – Vinent, 2006.

Se desarrolla en forma de parches aislados, como residuos de la erosión, en las provincias de Holguín y Guantánamo, en las elevaciones de Mayarí – Baracoa y en Sierra del Purial, donde Cobiella – Reguera *et al.* (1977) le denominaron Formación Cañas, que es un sinónimo tardío. La sección tipo es un corte en una pequeña loma aproximadamente 1 km al NE del caserío de Yaguaneque, provincia de Holguín (Hoja Yaguaneque, 5178 II, coordenadas x 685 100 y 223 800).

Descripción

Está compuesta de calizas masivas biógenas, con foraminíferos y moluscos, de color blanco, gris claro, crema grisácea con tonalidades rosadas. Como regla están muy recrystalizadas e intensamente fracturadas y forman bloques dispersos en el terreno, a veces en aparente contacto tectónico con las rocas del Cretácico (Iturralde – Vinent, 2011). Yace como bloques remanentes de la erosión sobre la Formación Santo Domingo y las metamorfitas de la Sierra del Purial, y aparece como bloques redepositados en las formaciones La Picota y Mícara del Maastrichtiano superior al Daniano temprano. Su espesor se desconoce, pero es mayor de 50 m. (Figura 22).

Tanatocenosis y edad

Según Nagy *et al.* (1983), en la localidad tipo contiene foraminíferos bentónicos (*Omphalocyclus* sp., *Pseudotextularia* sp., *Rugoglobigerina* sp., *Orbitoides* sp., *Pseudorbitoides israeli*, *Sulcoperculina* cf. *S. globosa*, *Vaughanina* sp.), fragmentos de rudistas, radiolarios y foraminíferos planctónicos (*Contusotruncana contusa*, C. cf. *C. fornicata*, *Globigerinelloides* sp., *Globotruncana linneiana*, *Globotruncanita stuarti*). Esta asociación y su posición estratigráfica sugieren una edad del Cretácico Superior (Maastrichtiano Inferior).

Formación La Picota Lewis y Straczek, 1955

Se desarrolla en las provincias de Holguín, Santiago de Cuba y Guantánamo, y lateralmente interdigita con la Formación Mícara (ver Figura 22). Su sección tipo es un corte en las Alturas de La Picota, Sierra de Cristal, provincia de Santiago de Cuba (Hoja Julio A. Mella, 5077 III, coordenadas x 607 500 y 189 900).

Iturralde-Vinent (1977) presenta un análisis de la sinonimia y la evolución del uso de esta unidad, e Iturralde-Vinent *et al.* (2006) definen su edad. Al respecto, es necesario destacar la opinión de Knipper y Cabrera (1972, 1974), quienes propusieron restringir el nombre de La Picota para los elementos sedimentarios del olistostroma, y separar de este las brechas de serpentinita, de supuesto origen tectónico. En realidad, las rocas serpentiniticas fracturadas son olistolitos y olistoplasas, que forman parte de los elementos componentes del olistostroma.

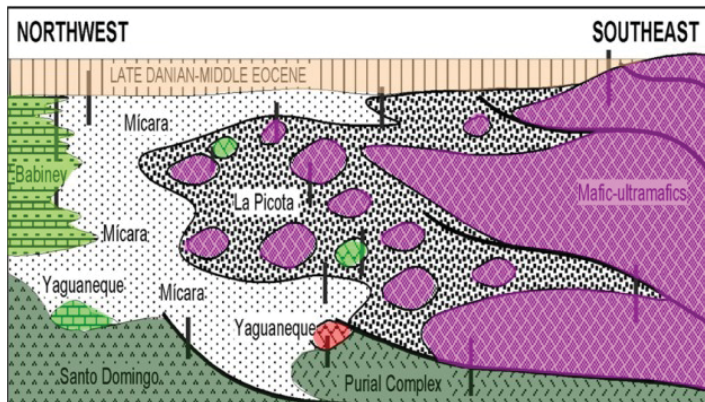


Figura 22. Modelo tectono-sedimentario de la paleocuenca Mícará, que refleja las complejas relaciones entre los componentes autóctonos y alóctonos de la misma. Las barras negras verticales reflejan relaciones observadas en el campo. Adaptado de Iturralde-Vinent et al. (2006).

Descripción

Se ha caracterizado como un olistostroma compuesto por conglomerados polimícticos y conglobrechas, con intercalaciones de areniscas polimícticas y argilitas grauvascas (Figura 23). El material clástico, desde mal seleccionado hasta el caótico, incluye cantos rodados, bloques, olistolitos y olistoplasas. El tamaño de estos elementos detríticos varía desde algunos centímetros hasta cientos de metros. Los menores son derivados de rocas del arco volcánico del Cretácico y máfico – ultramáficas. Los olistolitos y olistoplasas pueden estar constituidos por secciones desmembradas de la Formación Mícará y las olistoplasas son rocas máfico-ultramáficas y metamórficas. Las secciones olistostrómicas típicas tienen matriz arenoarcillosa de composición grauvasca, y se intercala con paquetes de varios metros de espesor compuestos por areniscas de grano grueso a fino, gradacionales, de composición serpentinitica, bien estratificadas (Figuras 23 y 24).

El espesor total de la unidad es difícil de determinar, pero de conjunto sobrepasa los 800 metros, si se mide entre el



Figura 23. Formación La Picota compuesta por brechas serpentiniticas (izq) y olistoplasas de serpentinitas y gabros en matriz muy deformada (der). Camino hacia La Alcarraza al noreste de Calabazas.

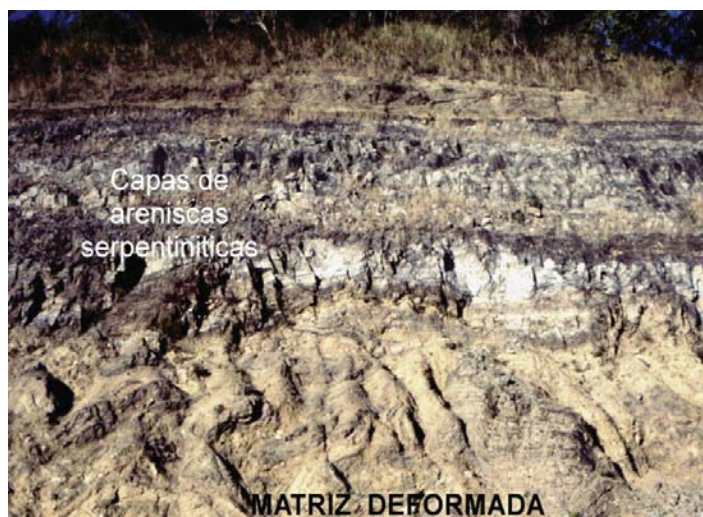


Figura 24. Formación Mícará, con grauvascas y areniscas serpentiniticas, poco inclinadas, que yacen sobre una masa extremadamente deformada que transiciona en el olistostroma La Picota. Alto de La Caoba.

contacto con el subyacente y el techo de los olistoplasas. Estos olistostromas interdigitan con la Formación Mícara, y sobreyacen discordante a la Formación Santo Domingo y las metamorfitas de Sierra del Purial. Están cubiertas concordantemente por las formaciones Gran Tierra y Sabaneta, del Daniano.

Tanatocenosis y edad

La mayor parte de los fósiles son redepositados, pues en las condiciones de sedimentación de estos olistostromas es muy poco probable que se preserven organismos propios de ese ambiente turbulento de sedimentación. Eventualmente aparecen restos fósiles y calizas con rudistas derivados de la Formación Yaguaneque. Entre estos fósiles se incluyen *Sulcoperculina globosa*, *Vaughanina cubensis*, *Titanosarcolites giganteus*, entre otros.

Su edad fue establecida del Maastrichtiano al Daniano basal, prácticamente isócrona con la Formación Mícara, sobre la base de sus relaciones estratigráficas (Iturralde-Vinent *et al.*, 2006).

Formación Mícara Cobiella, 1974

Aflora muy bien entre Mayarí y Baracoa, provincias de Granma, Holguín y Santiago de Cuba, en los valles del macizo montañoso, muy relacionada con el olistostroma La Picota. Su sección tipo se encuentra en el Valle de Mícara, por el camino de Mayarí Arriba a Sabanilla, provincia Santiago de Cuba (Hoja Mayarí Arriba 5077 II). Buenos cortes aparecen en la carretera de Nicaro a Moa, y desde Sagua de Tánamo hasta Calabazas y la Alcarraza (ver Figura 25). Iturralde-Vinent (1976) hace un recuento del uso de esta unidad.

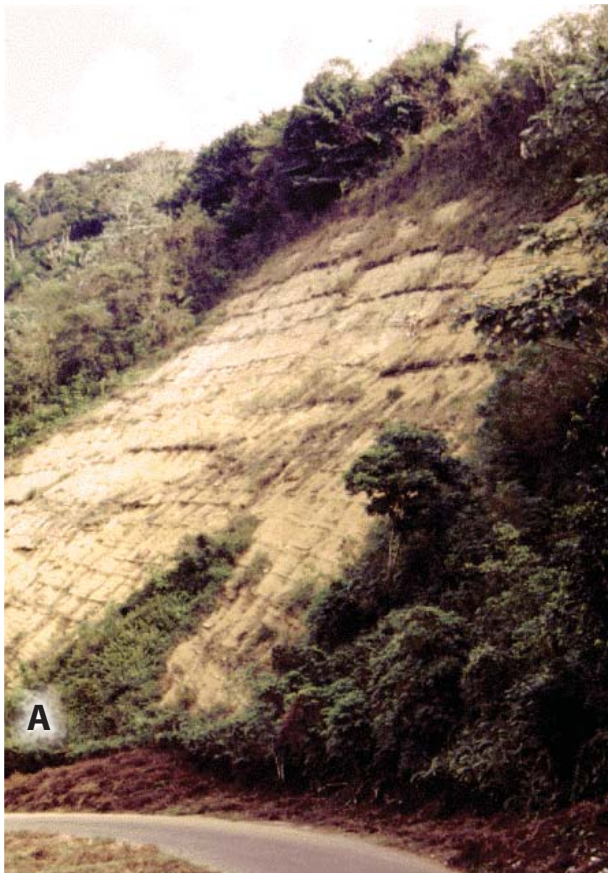


Figura 25. A: Afloramientos de la Formación Mícara en La Alcarraza, de edad Maastrichtiano a Daniano basal B: detalle de las tufitas blancas intercaladas entre las grauvacas.

Descripción

Es una sección de turbiditas grauvacas, bien estratificadas, en capas de pocos centímetros hasta decenas de centímetros de espesor, que presentan gradación granulométrica, con icnofósiles en la base de los estratos. Localmente aparecen capas de conglomerados ricos en cantos rodados de rocas del arco volcánico Cretácico, y en menor grado, de serpentinitas. También se les intercalan localmente capas hasta 5 y 10m de areniscas bien estratificadas constituidas por granos de serpentinita. Raramente aparecen finas intercalaciones de tobas vitroclásticas, cristaloclásticas y tufitas psammíticas, sobre todo en la porción del Daniano temprano (sección La Alcarraza) (Figuras 25 B). Las secciones de la Formación Mícara, como se observa en la Figura 22, pueden estar intercaladas con aquellas de la Formación La Picota, que constituye eventos de deslizamiento submarino hacia la cuenca, provenientes del frente de sobrecorrimientos o de superficies de despegue poco profundas (*decollement*). En estos casos, hay masas de la Formación Mícara extremadamente deformadas y desmembradas (Ver Figura 24).

En la región de Calabazas a Naranjo Agrio, Iturralde-Vinent (1976) distingue tres niveles:

- El nivel inferior aflora por el camino entre Calabazas y Achotal. El espesor alcanza los 100 m. Se compone de ritmitas de espesor variable constituidas por areniscas y lutitas. Las areniscas se acuñan o alcanzan los 30 m de espesor en distancias cortas. El contacto inferior de las areniscas es erosivo, con icnofósiles, en tanto que entre areniscas y lutitas es brusco. Las areniscas grauvacas son de grano grueso a medio, granodescendentes, de color negro que alteran a pardo. Contiene detritos redondeados de rocas efusivas, calizas criptocristalinas con *Calcisphaera(?)* sp., caliza micrítica con foraminíferos planctónicos del Albiano- Cenomaniano y en menor cuantía granos de plagioclasas, cuarzo, calcedonia, calcita y minerales ferromagnesianos. El cemento es

calcáreo y muy escaso. Contiene foraminíferos planctónicos y bentónicos pequeños, algas y moluscos. Las lutitas son laminares, de color gris acero que altera a tonalidades de pardo, y contienen detrito compuesto por granos de rocas, plagioclasas, cuarzo y calcita, en matriz arcillosa. Raramente contiene microfósiles. En esta sección se intercalan capas de conglomerados, de 1 a 5 m de espesor, de clastos bien redondeados, compuestos por rocas tobáceas (Formación Santo Domingo), que alcanzan hasta 30 cm de diámetro, en matriz arenograsosa. Su edad es Maastrichtiano de acuerdo a los pocos fósiles identificados (*Heterohelix* sp., *Globotruncana* cf. *G. linneiana*, *Pseudoguembelina* sp., *Rugoglobigerina rugosa*, *Sulcoperculina* sp.).

- El nivel medio aflora por el camino de Calabazas a Naranjo Agrio. Forma una escama levemente corrida sobre la sección inferior y sobre las serpentinitas. Su espesor es de unos 150 m. Se compone de areniscas grauvascas de grano grueso, en estratos de 10 a 15 cm. No se encontraron microfósiles índices.
- El nivel superior yace concordantemente debajo de las formaciones Gran Tierra y Sabaneta (Daniano tardío y más jóvenes). Se compone de areniscas grauvascas de grano grueso, en estratos de 5 cm de espesor, con esporádicas intercalaciones de gravelitas de 10 cm de espesor. En su porción media se intercalan capas de conglomerados de 1 a 3 m de espesor, con clastos de dioritas y de rocas vulcanógenas (Formación Santo Domingo), en matriz arenosa (Figura 26). La edad se determina como Paleoceno basal (Daniano), sobre la base de microfósiles (*Globorotalia compressa*, *G. elongata*, *G. cf. G. imitata*, *G. pseudobulloides*, *Pontocyprilla* sp.).



Figura 26 Dibujo del afloramiento de la Formación Mícaro en El Pícaro. Sección de grauvascas con capas intercaladas de conglomerados.

Tanatocenosis y edad

En otros afloramientos de la Formación Mícaro se han descrito numerosos fósiles, incluyendo foraminíferos (*Globotruncana* spp., *Globotruncanella havanensis*, *G. petaloidea*, *Globotruncanella conica*, *Guembelitra cretacea*, *Pseudotextularia varians*, *Racemiguembelina fructicosa*, *Contusotruncana contusa*, *Rugoglobigerina* sp.) propios del Maastrichtiano superior y *Globigerina eugubina*, del Daniano basal. Algunas localidades estudiadas por Mark Pucket (ostrácodos) y Charlie Smith (nannofósiles) contenían también fósiles del Maastrichtiano y Paleoceno, por ejemplo, la sección en Calabazas (Maastrichtiano: *Racemiguembelina fructicosa*, *Contusotruncana contusa*, *Globotruncanella stuarti*, *Abathomplalus mayaroensis*, *Bairdia* y *Cytherella*; Paleoceno: *Cytherelloidea* y *Cytherella*).

Ambiente de sedimentación

Se depositó en una depresión marina de aguas profundas, con aportes de sedimentos producto de la erosión de un terreno con rocas volcánicas y máfico-ultramáficas, seguido por el deslizamiento de escamas tectónicas y olistostromas frontales, que se mezclaron con los sedimentos debido al avance de mantos de corrimiento.

Miembro Naranjo Agrio Iturralde – Vinent, 1976

Se trata de una sección conglomerática presente en los alrededores de La Zarza y Naranjo Agrio (Iturralde – Vinent, 1976), que constituye una facies lateral de la Formación Mícaro. Son conglomerados con clastos bien rodados de 10 a 20 cm. Hay limitadas intercalaciones de areniscas grauvascas, de grano grueso a medio, en estratos de 5 a 10 cm, que forman horizontes de 20 a 5 m de espesor. El material clástico se compone de fragmentos de rocas tobáceas (Formación Santo Domingo) y de dioritas. Esta sección es masiva a groseramente estratificada. Su espesor sobrepasa los 250 m. No se encontraron fósiles. Yace en contacto tectónico debajo de las vulcanitas del Paleoceno – Eoceno y descansa sobre la sección inferior de la Formación Mícaro.

Formación Babiney Kozary, 1957. Redescrita por García Delgado et al., 2001.

Está desarrollada en la provincia Granma, al oeste de las elevaciones de Mayarí a Baracoa, donde aflora en un área menor de 10 km², en los alrededores de la localidad de Babiney, provincia Granma. Su sección tipo es un corte en la cantera abandonada situada al noroeste del poblado Babiney (Hoja 4877I, coordenadas iniciales x 534 600 y 203 500, coordenadas finales x 534 500 y 205 625).

Descripción

La sección expuesta, bien estratificada, se compone en su porción inferior de areniscas polimícticas, de grano fino a grueso, que se intercalan con capas de conglomerados. Hacia arriba en el corte transicionan a calizas arcillosas y margas. Los conglomerados presentan abundantes clastos de diabasas y gabro-diabasas poco alterados. Las rocas son de color claro, crema a amarillento, a excepción de las capas ricas en clastos oscuros.

Tanatocenosis y edad

La sección del Maastrichtiano superior contiene *Globotruncana arca*, *G. aegyptiaca*, *G. linneiana*, *G. stuartiformis*, *Globotruncanella conica*, *Globotruncanella petaloidea*, *G. havanensis*, *Heterohelix globulosa*, *Pseudogumbelina excolata*, *Pseudotextularia elegans*, *Racemigumbelina fruticosa*, *Rugoglobigerina rugosa*. La del Daniano basal presenta *Globigerina fringa* y *G. cf. G. eugubina*.

Ambiente de sedimentación

Según Iturralde-Vinent *et al.* (2006) se trata de una sección distal, de aguas más profundas, en el conjunto de ambientes de la paleocuenca Mícara, donde el material clástico proviene de los mantos alóctonos de rocas máfico-ultramáficas (ver Figura 26).

Sector Sierra Maestra

En el flanco meridional de la sierra, al sur del Turquino, aflora la Formación Manacal, la cual no está bien cartografiada. La cuenca sedimentaria original ha sido distorsionada por las deformaciones y la erosión, de manera que sus contornos no están bien definidos (Ver Figura 1).

Formación Manacal Lewis y Straczek, 1957

Se desarrolla en la Sierra Maestra, provincias de Granma y Santiago de Cuba. La sección tipo se encuentra por el río Portillo (Manacal) (Hoja Marea de Portillo 4775 I), provincia Granma.

Descripción

Areniscas y limolitas polimícticas y tobáceas, argilitas, calizas, gravelitas, tobas de diferente granulometría y conglomerados. Las tobas son de composición andesito-basáltica. Yace discordante sobre la Formación Turquino (Palma Mocha) y están cubiertas discordantemente por rocas vulcanógeno-sedimentarias del Grupo El Cobre. Su espesor se estima en unos 200 m.

Tanatocenosis y edad

Contiene foraminíferos bentónicos (*Sulcoperculina dickersoni*, *S. globosa*, *Orbitoides* spp., *Pseudorbitoides rutteni*) y planctónicos (*Globigerinelloides* spp., *Globotruncanalinneiana*, *Globotruncanella stuarti*, *Contusotruncana fornicata*, *Rugoglobigerina* sp.) propios del Cretácico Superior, probablemente del Maastrichtiano.

BIBLIOGRAFÍA

- Albear, J. F. de, Iturralde-Vinent, M., 1985. *Estratigrafía de las provincias de La Habana*. En: *Colectivo de Autores. Contribución a la Geología de las provincias de La Habana y Ciudad de la Habana*. La Habana: Editorial Científico-Técnica. P. 12-54.
- Alegret, L., Arenillas, I., Arz, J. A., Díaz, C., Grajales – Nishimura, J. M., Meléndez, A., et al., 2005. *Cretaceous - Paleogene boundary deposits at Loma Capiro, central Cuba: Evidence for the Chicxulub impact*. *Geology*. 33 (9): 721 – 724.
- Bralower, T., Iturralde Vinent, M. A., 1997. *Micropaleontological Dating of the Collision Between the North American Plate and the Greater Antilles Arc in Western Cuba*. *Palaios*. 12: 133 – 150.
- Brönnimann, P., Rigassi, D., 1963. *Contribution to the geology and paleontology of the area of the city of La Habana, Cuba, and its surroundings*. *Eclogae Geologicae Helvetiae*. 56: 193-480.
- Cobiella - Reguera, J. L., 1974. *Los macizos serpentiniticos de Sabanilla, Mayarí Arriba, Oriente*. *Tecnológica*. 12 (4).
- _____, 1977. *Geología del flanco sur de la Sierra del Purial*. *La Minería en Cuba*. 2 (4); 3 (1).
- _____, 1978. *Una mélangé en Cuba oriental*. *La Minería en Cuba*. 4 (4): 46 - 51.
- _____, 1983. *Sobre la geología de la Sierra Cristal y áreas adyacentes*. *Minería y Geología*. 1 (1): 19-28.
- Cobiella - Reguera, J. L., Campos, M., Boitesu, A., Quintas - Caballero, F., 1977. *Geología del flanco sur de la Sierra del Purial (I)*. *La Minería en Cuba*. 3 (1): 55 - 62.
- Cruz - Orosa, I., Blanco - Moreno, J. A., 2007. *Análisis estructural a escala regional de la zona de fallas La Trocha*. *Minería y Geología*. 23 (2).
- Cruz - Orosa, I., Sábat, F., Ramos, E., Rivero, L., Vázquez Taset, Y. M., 2012 a. *Synorogenic basins of central Cuba and collision between the Caribbean and North American plates*. *International Geology Review*. 54: 876 - 906.
- _____, 2012 b. *Structural evolution of the La Trocha fault zone: Oblique collision and strike-slip basins in the Cuban Orogen*. *Tectonics*. 31.
- de la Torre, A., Jakus, P., de Albear, J. F., 1978. *Nuevos datos sobre las asociaciones de rudistas en Cuba*. *Geologie en Mijnbouw*. 57 (2): 143 – 150.
- Díaz Otero, C., 1985. *Consideraciones paleoecológicas sobre el banco carbonatado de Sierra de Cubitas, provincia de Camagüey*. *Serie Geológica*. 2: 8 – 24.
- Echevarría, B., Gil, S., Flores, R., Talavera, F., 1988. *Acerca de la composición de los sedimentos del Paleoceno-Eoceno Inferior al sur de la falla Pinar*. *Serie Geológica del Centro de Investigaciones y Desarrollo del Petróleo*. 4:77-89.
- Flores Albin, E., 1986. *Radiolarios del Campaniano de la formación Vía Blanca en la Región Habana-Matanzas*. *Tecnológica*. 16 (2): 7-18.
- Franco Álvarez, G.L., Acevedo González, M., Álvarez Sánchez, H., Artime Peñeñori, C., Barrientos Duarte, A., Blanco Bustamante, S., et al., 1992. *Léxico Estratigráfico de Cuba*. Centro Nacional de Información Geológica, La Habana, 658.
- Furrazola-Bermúdez, G., Basov, V.A., Kuzovkov, G.N., Alioshin, V. M., Burov, V.A., 1976. *Sierra Maestra occidental. Nuevos datos. Estratigrafía del Cretácico Superior*. *La Minería en Cuba*. 2 (3): 50-62.
- García Sánchez, R., 1978. *Notas sobre la constitución geológico-estructural de la depresión Los Palacios*. *La Minería en Cuba*. 4 (3): 30-36.
- Gil González, S., 2007. *Consideraciones bioestratigráficas de los depósitos siliciclásticos en Cuba en cuenca piggy back del Campaniano Maastrichtiano*. En: *Memorias, Trabajos y Resúmenes. II Convención Cubana de Ciencias de la Tierra (Geociencias' 2007) (CD – ROM)*. La Habana: Centro Nacional de Información Geológica, Instituto de Geología y Paleontología de Cuba.
- Gil González, S., Díaz Otero, C., y García Delgado, D., 2009. *Consideraciones bioestratigráficas de los depósitos siliciclásticos en Cuba en cuenca piggy back del Campaniano-Maastrichtiano*. *Memorias de la III Convención Cubana de Ciencias de la Tierra*. La Habana: Centro Nacional de Información Geológica, Instituto de Geología y Paleontología de Cuba.
- Goto, K., Tada, R., Tajika, E., Iturralde-Vinent, M., Matsui, T., Yamamoto, S., et al., 2008. *Lateral lithological and compositional variations of the Cretaceous/Tertiary deep-sea tsunami deposits in northwestern Cuba*. *Cretaceous Research*. 29 (2): 217-236.
- Herrera, N.M., 1961. *Contribución a la estratigrafía de la provincia de Pinar del Río*. *Revista de la Sociedad Cubana de Ingenieros*. 1 – 2: 22-45.
- Iturralde-Vinent, M., 1976. *Estratigrafía de la zona Calabazas-Achotal, Mayarí Arriba, Oriente (I)*. *La Minería en Cuba*. 5: 9-23.

- _____, 1977. *Estratigrafía de la zona Calabazas-Achotal, Mayarí Arriba, Oriente (II)*. La Minería en Cuba. 6: 32-40.
- _____, 1978. *Historia geológica del Mesozoico de las provincias de La Habana*. En: *Colectivo de Autores. Contribución a la Geología de las provincias de La Habana y Ciudad de La Habana*. La Habana: Editorial Científico - Técnica. P. 94-99.
- _____, 1995. *Cuencas sedimentarias del Paleoceno-Eoceno de Cuba*. Bol. Soc. Venezolana de Geología. 20(1-2):75-80.
- _____, 2011. *Cuencas sinorogénicas del Campaniano tardío al Eoceno Superior, desarrolladas sobre rocas del arco volcánico y máfico-ultramáficas*. En: *Compendio de Geología de Cuba y del Caribe. Segunda Edición (DVD - ROM)*. La Habana: CITMATEL.
- Iturralde-Vinent, M., Díaz-Otero, C., Rodríguez-Vega, A., Díaz-Martínez, R., 2006. *Tectonic implications of paleontologic dating of Cretaceous-Danian sections in eastern Cuba*. En: Iturralde-Vinent, M., Lidiak, E.G. (Eds.). *Caribbean Plate Tectonics. Stratigraphy, Magmatic, Metamorphic and Tectonic Events*. Geologica Acta. 4 (1-2):89-102.
- Iturralde-Vinent, M., Tchounev, D., Cabrera, R. (Eds.), 1981. *Geología del territorio de Ciego - Camagüey-Las Tunas: resultados de las investigaciones científicas y del levantamiento geológico escala 1:250 000*. Academias de Ciencias de Cuba y Bulgaria. P. 940. Inédito.
- Jakus, P., 1983. *Formaciones vulcanógeno-sedimentarias de Cuba oriental*. En: *Colectivo de Autores. Contribución a la Geología de Cuba Oriental*. La Habana: Editorial Científico - Técnica. P. 17-85.
- Kantchev, I., Boyanov, I., Popov, N., Cabrera, R., Goranov, A., Iolkicev, I., et al., 1978. *Geología de la provincia de Las Villas. Resultado de las investigaciones y levantamiento geológico a escala 1:250 000*. Academia de Ciencias de Cuba y Bulgaria, Instituto de Geología y Paleontología, Oficina Nacional de Recursos Minerales, Ministerio de Energía y Minas, La Habana. Inédito.
- Kleschov, K.A., Shein, V. S., García-Sánchez, R., 1977. *Tipos de cuencas sedimentarias de Cuba*. La Minería en Cuba. 3 (4): 64-68.
- Knipper, A., Cabrera, R., 1972. *Tectonic position of ultramafic bodies of Cuba*. Transactions VI Caribbean Geological Conference, Margarita, Venezuela. P. 315-317.
- _____, 1974. *Tectónica y geología histórica de la zona de articulación entre el mio- y eugeosinclinal de Cuba y del cinturón hiperbásico de Cuba*. En: *Colectivo de Autores. Contribución a la Geología de Cuba. Publicación Especial Número 2*. La Habana: Instituto de Geología y Paleontología, Academia de Ciencias de Cuba. P. 15-77.
- Nagy, E., Brito, A., Jakus, P., Gyarmati, P., Brezsnýánszky, K., Franco-Álvarez, G.L., et al., 1983. *Contribución a la geología de Cuba Oriental*. La Habana: Editorial Científico - Técnica. P. 273.
- Piotrowski, J., 1978. *Nuevos datos sobre los sedimentos del Cretácico Superior tardío y Paleógeno en la zona estructurofacial de San Diego de los Baños*. En: Pszczółkowski et al., 1987. *Contribución a la geología de la provincia Pinar del Río*. La Habana: Editorial Científico - Técnica. P. 185-196.
- Pszczółkowski, A., 1986. *Megacapas del Maestrichtiano de Cuba occidental y central*. Bulletin of the Polish Academy of Sciences Earth Science. 34 (1): 81 -87.
- Pszczółkowski, A., Piotrowska, K., Myczynski, R., Piotrowski, J., Skupinski, A., et al., 1975. *Texto explicativo al mapa geológico a escala 1:250000 de la Provincia de Pinar del Río*. Varsovia - La Habana: Instituto de Ciencias Geológicas de la Academia de Ciencias de Polonia - Instituto de Geología y Paleontología de la Academia de Ciencias de Cuba.
- Pszczółkowski, A., Piotrowska, K., Piotrowski, J., de la Torre y Callejas, A., Myczyński, R., Haczewski, G., 1987. *Contribución a la geología de la provincia Pinar del Río*. La Habana: Editorial Científico - Técnica. P. 255.
- Pushcharovskiy, Y. M. (Ed.), 1988. *Mapa geológico de la República de Cuba, a escala 1: 250 000*. Academias de Ciencias de Cuba y la URSS. 40 hojas.
- _____, (Ed.), 1989. *Mapa tectónico de Cuba escala 1: 500 000*, Academia de Ciencias de Cuba y la URSS. 4 hojas.
- Rojas Consuegra, R., 2004. *Lista de los taxones de rudistas cubanos*. En: Iturralde-Vinent, M., (Ed.). *Origen y evolución del Caribe y sus biotas marinas y terrestres*. (CD-ROM). La Habana.
- Rojas Consuegra, R., Iturralde-Vinent, M., Skelton, P.W., 1995. *Stratigraphy, composition and age of Cuban rudist-bearing deposits*. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas. 12 (2): 272-291.
- Tada, R., Iturralde-Vinent, M., Matsui, T., Tajika, E., Oji, T., Goto, K., et al., 2003. *K/T boundary deposits in the Paleo-western Caribbean basin*. En: Bartolini, C., Buffler, R.T., Blickwede, J., (Eds.) *The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon habitats, basin formation, and plate tectonics*. American Association of Petroleum Geologists Memoir 79: 582-604.
- Takayama, H., Tada, R., Matsui, T., Iturralde-Vinent, M., Oji, T., Tajika, E., et al., 2000. *Origin of the Peñalver Formation in northwestern Cuba and its relation to K/T boundary impact event*. Sedimentary Geology. 135: 295-320.

METODOLOGÍA PARA LA INTERPRETACIÓN SÍSMICA 3D ESTRUCTURAL EN LA FAJA SEPTENTRIONAL CABALGADA DE CUBA

ALBERTO HELIO DOMÍNGUEZ GÓMEZ, MARGARITA JUARA ZULUETA

Centro de Investigaciones del Petróleo

Churruca No 481, Cerro, La Habana, Cuba, CP 12000.

Correo: *alberto@digicupet.cu*

RESUMEN

El presente trabajo se propone una metodología para la interpretación sísmica 3D estructural en la Faja Septentrional Cabalgada (Habana - Matanzas) de Cuba, mediante la sísmica de reflexión convencional que es el método más utilizado a nivel mundial en la exploración petrolera. El objeto son las rocas carbonatadas fracturadas y en menor medida terrígenas del Jurásico – Cretácico y Terciario, que componen el reservorio principal. El objetivo es optimizar los softwares de interpretación y cartografiar los altos estructurales. El método consiste en la concreción de una serie de etapas de trabajo que se pueden resumir en: (1) etapa de recopilación y preparación de los datos, (2) etapa de estudio estructural regional y elaboración del modelo sísmico – geológico y (3) etapa de visualización e interpretación de las imágenes sísmicas 3D. Como resultado de esta aplicación se obtienen mapas estructurales por los diferentes pliegues del tipo duplex. La aplicación experimental se realizó en la zona noreste del yacimiento Seboruco, apoyado en las experiencias adquiridas en los últimos años en otros yacimientos del país y en misiones internacionales. Se discute la validez y las limitaciones en la aplicación del método.

ABSTRACT

The work exposes a methodology for the seismic 3D structural interpretation in the Thrust Belt (Havana - Matanzas) of Cuba, using the conventional seismic reflection method by means of the seismic of conventional reflection that is the method more used at world level in the oil exploration. The object is the fractured carbonated rocks and minor clays of the Jurassic one - Cretaceous and Tertiary that compose the main reservoir. The objective is to optimize the interpretation software and maps cartographers the structurals highs. The method consists on the concretion of a series of work stages that can be summarized in: (1) summary and preparation of the data stage, (2) stage of regional structural study and elaboration of the seismic - geologic pattern and (3) visualization stage and interpretation of the 3D seismic images. As a result of this application structural maps are obtained by the different fould pleats of the type duplex. The experimental application was carried out in the northeast area of the Seboruco location, supported in the experiences acquired in the last years in other locations of the country and in international missions. The validity and the limitations in the application of the method are discussed.

INTRODUCCIÓN

En la medida que se van agotando los nuevos campos petroleros descubiertos, el hombre se ve en la necesidad de extender la exploración hacia regiones cada vez más complicadas, no solo desde el punto de vista geológico, sino también geomorfológico, lo que aumenta cada vez más el riesgo y a su vez la necesidad de extremar las medidas de seguridad y protección del medio ambiente. Independientemente de que la técnica avanza a paso gigantesco, y existan métodos de explotación secundarios y hasta terciarios para aumentar el recobro de petróleo y/o gas, se continúa consumiendo de estas fuentes energéticas fósiles sin encontrarse otras que las sustituyan. Es por esta razón que es necesario crear nuevos procesos metodológicos que faciliten la exploración. El proceso metodológico que plantean los autores es uno de ellos, y de tener resultados positivos se puede generalizar en otras regiones análogas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales utilizados y consultados

- 1- Estación de trabajo (Work Station), cubo 3D y software para realizar la interpretación sísmica.
- 2- Informes de los trabajos anteriores y experiencias análogas en otras partes del mundo.
- 3- Estratigrafía (correlación litoestratigráfica).
- 4- Paleontología (secciones delgadas, núcleos, muestras de canal, ditches).
- 5- Geofísica de pozos (complejos de registros geofísicos).
- 6- Geología estructural.
- 7- Geomorfología (efectos de la Neotectónica).
- 8- Levantamiento geológico.
- 9- Interpretación de capturas en Google.

Metodología

La metodología se concretó en tres etapas:

1. Etapa de recopilación y preparación de los datos.
2. Etapa de estudio estructural regional y elaboración del modelo sísmico – geológico.
3. Etapa de visualización e interpretación de las imágenes sísmicas 3D.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Etapa de recopilación y preparación de los datos

- a) Amplitudes con 8 bits son suficientes para la interpretación estructural pero los estudios de puntos brillantes (bright spots), atributos sísmicos en inversión sísmica requieren 16 ó 32 bits.
- b) Para la interpretación sísmica es recomendable cargar siempre los datos sísmicos en 16 bits en fase cero para que no se pierdan las informaciones importantes.

- c) El número de trazas sísmicas (pre apilado) que iluminan una unidad de área del subsuelo es más importante que la cobertura o tamaño del bin tomados separadamente.
- d) Los pozos inclinados dirigidos y horizontales perforados hacia la zona norte marina dificultan la aplicación de diagramas sintéticos y la detección de diferentes tipos de fallas, por lo que es necesario contar con el módulo de falla y software de cálculo de los sintéticos para aumentar el grado de confiabilidad en la correlación de los diferentes horizontes sísmicos.

Etapa de estudio estructural regional y elaboración del modelo sísmico – geológico.

- a) Ubicación en profundidad verticalmente y desarrollo lateral del sello y su contacto discordante con el reservorio principal, así como posibles elementos tectónicos de interés.
- b) Documentarse sobre la geología de la zona de estudio y los objetivos.
- c) Relacionar la geología con los horizontes sísmicos de interés, ya que se está en presencia de una geología muy compleja con trampas masivas tectónicamente apantalladas, intercaladas con sellos internos.
- d) Es aconsejables la impresión de líneas sísmicas crosslines, inlines y depth slices, sobre todo las que se van a utilizar para realizar los modelos sismo geológicos, estudio estructural regional, e interpretación preliminar manual para tener una visión general que facilite ver los pliegues en la estación de trabajo.
- e) En los modelos sismo geológicos, aplicar el balanceo estructural al menos cualitativamente (aproximadamente mantener los espesores), como apoyo durante la interpretación en áreas de las que no se dispone de datos de pozos.
- f) Al realizar la interpretación general observar los cortes sísmicos mas visibles en profundidad, con énfasis en las zonas levantadas, ya que por lo general por encima heredan las formaciones de estos levantamientos (poca variación de los espesores) que están relacionados con los altos estructurales.
- g) Reconocimiento de la estructura del apilado (*stack*) en una sección transversal (*crossline*) de forma general va a conformar una cuña, con su frente en dirección norte, con buenos marcados por el contraste del cambio de impedancia entre un medio y otro, tanto en su parte superior como inferior del corte.
- h) Mapear siempre las discordancias importantes, una vez que permitan entender el proceso de sedimentación en la cuenca (ver figuras 1, 2 y 3).

Etapa de visualización e interpretación de las imágenes sísmicas 3D.

- a) Hacer un recorrido de todas las líneas *inlines*, *crosslines* y *depth slices* o *time slices* con un paso largo. Ejemplo 125 * 200 m (cada 10 * 10 trazas), ubicándose de forma rápida en la cuña del apilado (1 a 2 Km de profundidad por la vertical) en el caso del primer apilado y los pliegues internos que constituyen el reservorio. Para lograr una mejor visualización, se aprovecha

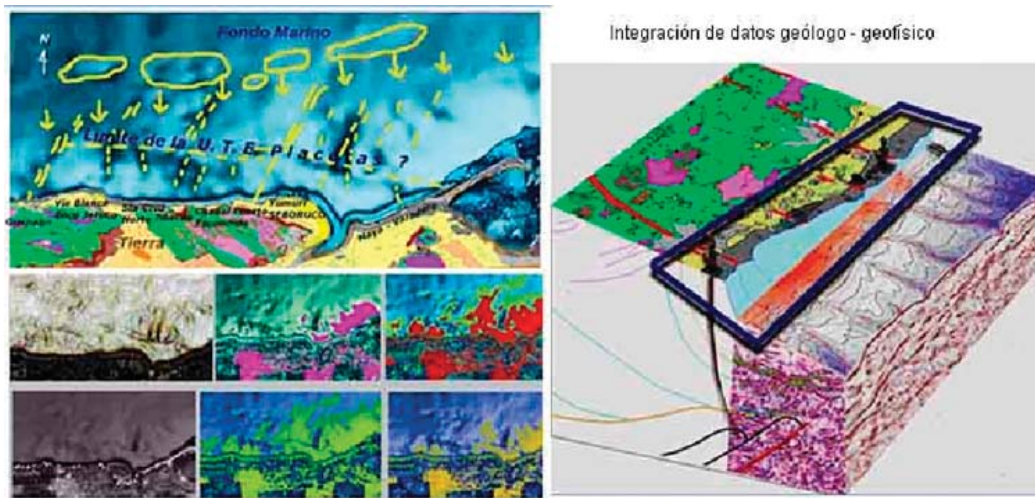


Figura 1. A la izquierda parte superior: interpretación preliminar del fondo marino en la región donde se aplicó la metodología, direcciones de los elementos tectónicos, zonas levantadas y hundidas relacionadas con las Unidades Tectónicas Estratigráficas y apoyo de la geología de superficie, debajo, algunos atributos geométricos. A la derecha: combinación de diferentes disciplinas para la reconstrucción tectónico-estructural: mapa de levantamiento geológico IGP, cubo sísmico, fondo marino y perfil geológico.

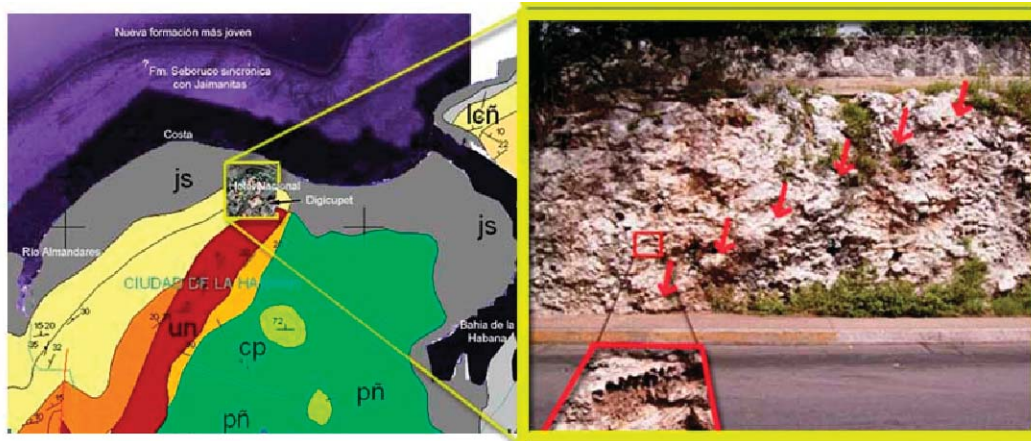


Figura 2. A la izquierda: formaciones geológicas del área combinado con foto aérea (se observa en color verde claro la cuenca rellenada por la Formación Vía Blanca y en violeta claro a gris en superficie la Formación Jaimanitas). A la derecha: afloramiento de la Formación Vedado; señalado con flechas rojas un posible cambio de la sedimentación o dirección, y dentro del cuadro rojo, detalle de un molde fósil.

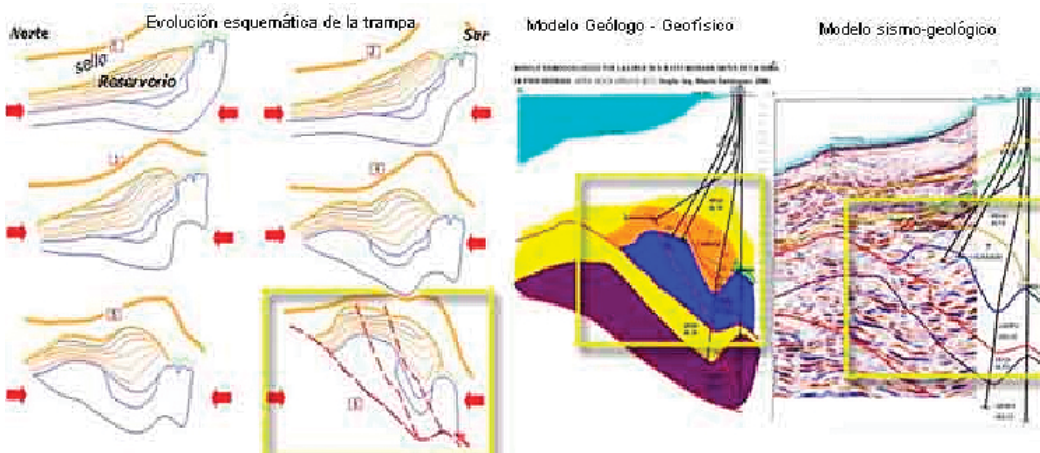


Figura 3. A la izquierda: reconstrucción esquemática de la cuenca y formación de la trampa estructural (flechas rojas simbolizan los esfuerzos predominantes). En el centro: modelo geólogo – geofísico a partir de los datos sísmicos y de pozos. A la derecha: los horizontes sísmicos principales trazados con el amarre de los pozos (en cuadro amarillo, imagen actual final que se corresponde en las diferentes secuencias de trabajo dentro de esta etapa).

la intersección de la base del sello que suprayace al tope del reservorio y sello en la base, que forman juntas en su frente (norte) una anomalía bastante visible por su alta energía, reflectores cortos, bien diferenciados de los que lo rodean. Las anomalías de amplitud deben ser siempre analizadas conjuntamente con su posición estructural.

- b) Tomar nota de los principales reflectores, discordancias y eventuales anomalías de amplitud. Interpretar las fallas principales, fallas inversas formadas por los plegamientos, fallas de rechazo horizontal (*strike slip*), edad de las fallas, tipos de fallas, y seguimientos. La creación de líneas arbitrarias (*random lines*) puede facilitar la interpretación de fallas y ubicación de los modelos paralelo al caño del pozo. No contar con el módulo de fallas dificulta el seguimiento de las mismas, sobre todo las fallas de rechazo horizontal.
- c) A partir de los pozos calibrados, empezar por los reflectores más sencillos o visibles, continuos y de carácter bien definido (alta amplitud, ejes cofásicos nítidos). No contar con el software de elaboración de diagramas sintéticos dificulta el buen amarre de la sísmica.
- d) Utilizar el *autotracking* (correlación automática) en el caso de que el amarre de la interpretación se realice por la base del sello. Refinar la interpretación de los horizontes, con el uso de una red más densa, aunque en este caso la respuesta sísmica producto de las discordancias bien marcadas que varían lateralmente el picado manual por trazas es necesaria.
- e) Detallar el patrón de falla inicial mientras se interpretan los horizontes. Analizar en las *depth slices* posibles lineamientos y compararlos con las fallas interpretadas. Nombrar las fallas correlacionadas y descartar las fallas aisladas sin correlación lateral.
- f) Calcular las isohipsas e isócronas y efectuar un control de calidad virtual (analizar los espesores a ambos lados de las fallas, saltos de fallas, tipos de fallas).
- g) En el caso de la interpretación de cortes sísmicos en tiempo, interpretar siempre los horizontes que correspondan a grandes contrastes de velocidad, puesto que son muy importantes para la conversión tiempo – profundidad.
- h) Las *depth slices* y *time slices* son muy útiles para rectificar el alineamiento de los planos de fallas interpretados en secciones verticales. Al trabajar con la amplitud convencional las fallas son visibles si el rumbo estratigráfico es diferente al rumbo de la falla. En los casos que no lo sea es aconsejables utilizar los atributos geométricos (buzamiento, azimut). También para verificar la confiabilidad de los mapas estructurales se superponen los contornos a diferentes profundidades o tiempos (ver Figuras 4 a 10, Tabla I y II).

Análisis de la incertidumbre sísmica

Las incertidumbres de la interpretación sísmica resultan de varios factores:

- Calidad de los datos, resolución sísmica: adquisición (densidad de las trazas, fuente, etc.), procesamiento (tipo de migración, atenuación de múltiples, etc.)

Tabla I. Diferentes sismosecuencias (SS) en los reservorios estructurales principales y sello regional. (De izquierda a derecha, diferentes imágenes sismoestratigráficas observadas durante la interpretación sísmica, su calibración litoestratigráfica y de pozos, los patrones de la imagen sísmica que la caracteriza y algunas observaciones importantes a tener en cuenta durante la visualización e interpretación de la sísmica estructural).




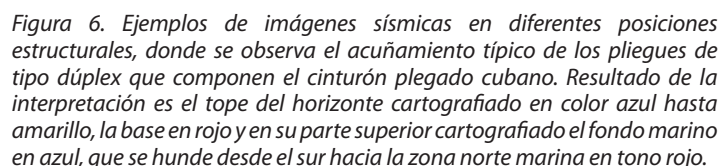
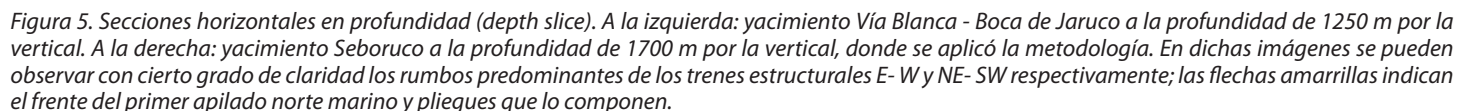
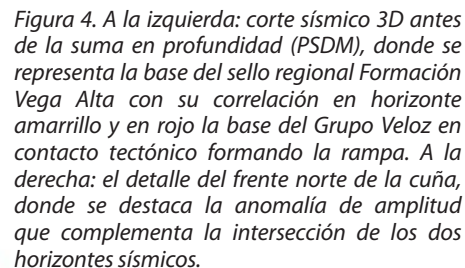
Secuencia Sismoestratigráfica	Calibración litoestratigráfica en pozos	Patrón típico de la imagen sísmica	Observaciones
SS-4 	Arcillas Vega Alta BJ-3, 9, 64, 500. Núcleos registros y cuttings 800s	Alta Amplitud Baja Frecuencia. Reflectores con buena expresión dinámica	Reflectores ondulados y continuos por tramos, bien expresados
SS-5 	Conglobrechas Tipo Canasí BJ-3, 9, 64, 500. VB-400. Núcleos, registros y cuttings 800s	Amplitudes y frecuencias de media a bajas. Reflectores caóticos	Reflectores agrupados por paquetes y prevalece la opacidad
SS-6 	Carbonatos del Grupo Veloz BJ-3, 9, 64, 500. VB-400. Núcleos, registros.	En general amplitudes son altas. Reflectores agrupados.	Grupos buzando con cierta orientación con ángulos medios a altos.

Tabla II. Diferentes sismosecuencias (SS) en los reservorios someros de tipos principalmente estratigráficos y sellos internos. (De izquierda a derecha, la columna de las sismosecuencias, su calibración litoestratigráfica y de pozos, los patrones de la imagen sísmica que la caracteriza y algunas observaciones importantes a tener en cuenta durante la visualización e interpretación de la sísmica).

Secuencia Sismoestratigráfica	Calibración litoestratigráfica en pozos	Patrón típico de la imagen sísmica	Observaciones
SS-1	Carbonatos, calcarenitas, argilitas y margas e las Fms. Güines-Cojimar. Ej: BJ-3, 9, 21, 35, 312 y 705. Registros de pozos, muestras de canal y <i>ditches</i> .	Medias a Altas frecuencia y Amplitudes Bajas (reflectores con cierta opacidad) a medias (reflectores finos "estratos").	Reflectores continuos interrumpidos por fallas recientes, derrumbes, colapsos y deslizamientos de roca (zona central).
SS-2	(c) Margas, argilitas, calcarenitas y dolomitas. Fm. Tinguaro. Ej: BJ-3, 9, 21, 35, 312 y 705. Registros de pozos, muestras de canal, <i>ditches</i> y núcleos BJ-215 y 8.	Amplitudes y frecuencias de media a altas. Reflectores con baja energía por tramos.	Cierta agrupación por tramos de los reflectores, prevalece la opacidad zona central, no así la norte y sur.
	(b) Margas, calizas y arcillas de la Fm. Encanto(Consuelo). Ej: BJ-3, 9, 21, 35, 312 y 705. Registros de pozos, muestras de canal, <i>ditches</i> y núcleo BJ- 8.	En general amplitudes altas. Reflectores agrupados por paquetes.	Intervalos de paquetes unos con alta energía dinámica y otros con baja energía.
	(a) Carbonatos, calcarenitas y argilitas de la Fm. Príncipe (Grupo Universidad). Ej: BJ-3, 9, 21, 35, 312 y 705. Registros de pozos, cuttings, <i>ditches</i> .	En general aumentan las altas amplitudes. Reflectores agrupados por paquetes y mayor espesor de estratos	Intervalos de paquetes unos con alta energía dinámica (prevalecen) y mas pequeños con baja, zona norte.



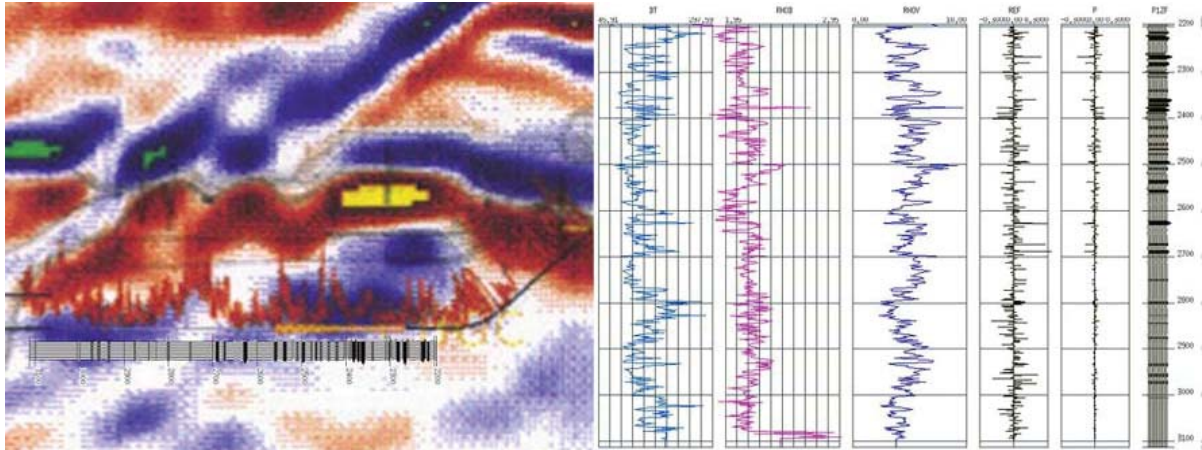


Figura 7. A la izquierda: detalle de imagen sísmica con pozo perforado representado por trayectoria en curvilínea negra fina, en rojo oscuro casi paralelo se destaca la base del sello regional (reflector ondulado continuo por tramo con una alta amplitud y baja frecuencia), registro geofísico y sintético (montaje) paralelo al caño del pozo horizontal BJ - 806, lo que conjuntamente con el FMI (Imagen de la Formación Microeléctrica) ayudaría a un buen amarre durante la interpretación sísmica.

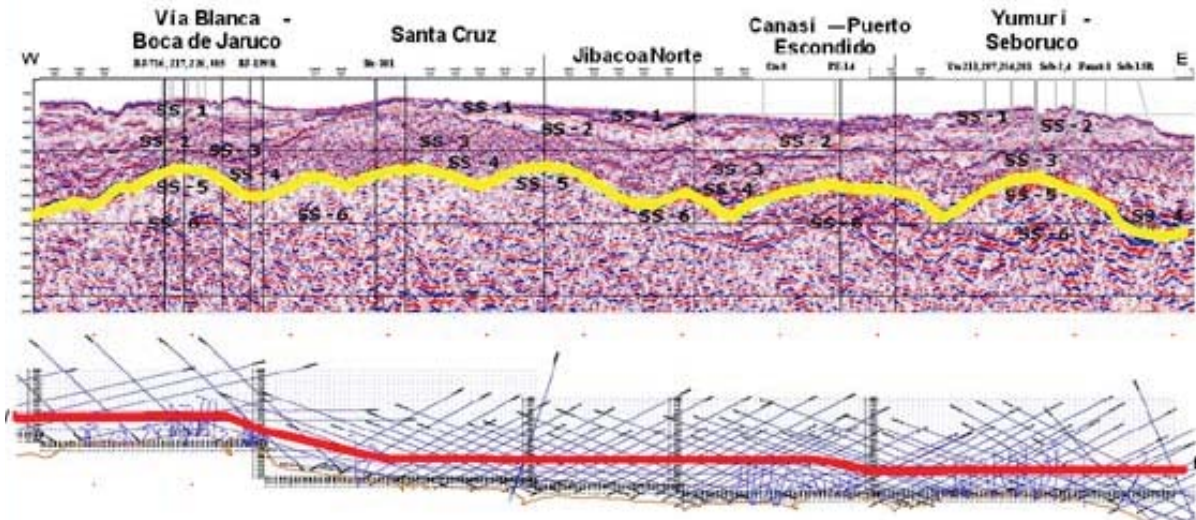


Figura 8. Corte sísmico regional Guanabo – Seboruco, representado por línea arbitraria dirección oeste – este que ubica con rapidez la posición de las diferentes sismosecuencias. El tope cercano al reservorio principalmente constituido por carbonato fracturado está representado por un horizonte sísmico en amarillo.

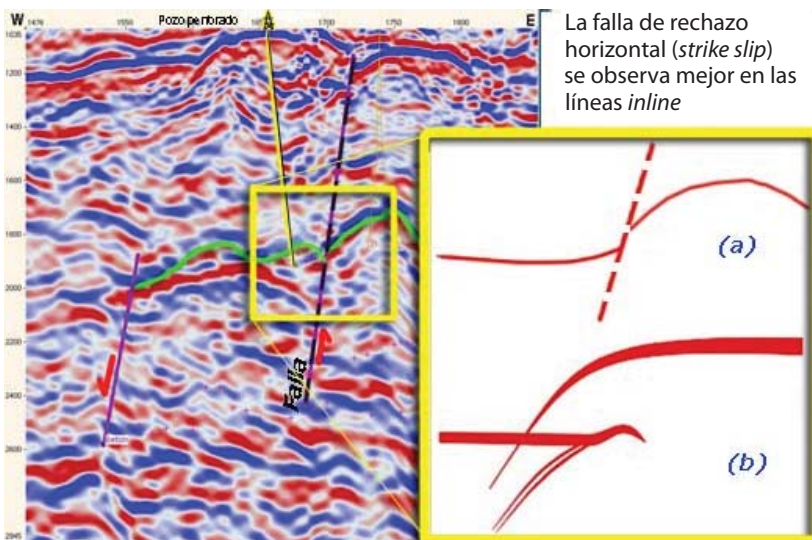


Figura 9. A la izquierda: sección de línea inline del yacimiento de petróleo Guanabo. La línea amarilla y negra representa al pozo perforado que penetra en el reservorio, amarrado y correlacionado con el horizonte verde (tope del reservorio). Como se puede apreciar, con una simple interpretación sísmica se sigue el reflector más fuerte y bien marcado en la parte inferior, si no se tuviera el dato de pozo. A la derecha: explicación de este fenómeno: (a) modelo de falla strike slip y línea discontinua que representa el plano de falla, (b) la impresión de las difracciones en rojo más fuertes del bloque levantado y del bloque hundido que permanecen bien separados, sin embargo, si hay un aumento rápido de velocidad con la profundidad, la difracción más baja es más plana, y los dos podrían acercarse de nuevo. En este caso la zona de confluencia contendría la reflexión de la parte inferior del plano de falla, porque el aumento rápido de velocidad con la profundidad hace que se vuelvan de nuevo ascendente los rayos que se proyectan hacia abajo. Esto va a ocurrir en rocas carbonatadas quebradizas (fracturas, rupturas); de ser rocas plásticas (dúctiles) estas fueran arrastradas, (para cualquier tipo y grado de arrastre es posible sintetizar la respuesta utilizando las hipérbolas de Huygens).

- Reflectividad de las capas de interés: Esta depende del contraste de impedancia acústica, pero el espesor de la capa y las posibles interferencias con las reflexiones de las capas vecinas pueden afectar la señal.
- Complejidad estructural y sedimentaria: fuente muy importante de errores durante la interpretación.
- Incertidumbre del picado: respuesta sísmica variable lateralmente (imposible de picar siempre en la misma fase), pocos pozos de control, fallas de grandes saltos y en ocasiones con basculamiento donde la correlación de una parte y otra es casi imposible.
- Incertidumbre de la conversión en profundidad: errores en el modelo de velocidad; o en el caso de los métodos directos la función utilizada no es precisa lejos de los pozos.

Principales resultados obtenidos

- 1- Se obtuvieron mapas estructurales por el tope del reservorio principalmente carbonatado fracturado en los primeros tres pliegues (tipo duplex) que componen el apilado principal de la faja septentrional cabalgada cubana los que se usaran para la ubicación de los futuros pozos a perforar.
- 2- Del resultado de la aplicación de la metodología en el yacimiento de petróleo Seboruco (ventana perteneciente a Cupet) como servicio prestado a la EPEP Occidente se perforó un pozo SB-XVIIA con resultados satisfactorios, y producción promedio de 1200 barriles diarios de petróleo, lo que representa un gran aporte al cumplimiento del plan de producción a esta empresa y al desarrollo energético del país (ver Figura 11).

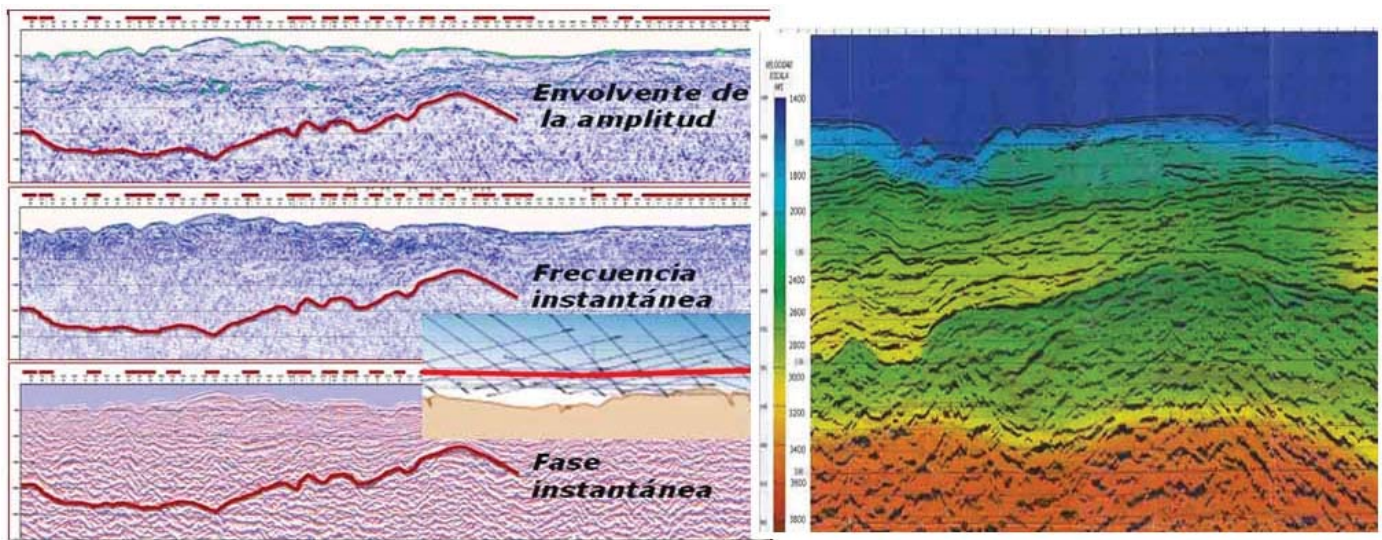


Figura 10. En la izquierda: ejemplos de atributos sísmicos utilizados como apoyo a la visualización sísmica con datos de pozos bien amarrados en Boca de Jaruco y su correlación (horizonte sísmico en rojo) de éste horizonte por el tope del reservorio principal carbonatado fracturado en dirección al oeste área de Bacuranao. A la derecha: ejemplo de un modelo de velocidad satisfactorio lo que facilita la interpretación sísmica estructural (colores en tonos azules baja velocidades, de verde a amarillo medias, y altas velocidades en rojo).

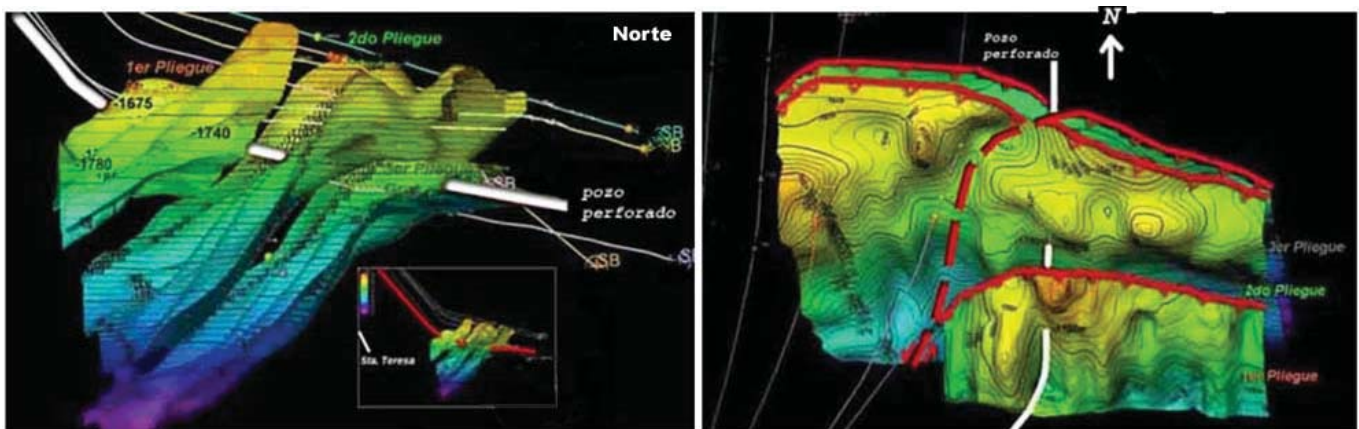


Figura 11. A la izquierda: corte transversal donde se muestran los diferentes pliegues que componen el apilado. A la derecha: como resultado de la interpretación sísmica estructural 3D vista en planta de los tres mapas estructurales superpuestos, por el tope del reservorio principal carbonatado fracturado que se utilizará para la ubicación de los pozos futuros.

CONCLUSIONES

1. Se aplicó la secuencia metodológica para la interpretación sísmica 3D estructural en el yacimiento de petróleo Seboruco perteneciente a la faja septentrional cabalgada cubana con resultado positivo.
2. Se obtuvieron mapas estructurales por el tope del reservorio principal carbonatado fracturado para los diferentes pliegues de interés, por el que se proyectaran los futuros pozos.

BIBLIOGRAFÍA

- Boletín de la Sociedad Canadiense de Geólogos Petroleros, Junio 1996. Zonas de Triangulo y Cuñas Tectónicas. Número especial, Volumen 44, No. 2. Calgary, Canadá.*
- Domínguez, A. H., 1992. Comparación Tectónico – Estratigráfica de los depósitos Terciario de Cuba y Venezuela. Memorias XIII Conferencia del Caribe, La Habana, Cuba.*
- Domínguez, A. H., 2008. Caracterización Sísmica de los Reservorio del Terciario Inferior de la Franja Septentrional Petrolera Cubana. Tesis en Opción al Título de Master en Ciencias Geológicas. Archivos Técnicos Universidad de Pinar de Río y Ceinpet, Habana, Cuba*
- Domínguez, A. H., García N., Gil S., y González D., Agosto 2010. Informe sobre la reinterpretación sísmica 3D en el yacimiento de petróleo Guanabo. Archivo Técnico Ceinpet - Digicupet, C. Habana, Cuba.*
- Domínguez, A. H., López., 1989. Constitución Geológica del Yacimiento Yumurí. Revista Especial de Geología, La Habana, Cuba.*
- Domínguez, A. H., Leyva, E., 1989. Informe Preliminar de las Margas Bituminosas del Neoaútóctono. Revista Especial de Geología, La Habana, Cuba.*
- Domínguez, A. H., Pérez, L. M., Tamayo, Y., 2011. Aplicación Sísmica 3D (Depth Slide) para la argumentación de un pozo somero en el Yacimiento de Petróleo Vía Blanca Boca de Jaruco. IV Convención de Ciencias de la Tierra, La Habana, Cuba.*
- Domínguez, A. H., Sánchez, C. E., Juara, M., Padilla, V., Lopez, M., Teruel, E., Hernández, J. C., 2011. Informe sobre la Interpretación del área este del yacimiento de petróleo Seboruco. Archivo Ceinpet. La Habana, Cuba.*
- Espeso A., 2010. "Interpretación Sísmica y Geofísica de Yacimiento, PDVSA, Caracas, Venezuela.*
- Lastra, M., Domínguez, A. H., 2007. La Migración Pre Stack en Profundidad y su Influencia en el Futuro Exploratorio en la Zona Noroccidental de Cuba. II Convención de Ciencias de la Tierra, La Habana, Cuba.*
- Tamayo, Y., Veiga, C., Domínguez, A. H., 2011. Aplicación Preliminar de Atributos Sísmicos en El Bloque Central del Yacimiento de Boca de Jaruco. IV Convención de Ciencias de la Tierra, La Habana, Cuba.*
- Turhan T, Koehler, F, Sheriff E, 2001. Complex seismic trace analysis. Geophysics. SEG. 44 (6): 1041 – 1063.*

EVALUACIÓN DE ADQUISICIONES SÍSMICAS MARINAS REALIZADAS EN CUBA

ROMEL JOSÉ OJEDA CÉSAR

Centro de Investigaciones del Petróleo.

Churruca No 481 e/ Vía y Washington, Cerro, La Habana, CP 12000

Correo: romel@digj.cupet.cu

RESUMEN

El trabajo tiene como objetivo evaluar la eficiencia de tres adquisiciones sísmicas marinas realizadas en Cuba, que tiene en cuenta parámetros de adquisición determinantes para su calidad, lo cual constituye actualmente un problema, toda vez que este tipo de evaluación no se hace frecuentemente, por lo que de realizarse, será de utilidad para la proyección de trabajos futuros que no repitan errores precedentes de adquisición. La evaluación se limita a tres adquisiciones realizadas, próximas a uno de los yacimientos petrolíferos más conocidos del país, una de ellas en 2D y el resto en 3D. Se entiende por eficiente la adquisición cuyo diseño permite obtener una geometría adecuada, una buena relación señal/ruido, una longitud del alejamiento apropiada y relacionada con la longitud del registro y la profundidad de los objetivos geológicos, una reducción del *aliasing* temporal y espacial y una buena resolución sísmica, tanto vertical como horizontal. En este estudio se evalúan objetivamente dichos parámetros para los tres proyectos en cuestión, con énfasis en el uso del software de diseño de adquisición sísmica y el control de calidad de ésta en tiempo real, una herramienta sumamente necesaria para la actividad, de la cual carece el área de exploración de Cupet. Se listan los resultados del trabajo y se destaca el hecho de que si bien se trata de un análisis crítico sobre las adquisiciones que se evalúan, este se apoya en los resultados parciales del procesamiento de los datos sísmicos, lo cual sería erróneo no tener en cuenta.

ABSTRACT

The objective of this paper is to evaluate the efficiency of three marine seismic acquisitions carried out in Cuba, efficiency that keeps in mind decisive parameters of acquisition for its quality, that constitutes a problem at the moment, since this kind of evaluation it is not done frequently, so if it is carried out, it will be of utility for the projection of future works that don't repeat previous errors of acquisition. The evaluation is limited to three acquisitions carried out next to one of the most known oilfield of the country; one of them 2D and the other two 3D and it was evaluated their efficiency it is understood as efficient the one whose design allows to obtain an appropriate geometry, a good signal to noise ratio, an appropriate offset related to the recording length and the depth of the geologic objectives, a reduction of the temporary and spatial aliasing and a good seismic resolution, both vertical and horizontal ones. Consequently, the work evaluates those parameters objectively for the three projects in question. The study emphasis in having software for seismic acquisition design and quality control in real time of it, an extremely necessary tool for the activity, of which it is a lack in the area of exploration of Cupet. The results of the work are listed and it is outstanding the fact that although it is a critical analysis about the acquisitions that are evaluated, it is supported by the partial results of the seismic data processing; it would be erroneous not to keep it in mind.

INTRODUCCIÓN

En este trabajo se evalúa el resultado de la adquisición sísmica marina de tres proyectos adyacentes que, por razones de confidencialidad, se les llamará Proyecto A, Proyecto B y Proyecto C.

Una adquisición sísmica se considera eficiente si cumple ciertos criterios de calidad que tienen en cuenta la geometría de adquisición, una buena relación señal/ruido, la disminución o ausencia de *aliasing*, la longitud de los alejamientos u *offsets* para los objetivos objetos de mapeo, así como la resolución vertical y horizontal.

Debe quedar claro que, debido a las limitaciones propias de un trabajo de este tipo, se mencionarán solamente los parámetros que pueden influir en el tipo de evaluación a realizar y no otros.

Generalmente, este tipo de evaluación que tiene en cuenta la eficiencia de los levantamientos sísmicos marinos realizados en Cuba y que se basa fundamentalmente en parámetros de adquisición determinantes para su calidad no se realiza. Este problema condujo al autor al objetivo de evaluar al menos tres de las últimas adquisiciones sísmicas marinas realizadas en el litoral norte cubano, pues los resultados de esa evaluación podrán ser de utilidad para la proyección de trabajos futuros.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los materiales empleados fueron informes de operaciones de las adquisiciones sísmicas realizadas. Los informes de los proyectos B y C estaban incompletos, por lo que en este caso el autor apeló a su propia información y experiencia.

Este trabajo también se apoya en la teoría y metodología de la adquisición sísmica marina y en resultados del procesamiento de los datos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se realizó una evaluación bastante exhaustiva de la eficiencia de las tres adquisiciones estudiadas, algo que habitualmente no se hace. Como criterio se tomaron parámetros ya establecidos, lo cual no suele ser una práctica en el sistema Cupet, incluida su área de exploración

Como resultado de esta evaluación, se obtuvo que los diseños de las tres adquisiciones objeto de estudio fueron adecuados para los objetivos propuestos, ya que se trata de casos estándar para los proyectos A y B, con características típicas de adquisiciones 2D y 3D, respectivamente. Para el diseño del Proyecto C no sucedió lo mismo, lo cual obliga a que en un futuro esta adquisición sea previamente simulada, recomendación que se ha venido reiterando (Ojeda César y Arriaza Fernández, 2011) y para la que se necesita de software de diseño.

A favor de este último proyecto, es necesario señalar que el resultado del procesamiento sísmico fue bueno, debido entre otras cosas a un seguimiento continuo del mismo, con información semanal, vía portal seguro del cliente y supervisión de tres visitas al centro de procesamiento.

Parámetros de adquisición

Las tablas I, II y III muestran los parámetros de adquisición para cada proyecto estudiado.

Tabla I. Parámetros de adquisición para el Proyecto A.

Parámetros	Especificaciones
Tipo de adquisición	2D
Profundidad del cable	Un cable de 6000 m arrastrado a 9 m de profundidad.
Profundidad de la fuente	Arreglo de una fuente a 7 m de profundidad.
Volumen de las fuentes	4200 plg ³
Distancia entre puntos de explosión	25 m
Distancia entre grupos	12,5 m
Paso de muestreo	2 ms
Tiempo de registro	9000 ms
Multiplicidad	12000 % (2D)

Tabla II. Parámetros de adquisición para el Proyecto B.

Parámetros	Especificaciones
Tipo de adquisición	3D
Profundidad del cable	Cuatro cables de 6000 m, separados a 100 m y arrastrados a 7 m de profundidad. Al final del proyecto sólo un cable de 3000 m y arrastrado a 6 m de profundidad.
Profundidad de la fuente	Arreglo de dos fuentes espaciadas a 50 m y a 6 m de profundidad.
Volumen de las fuentes	4000 plg ³ , al inicio, reducida a 2000 plg ³ al final.
Distancia entre puntos de explosión	18,75 m (<i>flip-flop</i>)
Distancia entre grupos	12,5 m
Paso de muestreo	2 ms
Tiempo de registro	6000 ms
Multiplicidad	8000 % (3D)

Tabla III. Parámetros de adquisición para el Proyecto C.

Parámetros	Especificaciones
Tipo de adquisición	3D
Profundidad del cable	Cuatro cables de 8000 m, separados a 100 m y arrastrados a 8 m de profundidad.
Profundidad de la fuente	Arreglo de dos fuentes espaciadas a 50 m y a 6 m de profundidad.
Volumen de las fuentes	4000 plg ³
Distancia entre puntos de explosión	18,75 m (<i>flip-flop</i>)
Distancia entre grupos	12,5 m
Paso de muestreo	2 ms
Tiempo de registro	6000 ms
Multiplicidad	10 800 % (3D)

El sector este del Proyecto A se adquirió con tal grado de densidad que puede ser asimilada como una pseudo 3D. Por otro lado, todo el volumen adquirido se procesó mediante el montaje de un cubo rectangular al estilo de un procesamiento netamente 3D.

Del análisis de las tablas anteriores, resulta evidente que el Proyecto A se adquirió mediante un levantamiento sísmico 2D, mientras que los proyectos B y C se adquirieron mediante un levantamiento sísmico 3D, aunque un volumen 12 veces mayor en el caso del Proyecto C comparado con el Proyecto B.

El hecho de que se trate de una 2D o una 3D no es determinante para el tipo de análisis que el autor se propone hacer en este trabajo. Lógicamente, al tratarse de una adquisición bidimensional en uno de los casos y tridimensionales en los otros dos, habrá que tener en cuenta las variaciones laterales de velocidad y la deriva o plumaje del cable que tienen una influencia menos marcada o llevan tratamiento diferente en el caso de la 3D.

En cada uno de los proyectos mencionados, el posicionamiento se realizó con sistemas integrales de navegación similares y avanzados, Spectra en el caso de los Proyectos A y B, y Orca en el caso del C, por lo que esto no resulta determinante en el tipo de evaluación que se propone. Tampoco lo es el tipo de sistema de adquisición sísmica empleado, todos de 24 bits y amplio rango dinámico, por encima de los 125 dB, con todos los datos adquiridos en formato secuencial de traza SEG-D 8058.

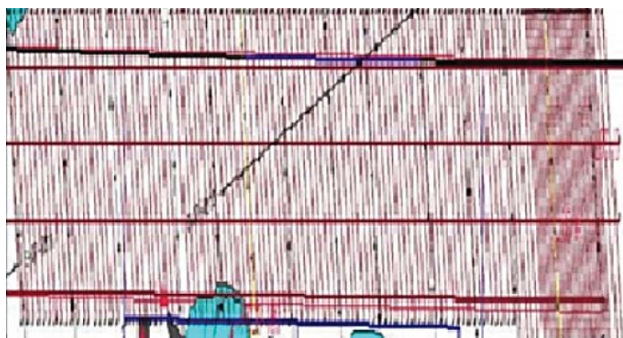


Figura 1. Geometría de adquisición 2D, correspondiente al Proyecto A.

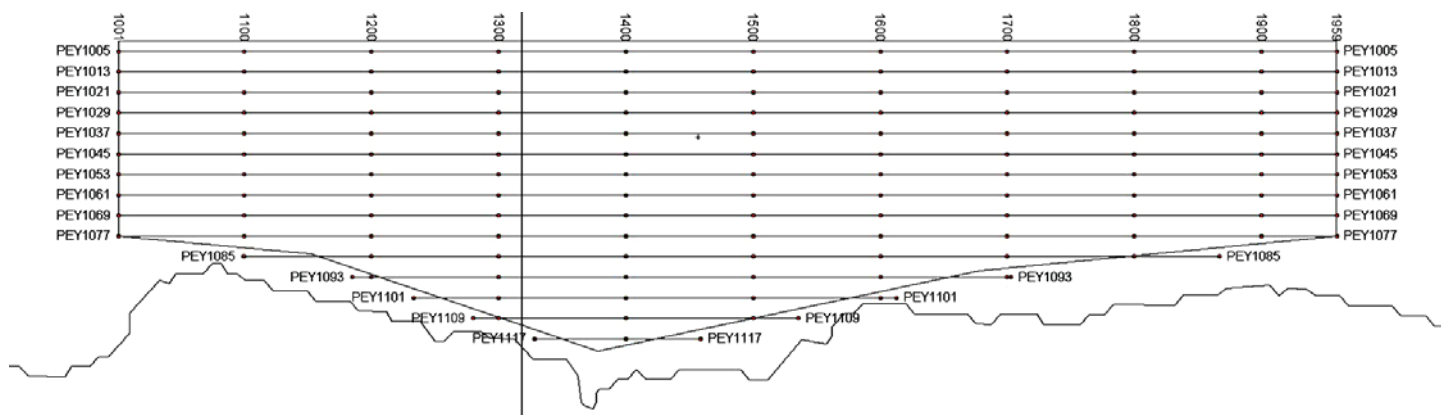


Figura 2. Geometría de adquisición 3D de azimuth estrecho, correspondiente al Proyecto B.

De antemano queda descartada entonces la influencia de los sistemas de adquisición en el análisis.

Evaluación de la eficiencia de las adquisiciones

Geometría

Desde el punto de vista geométrico, el primero de los proyectos se realizó mediante una geometría estándar 2D, con una distancia entre grupos de 12,5 m y una distancia entre puntos de explosión de 25 m, por lo que la distancia entre puntos medios comunes (CMP, por sus siglas en inglés) fue de 6,25 m. La adquisición se realizó con un cable de 6000 m y 480 canales, con el que se obtuvo una buena cobertura (ver Tabla I). Esta geometría satisfizo los objetivos geológicos planteados con el trazado de una malla rectangular compuesta de líneas transversales en la dirección del buzamiento y cuatro líneas de enlace en la dirección longitudinal o por el rumbo, con una densidad mayor hacia la parte este del proyecto por constituir el objetivo de mayor interés de la adquisición (Figura 1).

La geometría de adquisición del Proyecto B corresponde a una adquisición estándar 3D. Se trata de una adquisición típica de azimuth estrecho (Figura 2). En el caso del Proyecto C, la adquisición es bien atípica, pues se combinan *patches* o porciones de área de azimuth estrecho, pero adquiridos de una manera estándar hacia el norte del proyecto y con ángulos de inflexión (*doglegs*) hacia el oeste y sur del proyecto, respectivamente (Figura 3). Como en el caso del Proyecto A, la cobertura fue también adecuada, de 16000 % en el B y 21600 % en el C, para una fuente de 8000% en el B y 10800 % en el C cuando se les trata como adquisiciones 3D.

En la Figura 4 se muestra un ejemplo de mala geometría que fue solucionado de inmediato. Este problema se debió a una mala distribución de canales en un cable. El control de geometría en cada uno de los proyectos 3D se realizó mediante la ejecución de corrección cinemática lineal (LMO, por sus siglas en inglés) y a través de procedimientos conocidos, como el enmascaramiento de los cañones (Ojeda César y Arriaza Fernández, 2011).

En cuanto al Proyecto C, este tipo de adquisición se realizó por primera vez en Cuba y constituye casi una novedad mundial, incluso presentada como tal por la compañía que brindó el servicio. Esta geometría, así como el resto de la adquisición, tienen muchas aristas aun por pulir, ya que trajo aparejada una

serie de problemas no sólo de adquisición, sino de procesamiento del dato sísmico.

Relación señal/ruido

La relación señal / ruido es igual a la raíz cuadrada de la cobertura, en el caso del ruido aleatorio (Dobrin & Savit, 1988). Existe la tendencia a creer que el ruido en su mayoría es aleatorio, por lo que para su atenuación bastaría una buena cobertura, pues, en la medida que crezca, también podría eliminarse o al menos

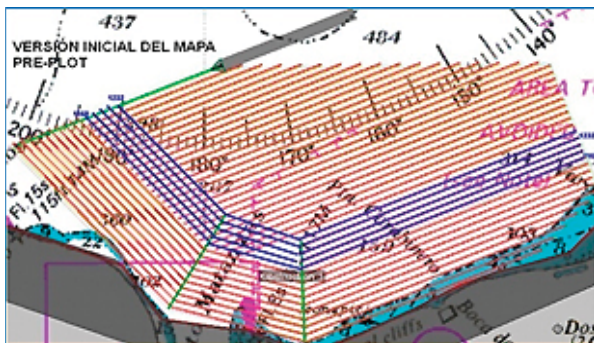


Figura 3. Geometría de adquisición atípica 3D, con puntos de inflexión o doglegs, correspondiente al Proyecto C.

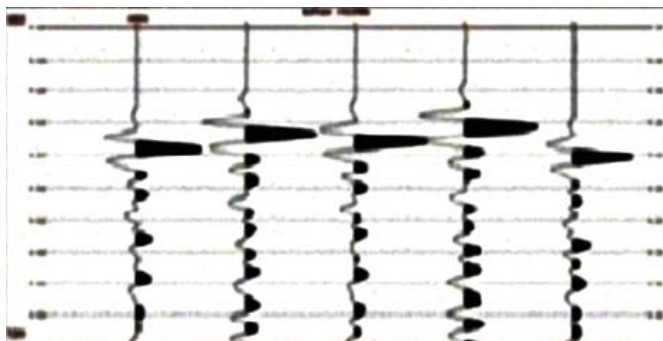


Figura 4. Problemas de geometría por mala posición de los canales 1 y 4 del cable 1, correspondiente al Proyecto B.

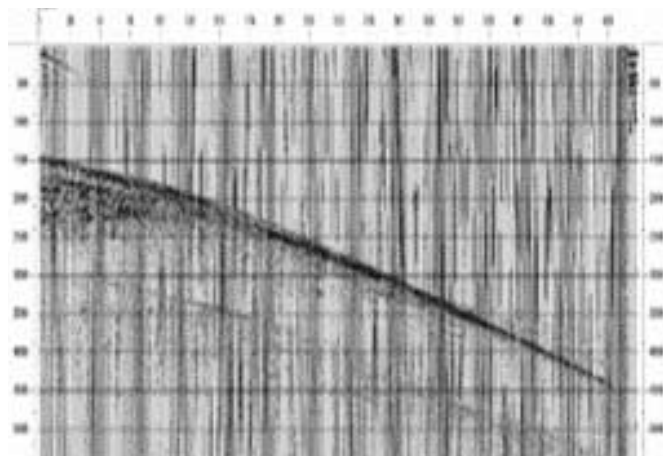


Figura 5. Presencia de ruido de oleaje en un sismograma del Proyecto A.

atenuarse. Esto no es rigurosamente cierto; de hecho, existen otros tipos de ruidos con los que es mucho más difícil lidiar.

Desde el punto de vista del ruido aleatorio, el comportamiento fue más o menos similar en los tres casos, ya que la cobertura se comportó de manera similar, aunque hubo un mayor deterioro en el Proyecto A debido a que al oleaje se le sumó el efecto de las corrientes, que en conjunto crearon el *feathering* o plumaje y empujaron al cable fuera de la línea adquirida (Liner, 2004).

El ruido de oleaje tuvo igualmente un comportamiento parecido, pues todos los proyectos se adquirieron entre los meses de mayo y junio, con estabilidad de las olas. El ruido fue menor, aunque no por ello descartable, en el caso del Proyecto A, pues el cable se arrastró un metro más profundo que en los demás proyectos y estuvo menos expuesto al efecto del oleaje. Aún así, fue posible notar su presencia, como se muestra en la Figura 5.

En el caso del Proyecto C, al ruido de oleaje se le sumó un ruido por doblaje del cable, conocido como *bending noise*, muy dañino y difícil de atenuar.

En la Figura 6 se muestra una combinación de ambos ruidos, en la que prevalece el ruido de oleaje, después de atenuado mediante un algoritmo que trabajaba en el dominio F-X.

La evaluación lleva un análisis más serio en el caso de un ruido coherente muy pernicioso. Este es un ruido lineal inherente a toda adquisición sísmica, con mucho peso en el caso del Proyecto C, pues al ruido de oleaje en los puntos de inflexión se le añade un ruido lineal proveniente de planos de alejamiento diferentes, que hace difícil lidiar con él. Su atenuación implicó comprometer eventos primarios, por lo que tuvo que realizarse con sumo cuidado para minimizar la afectación a dichos eventos. Esta atenuación requiere de mucha habilidad del procesador, ya que se corre el riesgo de atenuar la señal útil en la misma medida que se atenúa el ruido, o derealizar una atenuación incompleta del ruido en aras de preservar la señal. Ambos casos conducen a una disminución de la relación señal/ruido.

La Figura 7 muestra un caso de varios sismogramas correspondientes al Proyecto C, con presencia de ruidos lineales. Esta situación no fue diferente en los demás proyectos.

Para lidiar con los ruidos, es recomendable utilizar *Stack Array* en 2D. De acuerdo con este método, la fuente debe colocarse en el medio de los centros de receptores (Pritchett, 1990) o aumentar la densidad de líneas navegadas por km^2 en el diseño 3D, pero ambas técnicas implican gasto, y en las adquisiciones sísmicas siempre hay un compromiso entre la calidad requerida y el costo de las mismas.

Aliasing temporal y espacial

A partir de los datos de las Tablas I, II y III, es posible apreciar que los tres proyectos fueron adquiridos con igual paso de muestreo (2 ms), por lo que desde el punto de vista del *aliasing* temporal el comportamiento es el mismo, debido a que la frecuencia de Nyquist fue de 250 ms.

Se conoce que la frecuencia de Nyquist es igual a la frecuencia de muestreo sobre 2. Lang (1991) plantea que $f_a = f - f_n$, donde f_a es la salida ambigua o con *aliasing*, f es la frecuencia de entrada y f_n es la frecuencia de Nyquist.

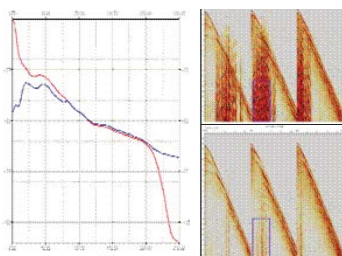


Figura 6. Sismogramas con presencia de una combinación de ruido de oleaje y de doblaje del cable y su atenuación (derecha), donde puede apreciarse el espectro de amplitud de la señal antes y después de la atenuación del ruido (izquierda).

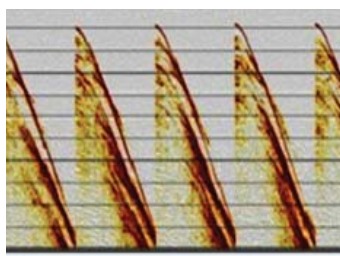


Figura 7. Sismogramas con fuerte presencia de ruidos lineales.

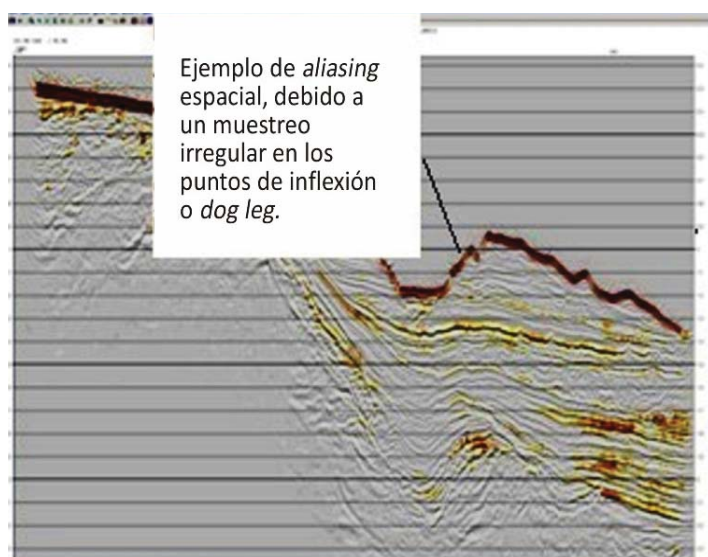


Figura 8. Presencia de aliasing espacial debido a un incorrecto muestreo de trazas por longitud de onda, acentuado en las líneas con puntos de inflexión.

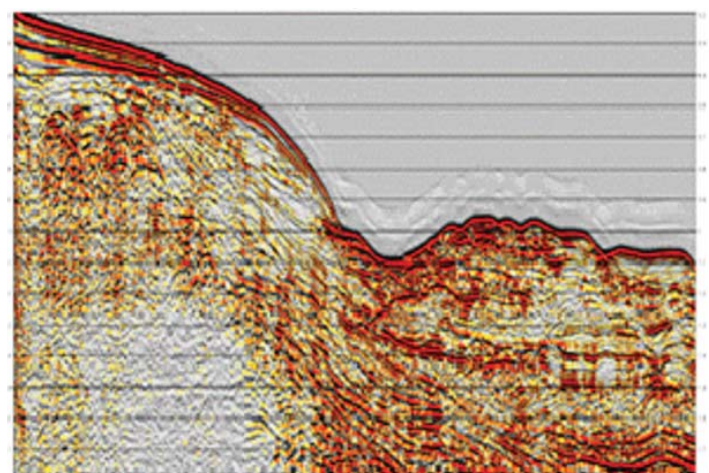


Figura 9. Suma después de la regularización de la malla, mediante interpolación REG3D, donde se observa una notable reducción o la casi eliminación de aliasing espacial.

En todos los casos, los sistemas de adquisición utilizaron filtros anti alias corta altas o pasa bajas, iguales a 0,8 fn.

Es necesario aclarar que el *aliasing* consiste en una ambigüedad donde se solapan bajas frecuencias por encima de un determinado valor de frecuencia, fenómeno que se resuelve con el filtro mencionado.

La diferencia entre estos tres proyectos resulta más seria desde el punto de vista del *aliasing* espacial, que se presenta asociado al hecho de muestrear a razón de menos de dos muestras por longitud de onda (λ). Tienen un peso fundamental la distancia entre grupos de receptores, que es la misma para los tres proyectos; y la distancia entre puntos de explosión, que resulta diferente para el caso del Proyecto A (25 m). En los demás proyectos, esta distancia fue de 18,75 m.

Resulta un caso mucho más complejo el Proyecto C, pues su comportamiento fue el mismo en el caso de las líneas rectas, adquiridas hacia el nordeste del área, pero no así en las líneas con puntos de inflexión adquiridas hacia el oeste y sur del proyecto, donde se produjeron saltos o tiros saltados, ya que el sistema de navegación Orca predecía una distancia de 18,75 m constante, previamente programada. Esta distancia no se encontró al girar el barco para suavizar la curvatura de dichos puntos, debido a que la distancia entre puntos previamente proyectados se obtiene de la proyección de los puntos de explosión realizados. Esto hizo que en muchos de esos tiros la distancia fuera mayor a los 18,75 m previstos, lo cual rompió con un muestreo constante que trae aparejado la aparición de *aliasing* espacial, fenómeno que se amortiguó un poco durante el procesamiento mediante la interpolación y disminución del ángulo de migración.

En la Figura 8 se observa un ejemplo de la presencia de *aliasing* espacial. La Figura 9 muestra un caso de clara reducción de este *aliasing*, después de regularizar la malla con el empleo de la interpolación de trazas.

Longitud del alejamiento u *offset*

El diseño de la distancia explosión-recepción, conocida como alejamiento u *offset*, en el Proyecto A puede considerarse como apropiado, pues se adquirió con un cable de 6000 m de longitud y una longitud del registro de 9000ms que, además de satisfacer la relación *offset*-profundidad de los objetivos geológicos, mantiene una correspondencia adecuada entre éste y el tiempo de registro. Esto se complementa con una potente fuente de energía que contribuyó a una mayor penetración y, por tanto, a la obtención de información profunda o de *offset* lejanos.

Algo similar ocurre con el Proyecto B, que presenta una longitud de registro en armonía con el alejamiento y la profundidad de los objetivos geológicos. Por lo general, se recomienda que ambos sean iguales. Esto se logró sobre todo hacia la costa, por la necesidad de protección de los cables, cuya longitud se redujo a 3000 m, similar a la profundidad de los objetivos en el área.

En el caso del Proyecto C no ocurrió lo mismo, ya que la profundidad de los objetivos geológicos no justifica el uso de un alejamiento de 8000 m.

Se pone de manifiesto, por lo tanto, la importancia que tiene la interrelación entre varios parámetros para determinar una iluminación adecuada del objetivo u horizonte de interés, que en la mayoría de los casos se asocia con la dimensión del alejamiento u *offset*, algo que se tuvo en cuenta en el diseño de dos de las adquisiciones que aquí se evalúan. Es preciso señalar que intervienen además otros factores, tales como la profundidad de dicho objetivo, que interviene en el cálculo del radio de Fresnel y la apertura de migración. Esta última variable se obtiene a partir de la fórmula:

$$X_{mig} = Z \tan \theta$$

Donde:

Z: profundidad del objetivo

θ : ángulo de inclinación de los estratos

Sheriff (2002), en su *Enciclopedia Dictionary of Applied Geophysics*, enuncia la apertura de migración como la extensión adicional de un levantamiento sísmico necesaria para visualizar correctamente los datos en el área de cobertura completa requerida, después de la migración.

En la Figura 10 es posible observar un ejemplo de *offset* y su relación con la longitud del registro, correspondiente al Proyecto A, donde se destaca una buena relación de la longitud del *offset* con la longitud del registro, no así en el caso del Proyecto C (Figura 11), donde es notable la poca información que aportan los *offsets* lejanos, pues sólo se registraron 6 s de datos.

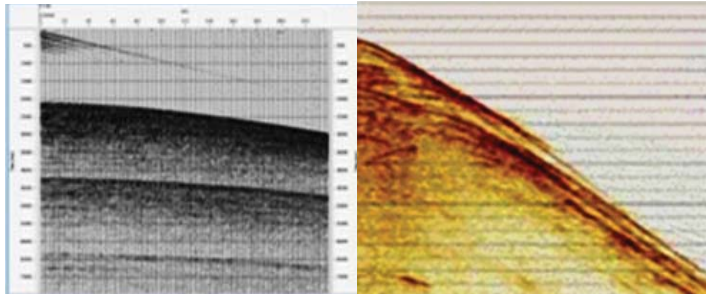


Figura 10. Ejemplo de *offset* y de una buena relación con la longitud del registro, correspondiente al Proyecto A.

Figura 11. Ejemplo de *offset* y de una mala relación con la longitud del registro, correspondiente al Proyecto C.

Resolución vertical y horizontal

La resolución vertical permite destacar la distancia entre el tope y la base de una formación. La resolución vertical es igual a un cuarto de la longitud de onda. De acuerdo con la ecuación $\lambda = VT \text{ o } \lambda = v/f$, es obvio que esta resolución depende de la velocidad promedio del reflector y de las frecuencias máximas recuperables para un reflector. La resolución vertical (RV) está definida por la fórmula:

$$RV = \lambda/4$$

Es decir:

$$RV = \text{Velocidad promedio} / 4 \times \text{Frecuencia máxima}$$

La resolución horizontal se define como el diámetro de Fresnel, a veces simplificada como el radio de Fresnel, a partir de la expresión:

$$F_n = 2 \sqrt{(Z + \lambda/8)^2 - Z^2}$$

En esta ecuación, Z es la profundidad de los objetivos.

Algunos autores simplifican aún más:

$$R_h = RV / \sin \theta$$

En esta expresión, θ es el ángulo de inclinación de los estratos.

A $\lambda/8$ se le conoce en inglés como *detectability*. Este término no tiene una traducción clara al español, pero viene siendo algo así como *aquello que se puede detectar*. Se intenta que ese radio sea el menor posible, de manera que la resolución es mayor para los eventos someros. Durante el proceso de migración, ese valor se reduce en unas seis veces.

La resolución lateral (RL) está definida por la ecuación:

$$RL = \lambda/2 = \text{Velocidad promedio} / 2 \times \text{Frecuencia máxima}$$

En la práctica, no es el tipo de resolución que más se tiene en cuenta.

En el caso de estudio, es de suponer que el comportamiento sea bastante similar dado que el campo de velocidad se presenta de la misma manera y la absorción de los componentes de alta frecuencia se comporta de modo parecido, con algún detrimento en el caso del Proyecto A, donde el cable fue arrastrado a 9 m y los demás a 8 m.

Si se asume como cierto que para un horizonte localizado a 1000 m la velocidad promedio en estos proyectos es de alrededor de 3200 m/s y la frecuencia fundamental es de 40 Hz, podría esperarse una resolución vertical de unos 20 m. Sería posible entonces distinguir un paquete cuya diferencia entre el tope y la base o espesor fuera de 20 m. En este caso fue algo menor, pues no se tomó en cuenta la frecuencia máxima y se esperó una mejora durante el proceso de convolución. Para el caso de resolución horizontal, es de esperar un valor de 142 m, que se verá sumamente mejorado durante el proceso de migración, al reducirse en unas seis veces.

La Figura 12 muestra una sección 2D de la 3D adquirida en el Proyecto B, donde es posible adelantar una buena resolución de la imagen sísmica, pues se trata de una suma en un estado primario, conocida como suma bruta. En la Figura 13 es posible observar un resultado final correspondiente al Proyecto C, donde se observa una buena resolución sísmica, a pesar de los problemas ya mencionados, relacionados con un doblaje y profundidad variable del cable en los puntos de inflexión, con pérdida de componentes de alta frecuencia.

Software de diseño de adquisición y de control de calidad de la adquisición

En la industria sísmica se han establecido algunos software de diseño de adquisición y de control de calidad que se convierten

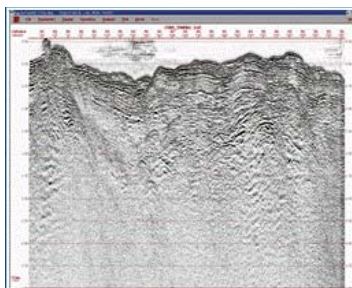


Figura 12. Ejemplo de una buena resolución sísmica, aun en un estadio temprano del procesamiento, correspondiente a una sección inline o de la línea en la dirección del rumbo (Proyecto B).

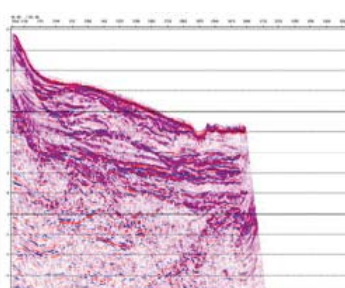


Figura 13. Ejemplo de una buena resolución sísmica en un estadio avanzado del procesamiento, correspondiente a una sección inline, del Proyecto C.

en una herramienta imprescindible de trabajo. Podrían mencionarse, entre otros, Mesa, Omni, Nucleus y Vista.

Lamentablemente, los especialistas cubanos encargados del diseño y control de calidad de las adquisiciones sísmicas, como supervisores a bordo de las embarcaciones que realizan la adquisición, carecen de tales herramientas, que les hubieran permitido realizar su trabajo en mucho mejores condiciones en cada uno de los tres proyectos objetos de evaluación, así como un control de calidad más efectivo, en tiempo real, por lo que se ha apelado muchas veces a la experiencia.

En estas condiciones, ha sido necesario aceptar la propuesta de la propia contratista encargada de realizar el servicio, convencidos de que se empleó la mejor opción de adquisición posible, cuando en la práctica y a lo largo de la experiencia adquirida se ha podido ver que otras variantes hubieran resuelto en mejores condiciones el objetivo geológico propuesto (Ojeda y Zambrana, 2003; Ojeda et al., 2006).

CONCLUSIONES

- Fueron evaluadas con sentido crítico algunas de las adquisiciones sísmicas marinas realizadas en el litoral norte cubano. Se prefirió la evaluación de tres de ellas, con una relación geográfica apropiada.
- Se ha podido constatar que, sin importar el tipo de adquisición realizada, si se tiene en cuenta un diseño con parámetros adecuados que hacen de una adquisición eficiente, los objetivos de exploración pueden ser logrados, aunque por razones obvias siempre será mejor realizar una adquisición 3D.
- Resulta de suma importancia contar con software de diseño de adquisición y control de calidad, que permiten realizar no sólo el diseño, sino también la modelación y simulación de la adquisición antes de ser adquirida.

BIBLIOGRAFÍA

- Dobrin, M. B., Savit C. H., 1988. *Introduction to Geophysical Prospecting*. Fourth Edition. Singapore.
- Lang, D. G., 1991. *Seismic Data Acquisition. A Simplified Overview of Theory and Technology*.
- Liner, C. L., 2004. *Elements of 3D seismology*. Second Edition. Oklahoma: Penwell Corporation.
- Ojeda, R., Zambrana, A., 2003. *Informe sobre la adquisición sísmica marina 3D*. Cuba Costa Afuera, Bloque 7. Inédito.
- Ojeda César, R., Arriaza Fernández, G., 2011. *Informe sobre la supervisión de la adquisición sísmica marina 3D en el Bloque II, Área Marina de Varadero Oeste, Provincia de Matanzas*. Inédito.
- Ojeda, R., Arriaza, G., Zambrana, A., 2006. *Informe sobre la adquisición sísmica marina 3D en los Bloques 6 A, 7 A, Bloques de Repsol y Líneas de Enlace 2D al Norte de La Habana*. Inédito.
- Pritchett, W. C., 1990. *Acquiring Better Seismic Data*. London: Chapman and Hall.
- Sheriff R. E., 2002. *Encyclopedic Dictionary of Applied Geophysics*. Fourth Edition. OnlineLink, Society of Exploration Geophysicists. 13 Geophysical References Series. Disponible en: www.seg.org

[illegible]

Centro de Negocios Miramar, Edificio Habana, Oficina 105A
Ave 3ra e/ 78 y 80, Playa, La Habana, Cuba. CP: 11300
Telf. +53 7 2042191

EL GEORRADAR EN LA EXPLORACIÓN DE LAS CORTEZAS SAPROLÍTICAS. CASO DE ESTUDIO YACIMIENTO YAMANIGÜEY, REGIÓN DE MOA

JORGE ACOSTA BREAL¹, MARÍA M. GENTOIU¹, JOSÉ L. MOURLOT¹, ORLANDO CARRAZ HERNÁNDEZ²

1. Empresa Geominera Oriente

Carretera de Siboney km 2 1/2. Santiago de Cuba, Cuba.

2. Instituto Superior Politécnico Jose Antonio Echeverría

Calle 114, # 11901, e/ Ciclovía y Rotonda, Marianao. CP 11500, Habana 15, La Habana, Cuba.

Correo: (1) jacosta@geominera.co.cu

RESUMEN

Los depósitos saprolítico níquelíferos localizados en la región norte oriental de Cuba despiertan cada vez mayor interés por su importancia como materia prima para el desarrollo de la industria ferro níquelífera, una de las prioridades económicas del país.

Estos depósitos, caracterizados por la alta complejidad en sus parámetros geológicos y respuestas geofísicas, se estudian tradicionalmente a través de redes de pozos de perforación que resultan insuficientes para modelar adecuadamente el espesor de la capa útil.

En el yacimiento saprolítico Yamanigüey se utilizó, por primera vez en Cuba, el método geofísico llamado georradar, con el objetivo de modelar de forma continua el espesor de la capa saprolítica y cartografiar las características del contacto con las rocas duras del basamento. Para cumplir la meta propuesta se usó un equipo georradar que cumple los requisitos preestablecidos de profundidad de estudio y precisión deseada.

Como resultado de la investigación, se obtuvo la cartografía de los espesores de la capa saprolítica, además de una imagen detallada del contacto entre la capa saprolítica y las rocas duras del basamento, cuya definición constituye una información muy valiosa para la futura planificación minera, y la detección de relictos de rocas duras dentro de la capa saprolítica.

Finalmente, en este trabajo se discute la correlación existente entre los resultados geológicos y geofísicos.

ABSTRACT

The saprolitic - nickeliferous deposits located in the north - eastern region of Cuba aroused increasing interest because of its importance as a raw material for the development of the ferrous - nickeliferous industry, one of the economic priorities of the country. These deposits are characterized by a high complexity in their geological and geophysical parameters, and are traditionally studied through networks of boreholes, insufficient to adequately model the variable thickness of the wear layer. At the saprolitic site Yamanigüey we used, for the first time in Cuba, the GPR geophysical method, aiming to model continuously the thickness of the layer and mapping saprolitical features contacting with the hard basement rocks.

To achieve the proposed results a GPR system which meets the tradeoff between depth of study and desired precision, was used.

As a result of this investigation, the following results were obtained:

- Reliability of the method in mapping the thickness of the saprolitic layer.
- Detailed image of the contact between the saprolitic layer and the hard basement rocks. The definition of this boundary represents a very valuable information for future mine planning.
- Detection of hard rock relicts within the saprolitic layer.

The correlation between the geological and geophysical results is discussed in the paper.

INTRODUCCIÓN

En la región Norte - Oriental de Cuba se localizan importantes yacimientos lateríticos saprolíticos que sustentan una importante producción de níquel y cobalto en una industria en la que se invierten cuantiosos recursos. La preparación de las reservas geológicas que garanticen el desarrollo de la industria niquelífera nacional se convierte en un objetivo priorizado de los geólogos y geofísicos cubanos.

Tras el progresivo agotamiento de los mejores yacimientos lateríticos, el futuro de esta industria se sustenta en la exploración y explotación de las menas saprolíticas, con una amplia difusión en la región. La gran variabilidad de los parámetros de cálculo de estas menas, especialmente del espesor, estimula los intentos de hallar metodologías que permitan, de forma confiable y económica, modelar dicho parámetro.

En este artículo se demuestra que la utilización de la técnica geofísica conocida como georradar o GPR (*Ground Penetrating Radar*) aporta información geológica confiable para realizar un eficiente cálculo de recursos y proceder a una adecuada planificación minera, con más eficiencia y menos costos que mediante la metodología tradicional (perforación de pozos).

La técnica GPR permite obtener imágenes de alta resolución de la mena saprolítica, con las cuales es posible delimitar:

- La frontera ocre estructural inicial (saprolita fina) y la roca madre lixiviada.
- La frontera entre la roca madre lixiviada y el basamento rocoso.
- La presencia de núcleos de rocas dentro de las saprolitas.

Debido a la alta variabilidad de la potencia de las capas productivas, sobre todo en el límite con el basamento, para lograr su modelación adecuada mediante perforaciones serían necesarias redes de 8m x 8m, según los resultados de varios investigadores cubanos (e.g. Lavaut, 1998), lo que elevaría considerablemente los costos de la investigación. El georradar

permite definir esas interfaces mediante imágenes continuas con una alta resolución lateral y vertical del perfil geológico.

MATERIALES Y MÉTODOS

Breve descripción del ambiente geológico

Los yacimientos lateríticos saprolíticos de la región de Moa, en la parte noreoriental de Cuba, comenzaron a ser estudiados en la década de los años 50 del siglo pasado por compañías estadounidenses, pero solo a finales de ese decenio se comienzan a explotar, luego de la instalación de una moderna industria de proceso ácido en Nicaro.

La parte oriental de Cuba incluye seis macizos de rocas máficas y ultramáficas ofiolíticas con un área total de 3400 km², de los cuales 835 km² (el 25%) están cubiertos eluvialmente por una corteza de intemperismo laterítica de 10m de potencia promedio, desarrollada en terrenos amesetados y de suave pendiente (principalmente 5 a 15°), con cotas entre 50 y 900 m (Maastrichtiano - Paleoceno hasta el Reciente). La mayor parte del área de los macizos está constituida por ultramafitas harzburgitas serpentinizadas en un 40 a 90%, de procedencia oceánica toleítica (23% de olivino y 76% de piroxeno rómbico enstatita).

La corteza de intemperismo constituye un cuerpo geológico zonal formado sobre un substrato de rocas consolidadas (basamento o rocas madres), bajo la acción de los factores de meteorización, en los que juega un papel decisivo el tipo o variedad de roca madre, la pendiente del terreno, las particularidades microclimáticas y el régimen hidrodinámico de la localidad (Lavaut et al., 2000). Según su composición zonal, se establecen tres grandes familias de perfiles de intemperismo (lateríticos, laterítico saprolíticos y saprolíticos), que se dividen en seis zonas litológicas (Lavaut, 2003) (Tabla I).

Tabla I. Estructura litológica de las cortezas de intemperismo de ultramafitas de Cuba Oriental (Tomado de Lavaut, 2003).

Zonas litológicas genéticas	Litotipos cubanos	Léxico literario	Tipos de perfiles de intemperismo
Zonas de deshidratación y globulización de hidróxidos de hierro	Ocre inestructural con concreciones ferruginosas (OICP)(perdigón y coraza)	Ferricreta	Inestructural laterítico goethítico-hematítico gibbsítico
Zona de ocretización completa	Ocre inestructural sin concreciones ferruginosas (OISP)	Limonita= Tierra roja	Inestructural laterítico goethítico-gibbsítico
Zona de ocretización completa	Ocre estructural final (OEF)	Limonita= Saprolita fina	Estructural laterítico goethítico-gibbsítico
Zona de ocretización parcial	Ocre estructural inicial o semiocre (OEI)	Saprolita media	Estructural saprolítico goethítico-serpentinico
Zona de lixiviación y ocretización inicial	Roca madre lixiviada y ligeramente ocretizada (RML)	Saprolita gruesa	Estructural saprolítico serpentínico-arcilloso
Zona de agrietamiento	Roca madre agrietada con mineralización zonal hipergénica filoniana y masiva (RMA)	Roca madre (basamento)	Estructural saprolítico serpentínico querolítico

Geología del yacimiento

Los trabajos se desarrollaron en el yacimiento saprolítico Yamanigüey, donde gran parte del perfil laterítico fue explotado por la empresa Pedro Soto Alba (Figura 1).

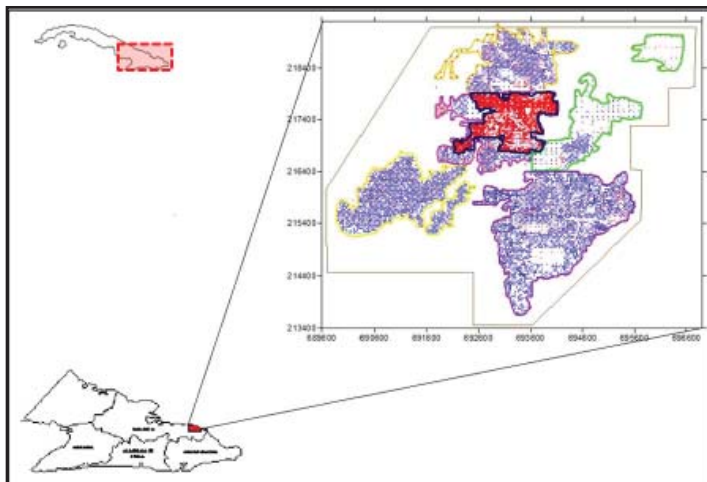


Figura 1. Ubicación del yacimiento Yamanigüey.

La corteza de meteorización del área del yacimiento (sector Yamanigüey Cuerpo I; Mourlot y Acosta, 2009) presenta un relieve muy accidentado, y se observan grandes escombreras y canteras con profundidades desde 5 hasta 7 m. Estas se convierten en lagunas artificiales en periodos de lluvia y en grandes depresiones en tiempo de seca, como consecuencia de los trabajos de minería realizados por la Empresa Pedro Soto Alba.

El basamento o roca madre del yacimiento es muy homogéneo. Está constituido fundamentalmente por rocas peridotitas serpentinizadas, representadas por harzburgitas serpentinizadas y serpentinitas. Aparecen además pequeños cuerpos de peridotitas piroxénicas y cuerpos aislados de gabros.

La génesis de la corteza de meteorización es esencialmente eluvial (*in situ*), compleja o poco madura, en la que se observan variaciones bruscas en el paso de una litología a otra, con la formación de bolsones de saprolitas y de rocas poco intemperizadas dentro de otras litologías más ocrosas. Es posible apreciar alternancias y un basamento mineralizado en un 20% de

su área, con una potencia en el sector de 2 m aproximadamente. La tectónica es intensa, representada por numerosas grietas y fallas locales que posibilitan el rápido escurrimiento de las aguas superficiales y la lixiviación de las rocas, con la formación de grandes zonas de cavernas. Se produce el enriquecimiento de la zona saprolítica del corte con una alta difusión de los perfiles laterítico saprolítico y saprolítico. La potencia mineral es de aproximadamente 10 m.

La extrema variabilidad lateral de los perfiles saprolíticos, fundamentalmente en los límites entre los ocres estructurales iniciales y la roca lixiviada o, en su ausencia, con la roca madre, impiden que las tradicionales redes de pozos proporcionen una imagen real de esos contactos y de las potencias de las capas (Francké, 2001). En la Figura 2 se observan algunos de los escenarios posibles donde las perforaciones no son capaces de dar la imagen real del perfil laterítico o saprolítico, lo que induce errores significativos en la estimación de los espesores.

Principios del georradar (GPR)

El GPR se basa en la emisión de un breve pulso de energía electromagnética a través de una antena emisora hacia el subsuelo, con una frecuencia única que puede variar entre 12,5 y 2000 MHz. Cuando el pulso alcanza una interface donde existe un contraste en la constante dieléctrica, ocurren fenómenos análogos a los registrados en la sismica de reflexión cuando cambia la impedancia acústica. Una parte de la onda es reflejada y regresa a la superficie, donde es captada por la antena receptora, mientras que la energía remanente continúa su recorrido hasta la siguiente interface.

La experiencia de trabajo en la zona indica que las profundidades alcanzadas por las ondas electromagnéticas en el perfil laterítico son significativas. Probablemente esto se deba a diferentes causas, entre las que se cuentan:

- El fuerte contraste existente entre los límites de las capas, especialmente entre los OEI y las rocas lixiviadas o en su ausencia el basamento rocoso.
- En el perfil laterítico-saprolítico se produce la lixiviación de los minerales conductores, lo que favorece el tránsito de la señal por este medio sin que se produzca su total atenuación.

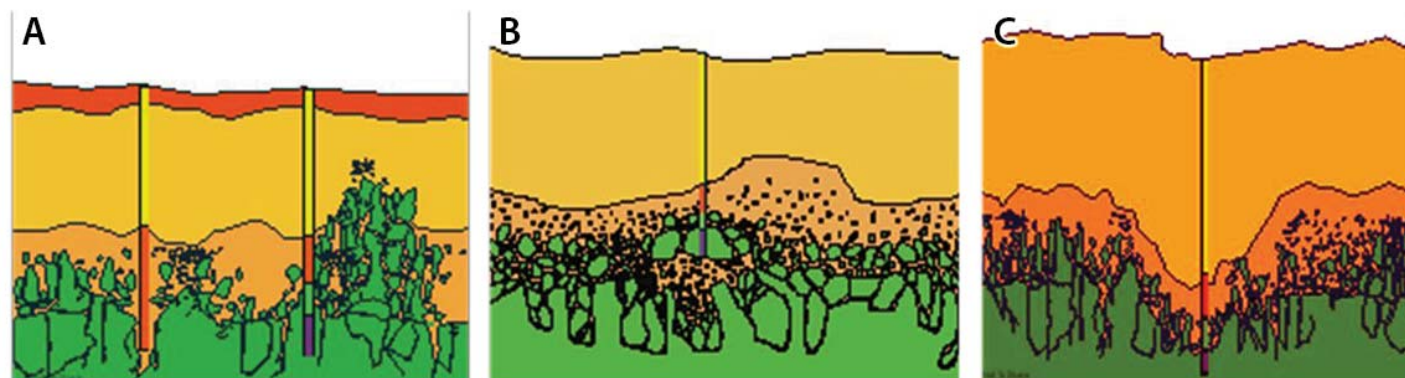


Figura 2. Situaciones que inducen a errores en la estimación de las potencias de las capas limoníticas (Tomado de Francké, 2001). A: Los pozos penetran por grietas o no detectan los pináculos de rocas. B: Los pozos se detienen en núcleos de rocas flotantes dentro de las limonitas o saprolitas. C: Los pozos penetran por depresiones.

Uno de los principales objetivos en la exploración de las saprolitas es definir el límite entre estas y la roca madre, que por lo general constituye la frontera de la minería. La imagen de este contacto se obtiene nítidamente por el georradar, posiblemente debido a las cantidades contrastantes de agua existentes en ambas capas. En las saprolitas el contenido de agua es alto por la presencia de minerales arcillosos y mayor cantidad de poros, lo cual determina que la velocidad de propagación

de las ondas sea relativamente pequeña, mientras que en el basamento disminuye drásticamente la cantidad de agua y las ondas alcanzan velocidades mucho más altas. En ese límite se produce una fuerte reflexión.

Metodología de los trabajos

En la captación de los datos se utilizó el sistema georradar ProEx GPR, de la prestigiosa firma Mala Geoscience, de nacionalidad sueca.

La antena seleccionada para la ejecución de los trabajos fue la RTA (*Rough Terrain Antenna*), de 50 MHz. Esta antena de configuración colineal está diseñada especialmente para desarrollar trabajos en condiciones de relieve de alta dificultad, semejante al que presenta el sitio donde se ejecutaron estos trabajos, lo que ofrece mayor seguridad en los resultados y multiplica la productividad. También satisface el compromiso existente entre la frecuencia y profundidad de estudio deseada, lo cual posibilita revelar contactos hasta los 30 m aproximadamente, en las condiciones geológicas del yacimiento Yamanigüey.

La modalidad utilizada durante los trabajos de campo fue la de perfilaje de reflexión (*common offset*), consistente en desplazar las antenas sobre una red de perfiles topográficamente trazados y georeferenciados, mientras se mantiene fija la distancia entre el transmisor y receptor (4 m, de acuerdo al diseño de la antena Ramac RTA). Como resultado se obtiene una sección en la que se representan tiempos dobles en ordenadas y distancia horizontal en abscisas, de forma similar a las utilizadas en la sismica de reflexión. La profundidad de los reflectores puede determinarse si se conoce la velocidad de propagación del impulso electromagnético a través del subsuelo y los tiempos de retardo de la onda reflejada.

La red utilizada fue de 16,66 * 16,66 m, con paso de medición de medio metro, lo que garantiza la obtención de imágenes de alta resolución y la posibilidad de definir la interface saprolitas - roca del basamento. En total, se ejecutaron con esta modalidad en el área 53,77 km.

Numerosos factores limitan la eficiencia del georradar en las condiciones geológicas de los yacimientos lateríticos saprolíticos orientales. Entre estos se encuentran la atenuación de la señal irradiada en su tránsito por el subsuelo, los ruidos externos o instrumentales, el relieve, entre otros. Por tales motivos, la señal registrada debe ser procesada en función de las características geológicas del yacimiento investigado y los objetivos propuestos.

En el caso específico del yacimiento Yamanigüey, las principales causas de atenuación de la señal pueden estar relacionadas con los siguientes aspectos:

- Fenómenos de reflexión y difracción (*scattering*)

No todas las reflexiones son deseables, solo aquellas que provienen del objeto de interés, por ejemplo, del límite entre las saprolitas y el basamento. En su recorrido por el perfil saprolítico, las ondas electromagnéticas pueden encontrar numerosos fragmentos pequeños (mayores de 0,4 m de diámetro) de rocas duras, que producen reflexiones desordenadas, conocidas en la literatura como el fenómeno clutter. Estas reflexiones no se producen con el ángulo necesario para ser captadas por la antena receptora y se pierden en diferentes direcciones. El clutter produce una atenuación de la señal, muy frecuente en las condiciones geológicas de este proyecto.

- Acumulaciones de agua

En el área del yacimiento Yamanigüey existen numerosos bolsones de agua que por lo general contribuyen a la sedimentación de arcilla, lo cual es desfavorable para el desplazamiento de las ondas electromagnéticas.

- Relieve

La presencia de pendientes muy fuertes obstaculiza el traslado adecuado de la antena sobre el suelo, lo cual dificulta su acoplamiento óptimo. Estas condiciones exigen cuidados máximos en el desarrollo de la campaña de campo. Por otro lado, en determinados sectores resulta imposible que la antena se desplace exactamente sobre el trazado topográfico, lo que puede conducir a algunas imprecisiones durante el procesamiento de la información, especialmente cuando se ejecuta la corrección de relieve.

La aplicación del GPR en las investigaciones sobre cortezas de intemperismo lateríticas saprolíticas tiene muy buenos resultados. Esto se debe a varios factores, entre los que se cuentan:

- Lixiviación de elementos conductores durante la génesis de estos yacimientos, por ejemplo, los del grupo de los álcalis, lo cual favorece que no se atenúe la onda electromagnética.

- Disminución drástica de los contenidos de agua en la roca del basamento.

- Acumulación significativa de sílice en la parte superior de la roca del basamento, que mejora considerablemente la velocidad de propagación de la onda electromagnética por ese medio.

- Fuerte contraste de la permitividad dieléctrica entre las rocas del basamento y las saprolitas y los ocreos.

La representación de los resultados de un registro de georradar debe ser mejorada mediante la aplicación de filtros y amplificadores de señal; estos últimos resultaron de gran importancia en el caso concreto de estas investigaciones. Para la interpretación de radargramas, se establecieron los siguientes pasos:

- Pre procesamiento: Incluye el análisis del radargrama obtenido en el terreno, mediante el uso del software Ramac GroundVision. Entre otros aspectos, se observan la

cantidad de trazas medidas y los parámetros de medición (frecuencia de muestreo, número de muestras, número de *stacks*, intervalo de trazas, entre otros), y se verifica la condición de que el registro observado fuese adquirido con los parámetros de medición correctos. Se destaca cualquier anomalía presente en el registro que pueda ser asociada con interferencias o errores en la medición.

- Aplicación de filtros amplificadores de la señal.
- Ajuste del cero.
- Filtros pasabandas, aplicados en función de las características de cada radargrama.
- Cálculo de las velocidades de propagación de la señal electromagnética: Se realiza mediante el procedimiento ajuste de hipérbolas. Se determina que la velocidad media de propagación de la onda electromagnética (EM) en el perfil saprolítico es de 0,15 m/ns.
- Corrección topográfica.
- Conversión de tiempos dobles en profundidad.
- Correlación de los resultados obtenidos con los pozos de perforación y toda la información geológica disponible.

En el procesamiento e interpretación de la información se utilizaron los *software* Ramac GroundVision, suministrado por la firma Mala Geoscience, y Reflexw2D, de la firma Sandmeier Software de Alemania.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Seguidamente, se presentan algunas de las líneas medidas en una campaña de georradar desarrollada en el año 2009, en 11 bloques del yacimiento Yamanigüey. Los trabajos de perforación se ejecutaron en una red de 16,6 * 16,6 m, y los perfiles de GPR a una distancia de 16,6 m, con un paso de medición de 0,5 m.

La Figura 3 muestra uno de los radargramas ejecutados en el Bloque 1616. Los pozos perforados se ubican en la parte superior de la imagen, con su nomenclatura y la representación por intervalos de las capas del perfil saprolítico.

En esta imagen es posible observar dos capas bien definidas, cuya frontera se delimita por una línea de color negro. La capa superior, en tonos de color rojo, se asocia al perfil saprolítico, mientras que por debajo, en tonos predominantemente amarillos y azules, aparece el basamento rocoso. Dicho basamento se caracteriza por texturas que muestran una gran variación en las velocidades de desplazamiento de las ondas electromagnéticas, consistente con estratos rocosos afectados por un intenso agrietamiento y procesos de serpentización. El basamento en los pozos de perforación está definido por el color marrón, y se establece una buena correlación con los resultados que ofrece el georradar.

El pozo 161744-K se ubica en una depresión, y detectó potencias del perfil saprolítico tres veces mayores que la media del perfil.

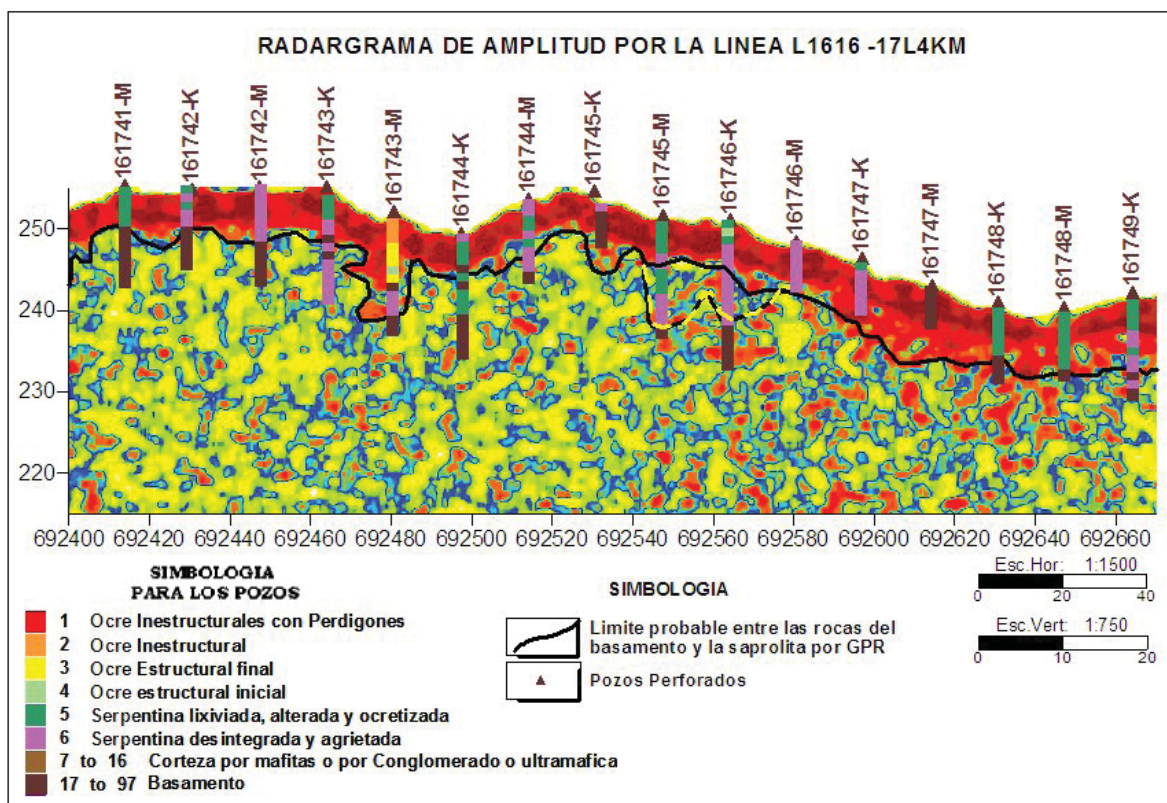


Figura 3. Radargrama ejecutado por el bloque L1616 línea 4KM, con la ubicación de las perforaciones.

El pozo 161746-K penetra por una zona de agrietamientos donde regularmente se encuentra material laterítico o saprolítico. Muestra erróneamente espesores que no se corresponden con la realidad y pueden inducir a sobreestimar el volumen de material útil.

El pozo 161743-K perforó una zona de alternancia de rocas y material saprolítico y, evidentemente, después del contacto definido por georradar, continúa por una grieta varios metros.

En el radargrama de la Figura 4 se establecen con nitidez las capas anteriormente descritas. En la capa relacionada con el basamento, desde el pozo P-151587-K hacia el este del perfil se observa la presencia de bandas alargadas de color amarillo que reflejan la existencia de grietas rellenas de material saprolítico arcilloso y probablemente húmedo. En esta zona, la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas disminuye y se produce una sensible pérdida de energía, posiblemente relacionada con una zona de fallas o agrietamiento.

En la Figura 5 se muestra un caso usual en la exploración de las saprolitas, cuando en esta capa subsisten numerosos relictos de rocas duras de diámetros mayores al metro. Es frecuente que los pozos sean detenidos al encontrar estos fragmentos y no lleguen a determinar el límite con el basamento. Esta es otra situación que induce a errores en el cálculo de los recursos, ya que estima menos que lo real. La imagen obtenida en el radargrama es muy nítida y confiable y, al igual que en los casos anteriormente discutidos, permite corregir los errores de la perforación y lograr un cálculo de los recursos mucho más eficiente.

Se demuestra que, aunque la red de perforación utilizada es muy densa (16,66 x 16,66 m), esta no es suficiente para modelar eficazmente la capa útil dada su gran irregularidad, por lo cual el método georradar constituye una herramienta imprescindible para lograr ese objetivo con eficiencia.

Con los resultados de cada radargrama se obtuvieron 12 246 puntos donde se midieron los espesores de las saprolitas, de ellos 1607 en pozos de perforación. Esto ha permitido realizar un estudio estadístico básico de los resultados obtenidos por ambos métodos y un análisis del coeficiente de correlación (Tabla II).

Para mayor confiabilidad del análisis, se eliminaron los valores anómalos (atípicos) provenientes de las diferencias entre los dos métodos, pues se conoce que el coeficiente de correlación es muy sensible a estos valores. Por esta razón se consideraron tres situaciones distintas para el 100%, 78% y 56% de los pozos. Como era de esperar, en la medida que se eliminan los pozos “anómalos”, la correlación aumenta, y se alcanza un buen resultado para el 78% de los datos (0,72) y muy buenos resultados para algo más de la mitad de los pozos (0,86).

En la Tabla III se presenta la estadística básica tanto del espesor de saprolita por GPR con todas las mediciones geofísicas (12246 puntos) como para un 100% y un 78% de los pozos. Es posible notar que la media por pozos es muy cercana a la media por GPR (6,50 m y 6,24 m), pero la mediana difiere en unos dos metros (5,61 m y 4 m). Los valores más grandes de saprolita hacen crecer la desviación estándar y el coeficiente de variación de los pozos, mucho más que en el GPR (6,91 y 3,30 para la desviación estándar y 1,11 y 0,51 para el coeficiente de variación). Esto se

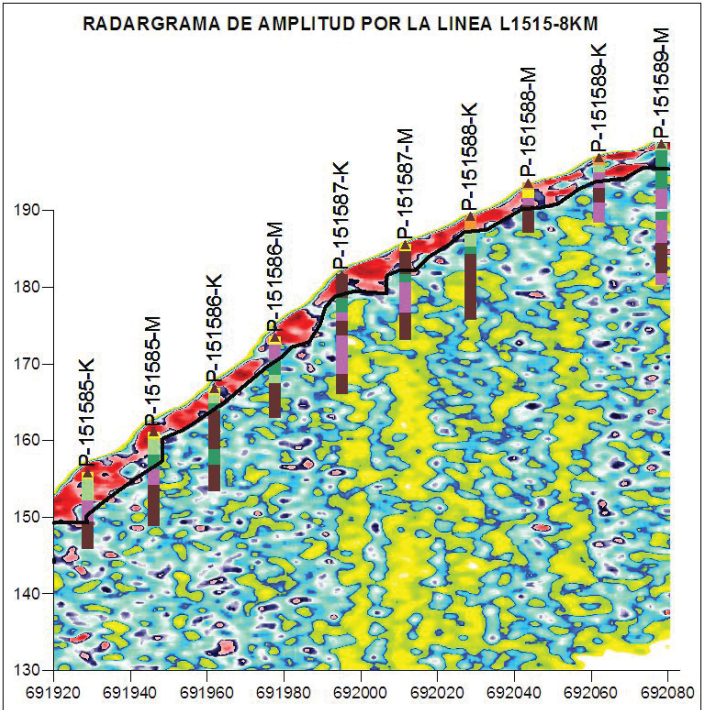


Figura 4. Radargrama por el bloque L1515 línea 8KM, con la ubicación de las perforaciones.

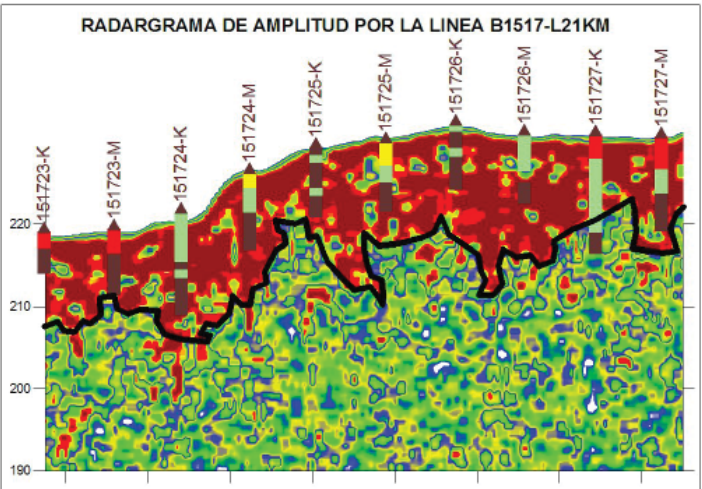


Figura 5. Radargrama por el bloque L1517 línea 21KM, con la ubicación de las perforaciones.

Tabla II. Estudio del coeficiente de correlación entre los espesores de saprolitas pronosticados por Pozo & Georradar, para 100%, 76.1% y 56% de los datos.

Pozos	100 %		76 %		56 %	
	Friable Pozo	Friable GPR	Friable Pozo	Friable GPR	Friable Pozo	Friable GPR
Friable Pozo	1		1		1	
Friable GPR	0,430	1	0,724	1	0,8566	1

explica por la mayor estabilidad en los datos del georradar, en el que no aparecen valores atípicos que influyan negativamente en dichos parámetros.

Tabla III. Estadística básica de los espesores de la saprolita por perforación y georradar, para 100% y 78% de los datos

Estadígrafo	Perfiles GPR	100% Pozos		78% Pozos	
		Friable GPR	Friable Pozo	Friable Pozo	Friable GPR
Cantidad de valores	12246	1607	1905	1248	1248
Mínimo	0	0	0	0	0
Máximo	23,55	23,03	46	29	23,03
Media	6,65	6,50	6,24	4,75	6,01
Mediana	5,94	5,61	4,00	4,00	5,14
Desv. standard	3,45	3,30	6,91	4,30	3,03
Coef. de variación	0,52	0,51	1,11	0,91	0,50
Skew	0,918	1,143	1,849	1,046	1,426
Kurtosis	0,938	1,443	4,14	1,202	2,809
Estadígrafo Kolmogorov-Smirnov	0,084	0,114	0,184	0,135	0,132
Estadígrafo K-S crítico, $\alpha = 0,05$	0,012	0,034	0,031	0,038	0,038

CONCLUSIONES

- Mediante este trabajo se obtuvo, prácticamente de forma continua, el contacto entre las saprolitas y el basamento, y se modelaron las características de dicha frontera, lo que favorece un cálculo más eficaz de los recursos minerales. Este resultado puede ser de gran utilidad durante la planificación de la explotación minera.
- Se estableció una rutina de interpretación que permite obtener radargramas con una alta calidad en la definición lateral y vertical del perfil geológico.
- Quedaron demostradas las ventajas del método georradar y las insuficiencias de la perforación en la determinación de los espesores del perfil saprolítico.

BIBLIOGRAFÍA

- Franché, J. C., 2001. *Ground Penetrating Radar Test Surveys*. Moa: Moa Bay Nickel Project.
- Lavaut, W., 1998. *Tendencias geológicas del intemperismo de las rocas ultramáficas en Cuba Oriental*. Minería y Geología, 1.
- _____, 2003. *Curso de actualización de depósitos Fe – Ni – Co lateríticos saprolíticos*. Santiago de Cuba: Geominera Oriente. Inédito
- Lavaut, W., et al., 2000. *Informe del estudio de redes para la exploración de depósitos Fe – Ni – Co lateríticos saprolíticos*. Santiago de Cuba: Geominera Oriente. Inédito
- Mourlot, J. L., Acosta, J., 2009. *Informe Geológico Final Yamanigüey Cuerpo I. Red 16,16 x 16,66 m*. Santiago de Cuba: Geominera Oriente. Inédito

IGP. Servicio Geológico de Cuba

Desde su fundación, en el año 1967, ha desplegado una amplia trayectoria en el campo de las investigaciones geológicas. Cuenta con profesionales altamente calificados para dar solución a cualquier problemática o tarea dentro de la actividad geológica general y en particular en la prospección de yacimientos minerales. Durante más de 46 años ha desarrollado diferentes proyectos de investigación que han contribuido a profundizar en el conocimiento geológico sobre Cuba y el Caribe.

MISIÓN

El Servicio Geológico de Cuba tiene la misión de generar y proveer conocimientos geológicos al país.

VISIÓN

Ser un centro de referencia para las Ciencias Geológicas en el área de América Latina y el Caribe.

ÁREAS PRINCIPALES DE TRABAJO

1. Cartografía
2. Geología ambiental
3. Geología regional
4. Paleontología
5. Geoprocesamiento
6. Petrografía y Mineralogía
7. Geofísica
8. Yacimientos Minerales y pronóstico
9. Control geológico
10. Centro Nacional de Información Geológica

EVALUACIÓN DE LA APLICACIÓN DE UN COMPLEJO DE MÉTODOS GEOFÍSICOS PARA LA CARTOGRAFÍA DE ESTRUCTURAS RELACIONADAS CON MENAS DE CROMITAS

ORLANDO DUSSAC TAMAYO¹, JORGE ACOSTA BREAL, MARIA GENTOIU

Empresa Geominera Oriente, Unidad Empresarial de Base Servicios Geológicos

Carretera de Siboney Km 2 ½ Alturas de San Juan, Santiago de Cuba, Cuba.

Correo: (1) odussac@geominera.co.cu

RESUMEN

En el presente trabajo se muestran los resultados de la caracterización geofísica de la estructura portadora de menas de cromitas en la Asociación Ofiolítica (faja Mayarí-Baracoa) de Cuba Oriental, a partir de la aplicación de un complejo de métodos geofísicos, que permitirán elaborar un modelo geofísico de yacimientos minerales muy útil para las futuras prospecciones geológicas, con la introducción de nuevas tecnologías y metodologías en la evaluación de los recursos minerales.

Los intentos de utilización de los métodos geofísicos para mejorar la eficiencia de la prospección de esta mena comenzaron en el país antes del triunfo de la Revolución de forma esporádica y se basaron fundamentalmente en la utilización de la prospección gravimétrica por algunos autores norteamericanos. Después de 1959 otros investigadores extranjeros, fundamentalmente rusos y cubanos (Empresa Geominera Oriente (EGMO) y de la CUJAE), trataron de desarrollar la prospección geofísica en este contexto geológico.

A partir de estas experiencias con base en un estudio profundo de las propiedades petrofísicas de las litologías que forman la Asociación Ofiolítica, los autores, diseñaron un complejo de investigaciones geofísicas basadas en la utilización combinada de métodos eléctricos (polarización inducida), electromagnéticos, magnéticos y gravimétricos.

Estos resultados permitieron elaborar un complejo óptimo de métodos geofísicos para realizar prospecciones mucho más eficientes, con un significativo ahorro de recursos financieros, fundamentalmente al permitir un uso más racional de la perforación. La localización de nuevas reservas minerales contribuirá significativamente al desarrollo social y económico de la región y del país.

ABSTRACT

In this paper the results of the geophysical characterization of ore-bearing structure in the ophiolitic chromites Association (Mayarí-Baracoa belt) Eastern Cuba, from the application of a complex of geophysical methods is, that will develop a geophysical model of useful mineral deposits for future geological surveys, introducing new technologies and methodologies in the evaluation of mineral resources.

Attempts to use geophysical methods to improve the efficiency of this ore prospecting began in the country before the triumph of the revolution sporadically and were largely based on the use of the gravity survey by some American authors. After the triumph of the revolution foreign research mainly Russians and Cubans (Company Geominera East (EGMO) and CUJAE) also tried to develop geophysical prospecting in this geological context.

From these experiences and based on a thorough study of the petrophysical properties of ophiolitic lithologies forming the Association, the author along with other authors designed a complex of geophysical research based on the combined use of electrical methods (induced polarization), electromagnetic magnetic and gravimetric.

These results permitted complex optimal geophysical methods to more efficient exploration, with significant financial savings, primarily by allowing a more rational use of drilling. The location of new mineral reserves contribute significantly to social and economic development of the region and the country.

INTRODUCCIÓN

La minería de las menas de cromitas constituye, después de la del níquel y el oro, la más importante del país por sus volúmenes de producción. Sin embargo, no se dispone de un complejo de métodos geofísicos eficiente para la prospección de nuevas menas y la ampliación de las reservas conocidas de tal manera que se garantice la continuidad de esta explotación en los próximos años. La metodología tradicional de prospección, basada fundamentalmente en métodos geológicos y de perforación, resulta muy costosa y poco eficiente.

El objeto de esta investigación lo constituye la Asociación Ofolítica de Cuba Oriental. El Dr. Iturralde-Vinent divide a las ofiolitas cubanas en, ofiolitas del Cinturón Septentrional, ofiolitas anfibolitizadas y ofiolitas de los terrenos sudoccidentales; así divide al cinturón septentrional en tres fajas principales: Cajalbana, Mariel-Holguín y Mayarí-Baracoa. La faja Mayarí-Baracoa, a su vez, la divide en tres macizos: Sierra del Convento, Mayarí-Cristal, y Moa-Baracoa (Iturralde-Vinent 1994, 1996). A estos dos últimos pertenecen las ofiolitas a las que los autores dedican sus esfuerzos.

En este trabajo se propone la solución de importantes problemas en el estudio de los recursos minerales que se encuentran en la Asociación Ofolítica de Cuba Oriental, especialmente los referidos a la prospección de menas de cromitas, que constituye un objetivo priorizado para la EGMO, la Unión de Empresas del Níquel y el MINBAS. La exportación de este mineral constituye una importante fuente para la captación de divisas y representa una de las minerías más antiguas del país, alrededor de la cual existe una comunidad con características propias.

El autor principal de esta investigación ha ejecutado durante muchos años proyectos de prospección en ese ambiente geológico, en la evaluación de las menas ferro-niquelíferas y de cromitas en las regiones de Pinares de Mayarí y el macizo Sagua-Baracoa

Los intentos de utilización de los métodos geofísicos para mejorar la eficiencia de la prospección de esta mena comenzaron en el país antes del triunfo de la Revolución de forma esporádica y se basaron fundamentalmente en la utilización de la prospección gravimétrica por algunos autores norteamericanos. Después del 1959 otros investigadores extranjeros, fundamentalmente rusos y cubanos (Empresa Geominera Oriente (EGMO) y de la CUJAE) también trataron de desarrollar la prospección geofísica en este contexto geológico.

A finales de la década del 60 del siglo pasado, en el macizo Pinares de Mayarí, A. Murashko dirigió un proyecto de evaluación y prospección de cromitas donde, por primera vez en la región, de forma sistemática se utilizaron los métodos geofísicos (gravimetría y magnetometría) en el estudio de varios yacimientos y manifestaciones (Murashko, 1966).

El resultado fue pobre, debido, entre otros factores, a las pequeñas dimensiones de los cuerpos minerales y a la intensa desarticulación del relieve topográfico, que exige una corrección de relieve de alta precisión, para lograr que las anomalías de Bouguer del campo gravimétrico pudieran ser obtenidas con la precisión necesaria para revelar cuerpos minerales de las

características esperadas, y a la red de observación muy amplia 200 x 40 m, cuando los cuerpos son de 30 x 10.

En los primeros años de la década del 80, en el campo mineral Cayo Guan del macizo Moa-Baracoa, se desarrollaron investigaciones con similares características. Los resultados obtenidos por la geofísica fueron aun peores, causa fundamental para que aquel proyecto fuera abandonado.

A partir de estas experiencias, y tomando como base en un estudio profundo de las propiedades petrofísicas de las litologías que forman la Asociación Ofolítica, los autores, diseñaron un complejo de investigaciones geofísicas basadas en la utilización combinada de métodos eléctricos (polarización inducida), electromagnéticos, magnéticos y gravimétricos.

Estos métodos se aplicaron extensamente en dos grandes proyectos ejecutados en el macizo Mayarí-Cristal, además en varios sectores de la región de Sagua y en el campo mineral Cayo Guan, con resultados muy favorables. En la mayoría de los casos se logró cartografiar las estructuras geológicas portadoras de la mineralización y, en condiciones favorables, la detección directa de los cuerpos de cromitas.

Este complejo de métodos permite además estudiar otras mineralizaciones y rocas de interés económico que existen en esta asociación ofiolítica, tales como, sulfuros polimetálicos, oro y dunitas. Es de interés con este trabajo sistematizar toda la amplia información geofísica recolectada, modelar las diferentes estructuras geológicas en que se encuentra la mineralización cromítica y perfeccionar métodos geofísicos que conlleve a una investigación exitosa y eficiente de este mineral.

Estos resultados permitirán elaborar un complejo de métodos geofísicos para realizar prospecciones mucho más eficientes, con un significativo ahorro de recursos financieros, fundamentalmente al permitir un uso más racional de la perforación. La localización de nuevas reservas minerales contribuirá significativamente al desarrollo social y económico de la región y del país.

DESARROLLO

Durante la década de los noventa del pasado siglo, los autores de este trabajo desarrollaron, en el marco de varios proyectos de prospección de menas de cromitas, numerosas investigaciones geofísicas encaminadas a descubrir nuevas menas de mineral o las estructuras geológicas más favorables para su localización.

Se elaboraron modelos geofísicos de prospección ajustados a las características de cada sector de trabajo investigado.

En este trabajo se presentan los resultados geofísicos obtenidos en las investigaciones sobre el yacimiento Casimba, que constituye el modelo o patrón geofísico para la prospección en los sectores de Pinares de Mayarí.

Se diseñó un complejo de métodos geofísicos formado por los siguientes:

- Gravimetría
- Magnetometría

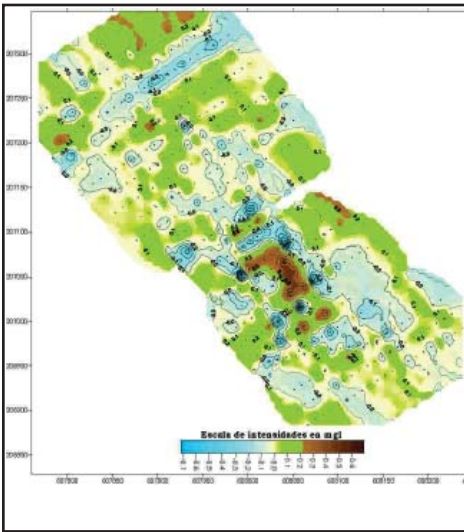


Figura 1. Mapa de isótopos del campo gravimétrico residual con reducción de Bouguer.

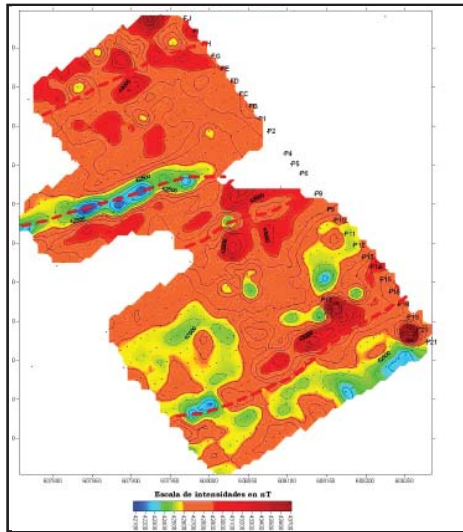


Figura 2. Mapa de isótopos del Campo Magnético Total.

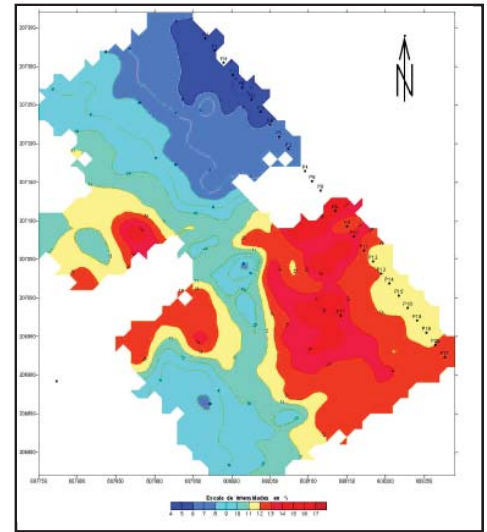


Figura 3. Mapa de isótopos de polarizabilidad.

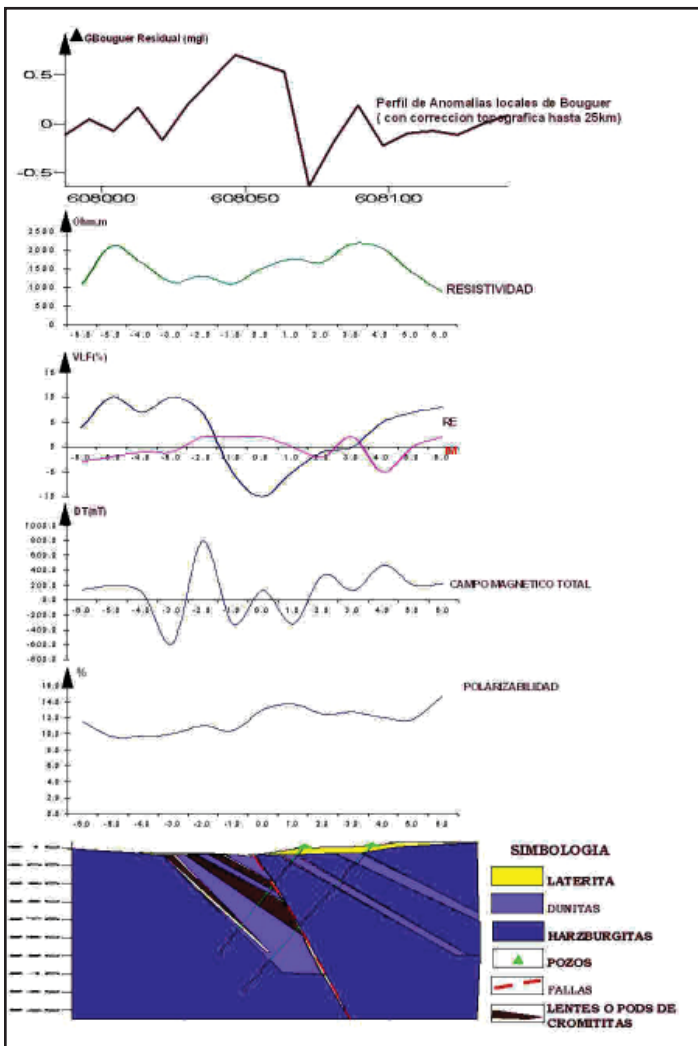


Figura 4. Perfil de interpretación por la Línea 10.

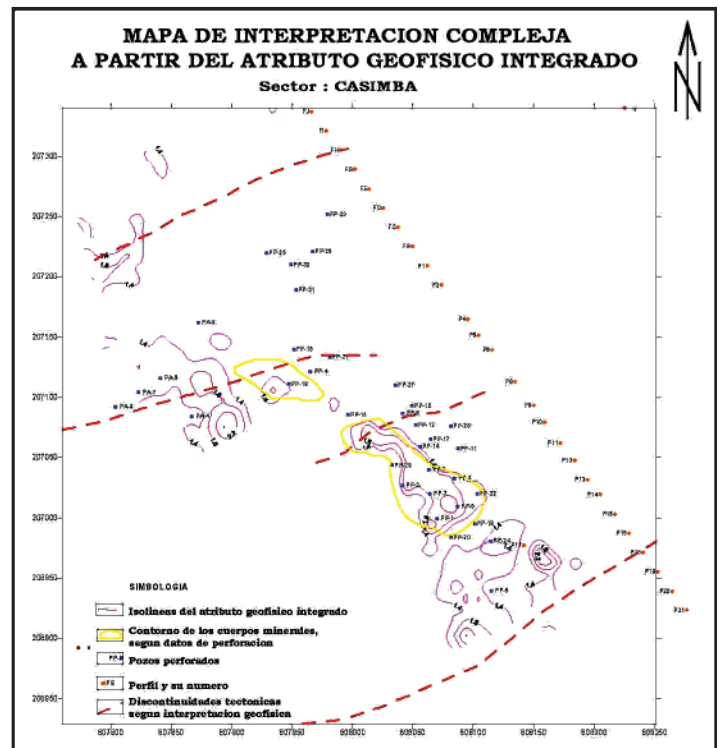


Figura 5. Mapa de interpretación compleja, mediante el Atributo Geofísico Integrado.

- Polarización Inducida en la variante gradientes medios
- Ultrabaja frecuencia (VLF)

Los trabajos en el área del yacimiento Casimba estuvieron encaminados a estudiar con mayor detalle los cuerpos conocidos y encontrar de ser posible, otros lentes. Se realizaron las investigaciones geofísicas en una red de 20 x 10 m aproximadamente.

Las anomalías registradas en cada uno de los métodos ejecutados son generalmente débiles. Los mejores resultados se obtuvieron con el uso del coeficiente geofísico integrado. En las figuras 1, 2, 3, 4 y 5 se presentan algunos de los resultados.

En la Figura 4, (corte de interpretación), se observa cómo cada uno de los métodos utilizados revelan los cuerpos minerales o la estructura geológica que los contiene.

Como se esperaba, el análisis del campo gravimétrico ofrece información directa de los lentes de cromitas, basado en los relevantes contrastes de densidad efectiva que existen entre la roca encajante y los cuerpos de cromitas. Las anomalías residuales de Bouguer con corrección topográfica son las que mejor descubren los cuerpos minerales. En este caso se observa que la anomalía es el resultado acumulado de los cuerpos minerales que existen en este perfil.

La componente real o en cuadratura del campo electromagnético (ver Figura 4) cartografía la estructura geológica portadora de la mineralización por mínimos bien definidos. Este método resulta muy útil cuando la zona mineral está ubicada en las tres primeras decenas de metros de profundidad; además, aporta una apreciable información para el desciframiento tectónico de las zonas estudiadas.

En el campo magnético, los cuerpos minerales se revelan mediante máximos por lo general no muy intensos, con valores entre 1000 y 3000nT.

La resistividad (ver Figura 4) se manifiesta con valores relativamente pequeños sobre la estructura portadora de los cuerpos minerales, y presenta máximos en el contacto entre esta y la roca encajante. La polarizabilidad presenta un comportamiento similar

La interpretación compleja de estos resultados mediante el Índice Geofísico Integrado (ver Figura 5) resulta un procedimiento

muy efectivo que identifica las zonas más probables para la localización de nuevos lentes del mineral. De esta forma se discriminan aquellas áreas menos perspectivas.

Con este complejo de métodos se establece un modelo geofísico de prospección para condiciones geológicas similares que permitió estudiar con éxito más de 15 minas y manifestaciones de cromitas, aportando un volumen de información muy útil, que contribuyó a orientar con mayor eficiencia los trabajos geológicos, en especial la perforación.

CONCLUSIONES

El complejo de métodos utilizado permitió:

1. Confeccionar un modelo geólogo - geofísico de prospección para condiciones geológicas similares al sector estudiado, con el mismo se logró investigar con éxito más de 15 minas y manifestaciones de cromitas.
2. Orientar con mayor eficiencia los trabajos geológicos, en especial la perforación de los nuevos sectores estudiados.

BIBLIOGRAFIA

- Iturralde-Vinent, M.A., 1994. *Cuba geology: a new plate-tectonic synthesis*. *Journal of Petroleum Geology*, 17, 39-70.
- Iturralde-Vinent, M.A., 1996. *Geología de las ofiolitas de Cuba*. In M.A. Iturralde-Vinent (ed.). *Ofiolitas y arcos volcánicos de Cuba*, IGCP Project 364. Special Contribution n.1, Miami, USA, 83-120.
- Millán, G., 1996. *Metamorfitas de la asociación ofiolítica de Cuba*. In M. Iturralde-Vinent (ed.). *Ofiolitas y Arcos Volcánicos de Cuba*, IGCP Project 364. Special Contribution n.1., Miami, USA, 131-153.
- Murashko, V.I., 1966. *Cromititas de la Isla de Cuba*. C.N.F.G. La Habana, Cuba.

PROSPECCIÓN DE ARENA ALUVIAL EN SISTEMAS FLUVIALES DE LOS RÍOS JOBABO Y TANA CON UTILIZACIÓN DE MÉTODOS GEÓLOGO – GEOFÍSICOS

LUIS ENRIQUE FUENTES SALAS¹, ANTONIO BARROSO BETANCOURT, JORGE PÉREZ ACOSTA, FIDEL PEREIRA ECHEMENDÍA

Empresa Geominera Camagüey

Carretera Central Este, Km 5½. Camagüey, Cuba. CP 70600.

Correo: (1) luisfs@gmcmg.gms.minem.cu

RESUMEN

El objetivo principal de esta prospección fue localizar depósitos de arena aluvial en paleo cauces enterrados y/o terrazas fluviales para su uso en la construcción en los municipios del Sur de la Provincia de las Tunas (Colombia y Jobabo), cuestión que se cumplió con efectividad.

Tras el paso por el territorio de los huracanes Ike y Paloma, los que provocaron la destrucción de un número considerable de viviendas y establecimientos estatales, se requirió impulsar planes de desarrollo local (microminería) para priorizar la construcción en todo el territorio afectado. Además, los municipios del Sur de la Provincia de Las Tunas no disponen de yacimientos de esta materia prima, imprescindible en las obras de construcción, por lo que es necesario recorrer grandes distancias hasta otros territorios para adquirir la misma, lo cual encarece su costo con grandes gastos de transportación.

Esta compleja situación fundamentó el empleo de los métodos geólogo geofísicos y posterior comprobación de las anomalías con perforaciones, para la localización de la materia prima en las áreas propuestas. Se aplicaron en forma racional y con un mínimo de gastos, cumpliendo los objetivos trazados, de acuerdo a las características geológicas de la región y la información acerca de la presencia de arcillas y arenas en diversos ambientes geológicos, vinculados a las cuencas de los ríos y arroyos que componen los sistemas fluviales que son el objeto de este estudio.

ABSTRACT

The principal objective of this prospection was to locate alluvial sand deposits in buried paleo cauces and/or fluvial terraces for its use at the construction at the municipalities of the south of the Province of Las Tunas (Colombia and Jobabo). This subject was carried on with effectiveness.

After the hurricanes Ike and Paloma crossed the territory, provoking the destruction of a considerable number of housings and state - owned establishments, an impulse of local development plans (micromining) was required for the construction housings at all the affected territory. Besides, the municipalities of the south of the Province of Las Tunas do not possess deposits of this raw material, essential in the work of construction, being necessary to go over long distances to other territories to acquire it, and that raise the costs with grand expenses of transportation.

This complex situation based the use of geological - geophysical methods and posterior checking of anomalies with perforations, for the location of this raw material in the proposed areas. This methods were applied in a rational form with a minimum of expenses, obeying to the previous objective, according to the geological characteristics of the region and the information about the presence of clays and sands in various geological environments, linked to the basins of rivers that compose the fluvial systems that are the object of our study.

INTRODUCCIÓN

Para la región del sur de Las Tunas, en la que se llevó a cabo este trabajo, se dispone de información acerca de la presencia de arcillas y arenas en diversos ambientes geológicos, tales como depósitos aluviales y aluvio deluviales vinculados a las cuencas de los ríos y arroyos que atraviesan los sectores de trabajo (municipios Colombia y Jobabo), de acuerdo con las características geológicas del área.

A partir de esta idea, y con el objetivo de localizar depósitos de arena aluvial en paleo cauces enterrados y/o terrazas fluviales para su uso en la construcción en los municipios anteriormente mencionados, se planteó la utilización de un complejo de métodos de trabajo geólogo geofísicos, que fueron aplicados en forma racional y que posibilitó cumplir la meta trazada con un mínimo de gastos de recursos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los trabajos realizados estuvieron enfocados en el cumplimiento de los objetivos previstos en la Tarea Técnica, donde se contempló establecer la presencia de depósitos de arena aluvial en paleocauces enterrados para su uso en la construcción local, con su evaluación como materia prima para la industria de materiales de la construcción. Es necesario señalar que en la región existen grandes volúmenes de arcillas plásticas y arcillas arenosas con alto contenido de limo que pueden ser utilizados en la producción de ladrillos y otros productos del barro. Estos se desarrollan fundamentalmente al sur del área, en el Sector Los Sitios.

En los sectores donde se demostró la presencia de las arenas, fueron investigados los lugares de más fácil acceso natural y los que han sido desbrozados con maquinarias debido a la presencia de marabú, para facilitar condiciones más favorables en la prospección y garantizar los volúmenes solicitados.

Para la elección de los métodos a emplear en el estudio, fueron consultados diversos materiales especializados de temática general (e.g. Quintas, 1986; Arche, 1992), informes (e.g. Shevchenko *et al.*, 1979; Escalona *et al.*, 1991; McDonald Mines LTD., 1997; Guerrero *et al.*, 2004), literatura relacionada con el tema específico de los materiales de la construcción (e.g. Orus, 1966; Gorchakov, 1984), así como evaluaciones y especificaciones de calidad (e.g. NC 054-256-83, NC-178-2002, NC-182-2002, NC-185-2002, NC-251-2005, NRIB 855-1986, NRIB 875-1986).

Geología de las zonas de estudio

La zona de trabajo está ubicada en áreas de desarrollo de depósitos aluviales recientes y del Cuaternario de los ríos Jobabo y Tana, las que sobreyacen transgresivamente a las variedades litológicas vulcano plutónicas del Arco de Islas del Cretácico.

En el valle del río Jobabo, estos depósitos presentan un amplio desarrollo y se encuentran asociados al plano del cauce actual y a dos niveles de terraza. Los sedimentos asociados al plano del cauce actual corresponden a pequeños bancos de material poco clasificado, constituidos por una mezcla de material arenoso con gravas y algo de arcilla, cuyas dimensiones por lo general no

superan los 100 m de largo por 10 a 30 m de ancho y su potencia es de menos de 1 m. El acceso hasta allí es difícil, ya que el río se encuentra en la etapa de profundización de su cauce y, además, existe una gran infestación de marabú. Se presenta entonces un valle de meandros divagantes con gran tasa de avulsión, dé paredes muy abruptas con altura del orden de los 10 m y un lecho de rocas de relieve irregular.

La primera terraza sobre el plano del cauce (Figura 1) tiene un ancho de 10 a 30 m, su superficie es plana y su borde y parte trasera están bien delimitados. Aparece como relictos a ambos lados del cauce, mayormente pronunciada en los recodos y meandros convexos generados por las líneas de acreción. Está compuesta por dos cuerpos de sedimentos en forma tabular: el superior, constituido por material arcilloso con escasa arena; y el inferior o de fondo de canal, formado por gravas y guijarros. La potencia del primero es de 1,50 m, mientras que la del segundo puede llegar a los 2 m.

La segunda terraza presenta un desarrollo continuo sobre



Figura 1. Primera terraza del valle del río Jobabo.

el plano del cauce, con un ancho que varía entre los 150 m y 500 m. Su superficie es llana, sus depresiones están bien delimitadas y su altura es de 6 a 10 m sobre el nivel inferior de las aguas. El espesor del aluvio es de 4 a 8 m y está constituido mayoritariamente por material arcillo arenoso hasta arena arcilloso, que en superficie se presenta de forma monótona en toda la extensión que ocupa. Esto no ocurre así en la vertical, donde se presentan cuerpos de arena de potencia de 1 a 3 m, siempre sobreyacidos por sedimentos arcillo arenosos y arena arcillosos de más de un metro de potencia. Las longitudes conocidas de estos sedimentos están en el orden de los 30 a 100 m y el ancho es de 10 a 20 m, pero deben existir con mayores dimensiones, sobre todo en longitud, hacia la dirección meridional del sector de trabajo Los Sitios.

Estos cuerpos sobreyacen a una secuencia constituida por gravas y guijarros, cuyas dimensiones aumentan con la profundidad. En

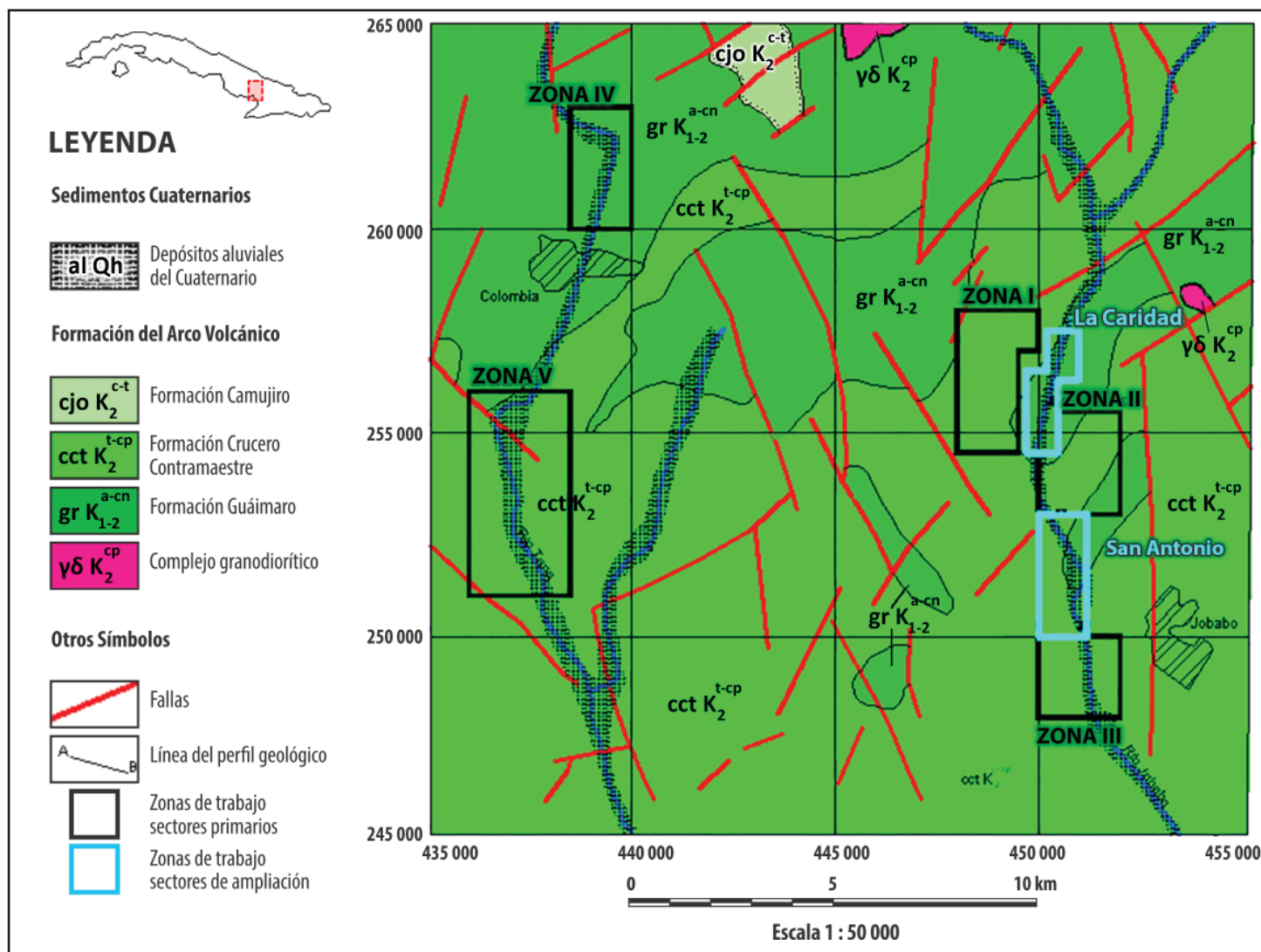


Figura 2. Geología de la región de estudio.

un corte, es posible observar un cambio gradual de las arenas y arcillas arenosas a guijarros, inicialmente como una mezcla de ambas fracciones donde se van incrementando los guijarros con la profundidad hasta predominar en el corte. No ocurre así en el cambio del material arcillo arenoso a las arenas, entre las que existe un contacto bien definido, pasando bruscamente de arcillas arenosas a arenas. A las arcillas y arenas corresponde unos 6 m de potencia y a las gravas y guijarros alrededor de 2 m.

En correspondencia con la similitud existente en cuanto a las características de los ríos Jobabo y Tana, así como a las secuencias que estos atraviesan, los depósitos aluviales de ambos ríos se consideraron muy semejantes en los trabajos preliminares de fotointerpretación. En los trabajos conjuntos geólogo geofísicos se comprobó que no era realmente así, pues los sedimentos en el río Tana son en extremo finos (arcillo arenosos a limo arcillosos) y no presentan amplio desarrollo por la vertical.

Tectónica

El alineamiento principal de las estructuras disyuntivas es del NE – NNE, como se puede observar en la Figura 2. Estas estructuras son cortadas por un sistema de fallas con rumbo noroeste – sureste. Existen también varias estructuras circulares de carácter vulcano tectónico de primer y segundo rango, observadas en fotos satelitales del Google Earth (estructura circular Guáimaro, estructura circular Jobabo y más al sur de este poblado), que en su conjunto le confieren a la geología de la región una estructura en bloques, sobre todo en su borde, al oeste del pueblo de Jobabo. Dicha estructura influye en la disposición de los sedimentos aluviales y en su estratificación cruzada visible.

Magmatismo

El magmatismo efusivo explosivo comienza en la base con características básicas a medias y un quimismo toleítico a calco

alcalino que se subordina inmediatamente al tipo subalcalino, por la presencia relativamente abundante de las rocas traquibasálticas a traquiandesíticas en la formación Guáimaro. El quimismo subalcalino sigue predominando a continuación en las rocas medias a medio ácidas de la formación Crucero Contraestre.

El magmatismo intrusivo presenta un menor desarrollo. Solo existe el complejo granodiorítico ($\gamma\delta K_2^{CP}$) en el stock de Guáimaro, al norte de las zonas de trabajo, y un pequeño stock en el área de Maclama, los cuales están representados por diorita cuarcíferas y dioritas respectivamente. En este pequeño stock del área de Maclama se han descrito monzonitas, con estructura masiva y textura holocristalina porfírica, donde sus contactos con las rocas encajantes son intrusivos y tectónicos, revelados por los numerosos laboreos mineros superficiales ejecutados en el área.

También se han identificado de forma dispersa diques de pórfidos dacíticos a traquidacíticos, porfiritas andesíticas a traquiandesíticas y pórfidos dioríticos cuarcíferos. Estos cuerpos intrusivos deben representar la principal fuente de aporte, después de erosionados, de las arenas aluviales presentes en la cuenca y la llanura de inundación del río Jobabo.

Métodos aplicados para el trabajo

Los métodos aplicados para los trabajos de investigación se ejecutaron de manera racional y lógica, lo que permitió el máximo ahorro de recursos. Estos métodos fueron:

- Interpretación de fotos aéreas

Previo a los trabajos de campo, fue realizada la fotointerpretación geológica. Para esto se utilizaron fundamentalmente las fotos aéreas a escala 1: 37 000 del vuelo K- 10/70, con auxilio de fotos más recientes a una escala aproximada de 1: 26000 y más antiguas a escala 1: 52 000. Estas fotos se encuentran disponibles en el Archivo Central de la Empresa Geominera Camagüey.

- Itinerarios geológicos

Se realizaron a lo largo de toda la red fluvial, en dependencia del limitado acceso por la abundante presencia de marabú. Fueron ejecutados 108,71 km en zonas de complejidad geológica media y accesibilidad mala, con especial interés en los sitios recomendados por los resultados de la interpretación fotogeológica. En las zonas de acumulación y en los lugares donde se comprobó la presencia de arena aluvial de grano medio (0,59 – 1,19 mm), arena aluvial de grano grueso (2,38 – 4,76 mm) y gravas (> 9,52 mm) se realizaron itinerarios transversales, en dependencia de las dimensiones de los depósitos.

- Trabajos de documentación y muestreo

Estos trabajos comenzaron conjuntamente con los itinerarios geológicos. Fue realizada la documentación y el muestreo de los afloramientos y posteriormente, durante la perforación, se realizó el mismo procedimiento para el testigo obtenido. Para cada intervalo geológico fue descrito su tipo litológico,

color, granulometría, contenido e intercalaciones de arcilla, con atención a cualquier otro tipo de materia prima que pudiera aparecer, en cuyo caso esta sería debidamente caracterizada colateralmente con vistas a su posible evaluación posterior.

- Trabajos topográficos

Con anterioridad a esta investigación, habían sido realizados múltiples trabajos topográficos en la zona, como parte del proyecto de Oro Golden Hill.

Durante esta etapa se ejecutaron trabajos de replanteo y amarre de labores, debido al largo tiempo transcurrido y los cambios lógicos existentes motivados por la acción de la agricultura y otras entidades del territorio, además de la previa destrucción de los monumentos. Fueron realizados:

- o Reconocimientos de la zona de trabajo
- o Señalamientos de puntos
- o Creación de la red de apoyo
- o Poligonal 2da Categoría
- o Poligonal 1:1000
- o Trazado de líneas con estaquillado cada 20 m
- o Monumentación
- o Amarre de labores
- o Confección de planos

- Trabajos geofísicos

Los métodos geofísicos cumplieron con su objetivo fundamental, que consistía en la determinación de depósitos de arena aluvial en paleocauces enterrados, para su uso en la construcción local. Se lograron localizar en las márgenes del río Jobabo cuerpos que tuvieron una longitud variable ($L=50 - 250$ m), con un ancho que osciló entre 40 y 100 m y potencias en el orden de 2,00 – 4,30 m. Para esto fue utilizado el Perfilaje Eléctrico Wenner Alpha (PEWA).

Los trabajos fueron efectuados en líneas trazadas topográficamente con estaquillado cada 20m y separación máxima entre líneas de 100 a 200m, todas en dirección E-W. El dispositivo utilizado para este tipo de investigación fue $AM=MN=NB=10$ m, de coeficiente $K = 2\pi a$, cuya eficacia ha sido comprobada en trabajos anteriores, con el logro de profundidades de estudio cercanas a los 6 m.

El equipamiento geofísico que se utilizó para la adquisición de la información fue la Estación Geoelectrica Digital Tayata - 2R, acoplada a un generador de corriente continua VIL - 3T de 180 V de salida, suficientes para lograr mediciones confiables.

La metodología empleada se basó en la detección de zonas anómalas ($\rho_a > 30 \Omega.m$), que responden en un gran porcentaje a cuerpos arenosos, como se ha demostrado en trabajos realizados en los distintos sectores del río Chambas (Chambas III y IV), en sistema fluvial Braided, en la provincia

de Ciego de Ávila, y en los yacimientos Santa Isabel y El Ángel, pertenecientes al río Saramaguacán del sistema fluvial Anastomosado, en la provincia de Camagüey. Para esto, se trazaron inicialmente perfiles cada 100 m en las zonas elegidas y posteriormente, donde las dimensiones de las anomalías fueron de interés, se realizaron detalles en líneas intermedias para que los cuerpos quedaran precisados cada 50 m. A las zonas anómalas que podían conformar cuerpos arenosos se les estudió además con una línea de Tomografía Eléctrica Wenner (TEW), para conocer el comportamiento de la resistividad en la profundidad y poder ubicar las perforaciones en las zonas más perspectivas.

- Trabajos de perforación

Los trabajos de perforación fueron realizados con el objetivo de comprobar los depósitos aluviales revelados mediante los trabajos de interpretación conjunta de los itinerarios geológicos y los métodos geofísicos, con el fin de estudiar sus características cualitativas y cuantitativas (granulometría, potencia, composición mineral y estimación de recursos).

Orientativamente, como metodología de estos trabajos, se planteó realizar de una a tres comprobaciones con perforación en cada uno de los cuerpos aluviales detectados por los métodos geólogo geofísicos, en dependencia de sus dimensiones. La profundidad proyectada de los pozos fue de 6,00 m y la profundidad promedio real fue de 4,47 m.

Todos los pozos ejecutados fueron verticales y se perforaron en seco. La recuperación promedio fue del 97 %, y fueron perforados con máquinas autotransportadas URB – 2 A 2 en la Primera Campaña y UGB -50 en la Segunda Campaña.

Para cumplir con los objetivos trazados, se proyectó la realización de 420,0 m de perforación en 70 pozos. De estos, se perforaron en total 196,80 m en 42 pozos. Esta diferencia se debe a que no se trabajó en el río Tana por no revelarse zonas perspectivas en los itinerarios geológicos y tampoco anomalías geofísicas de interés en las zonas donde se ejecutaron las mediciones, por lo que se reorientó el metraje proyectado hacia el Río Jobabo. Solo se ejecutó un 46,8 % del metraje total planificado y un 60 % de realización de la cantidad de pozos proyectados.

- Investigaciones de laboratorio

Las investigaciones de laboratorio, en correspondencia con el estadio de los trabajos de reconocimiento geológico, estuvieron orientadas a obtener una caracterización generalizada de los cuerpos de arena detectados en los trabajos geólogo geofísicos ejecutados. Fueron efectuados 113 análisis granulométricos por siete tamices, tamiz 200 y Módulo de Finura, 32 análisis para impurezas orgánicas y 15 análisis mineralógicos. Fueron realizadas además tres pruebas colaterales para cerámica roja.

Al seleccionar los ensayos y análisis necesarios para ejecutarlos en este estadio, se consultaron las normas NC 054-256-83, NRIB 855-1986 y NRIB 875-1986. Ya en la fase de ejecución de los análisis, y al ser derogada la norma NC 054-256-83, se trabajó con las normas NC -178-2002,

NC- 182-2002 y NC- 185-2002. La fase final para el análisis de los resultados se realizó por la norma NC-251-2005, que sustituye a la NC 054-256-83.

Para las muestras básicas se realizaron las siguientes determinaciones:

- 1- Análisis granulométrico por los tamices 9.52, 4.76, 2.38, 1.19, 0.59, 0.295 y 0.149
- 2- Módulo de finura
- 3- Porcentaje de material más fino que pasa por el tamiz 200
- 4- Contenido de impurezas orgánicas

Para las muestras complementarias se efectuó un análisis mineralógico, que determinó los minerales constituyentes de las arenas y la presencia de minerales sulfurosos.

Los ensayos físico mecánicos fueron realizados en el laboratorio de la Unidad de Investigación para la Construcción (UIC) de la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA) de Camagüey. Los análisis mineralógicos se llevaron a cabo en el Departamento de Mineralogía y Petrología del Instituto de Geología y Paleontología (IGP) de la Habana. La preparación de las muestras para los ensayos solicitados se realizó en cada una de las dependencias citadas anteriormente.

Evaluación de las perspectivas del área

Los trabajos realizados permitieron comprobar la amplia perspectividad del área de reconocimiento geológico en el río Jobabo para detectar la presencia de volúmenes de arenas aluviales y colateralmente gravas, arcillas arenosas y plásticas mediante el uso del complejo de métodos geólogo geofísicos propuestos. Fueron localizadas seis zonas para la detección de arenas aluviales, en las cuales, luego de un trabajo de interpretación detallada, se seleccionaron los sectores más favorables para realizar los trabajos de perforación y los consiguientes muestreos e investigaciones de laboratorio, lo que posibilitó la delimitación y la estimación de los recursos y garantizó la presencia de volúmenes de arena aluvial que superaron la proyección preliminar en la Tarea Técnica.

Como guía principal para el trabajo conjunto, se planteó la localización de los recursos con un uso racional de los gastos, en los lugares con las mejores condiciones de acceso, a pesar de la gran invasión de marabú en toda el área. También se observó la gran perspectividad de las áreas situadas al sur del último sector de trabajo, Los Sitios, en las cuales deben realizarse trabajos en un futuro inmediato, que aumentarían el potencial de cuerpos de arenas de toda la llanura aluvial sur del río Jobabo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como resultado de esta investigación, fueron localizados en las zonas de los municipios Colombia y Jobabo, al sur de la Provincia de las Tunas sectores perspectivos para la explotación

de depósitos de arena aluvial en paleocauces enterrados y/o terrazas fluviales en aras de implementar su uso en las labores de construcción como parte de los planes de desarrollo local.

Los sectores más perspectivas fueron localizados en el área del Río Jobabo (Figura 3), donde se realizaron perforaciones de comprobación en las anomalías geofísicas que brindaron resultados positivos. Se estimaron los volúmenes de recursos identificados inferidos San Antonio Este (98777,25 m³), San Antonio Oeste-1 (103257,54 m³), San Antonio Oeste-3 (80044,15 m³), Los Sitios Este (122118,82 m³) y Los Sitios Oeste (239012,12 m³). Igualmente, fue calculado un punto en anomalía geofísica con recursos no identificados hipotéticos en el sector La Caridad (11881,62 m³). Todo esto representa un total de 643209,89 m³ de recursos en la categoría de Inferidos y 11881,62 m³ en la categoría de Hipotéticos.

En los Sectores Anacaona y La Julia se realizaron itinerarios geológicos, con los que fue posible verificar la perspectiva nula de los meandros del río Tana en el desarrollo de paleocauces y/o terrazas que pudieran presentar arena. Existen pocas llanuras de inundación y abundante presencia de arcillas con poca potencia en sus perfiles naturales sobre rocas volcánicas que afloran. No obstante, fueron efectuados algunos trabajos geofísicos que comprobaron la interpretación geológica preliminar. Los sectores estudiados en el río Tana fueron declarados negativos.

Resultados geológicos y geofísicos

Río Jobabo

Este río se estudió desde la coordenada Y = 248200 hasta la Y = 257400. Fue subdividido en cuatro sectores (San Antonio,

Los Sitios, San Rafael y La Caridad), para hacer más fácil su investigación.

Para este artículo solo se muestran como ejemplos los resultados obtenidos en los sectores San Antonio y Los Sitios, además de los analíticos para el Sector San Antonio Este 1.

Sector San Antonio

Las investigaciones comenzaron por este sector al existir un depósito de arena en explotación (Figura 4) detectado en las investigaciones anteriores, en el que se estimaron recursos asociados a paleocauces que fueron expuestos por cortes naturales y laboreos realizados.

A esta área se le denominó San Antonio Este (SAE), ya que se ubica en la ribera este del río, en un meandro pronunciado, al sur de la carretera de Colombia a Jobabo (Figura 5). Allí fueron detectadas cinco zonas anómalas de interés con ρ_a mayor de 30 Ω .m. La primera de estas estuvo localizada desde la línea SA-250900 hasta la línea SA-251050, entre las estaciones E=450700 – 450850. La resistividad del subsuelo logró alcanzar intensidades de ρ_a de 34 a 88 Ω .m.

Por la coordenada Y = 251050 se realizó una línea de TEW (Figura 6), en la que se observó un buen contraste de ρ_a entre las arenas y las arcillas que la subyacen. Se logra delimitar la potencia que alcanzan las arenas, aunque siempre es superior al valor real.

Los epicentros de las zonas anómalas fueron comprobados con la perforación de los pozos SA-6E, SA-7E, SA-10E y SA-11E, que cortaron potencias de arena de variado orden (2,50 a 4,60 m). Esta zona fue denominada Bloque SAE-1. El perfil geológico obtenido se muestra en la Figura 7.

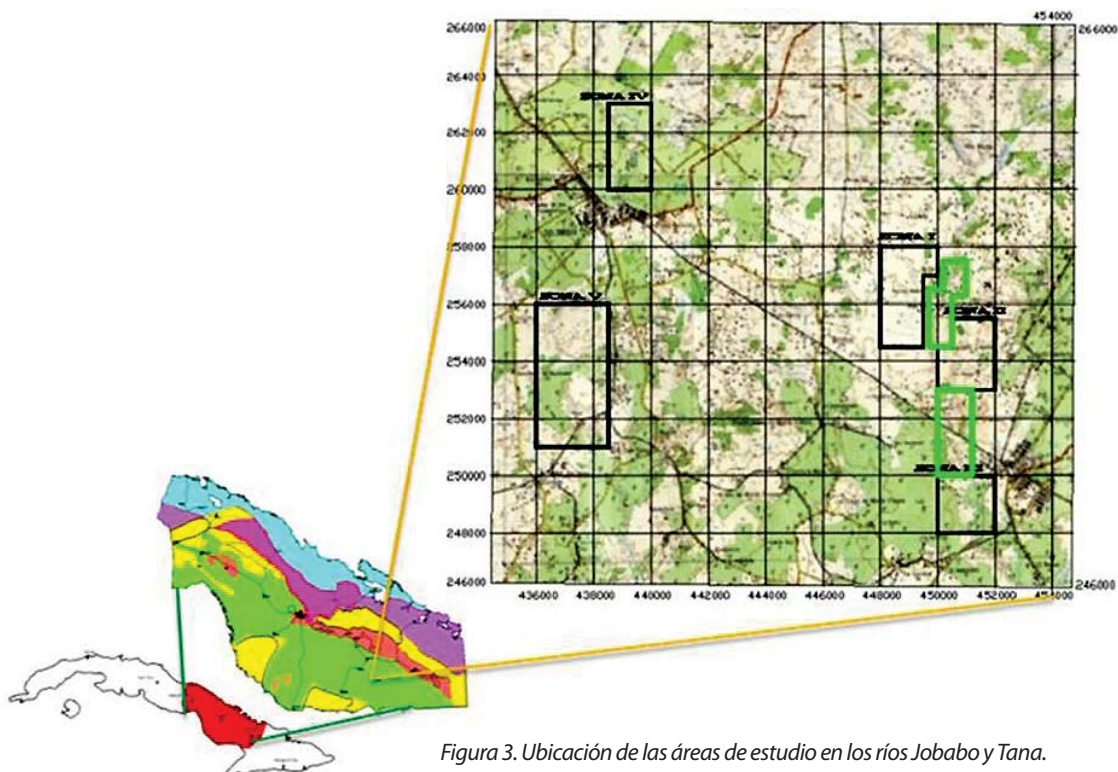


Figura 3. Ubicación de las áreas de estudio en los ríos Jobabo y Tana.



Figura 4. Depósito de arena en explotación. Sector San Antonio Este-3 (SAE-3).

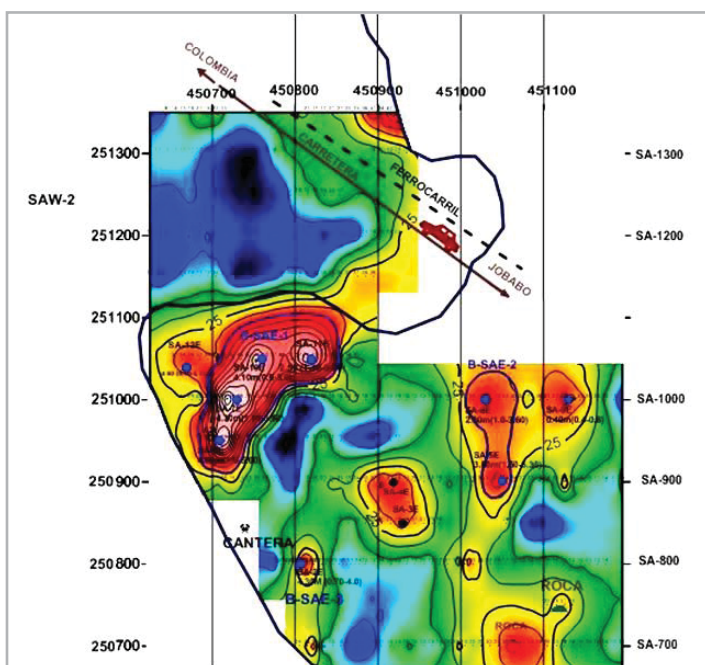


Figura 5. Sector San Antonio Este (SAE).

El volumen de los recursos inferidos (V) se obtuvo mediante el cálculo del área anómala $A = 19\,291,58\text{ m}^2$ para ρ_a mayor de $30\ \Omega\cdot\text{m}$, multiplicado por la potencia promedio útil ($P = 3,88\text{ m}$). Como resultado se obtuvo $V = 74\,851,33\text{ m}^3$.

La segunda zona anómala se ubica más al este, en las líneas SA-250900 hasta SA-251000, desde las estaciones E = 451000 – 451100, con intensidades de ρ_a entre 37 y $40\ \Omega\cdot\text{m}$. Dicha zona ha sido denominada B-SAE-2. Aquí también se ejecutó la TEW, por la línea SA-251000, como se muestra en la Figura 8. Se obtuvo una anomalía con intensidad máxima de $\rho = 38\ \Omega\cdot\text{m}$ que, al comprobarse con los pozos SA-5E y SA-8E (Figura 9), arrojaron potencias (P) de 3,80 m y 2,60 m, con un área anómala (A) de $6\,202,24\text{ m}^2$, para un volumen de $19\,847,17\text{ m}^3$.

La tercera zona anómala se ubica en las líneas SA-250850 hasta SA-250900, a la altura de la estación E – 450900, con una intensidad de $\rho_a > 30\ \Omega\cdot\text{m}$. Fue comprobada con los pozos SA-3E y SA-4E, en los que resultó negativa, al cortarse arcillas arenosas y fragmentos de rocas volcánicas.

La cuarta zona anómala se localiza en la línea SA-250700. Esta no se perforó, debido a la existencia de un afloramiento en sus cercanías. Debe responder a rocas volcánicas.

Por último, la pequeña anomalía detectada en el frente de cantera, en la línea SA-250800, a la altura de la estación E-450800 y denominada B-SAE-3, fue comprobada con el pozo SA-2E, que cortó 4,30m de arena, con un área anómala de $970,98\text{ m}^2$. Como resultado se obtuvo $V = 4\,175,21\text{ m}^3$.

Los Sitios

Este sector se ubica en la porción meridional de los trabajos. Existen valores anómalos de resistividad desde la línea LS-248500 hasta LS-248900 en ambas márgenes del río, lo que demuestra que, al ser más amplias las llanuras de inundación, las perspectivas de este río aumentan hacia el sur (Figura 10).

En la margen oeste se detectaron dos zonas anómalas. La primera se localiza desde la línea LS-248700 hasta LS-248900, con intensidades de ρ_a entre 37 y $64\ \Omega\cdot\text{m}$. Fue comprobada con los pozos LS-2W, LS-4W, LS-6W y LS-7W, que conformaron el bloque B-LSW-3, con un área de $40\,618,79\text{ m}^2$ y potencia media útil de 3,84 m, para un volumen de $155\,976,15\text{ m}^3$.

La segunda zona anómala, de forma alargada, se localizó bordeando el río, y presentó intensidades de $\rho_a = 36-118\ \Omega\cdot\text{m}$. Esta zona tuvo que dividirse en dos bloques, debido a que el pozo LS-5W resultó no balanceado (NB) al presentar poca potencia de arena, solo 0,75 m.

El primer bloque, denominado B-LSW-1, está conformado por los pozos LS-1W y LS-3W, con una potencia de 2,03 m y un área de $29\,164,41\text{ m}^2$, para un volumen de arena de $59\,203,75\text{ m}^3$. En la Figura 11 se muestra el perfil geológico por la línea L-248900 de los bloques B-LSW-3 y B-LSW-1.

El segundo bloque (B-LSW-2) está formado por los pozos LS-8W y LS-9W, con una potencia promedio de 2,35 m, en un área de $10\,246,63\text{ m}^2$, para un volumen de $24\,079,58\text{ m}^3$.

Es necesario aclarar que estas zonas no pudieron detallarse con el PEWA ni les fueron realizadas líneas de TEW, al estar infestadas de marabú y tener muy poco acceso.

En la margen este (ver Figura 10) fueron localizadas tres zonas anómalas, con intensidades en el orden de $\rho_a = 32 - 52\ \Omega\cdot\text{m}$. Fue posible detallar la zona con perfiles cada 50 m, al estar ubicada en terreno cubierto por pastos. De esta forma quedaron delimitados con mayor exactitud los bloques delimitados. El primero de estos bloques (B-LSE-1) está conformado por los pozos LS-1, LS-2, LS-3, LS-4 y LS-5, con una potencia promedio de 3,55 m y un área de $30\,258,76\text{ m}^2$, para un volumen de $107\,418,60\text{ m}^3$.

La segunda línea de investigación se ejecutó por la coordenada Y=248600, con centro en la estación E-451590 (Figura 12),

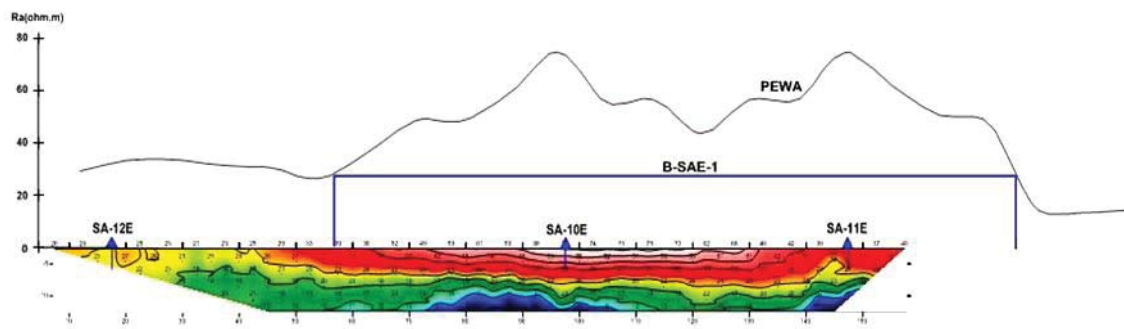


Figura 6. TEW. Línea SA-251050.

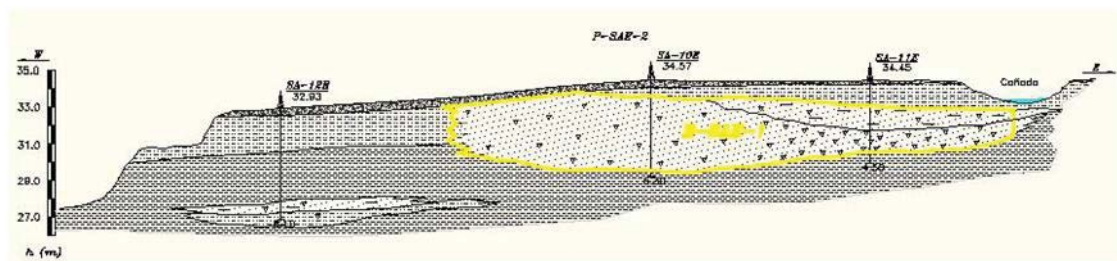


Figura 7. Perfil geológico. Línea SA-251050. Leyenda: Anexo 1.

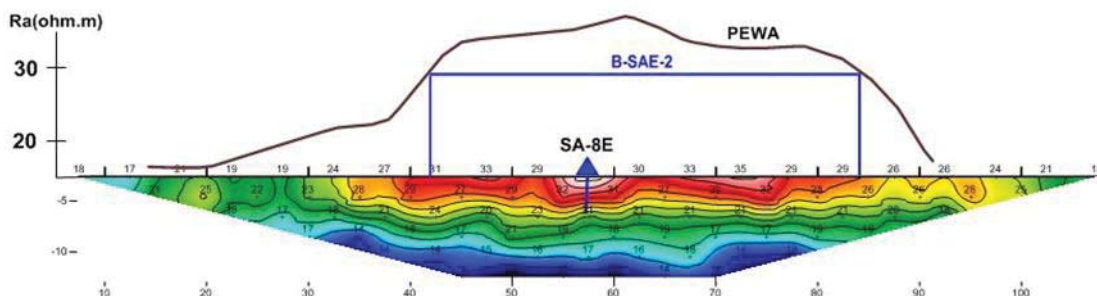


Figura 8. TEW. Línea SA-251000.

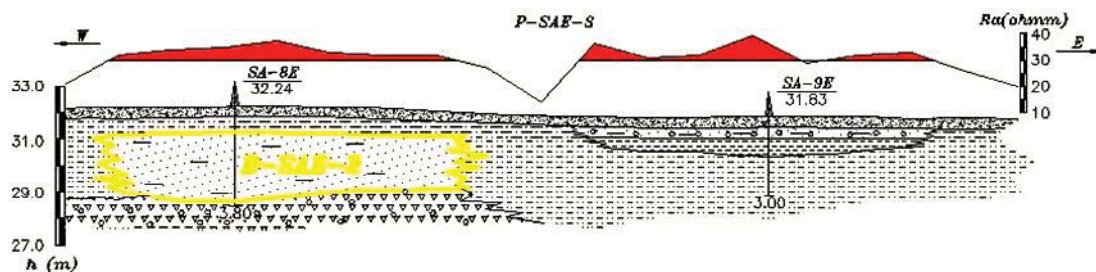


Figura 9. Perfil geológico. Línea SA-251000. Leyenda: Anexo 1.

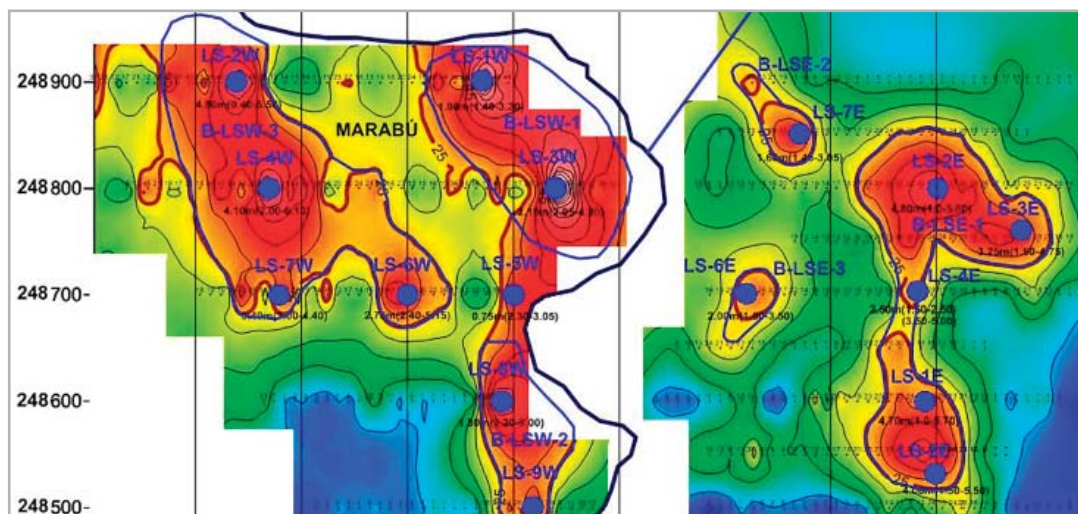


Figura 10. Sector Los Sitios.

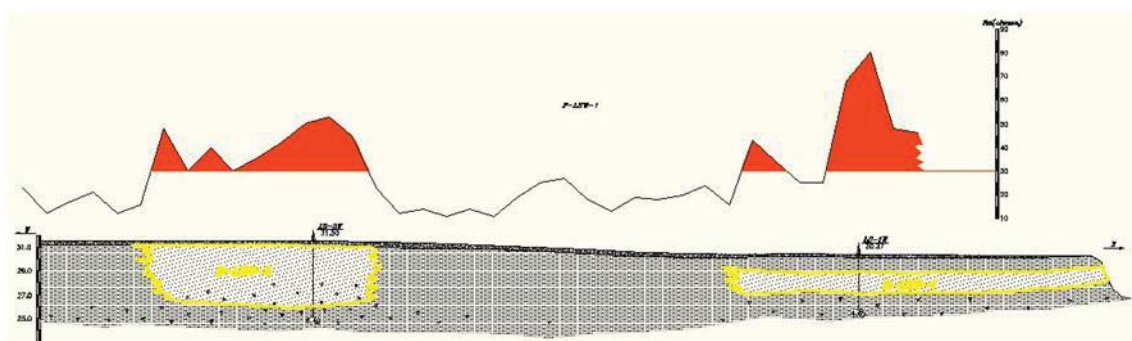


Figura 11. Perfil geológico por la línea LS-248900. Leyenda: Anexo 1.

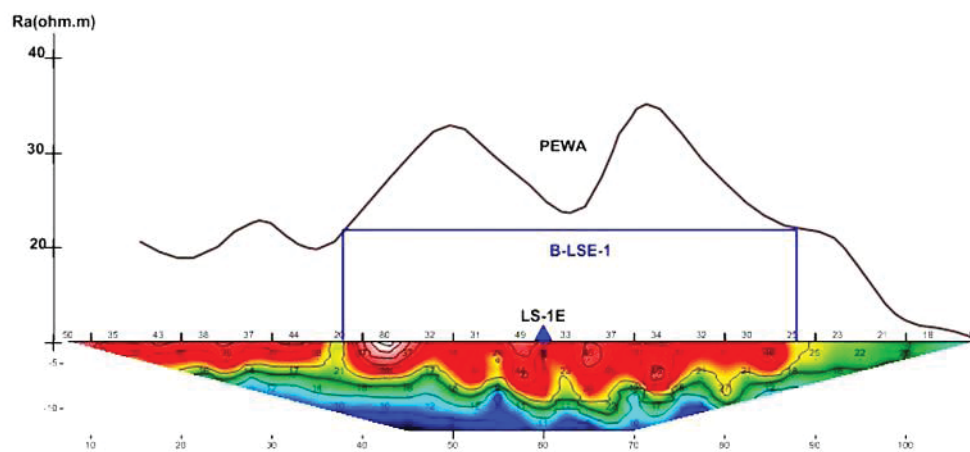


Figura 12. TEW. Línea LS-248600.

donde más tarde se ubicaría el pozo LS-1E, el cual cortó una potencia de 4,70 m en el intervalo 1 - 5,70 m (Figura 13).

El segundo bloque (B-LSE-2) solo está conformado por el pozo LS-7E, que cortó una potencia de 1,60 m en el intervalo 1,45 – 3,05 m. Este bloque presenta un área de 4 784,24 m², para un volumen de arena de 7 654,78 m³.

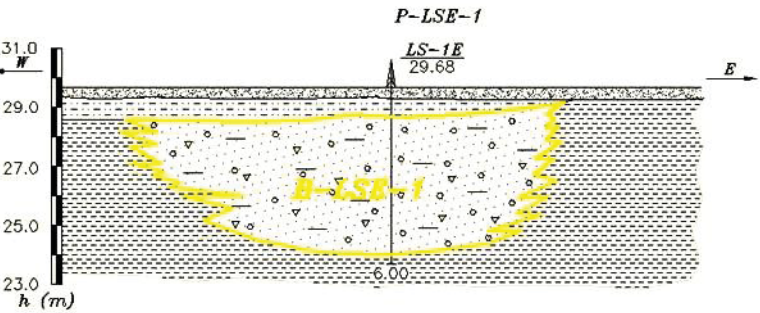


Figura 13. Perfil geológico. Línea SA-251000. Leyenda: Anexo 1.

Por último, el tercer bloque (B-LSE-3) está conformado por el pozo LS-6E, con potencia de 2,00 m en el intervalo 1,50 – 3,50 m. El bloque presenta un área de 3 522,72 m² y un volumen de arena de 7 045,44 m³.

En general, es posible decir que en el río Jobabo se ubicaron 40 pozos en los epicentros de las anomalías de resistividad con intensidades mayores que 30 ohm.m. De estos, 34 fueron positivos, para un 85%, lo que demuestra la efectividad de las dos variantes eléctricas utilizadas para la determinación de depósitos de arena aluvial en paleocauces enterrados.

La Tabla I muestra los distintos sectores positivos con los volúmenes de arena localizados (recursos inferidos), organizados de norte a sur. Como se aprecia, los volúmenes van en aumento en esa dirección, lo cual demuestra que la perspectiva de este río crece hacia el

sur, donde las terrazas de la llanura de inundación se van haciendo cada vez mayores.

Resultados analíticos

El bloque SAE-1 estuvo integrado por los pozos SA-6E, SA-7E, SA-10E, SA-11E. La distancia entre los pozos de norte a sur es de 50 m desde los perfiles 950, 1000 y 1050. Se obtuvo una potencia media de arena de 3,88 m y una potencia media de cubierta de 1,15 m. El módulo de finura ponderado para el bloque fue de 3,74, con una relación promedio de potencia de destape con respecto a la potencia útil de 0,32 m.

Toda la potencia útil de los pozos fue homogeneizada, cuarteada y muestreada. Estas muestras fueron enviadas al laboratorio para la realización del análisis granulométrico completo. Como resultado, se obtuvo un valor estimado del cálculo de recursos de 74851,33 m³ en el bloque (Ver Tabla I), con un porcentaje de arena ponderado de 89,71.

Se evaluaron de forma colateral y orientativamente las arcillas presentes en los pozos SA-7E y SA-10E. El primero se encontró arcilla muy plástica, de 5,60 m hasta 6 m; mientras que el segundo presenta arcilla plástica con alto contenido de carbonato de calcio, de 5 m hasta 5,30 m. Estas arcillas pueden utilizarse para la elaboración de objetos de barro, según las pruebas realizadas en la Planta de Cerámica Roja de Camagüey (Figura 14).

Dado su alto módulo de finura, estas arenas para poder ser utilizadas deben recibir un beneficio por tamizado y lavado, ya que presentan un alto contenido de partículas mayores de 9,52 mm (gravas y guijarros) y fracción fina menor de 0,149mm. Dichas arenas tienen un comportamiento granulométrico general que no cumple con la especificación según la norma NC-251-2005 Áridos

Tabla I. Sectores positivos y volumen de arena calculado.

RECURSOS INFERIDOS			
Sector	Bloque	Volumen (m³)	Total
San Antonio Oeste - 3	B-SAW-1	48 366,20	80 044,15
	B-SAW-2	14 892,58	
	B-SAW-3	16 785,37	
San Antonio Este	B-SAE-1	74 851,33	98 873,71
	B-SAE-2	19 847,17	
	B-SAE-3	4 175,21	
San Antonio Oeste - 1	B-SAW-1	103 257,54	103 257,54
Los Sitios Este	B-LSE-1	107 418,60	122 118,82
	B-LSE-2	7 654,78	
	B-LSE-3	7 045,44	
Los Sitios Oeste	B-LSW-1	59 203,75	239 259,48
	B-LSW-2	24 079,58	
	B-LSW-3	155 976,15	
Total			643 553,70



Figura 14. Briquetas de valoración colateral de arcilla para cerámica en el río Jobabo.

para Hormigones Hidráulicos, que es la vigente en la actualidad (Figura 15).

En las tablas II, III y IV se presentan las características mineralógicas de la composición de las arenas provenientes del bloque B-SAE-1, analizadas a partir de muestras del pozo representativo (SA-7E D: 3,00 H: 5,00 m).

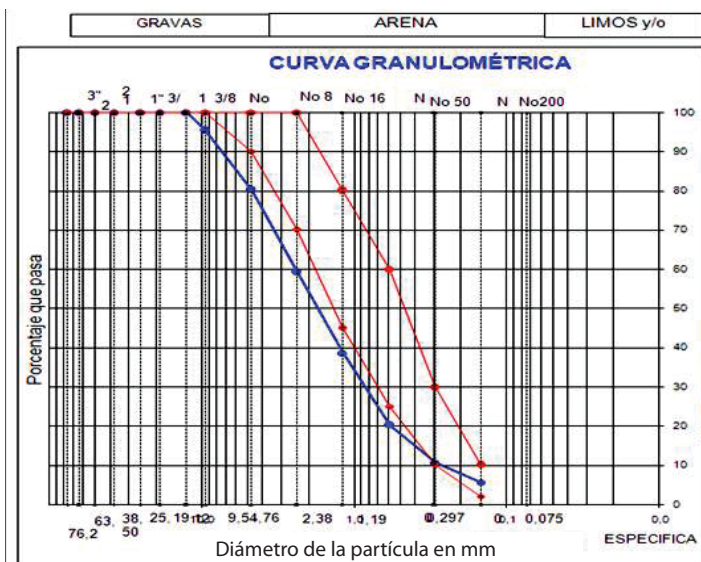


Figura 15. Curva granulométrica del pozo SA-7E, D: 3,00 H: 5,00 m, representativo del B-SAE-1.

CONCLUSIONES

- Fue establecida la presencia de depósitos de arenas aluviales en paleocauces enterrados y/o terrazas fluviales y se estudiaron preliminarmente sus características cualitativas y cuantitativas con vistas a sus usos como áridos para la construcción y el desarrollo de la producción local de materiales de la construcción, de conformidad con lo establecido en los Lineamientos de la Política Económica y Social del Partido y la Revolución, en correspondencia específica con el Lineamiento 296.
- En los seis sectores del río Jobabo en los que se detectaron anomalías geofísicas fueron calculados 14 bloques de arena aluvial, con un volumen total de 643 209,89 m³ en categoría de Recursos Inferidos y de 11 881,62 m³ en categoría de Recursos Hipotéticos.
- Dada la ampliación lateral del canal del río, al ser este un sistema fluvial de alta sinuosidad (meandriforme) en su llanura aluvial y aumentar la posibilidad de sedimentar su carga, los recursos calculados aumentan de norte a sur.
- Es posible utilizar las gravas que se encuentran en el río Jobabo si se trituran hasta convertirlas en arena que cumpla las especificaciones de la norma NC-251-2005, para no desechar esta materia prima. Pueden usarse además las arcillas presentes en el área para producir artículos de barro.

Tabla II. Composición mineralógica en relación con las clases granulométricas registradas en el pozo SA-7E.

No.	Minerales	Clase > 1,0 mm (%)	Clase > 0,4 mm (%)
1	Fragmentos de rocas silíceas	49,4	30
2	Fragmentos de rocas volcánicas	50	30
3	Hematita	0,1	0,5
4	Limonita	0,5	0,5
5	Cuarzo		36,4
6	Piroxeno		0,1
7	Anfíbol		0,5
8	Fragmentos de rocas arcillosas		2

Tabla III. Composición mineralógica de la clase granulométrica > 0,2 mm registrada en el pozo SA-7E.

No.	Minerales	Fracción magnética Peso: 0,255 g	Fracción electromagnética Peso: 1,848 g	Fracción diamagnética Peso: 1,608 g
1	Magnetita	15		
2	Fragmentos de rocas volcánicas	59	37,1	
3	Fragmentos de rocas silíceas	25	35	
4	Hematita	0,5	2	
5	Limonita	0,5	10	
6	Mica		0,2	
7	Anfíbol		0,5	
8	Cuarzo		15	95
9	Piroxeno		0,2	
10	Plagioclasa			5

Tabla IV. Composición mineralógica de la clase granulométrica < 0,2 mm registrada en el pozo SA-7E.

No.	Minerales	Fracción magnética Peso: 0,123 g	Fracción electromagnética Peso: 0,773 g	Fracción diamagnética Peso: 0,671 g
1	Magnetita	40		
2	Limonita	5	3	
3	Hematita	5	2	
4	Fragmentos de rocas volcánicas	50	53	
5	Anfíbol		2	
6	Plagioclasa		10	15
7	Cuarzo		30	82
8	Fragmentos de rocas arcillosas			3

- Es probable que la mayor perspectiva de encontrar nuevos depósitos de arenas en el río Jobabo hasta su desembocadura para ejecutar futuros trabajos de reconocimiento y prospección de depósitos de arena, sea estudiar al sur del sector Los Sitios.
- El método geofísico empleado (Perfilaje Eléctrico Wenner Alpha (PEWA), con las dimensiones AM – MN – NB=10m) es el dispositivo ideal para localizar depósitos de arena aluvial en paleocauces enterrados.
- La Tomografía Eléctrica Wenner (TEW) brindó información acerca del comportamiento de la resistividad (ρ_a) en la profundidad, lo que permitió precisar con mayor exactitud el tamaño de los paleocauces.
- Cuando los depósitos de arena descansan sobre lecho de rocas, los valores de ρ_a obtenidos se solapan y se logran anomalías más intensas que enmascaran la potencia de arena.
- La metodología geólogo geofísica empleada permite localizar los distintos cuerpos con un mínimo de gastos por concepto de pozos de perforación, los que solo son ubicados en los epicentros de las anomalías de PEWA.
- El río Tana fue evaluado como no perspectivo para arena.

BIBLIOGRAFIA

- Arche, A., 1992. Sedimentología. Madrid: Editorial Consejo Superior de Investigaciones Científicas. P. 53-142.*
- Escalona, B. W., et al., 1991. Informe sobre la Prospección Detallada y Exploración Orientativa de placeres de oro en la región Guáimaro -*

Las Tunas. Camagüey: Archivo EGM Camagüey. Inédito

Gorchakov, G. I., 1984. Materiales de construcción. Moscú: Editorial Mir. P. 680.

Guerrero, J., et al., 2004. Informe Reconocimiento Geológico para arena aluvial y arcilla en los alrededores de Golden Hill. Camagüey: Archivo EGM Camagüey. Inédito

Mc Donald Mines LTD, 1997. Informe de los trabajos de mapeo regional a escala 1: 50 000 de la Concesión Florencia- Jobabo. La Habana: ONRM. Inédito

Orus, F., 1966. Materiales de construcción. La Habana: Edición Revolucionaria. P. 703.

Quintas, F., 1986. Estratigrafía y Sedimentología. La Habana: Editorial Pueblo y Educación. P. 238.

Shevchenko, V., et al., 1979. Informe sobre los trabajos de levantamiento – búsqueda a escala 1: 100 000, en los límites de la parte sur del Anticlinorio Camagüey (región Guáimaro – Las Tunas). La Habana: ONRM. Inédito

NORMAS CUBANAS UTILIZADAS

NC 054-256-83. Materiales y productos de la construcción. Arena de yacimientos. Especificaciones de calidad.

NC-178-2002. Análisis Granulométrico.

NC-182-2002. Material más fino que el tamiz 200.

NC-185-2002. Impurezas Orgánicas.

NC-251-2005. Áridos para hormigones hidráulicos. Requisitos.

NRIB 855-1986. Prospección geológica. Arena y grava para la construcción. Evaluación tecnológica.

NRIB 875-1986. Yacimientos de arena y grava para la construcción. Prospección geológica.

UTILIZACIÓN DE LOS DATOS DE GEORRADAR EN LA ESTIMACIÓN DE RECURSOS MINERALES CON EL EMPLEO DE LA GEOESTADÍSTICA, EN YACIMIENTOS FERRONIQUELÍFEROS

MARÍA MAGDALENA GENTOIU ¹, JORGE ACOSTA BREAL

Empresa Geominera Camagüey

Carretera de Siboney km 2½, Santiago de Cuba.

Correo: (1) mgentoiu@geominera.co.cu

RESUMEN

Un problema que los geólogos enfrentan en el estudio de los yacimientos lateríticos es la gran irregularidad del contacto entre la roca dura y la capa friable, laterítica, portadora de la mena. La red de pozos que usualmente se utiliza no es suficiente para describir esta variabilidad y, por lo tanto, la estimación de recursos no es precisa. Para obtener información entre pozos se ha empleado el método geofísico Georradar (GPR), pero hasta ahora los datos resultantes no se habían utilizado en la estimación de recursos.

El presente trabajo muestra una metodología para la incorporación de estos datos en la estimación de los recursos niquelíferos mediante el uso de métodos geoestadísticos, de los cuales los más eficientes resultaron ser los métodos multivariados de estimación: *cokriging* ordinario y *cokriging* colocado. Se confeccionaron modelos de distribución espacial del friable y de la mena a lo largo de todo el yacimiento, con el objetivo de obtener una red tres veces más densa que la red inicial de pozos y utilizarla en la estimación de recursos.

Como caso de estudio se presentan dos bloques del yacimiento laterítico Yagrumaje Norte, para los que se dispone de los datos de la explotación minera, lo que permite comparar los resultados alcanzados.

ABSTRACT

One problem confronted by the geologists studying the lateritic deposits, is the great irregularity of the contact between bedrock and friable, laterite, ore - bearing layer. The borehole grid used is usually not enough to describe this variability and, therefore, the estimated resource is not accurate. To obtain information between boreholes, the Ground Penetrating Radar (GPR) has been employed, but, until now, its information have not been used in the resource calculation.

This paper presents a methodology for incorporation of these data in estimation of the nickeliferous resources, using multivariate geostatistical methods such as Ordinary Cokriging and Collocated Cokriging considering them the most efficient. This made possible to combine the data from the borehole and GPR, and to develop a model of the friable and ore distribution along the entire deposit. The result was a grid three times denser than the initial one, which has been used in the estimation of the resources.

As a case of study, two blocks Yagrumaje Norte deposit are presented with available data mining, allowing comparing the results achieved.

INTRODUCCIÓN

Este trabajo es el resultado de seis años de experiencia en la estimación de recursos minerales, con el empleo de la Geofísica y la Geoestadística, en yacimientos de Moa, Cuba Oriental. Como caso de estudio se han elegido dos bloques del yacimiento Yagrumaje Norte, del que se tienen los datos de la explotación minera, lo que ha permitido comparar y valorar los resultados obtenidos.

El yacimiento Yagrumaje Norte pertenece al macizo Moa – Baracoa, que se caracteriza por presentar rocas ofiolíticas máficas y ultramáficas (basamento) cubiertas por una corteza de intemperismo con zonalidad vertical (laterita), en lo sucesivo nombrada *friable*.

Debido a que el basamento es muy accidentado e irregular, se hace muy difícil modelar la capa *friable* para la estimación de recursos. Se requeriría de una malla muy densa de pozos, que no sería rentable desde el punto de vista del costo de perforación y tendría un impacto negativo sobre el medio ambiente. Es por esto que se ha decidido utilizar los métodos geofísicos, en particular el Georradar (GPR), como una vía alternativa para aumentar la resolución de la información, desde una malla de pozos de $23,5 \times 23,5$, hasta $8,33 \times 8,33$ m.

La utilización conjunta de los datos de perforación y de GPR ha sido posible debido al empleo de la geoestadística multivariada, con sus dos métodos de estimación: cokriging ordinario y cokriging colocado. El *krigeaje* utiliza en la estimación las características de variabilidad y correlación espacial del fenómeno estudiado, por lo que su uso implica un análisis previo de la información, para definir o extraer de esta un modelo que represente su continuidad espacial (modelo de variograma) (Cuador, 2002). Una vez logrado esto, se está en condiciones de obtener el mejor valor posible en cada localización (nodo de la nueva malla), acompañado de la varianza de *krigeaje* como medida del error de la estimación realizada, lo cual brinda la posibilidad de realizar análisis sobre la calidad de las estimaciones.

MATERIALES Y MÉTODOS

Como caso de estudio se han escogido dos bloques del yacimiento Yagrumaje Norte, que fueron explotados y presentan la ventaja de poseer datos de minería, lo que ha permitido comprobar la eficiencia de la metodología empleada. La ubicación de los trabajos realizados en la zona se presenta en la Figura 1.

Se perforaron 119 pozos en una red de $23,5 \times 23,5$ m y se trazaron 21 perfiles de Georradar a una distancia de 16,6 m, con un paso de medición de 0,5 m. La ubicación de los datos de minería coincide con la de los pozos de perforación, aunque la explotación se realizó en bloques con una superficie menor, de $8,33 \times 8,33$ m. El resultado final de las mediciones con el Georradar consiste en determinar el espesor de la capa *friable*, obtenida como diferencia entre la cota del relieve topográfico y la cota superior del basamento digitalizada en las radargramas. Se dispone también de los valores del espesor por GPR en los pozos de perforación. Los datos de la perforación permiten



Figura 1. Ubicación de los trabajos geólogo - geofísicos en dos bloques del yacimiento Yagrumaje Norte.

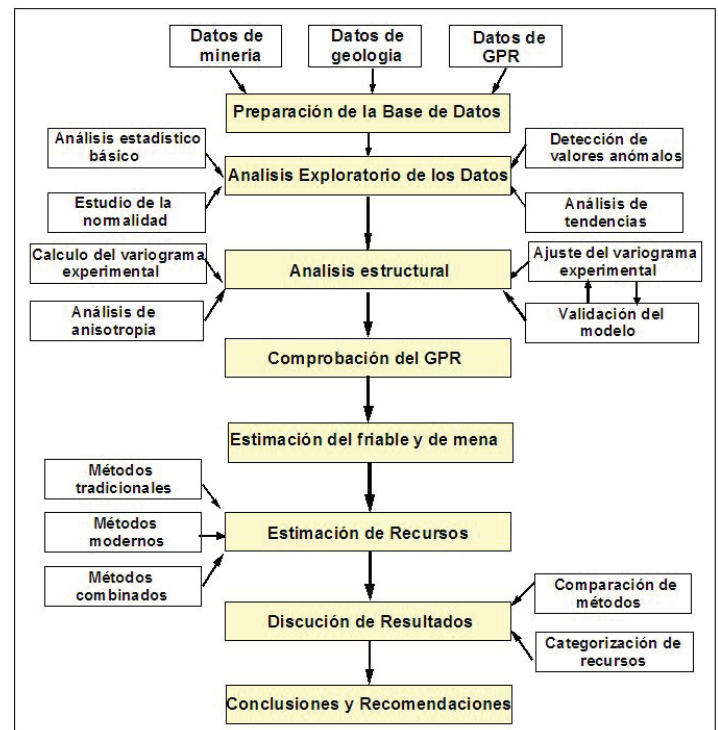


Figura 2. Etapas para la estimación de recursos con Geoestadística.

obtener un espesor de *friable* y uno de mena, calculado en función del contenido de Ni establecido (el *Cutoff*). En lo adelante, el espesor de *friable* se nombrará simplemente *friable* y el espesor de mena será llamado solo *mena*.

La metodología empleada para la estimación de recursos se puede concretar en el diagrama de la Figura 2, pero el objetivo de este trabajo no es la estimación de recursos en sí, sino la forma en que los datos de GPR participan en la estimación de recursos, por lo cual se considerarán solo las primeras cinco etapas presentadas.

Preparación de la Base de Datos

La preparación de la base de datos ha implicado el control integral de los datos, su verificación, corrección de errores numéricos y el estudio de la geología del yacimiento, para tener conocimiento del modelo geológico. Estos son los elementos fundamentales que se tienen en cuenta antes de comenzar un estudio geoestadístico (Armstrong y Carignan, 1997; Cuador, 2002).

Análisis exploratorio de los datos

El análisis exploratorio de los datos (AED) es un paso indispensable en cualquier estudio geoestadístico, ya que permite obtener las características estadísticas de las variables y las relaciones existentes entre ellas, con el fin de encontrar el método óptimo de procesamiento e intervenir, si es posible, para obtener mejores resultados (Díaz y Casar, 2004; Kitanidis, 1997). Como parte del AED, se realizaron los siguientes análisis:

- Análisis estadístico básico

El Análisis estadístico básico ha permitido caracterizar estadísticamente el yacimiento y valorar la calidad de las mediciones geofísicas con respecto a las de perforación y explotación minera, en lo que se refiere a la media, mediana, moda, los cuartiles, coeficiente de variación, desviación estándar y varianza. También era posible la existencia de datos que mostraran diferentes poblaciones, los cuales pueden estar estadísticamente diferenciados y/o perteneciendo a zonas geográficamente distintas.

- Estudio de la normalidad

El estudio de la normalidad representa un paso importante, debido a que la mayoría de los métodos de estimación, como es el caso de la estimación del variograma, tiene un desempeño óptimo cuando la distribución es normal. Por esto, en presencia de distribuciones muy asimétricas usualmente se emplean transformaciones como la logarítmica, anamorfosis, entre otras, que intentan corregir este problema. El histograma, el coeficiente de asimetría y curtosis, el test Q - Q y, sobre todo, la prueba Kolmogorov - Smirnov, se utilizaron para valorar la distribución de los datos.

- Detección de valores anómalos

La detección de valores anómalos u *outliers*, que se diferencian de manera significativa de la mayoría de los datos, es un análisis de gran importancia, puesto que dichos valores pueden influir de manera drástica en el proceso de estimación y pueden conducir a la obtención de un variograma fuertemente errático, lo cual desvirtúa los resultados. Se han buscado tanto valores que se diferencian netamente de la vecindad en la que se encuentran, como valores extremos causantes de las asimetrías en los histogramas, y se definen cuando presentan más de dos desviaciones estándar por encima de la media. No obstante, para propósitos de modelación del variograma se eliminaron provisionalmente estos valores.

- Análisis de tendencias

El estudio de la tendencia se realizó graficando el valor del espesor contra las coordenadas X y Y respectivamente, con el objetivo de notar la estacionalidad de los datos.

- Análisis multivariado

El análisis multivariado es muy importante para comprobar la eficiencia de las mediciones del friable por GPR con respecto a las de pozos o explotación minera, ya que sólo en presencia de una alta correlación entre variables tiene sentido este trabajo y se puede aplicar la geoestadística multivariada. También se comprueba la correlación entre el espesor de mena y del friable en los pozos de perforación, condición indispensable para la estimación de mena. Como herramientas se han utilizado el gráfico de dispersión y el coeficiente de correlación.

Análisis estructural de los datos

El análisis estructural o estudio variográfico consiste en la cuantificación de la correlación espacial y su estructura; el cálculo, análisis e interpretación del semivariograma experimental; y el ajuste de éste a un modelo teórico conocido. Este modelo debe ser validado (Lajaunie, 1997; Legrá y Guardiola, 1999) y correspondido con la geología (Cuador, 2002). Los detalles teóricos pueden ser consultados de cualquier libro de Geoestadística (e.g. Matheron, 1969; Armstrong y Delfiner, 1980).

Comprobación del GPR

Una vez concluidos los AED y el análisis estructural de los datos, se ha comparado el espesor del friable inferido por Georradar con el medido en los pozos de perforación y en la explotación minera. Si los valores de friable fueran muy diferentes estadísticamente, significaría que el GPR no logra separar el contacto friable - basamento, o que el patrón del contacto friable - basamento en las radargramas no es el más adecuado. En este caso, sería necesario cambiarlo de acuerdo a la información ofrecida por los pozos de perforación.

Estimación

El *krigeaje* es una técnica de estimación que proporciona el mejor estimador lineal imparcial (BLUE, del inglés *Best Linear Unbiased Estimator*, Schaug *et al.*, 1993) y permite obtener el valor de una propiedad Z en sitios no muestreados mediante la interpolación de los valores vecinos de tal propiedad.

Supóngase que se dispone de los valores muestreados $Z(x_i)$, $i = 1, \dots, n$, y se desea estimar un valor de la característica observada en el panel $Z(v)$ por una combinación lineal de $Z(x_i)$. La fórmula para el cálculo queda de la forma:

$$Z^*(v) = \sum \lambda_i Z(x_i)$$

Donde:

$Z^*(v)$: valor estimado
 λ_i : pesos de *krigeaje*

De este modo, los λ_i son obtenidos de tal forma que proporcionan un estimador insesgado ($E[Z^*(v) - Z(v)] = 0$) y de varianza mínima ($\text{Var}[Z^*(v) - Z(v)]$).

En el presente trabajo se ha utilizado tanto la estimación univariada como la multivariada. Esta última estimación implica la noción de semivariograma cruzado, que define la correlación lineal y espacial entre el espesor por GPR con el espesor por pozos, y el espesor de friable con el espesor de mena en los pozos de perforación. Su expresión es:

$$\gamma_{AB}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z_A(x_i) - Z_A(x_i + h)] [Z_B(x_i) - Z_B(x_i + h)]$$

En esta ecuación, Z_A y Z_B son variables correlacionadas; Z_A es la variable principal (espesor friable por perforación) y Z_B la variable auxiliar o secundaria (espesor friable por GPR).

Los criterios para el cálculo del semivariograma cruzado son análogos al caso univariado. El semivariograma directo toma sólo valores positivos, mientras que el cruzado puede tomar valores negativos, lo que indica una correlación inversa entre las variables. Un aspecto importante en el modelado de los semivariogramas cruzados es el hecho de que deben satisfacer la desigualdad de Cauchy – Schwarz (Wackernagel, 1995):

$$|\gamma_{AB}(h)|^2 \leq \gamma_A(h) \gamma_B(h)$$

En particular, el producto de cada uno de los sill de los variogramas individuales es mayor que el cuadrado del sill del variograma cruzado:

$$(\sigma_{AB}^2)^2 \leq \sigma_A^2 \sigma_B^2$$

Una forma de modelar los semivariogramas cruzados consiste en ajustar independientemente los semivariogramas de las variables Z_A , Z_B y el de la suma $Z_A + Z_B$, los cuales están relacionados por la siguiente expresión:

$$\gamma_{AB}(h) = \frac{1}{2} [\gamma_{A+B}(h) - \gamma_A(h) - \gamma_B(h)]$$

El cokrigeado, aún sin diferenciarse del krigeado desde un punto de vista algorítmico, permite la participación directa de los datos de información secundaria en la estimación de la variable principal. De este modo, la información secundaria se trata como información covariada. No es necesaria la existencia de la variable secundaria en todos los nodos en que se desea estimar la variable primaria, pero es recomendable que sea por lo menos en la mitad de los puntos del muestreo de la variable principal. El GPR tiene la gran ventaja de que ofrece información en todos los pozos de perforación.

En Issaks y Srivastava (1989) y Wackernagel (1995) se presentan elementos para el cálculo y ajuste de los semivariogramas en el caso multivariado, además del Modelo Lineal de

Corregionalización como procedimiento para modelar semivariogramas directos y cruzados.

Validación del modelo teórico

Uno de los métodos utilizados para la validación de los modelos (*Cross validation*) es el *One leave out*, que consiste en estimar el friable en el punto medido, en función de los valores de friable que se encuentran en el área de búsqueda (vecindad), sin considerar en la estimación el valor ubicado en el propio punto. La diferencia entre el valor medido y el calculado representa el error de estimación. Un estudio estadístico detallado de este error permite saber si el modelo empleado se ajusta bien o no a los datos reales.

En este caso, se emplearon los siguientes estadígrafos (Figura 3):

- Coeficiente de correlación (Correl.) entre los valores medidos (Z) y los calculados (Z^*)
- Error medio (EM)
- Varianza del error (VE)
- Media del error estandarizado (MES)
- Varianza del error estandarizado (VES)

En estas ecuaciones:

N : número total de puntos medidos por perforación, GPR o ambas

Z : valor medido

Z^* : valor calculado (estimado)

σ : desviación estándar teórica (estimada)

$$EM = \frac{1}{N} \sum_N (Z^* - Z) \quad VE = \frac{1}{N} \sum_N (Z^* - Z)^2$$

$$MES = \frac{1}{N} \sum_N \frac{(Z^* - Z)}{\sigma} \quad VES = \frac{1}{N} \sum_N \frac{(Z^* - Z)^2}{\sigma}$$

Figura 3. Fórmulas para los estadígrafos utilizados en la validación del modelo teórico.

Como se trata de estimación y el krigeaje es un interpolador exacto, es de esperar que EM sea nulo. El grado de insesgates está dado por la varianza de krigeaje (σ_k^2) que tiene que ser mínima. Esta tiene un carácter puramente geométrico; es decir, es relativa a la configuración espacial de los datos y a la variabilidad de éstos, pero no tiene en cuenta los valores de los datos (Armstrong y Carignan, 1997; Deutsch y Journel, 1998; Cuador, 2002). La varianza de krigeaje y el sistema de krigeaje en general dependen sólo del modelo estructural $C(h)$ o $\gamma(h)$ obtenido. Estas características dan la posibilidad de que sea usada cuidadosamente para el estudio de redes y la clasificación de recursos.

El más significativo estadígrafo es la varianza del error estandarizado (VES), que corresponde a la relación entre la varianza experimental y la teórica. Cuando el modelo se ajusta bien a los datos experimentales, las dos varianzas son iguales y, por tanto, el cociente se acerca al valor 1.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla I se presenta un resumen de la estadística básica de las variables utilizadas en la estimación de recursos. El friable por minería sirve para la comparación de los resultados con la situación real.

Conforme a la prueba de Kolmogorov - Smirnov, el friable por GPR tiene una distribución normal para un nivel de significación de 0,05, e igual sucede con la potencia por minería para un nivel de significación de 0,1, lo que permite considerar la media y la desviación estándar como muy representativas para estas dos variables. En el caso de la perforación, el acercamiento de la mediana a la media (17 y 18,2) y un coeficiente de asimetría cercano a 0 ($skewness = 0,18$) y de kurtosis a 1, hacen que la distribución parezca normal, por lo que los datos no se transformaron, sino que se eliminaron de los cálculos variográficos aquellos valores considerados como anómalos. La potencia de mena, aunque no tiene una distribución normal, por razones prácticas se puede considerar como tal, por lo que representa una distribución simétrica.

Tanto en la Tabla I como en los diagramas de cajas de la Figura 4, se puede observar que el 50% de los datos de GPR y de minería se concentran alrededor de la media, más que los datos de perforación. Las medias del friable por perforación, minería y GPR son muy cercanas, con valores de 18,2, 18,2 y 18,7, respectivamente, lo que refleja el potencial de estos métodos para cartografiar el friable. Puede que el Georradar se acerque más a la realidad descrita por la minería, si se compara la mediana (19,4 & 19,4) y los dos cuartiles (15,4 & 15,3 y 21,4 & 21,9), o la desviación estándar (4,4 & 4,5) y el coeficiente de variación (0,2 & 0,2). En el caso de la perforación, se observa un leve aumento de la desviación estándar, que es un 30 % de la media (coeficiente de variación = 0,3) y un rango de 30,2 m, mayor con 10 m que en el caso de los otros métodos. Esto sugiere una mayor resolución de la perforación o mayores errores de los pozos, los que muchas veces se detienen antes, en bloques flotantes, o se van por fallas.

En la Figura 5 se presenta gráficamente la correlación lineal del friable por los tres métodos. Aunque el coeficiente de correlación no supera el 0,7, no significa que no exista una alta correlación, sino que cada método tiene sus deficiencias a la hora de ser comparados. Por ejemplo, la minería no puede explotar todo el friable porque las excavadoras no logran seguir los detalles del contacto con el basamento que el GPR y los pozos indican. El coeficiente es sensible a los valores anómalos, por lo cual fueron eliminados algunos de estos (cuadros en rojo en la Figura 5).

Una correlación muy importante para la aplicación de los métodos geoestadísticos multivariados es entre mena y el friable, en los pozos. Como se puede notar en la Figura 6, esta correlación es alta (0,82). La práctica ha demostrado que se mantiene aunque se cambie el *cutoff* de Ni.

El estudio variográfico del friable por GPR muestra una cierta anisotropía zonal, debido a que los variogramas direccionales no alcanzan la meseta en los mismos valores (Figura 7), pero por motivos prácticos se ha tomado en cuenta sólo la distribución espacial omnidireccional. En dirección E - O (cero grados)

Tabla I. Estadística básica de los datos del friable por geofísica, perforación y minería.

Estadísticos:	Espesor del friable (m) por:				Espesor de Mena (m)
	Pozos	Minería	GPR en pozos	GPR	
Numero de valores	119	119	113	4354	119
Mínimo	4	6,38	7,87	2,35	2
Máximo	34,2	27,18	27,5	30,45	25,5
Rango	30,2	20,8	19,63	28,1	23,5
Media	18,2	18,2	18,7	19,4	11,5
Mediana	17,0	19,4	19,4	19,8	11,0
Primer cuartil	13,3	15,4	15,3	17,0	8,0
Tercer cuartil	22,5	21,4	21,9	22,4	15,0
Varianza	40,1	19,4	20,7	17,3	23,2
Desviación estándar	6,3	4,4	4,5	4,2	4,8
Coeficiente de variación	0,3	0,2	0,2	0,2	0,4
Coeficiente de simetría	0,18	-0,66	-0,35	-0,53	0,28
Kurtosis	-0,52	-0,34	-0,51	0,16	-0,22
Kolmogorov-Smirnov stat	0,081	0,121	0,088	0,054	0,079
Critical K-S stat, alpha=.10	0,111	0,111	0,114	0,019	0,111
Critical K-S stat, alpha=.05	0,123	0,123	0,126	0,021	0,123

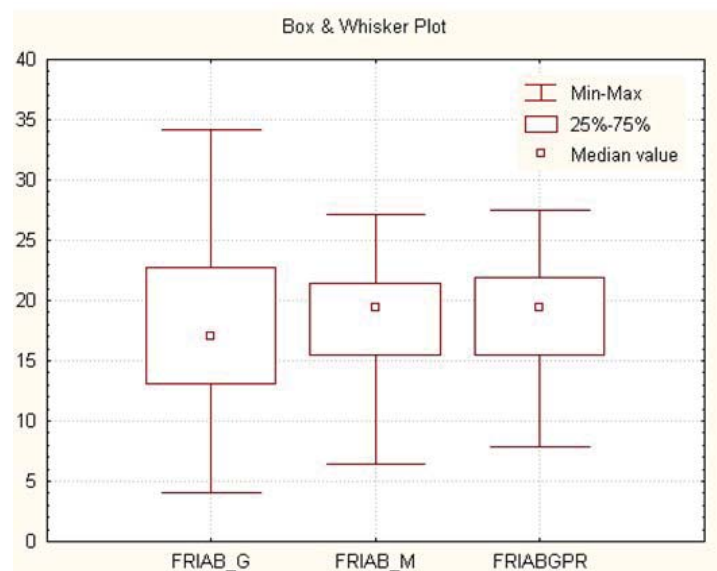


Figura 4. Diagramas de cajas y bigotes para los datos de friable obtenidos por perforación (FRIAB_G), minería (FRIAB_M) y georradar (FRIABGPR).

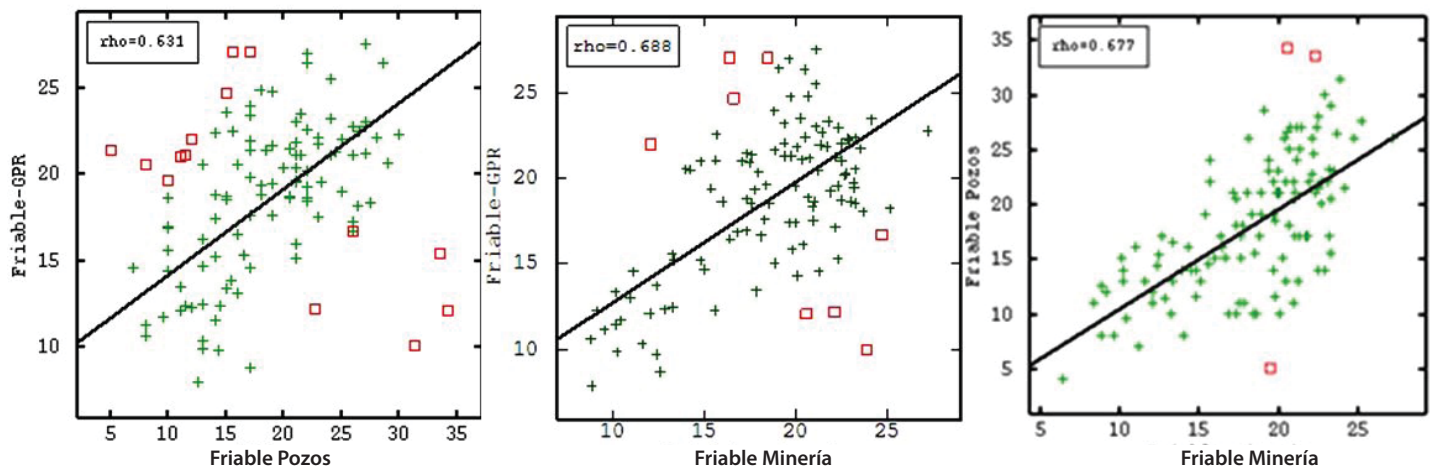


Figura 5. Diagramas de dispersión y coeficientes de correlación de los datos de friable obtenidos por minería, GPR y perforación.

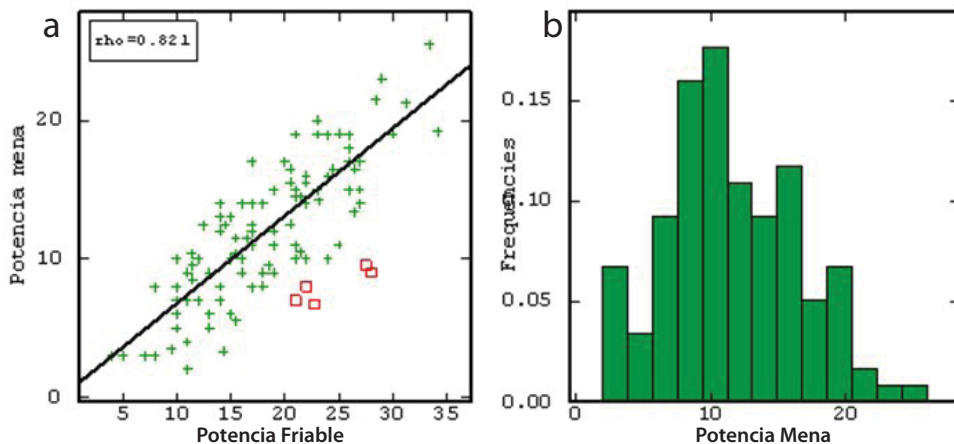


Figura 6. a: Diagrama de dispersión de los datos de potencia de mena contra potencia de friable en los pozos de perforación; b: histograma de la mena

se dispone de un mayor número de datos de GPR, dado que los perfiles están orientados en esa dirección. Esto permite distinguir dos estructuras de diferentes alcances, lo que se explica geológicamente por la presencia de variaciones del contacto friable - basamento hasta 20 m, dentro de una tendencia general de rangos mayores de 150 m. Los modelos utilizados para la estimación del friable reflejan también esta realidad geológica, por lo que en general son combinaciones de dos estructuras anidadas (Ver Figura 10).

Para la estimación del friable en la red de 8,33 * 8,33 m se han utilizado tres métodos:

Kriging Ordinario para los datos de GPR, Cokriging Ordinario y Cokriging Colocado para el conjunto de datos de pozos y GPR. Para la modelación, y solo para eso, fueron eliminados 11 valores atípicos.

La estimación del friable con GPR se realizó en dos variantes: una para el carácter local, más detallado, con un LAG=3 m y otra más general, con un LAG=23 m. Los modelos y sus parámetros de ajustes se presentan en las Figuras 8 y 9. La línea negra corresponde a los datos experimentales y la roja al modelo ajustado. En la Figura 8 se observa una pequeña inflexión alrededor del cuarto LAG (a los 100 m) que delimita las dos estructuras.

El análisis geoestadístico multivariado fue realizado a través de un modelo de correlograma lineal (Figura 10), con el que se estimaron los variogramas simples y cruzados para el friable por

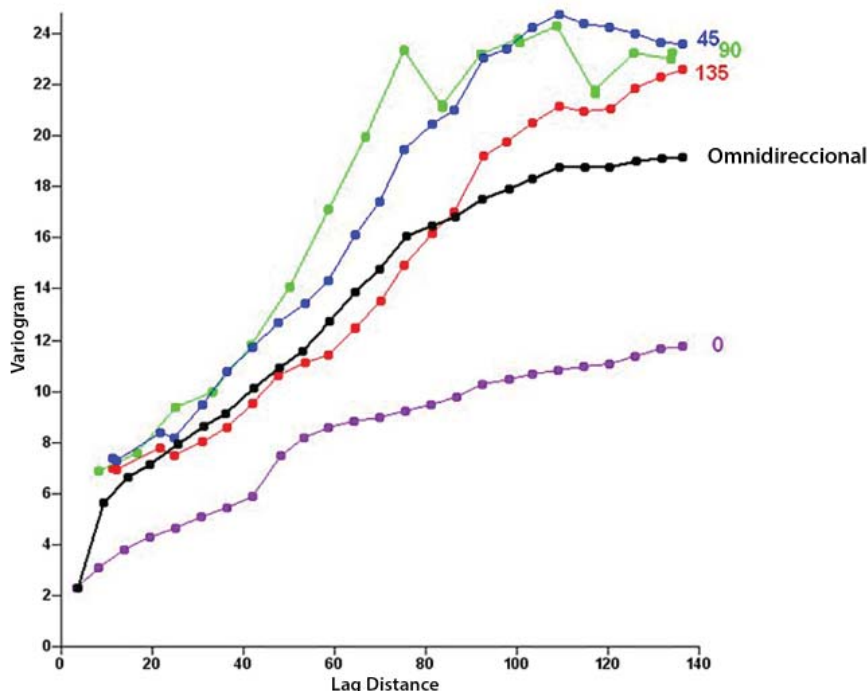


Figura 7. Estudio variográfico de la anisotropía del contacto friable - basamento, por GPR.

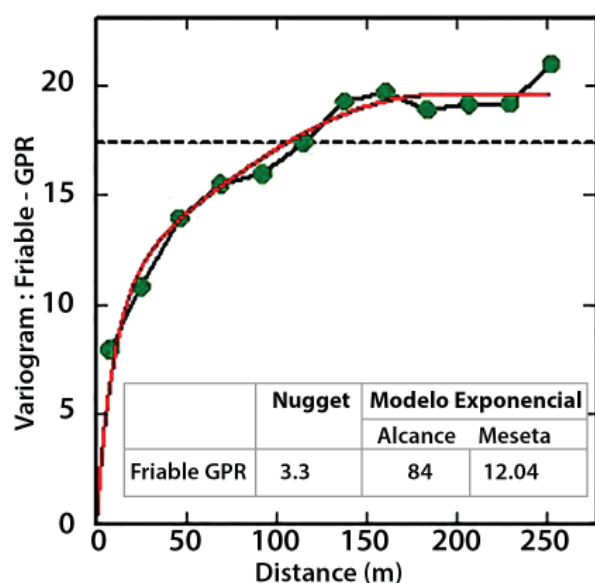


Figura 8. Modelo de variograma y sus parámetros utilizados para el cálculo de la potencia de friable por GPR, con LAG = 3m.

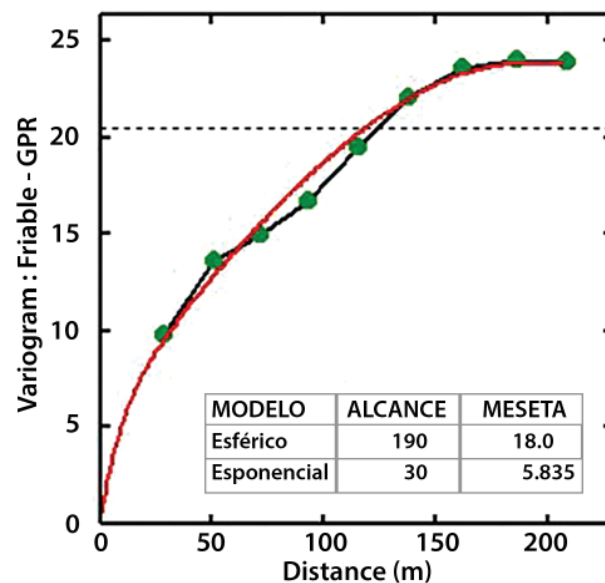
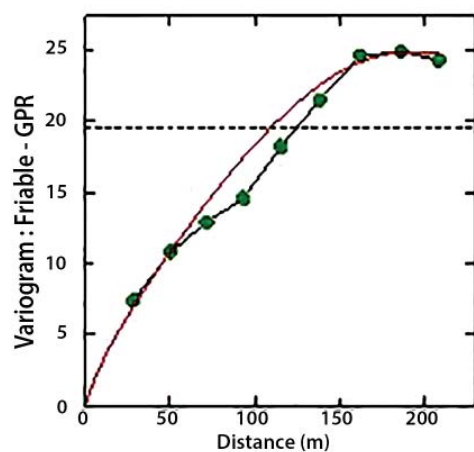


Figura 9. Modelo de variograma y sus parámetros utilizados para el cálculo de la potencia de friable por GPR, con LAG = 23m.



Variables	Modelo	Alcances	Mejeta
Friable Pozos	1. Esférico	190	16.86
	2. Exponencial	13	18.42
Friable GPR	1. Esférico	190	11.68
	2. Exponencial	13	8.27
Friable Pozos & Friable GPR	1. Esférico	190	14.02
	2. Exponencial	13	-0.4529

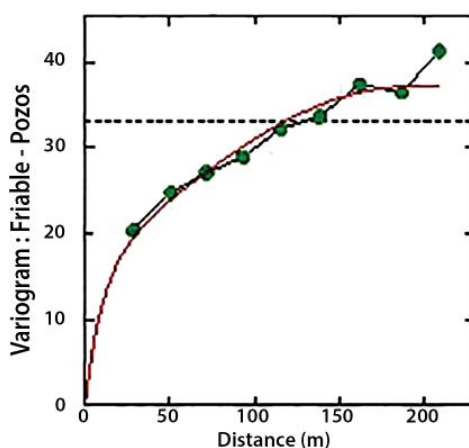
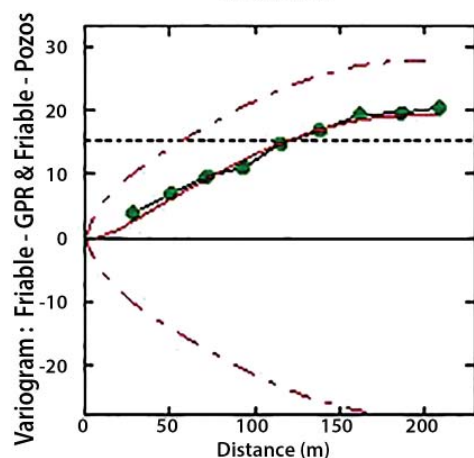


Figura 10. Modelo de correogionalización linear y sus parámetros para las potencias de friable por perforación y por GPR.

pozos y el friable por GPR. La validación cruzada de estos métodos se presenta en la Tabla II, donde se analizan no sólo los estadígrafos del error de estimación, sino también la correlación del friable estimado, contra el friable medido por GPR, pozos y minería (los estadígrafos Correl Z* & Z, Correl-P y Correl-M, respectivamente).

El modelo fue empleado tanto en la estimación por cokrigeaje ordinario como cokrigeaje colocado. En este último caso, para la variable colocada se consideró la potencia obtenida por GPR en una red de 8,33 * 8,33 m, estimada con el modelo de la Figura 9.

Como se puede observar en la Tabla II, los mejores ajustes se han obtenido para los datos de GPR, con Krige ordinario, como lo demuestran los altos coeficientes de correlación entre los valores estimados y los reales (0,963 y 0,986) y también los valores de VES, que son subunitarios. Se puede utilizar cualquiera de las dos estructuras, de poco o de largo alcance, y es alta la calidad de la estimación. Cabe destacar la correlación que se obtiene entre la estructura de largo alcance y los datos de minería. Como éstos últimos tienden a suavizarse por la falta de un equipamiento de explotación más preciso y la estructura anidada de largo alcance incluye un efecto "regional", la correlación aumenta.

En caso de los métodos multivariados, se pueden aceptar ajustes. Las diferencias entre estadígrafos son tan leves que es difícil decir cuál de los dos es mejor. El Cokriging ordinario pudiera

ser el más indicado debido a que presenta coeficientes de correlación más altos, pero el Cokriging colocado tiene menos cómputo. Llama la atención la alta correlación con los datos de la minería (0,826 y 0,814), lo que significa que la utilización en conjunto del georradar y la perforación da mejores resultados que su utilización por separado. La correlación minería - GPR y minería - perforación es de solo 0,677 y 0,688 respectivamente (ver Figura 5).

Una vez decidido el modelo, fue estimado el friable en una malla más densa, de 8,33 * 8,33m. En la Figura 11 se compara la imagen del basamento obtenida a través de este modelo (d) con las imágenes de krigeing ordinario, por separado para la minería (a), perforación (b) y GPR (c). Es posible notar que la imagen de cokriging colocado es congruente con la de pozos y reproduce los rasgos espaciales del GPR pero, a diferencia de estas, da distribuciones mucho más detalladas.

Para la estimación de mena se ha empleado el método de Cokriging colocado. Fue considerada como variable principal la mena por perforación, como variable secundaria (colocada) el friable en pozos y como red de la variable colocada la red de 8,33 * 8,33 m del friable anteriormente estimado.

El hecho de que la red de perforaciones sea de 23,5 * 23,5 m ha dificultado la elección del modelo de correogionalización lineal, al no tener la certeza del comportamiento de los variogramas en los primeros 23,5 m. El variograma experimental sugiere tanto un modelo con efecto pepita (*nugget*) como uno sin él.

En la Figura 12 se presenta el modelo de correogionalización lineal sin el efecto pepita, como una estructura anidada de dos modelos de diferentes alcances: uno esférico con alcances de 110 m, que sugiere un efecto regional; y otro exponencial, local, con alcance de solo 36 m. La validación cruzada para el 85% de los datos indica una correlación de 0,633 entre el valor real y el estimado, y una varianza del error estándar de 1,048, lo que significa un ajuste aceptable del modelo. Gráficamente, se remarca la superposición de la varianza de los datos (línea discontinua) a la meseta del variograma.

El modelo con efecto pepita se presenta en la Figura 13. Su ajuste, comprobado por la validación cruzada, es mejor que el anterior en lo que se refiere al coeficiente de correlación entre los datos reales estimados (0,702 para el 100% de los datos) y a la varianza del error estandarizado (1,02). Aunque las diferencias entre los dos modelos son leves, se ha elegido el segundo porque refleja más la realidad: la presencia del efecto pepita puede ser asociada a errores de perforación, de muestreo e interpretación, o a una red insuficientemente densa para describir el espesor de mena.

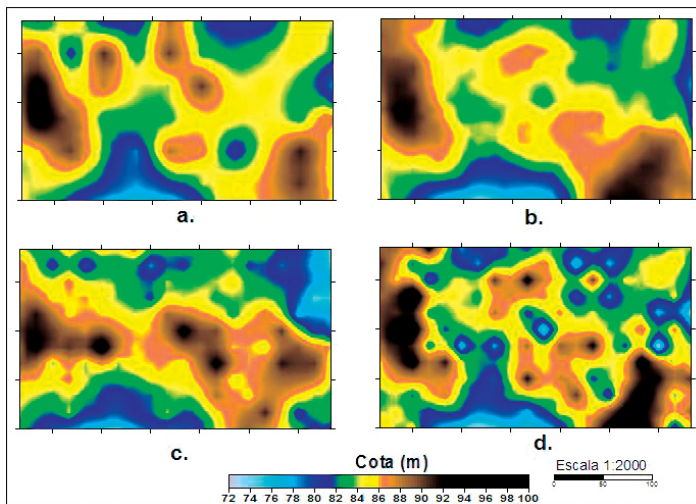


Figura 11. Imágenes 2D del basamento. a: por minería; b: por perforación; c: por GPR y d: por Cokriging colocado.

Tabla II. Validación de los modelos de estimación del friable (KO-1= Krige Ordinario con una estructura; KO-2= Krige Ordinario con dos estructuras anidadas; CoK= Cokrige; CoKco= Cokrige Colocado).

Método	EM	VE	MES	VES	Correl Z*&Z	Correl-P	Correl-M
KO-1	0,0145	0,8648	0,00460	0,181	0,963	0,463	0,503
KO-2	0,0232	0,2464	0,01047	0,220	0,986	0,441	0,623
CoK	-0,0319	23,0400	-0,00695	1,190	0,79	0,460	0,826
CoKco	-0,0144	23,1192	-0,00286	1,196	0,698	0,457	0,814

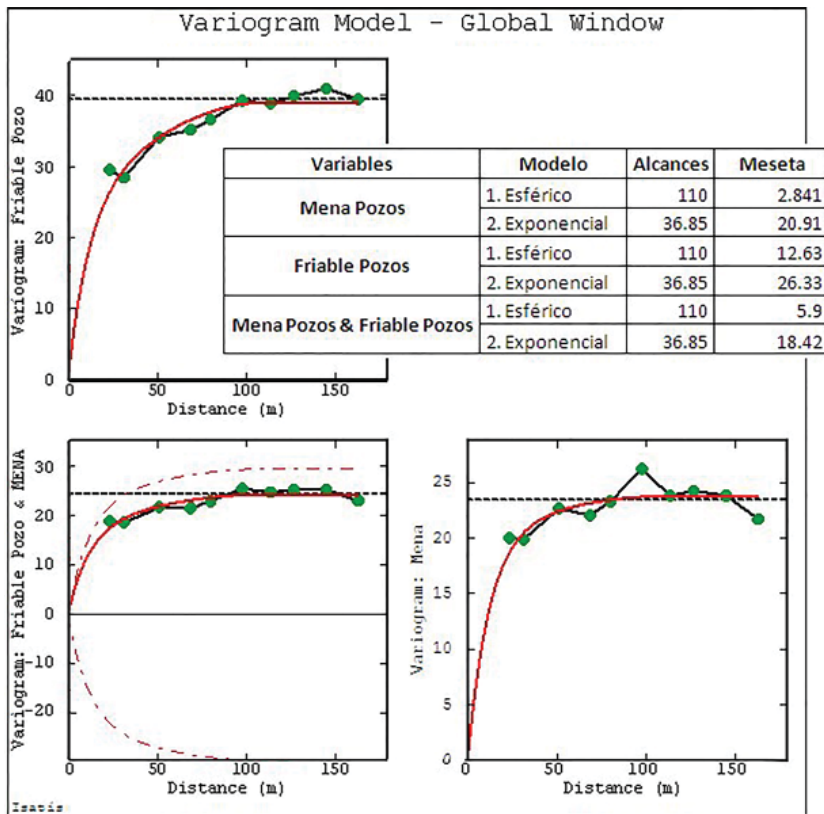


Figura 12. Modelo de correogionalización lineal y parámetros para la potencia de mena y potencia de friable, por perforación, sin nugget.

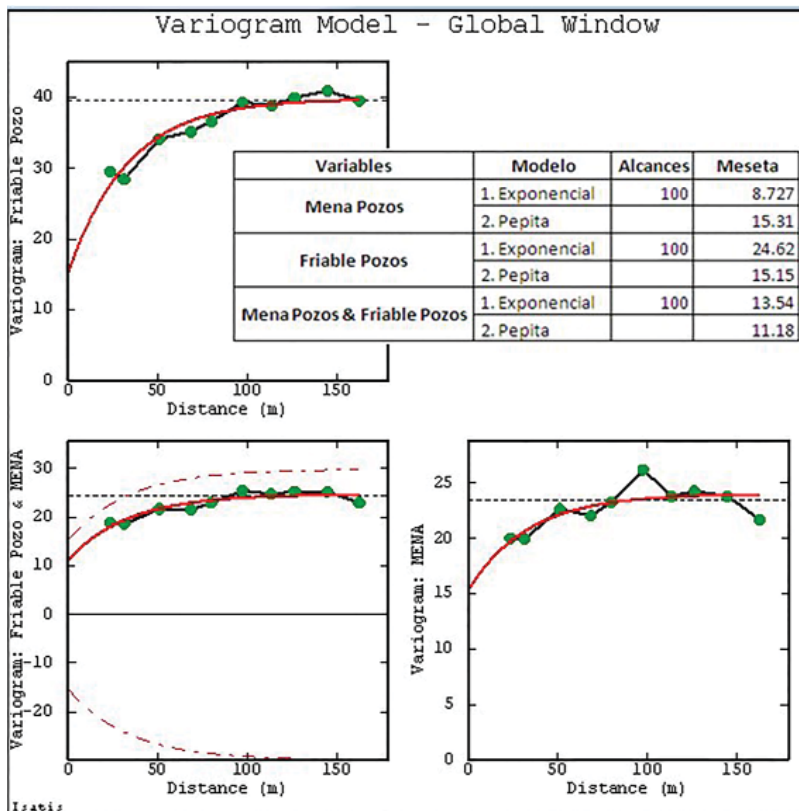


Figura 13. Modelo de correogionalización lineal y sus parámetros para la potencia de mena y potencia de friable, por perforación, con nugget.

CONCLUSIONES

- Se definen los elementos fundamentales para la elaboración de una metodología que integre los datos de Georradar en la estimación de recursos minerales en yacimientos lateríticos ferroniquelíferos, con el uso de la geoestadística.
- Con la metodología propuesta se ha logrado optimizar la estimación de los recursos laterítico ferroniquelíferos. Los resultados obtenidos han sido comprobados con los datos de la extracción minera, y se demostró que estadísticamente existe mayor equivalencia con la minería cuando se incorporan los datos de Georradar.
- Se estimaron y graficaron de forma óptima los espesores de friable y de mena, con datos conjuntos, en una red más densa de $8,33 \times 8,33$ m. Cada valor estimado se acompañó del error de estimación, una gran ventaja de la Geoestadística que permite orientar con mayor precisión los trabajos mineros y clasificar los recursos.
- En el *Cokriging* colocado, la distribución del friable estimado es congruente con los valores de friable en pozos y reproduce los rasgos espaciales del friable por GPR. El *Kriging* ordinario da estimaciones suavizadas de la variable, a diferencia del *Cokriging* colocado, que da distribuciones mucho más detalladas.

BIBLIOGRAFÍA

- Armstrong, M., Delfiner, D., 1980. *Towards a more robust variogram: case study on coal. Note n - 671.* Fontainebleau: CGMM.
- Armstrong, M., Carignan, J., 1997. *Géostatistique Linéaire, Application au Domaine Minier.* Paris: École de Mines de Paris. P. 112.
- Cuador, J. Q., 2002. *Estudios de Estimación y Simulación Geoestadística para la Caracterización de Parámetros Geólogo Industriales en el Yacimiento Laterítico Punta Gorda.* Tesis de Doctorado en Ciencias Técnicas. Facultad de Geología y Mecánica, Universidad de Pinar del Río.
- Deutsch, C. V., Journel, A. G., 1998. *GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide. Second Edition.* Oxford: Oxford University Press. P. 369.
- Díaz, A. M., Casar, R., 2004. *Curso de geoestadística aplicada.* México D.F.: UNAM.
- Isaaks, E. H., Srivastava, R. M., 1989. *Applied Geostatistics.* Oxford: Oxford University Press. P. 561.
- Kitanidis, P. K., 1997. *Introduction to Geostatistics: Application to Hydrogeology.* Cambridge: Cambridge University Press. P. 247.
- Lajaunie, C., 1997. *Iterative Cross Validation.* Paris: Centre de Géostatistique, Ecole des Mines de Paris. P. 8.
- Legrá, A., Guardiola, R., 1999. *Contribución a la práctica del análisis variográfico y de la estimación por Kriging.* Revista Minería y Geología, XVI (2).
- Matheron, G., 1969. *Curso de Geoestadística.* Fontainebleau: Centro de Morfología Matemática de Fontainebleau. P. 78.
- Schaug, J., Iversen, T., Pedersen, U., 1993. *Comparison of Measurements and Model Results for Airborne Sulphur and Nitrogen Components with Kriging.* Atmospheric Environment. 27 A (6): 831 - 844.
- Wackernagel, H., 1995. *Multivariate Geostatistic, an Introduction with applications.* Berlin: Springer. P. 256.

PUBLICACIÓN

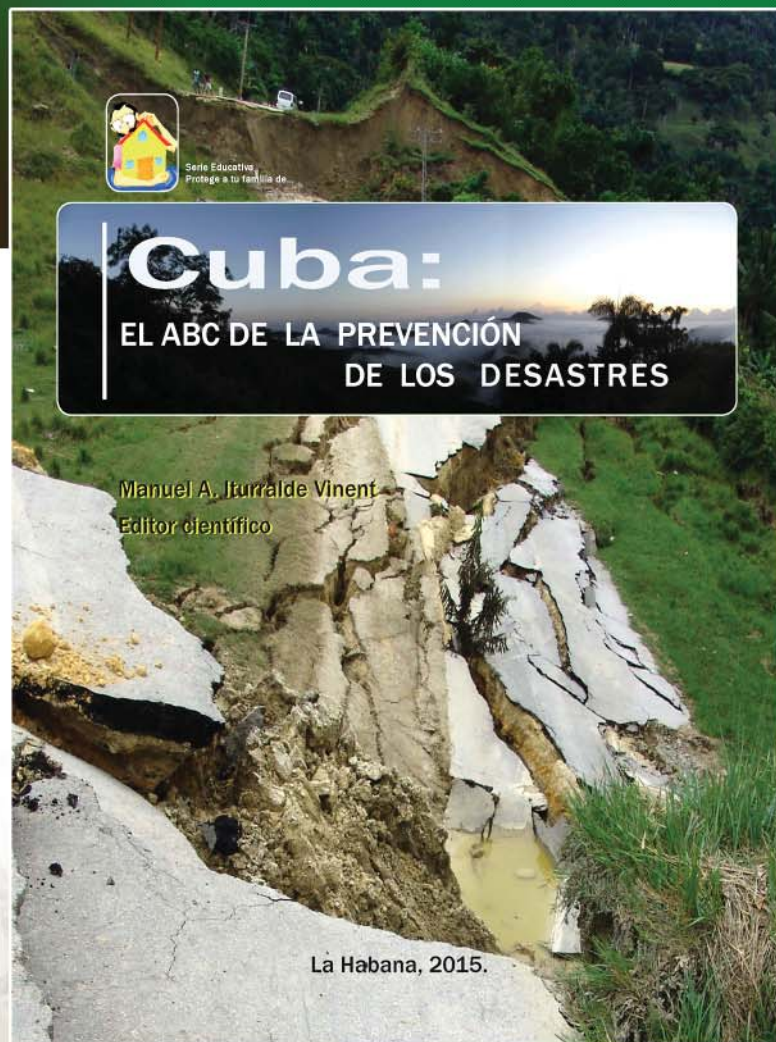
Nuevo Libro para la educación ante los peligros naturales

Como parte de la serie educativa "Protege a tu familia de..."; la Editorial Oriente ha publicado con apoyo financiero del MINED, la Embajada del Reino de Noruega, la Agencias de Medio Ambiente del CITMA y la Sociedad Cubana de Geología, el libro "Cuba: El ABC de la prevención de los desastres" destinado a fomentar una cultura de prevención de los peligros naturales.

En especial caracteriza los eventos potencialmente dañinos que amenazan a nuestro país, derivados del Cambio Climático y la actividad interna-geológica- de nuestro planeta, con una explicación del origen de cada evento, sus consecuencias negativas y las medidas que se deben tomar para mitigar los desastres, tanto en anticipación, en el momento que está ocurriendo, como con posterioridad.

El MINED ha adquirido una importante cantidad para incorporarlo a las clases no-formales de Defensa Civil, para los alumnos de secundaria, preuniversitario y enseñanza técnica. Algunos cientos estarán a disposición del público desde 2016.

**Para reducir el peligro de desastre
hay que entender y respetar la armonía de los procesos naturales
y estar preparados.**



METODOLOGÍA DE REHABILITACIÓN BIOLÓGICA PARA LA RECUPERACIÓN PAULATINA DE LOS TERRENOS MINADOS

MARÍA DEL CARMEN RABILERO FERNÁNDEZ

Empresa de Rehabilitación Minera Dra. Rosa Elena Simeón Negrín

Carretera Moa – Baracoa Km 16 ½, Quemado del Negro, Moa, Holguín.

RESUMEN

Los minerales son recursos no renovables, pero pueden reciclarse si se diagnostican las necesidades del sustrato, se cumple con las exigencias agrotécnicas y tecnológicas para la rehabilitación biológica de los terrenos minados y se mitigan los impactos negativos causados por la minería. Se comprobó que al término de la minería en los terrenos en estudio no se tuvieron en cuenta requisitos o exigencias agrotécnicas y tecnológicas, como la inclinación de las pendientes, el marco de siembra o la protección de taludes. El control no era sistemático y no se realizaba la rehabilitación del terreno conjuntamente con la explotación. Con el objetivo de determinar las particularidades y necesidades de los terrenos para elaborar una metodología adecuada para su rehabilitación, se comenzó a trabajar con observación directa del objeto. Se recorrieron las áreas, se recolectaron datos, se tomaron fotografías, y se revisaron documentos anteriores y bibliografía especializada referente al tema. Como resultado, se logró una rehabilitación al unísono con la explotación y se sistematizó el control de la calidad. Las exigencias agrotécnicas y tecnológicas fueron cumplidas. Para la reforestación se utilizaron especies de alta adaptabilidad, que formaron una capa protectora para la incidencia de los agentes climáticos y cuyo impacto positivo se percibe a corto plazo. Fueron introducidas técnicas novedosas, con el establecimiento de un equilibrio entre desarrollo y medio ambiente, sin pretender obstruir ni frenar el desarrollo. Queda demostrado que si se elabora una metodología que logre disminuir los costos, eliminar la sobreexplotación de los recursos naturales y los impactos negativos y minimizar los residuales, todo esto con técnicas modernas de manejo ambiental, con el reacomodamiento del terreno, cumpliendo las exigencias agrotécnicas y tecnológicas, se logra una minería sostenible.

ABSTRACT

The minerals are non renewable resources, but they can be recycled if the necessities of the substratum are diagnosed and it is fulfilled the agrotechnical and technological exigencies for the biological rehabilitation of mined lands and the negative impacts caused by the mining are mitigated. At the end of the mining, it was verified that the agrotechnical and technological exigencies or requisites, like slope gradient, sowing frame or slope protection, did not were considered. The control was not systematic, and the rehabilitation did not run jointly with the operation. With the aim of determining the particular features and necessities of the terrain to elaborate an adequate methodology to its rehabilitation, this work initiated with the direct observation of the object of study, crossing the areas, collecting data, takings photographs and making a revision of specialized documents and bibliography. As a result of this, a rehabilitation in tune with the operation was obtained and the quality control was systematized. The agrotechnical and technological exigencies were fulfilled. In the reforestation process, species of high adaptability were used, to form a protective coating for the incidence of the climatic agents, and the positive impact is perceived in the short term. Novel techniques were introduced, settling down a balance between development and environment, without trying to obstruct nor restrain the development. It remains demonstrated that, using a methodology that manages to obtain a continuous improvement by diminish the costs, eliminating the negative impacts and the overexploitation of the natural resources, and minimize the residual elements, all of this by using modern technologies of environmental handling, and fulfilling the agrotechnical and technological exigencies, a sustainable mining can be obtained.

INTRODUCCIÓN

El hombre forma parte del mundo que lo rodea, a la vez que depende de él para la satisfacción de sus más perentorias e impostergables necesidades materiales y espirituales. La pérdida de recursos biológicos y su diversidad pone en peligro el suministro de alimentos, la provisión de madera, medicamentos y energía, y las oportunidades para el recreo y el turismo. Además, interfiere con las funciones ecológicas esenciales, como la regulación de la escorrentía, el control de la erosión del suelo, la asimilación de desechos, la purificación del agua y el ciclo del carbono. Por esta razón, la necesidad de salvaguardar estos recursos es cada vez más urgente, ya que el ritmo de pérdidas es tal que, si no se toman las medidas apropiadas, en un futuro no muy lejano la humanidad se encontrará en medio de una verdadera catástrofe.

La explotación minera suele destruir toda la vegetación de los sitios donde opera, alterar radicalmente el paisaje y perturbar totalmente el ecosistema. Si no se conducen debidamente, las actividades mineras pueden tener también consecuencias importantes fuera de su terreno, sobre todo por la descarga de residuos contaminados con sedimentos, productos químicos, metales o acidez alterada. Las operaciones de minería pueden introducir también plagas, depredadores y enfermedades en los ecosistemas naturales, además de que pueden abrir zonas aisladas a otras perturbaciones producidas por el hombre. Sin embargo, la minería y los minerales son esenciales para el desarrollo futuro y contribuyen a mantener y elevar los niveles de vida en todo el mundo.

La explotación de estos yacimientos tiene efectos positivos en la economía. Sin embargo, produce importantes daños al medio ambiente local. La concepción, metodología y trabajos que se recogen en este estudio representan un valioso aporte para las acciones de corrección a este problema. Los autores asumen la recuperación y rehabilitación desde un enfoque remedial, mediante la realización de trabajos de reacomodamiento del terreno, reforestación y eliminación o disminución de los niveles de contaminación, en los focos revelados en un análisis ambiental realizado para este fin.

Esta investigación tuvo como principal objetivo la elaboración de una metodología que pudiera ser utilizada en la rehabilitación biológica de los terrenos al término de la minería, para propiciar su paulatina recuperación. Para cumplir esta meta, se diagnosticaron las particularidades y necesidades de recuperación del substrato rocoso en estudio y se estableció una metodología para la rehabilitación biológica de estos terrenos, de acuerdo a sus características.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para este estudio se tomaron como base experiencias de yacimientos ubicados en las inmediaciones de la región minera de Moa. Para cumplimentar los objetivos de la investigación se emplearon los siguientes métodos:

- Recolección de datos
- Observaciones directas del objeto de estudio

- Tomas de fotografías
- Revisión de documentos y bibliografía especializada acerca de la temática de estudio
- Actualización topográfica
- Entrevistas a especialistas y moradores de la zona

La metodología de trabajo fue aplicada en dos fases: la preparación técnica del terreno, que contiene la remodelación y conformación de la superficie; y la rehabilitación biológica, conformada por los procesos de mejora edáfica e implantación de la vegetación. En este artículo se referirán solo los trabajos que conformaron esta última etapa.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Rehabilitación biológica

Se conoce como *rehabilitación biológica* al conjunto de labores que se realizan una vez concluida la rehabilitación técnica, que protegen definitivamente el suelo y garantiza la reincorporación al medio rehabilitado de la vida vegetal y la animal. Para llevar a cabo esta actividad, es necesaria una serie de aseguramientos que garanticen los materiales o materias primas imprescindibles para la misma.

En este proceso se realiza de acuerdo a las características propias de cada área, entre las que se incluyen la ubicación geográfica, el tipo de suelo, las pendientes, las particularidades de la zona y las especies que conviven en esta, el área a reforestar y la integración paisajística. El éxito de la rehabilitación depende del cumplimiento de la metodología a aplicar, de la calidad del trabajo con el área y de los factores climáticos de la zona.

Labores de la rehabilitación biológica

Para comenzar con las labores de la rehabilitación biológica, primero fueron analizadas las dimensiones del área, así como sus características topográficas, el grado de pendiente, la labor agrícola requerida y el marco de siembra, las necesidades particulares de nutrientes para el suelo, el tipo de cobertura forestal adecuada para la región y las especies que habitan la zona.

Según las características del yacimiento, que se encuentra ubicado a ambos lados del río, se tuvo que ser muy selectivo con las especies a sembrar, sobre todo en relación con las que ya existen en la faja forestal hidrorreguladora. Siempre que fue posible, se priorizó el uso de especies formadoras de suelo, pertenecientes a la flora autóctona.

De la correcta preparación del terreno dependerá la adaptación y desarrollo de las plantas en su nuevo hábitat. Debe ser descompactado y nivelado, siempre que la pendiente lo permita, y alisado si es necesario. Se ha de realizar un laboreo mínimo, marcar y estaquillar según el marco de siembra a utilizar y en dependencia de la especie a plantar. Finalmente, se aplica la materia orgánica a estos hoyos; teniendo en cuenta que el suelo después de la minería queda totalmente degradado, deben aplicarse 2 kg de materia orgánica.

Dentro de las labores de preparación, es necesario tener presentes todas las actividades de conservación de suelos, como las barreras vivas, las barreras muertas, la corrección de cárcavas (Figura 1) y la protección de taludes, entre otras.



Figura 1. Corrección de cárcavas.

Para escoger y preparar el área destinada a garantizar la producción y el suministro de las posturas necesarias para la reforestación, se debe:

1. Seleccionar un área de topografía llana, con buen drenaje interno a través de una fuente de abasto cercana). Debe estar cerca del área de siembra y ser de fácil acceso. Luego, es necesario nivelar el terreno y trazar los canteros.
2. Establecer una cerca perimetral para impedir entrada de animales y personal ajeno.
3. Estaquillar y alambrar los canteros, con medidas de 1 m de ancho, 20 m de largo y 0,60 m de pasillo entre canteros. La orientación debe ser de norte a sur. Posteriormente, se comienza la construcción de zanjas de drenaje para los canteros.
4. Tamizar el suelo y mezclar con un 2 % de materia orgánica para el llenado de los bolsos (en los hoyos).
5. Colocar 2 ó 3 semillas a 1 cm de profundidad por bolsos, que deben ser de tres veces la dimensión de la semilla.
6. Realizar escarpe en los bolsos y limpiar sistemáticamente los pasillos.
7. Regar dos veces a diario, en las horas más frescas.
8. Efectuar control fitosanitario a la entrada del vivero.
9. Cuando la postura alcance la altura adecuada (30 - 40 cm) y se observe un porte vigoroso, seleccionar las de mayor desarrollo en el sistema radical. A las posturas con sistema radical poco desarrollado se les debe realizar una poda en el área foliar.
10. Los bolsos retirados para plantar en el área a reforestar deben ubicarse derechos para no derramar en el suelo y, ya dentro de esta, ser depositados en un lugar fresco y sombreado.
11. Aplicar riego antes de la siembra

La plantación se debe realizar en correspondencia con la época de lluvia.

Para la dimensión de los hoyos, se debe tener en cuenta la variedad de los árboles a plantar, si la especie es maderable (20 * 30 cm) o frutal (40 * 30 cm). Igualmente son importantes en este caso las características de la topografía del terreno.

El marco de siembra o plantación se elabora de acuerdo al nivel de crecimiento de la especie a sembrar. Las frutales deben tener marcos de 6 * 6 m) y las maderables de 2 * 2 m, 3 * 3 m o 6 * 7 m, en dependencia de su crecimiento. Son recomendables los marcos de 2 * 2 m o 1,5 * 1,5 * 1,5 m a tres bolillos.

En terrenos con pendientes, las siembras se realizan en curvas de nivel y a tres bolillos. En las áreas donde las pendientes son más pronunciadas, se deben construir terrazas.

El método de marco real, por otra parte, se aplica en terrenos de topografía llana, sin alterar el marco de siembra previamente establecido.

Para depositar la postura en el hoyo se realiza una poda de raíz y se extrae el nylon. Luego, la postura se deposita en el fondo del hoyo y se arroja. Se combina con cobertura muerta o viva, o ambas a la vez.

Si las lluvias no son abundantes y si se conoce que las temperaturas de esos suelos son elevadas, el riego debe ser aplicado sistemáticamente.

De los cuidados mínimos (mantenimientos de tipo I, II, III y general) deben formar parte el riego y la fertilización, de acuerdo a los requerimientos nutricionales de cada planta (Figuras 2 y 3).

La reposición de fallas debe realizarse a partir de los 6 meses. Se debe revisar igualmente la colocación de vientos y tutores, el control de la calidad del sustrato y el aclareo y la eliminación de las malas hierbas.

Con la aplicación correcta de la metodología anteriormente explicada, se logrará una mejor adaptación de las plantas al área minera reforestada. Las áreas que no se transforman y se



Figura 2. Terreno sembrado.



Figura 3. Realización de mantenimientos en el área sembrada.

mantienen vírgenes sirven de corredor biológico y mantienen el endemismo. La vegetación de las franjas forestales hidrorreguladoras (orillas de ríos y arroyos) sirven de capa protectora. La gramínea que se encuentra en la zona se motea y se planta en los taludes para protegerlos de la erosión por escorrentía.

En el área de estudio, en el año 2007 existían 1,93 km² afectados por la minería. Fueron rehabilitados 11 578 m² sin usar la metodología que se propone, lo que en el momento dio un resultado positivo de supervivencia de un 90 %, con una calidad en la siembra de un 85 a un 88 %. De estos, en 4 732 m² se aplicó la metodología al cierre del 2007.

Un análisis socioeconómico al respecto arrojó los siguientes resultados:

- 3 427 m² plantados con casuarina, con un precio en el servicio de 2 678,80 USD, lo que equivale a 37 625,9 USD; y 1 405 m² plantados con gramíneas (pasto estrella) con un precio de 2 678,80 USD. Todo esto representa un total de 37 637,14 USD.
- Se le realiza mantenimiento de tipo I a 2 528 m² y mantenimiento de tipo II a 1000 m², con un precio de 4 844,61 USD, que representa un total de 170 917,84 USD.
- Los procesos de conservación de suelo fueron realizados a 150 m² con barreras muertas en surcos y cárcavas, lo que equivale a 10 671,9 USD.
- Se reconfirmaron 850 m² de cárcavas, revertido en 12 160,95 USD.

En este caso, con la metodología aplicada existió un aumento notable en la supervivencia, llegando a ser de un 97 %, y la calidad se elevó hasta un 98 %. Las afectaciones son mínimas, comparadas con los resultados de la rehabilitación realizada sin la metodología.

Todo el trabajo realizado con la metodología propuesta refleja la efectividad de la misma, ya que los resultados obtenidos respaldan los gastos.

Durante este trabajo se producen impactos negativos, entre ellos la emisión de polvos y los ruidos, pero estos son de corta duración. Por otro lado, los métodos de trabajo aplicados generan una serie de impactos positivos que se producen en cadenas a mediano y largo plazo, que permiten realizar una minería sostenible.

Debido al impacto positivo que produce sobre las áreas rehabilitadas, el uso de esta metodología tiene un alto valor social, ya que:

- Incrementa los bosques y disminuye la posibilidad de desertificación de los suelos.
- Genera fuentes de empleo.
- Aumenta la cultura medioambientalista.
- Mejora el paisaje y el medio ambiente en general de las áreas afectadas.
- Disminuye los efectos negativos de la erosión.
- Elimina la degradación de los suelos.
- Disminuye la contaminación hídrica por los arrastres.
- Restablece la biodiversidad del área.

Después de su establecimiento, a las plantaciones se les debe realizar un plan de monitoreo y control o plan contra plagas y enfermedades.

Consideraciones finales

En la actualidad, en los yacimientos lateríticos existen problemas con la rehabilitación de los terrenos. Generalmente se realiza la reforestación sin haber realizado una debida rehabilitación minero técnica de los terrenos por no disponer de los equipos, no se tiene en cuenta la pendiente para el trazado y estaquillado, la selección del marco de siembra no se corresponde con la pendiente del terreno, no se establece cobertura herbácea, no se realizan las correcciones de cárcavas ni se protege el talud; o sea, no se cumplen las exigencias agrotécnicas y tecnológicas necesarias para obtener resultados satisfactorios.

La situación de las áreas reforestadas sin la aplicación de la metodología propuesta en este trabajo es muy variable pero, en sentido general, puede decirse que no ha sido totalmente efectiva, ya que en algunos casos no se logra la formación del suelo ni la estabilidad de las pendientes. Solamente en algunas ocasiones se han realizado las labores siguiendo las curvas de nivel, y no poseen cobertura o tranques para minimizar la escorrentía. Por esta razón, la supervivencia poblacional es deficiente.

De acuerdo con las condiciones particulares del área estudiada y los resultados obtenidos en la rehabilitación de las áreas afectadas según el Plan de Control de Erosión y Sedimentación,

fue posible determinar las necesidades que impulsaron la elaboración de esta metodología, que tiene en cuenta las exigencias agrotécnicas y tecnológicas para la realización de las labores de rehabilitación, cuyos objetivos fueron:

- Impedir el proceso de deterioro y de degradación de la vegetación que se estaba produciendo.
- Lograr una regeneración de los terrenos afectados, de manera que puedan ser utilizados con otros fines. Esto depende de los múltiples usos a los que se destinan, de los intereses de la comunidad y de las técnicas y la capacidad de la rehabilitación, desarrolladas sobre todo localmente, en los que están implicados tanto los responsables de la explotación como los de la rehabilitación.
- Conseguir un alto grado de eficacia y rapidez en los resultados medio ambientales y la obtención de costos razonables.

El estudio del terreno debe ser analizado desde que se elabora el proyecto de explotación y considerado como parte de las labores mineras, de manera que se facilite la utilización del área y la recuperación paisajística del entorno una vez extraído el mineral.

De forma general, dentro de los cuidados mínimos, que son aquellos que se realizan en los mantenimientos I, II y III, se encuentran el riego, la fertilización, la reposición de fallas a partir de los seis meses, la colocación de vientos y tutores, el control de la calidad del sustrato y la eliminación de las malas hierbas.

La estabilización de las laderas mediante tranques con madera se debe realizar de acuerdo al ángulo de inclinación del talud, con la incorporación de valores estéticos al paisaje y la protección de la superficie del suelo con cobertura herbácea contra el impacto de lluvias intensas, corrientes de agua, vientos y otras formas de erosión. Después de esto, se realiza la siembra o plantación.

El apantallamiento (siembra de gramíneas) posibilita la mitigación de la erosión superficial, tanto eólica como hídrica. Durante la implantación de este método es necesario:

- Preparar el suelo.
- Aplicar la materia orgánica.
- Regar la semilla de pasto.
- Cortar estolones de 30 cm y enterrar 20 cm, o motear y sembrar a surco corrido. A mayor cantidad de plantas, mayor será el establecimiento.

En este caso, la forma de plantación debe ser de surco con riego de semilla por estolón de 30 cm de largo, a sembrar estolones o motas. Deben plantarse de 60 000 por 100 m² de estolones.

Con la modelación del terreno y la reforestación no concluye la actividad de rehabilitación. Los mantenimientos deben realizarse de forma sistemática. Cuando el proceso erosivo esté controlado y se comience a regenerar la flora y la fauna autóctona, es necesario monitorear el cumplimiento de las medidas tomadas y, a partir de los resultados, perfeccionar los proyectos futuros y corregir los errores que se vayan presentando.

Para controlar la evolución de la rehabilitación y la recuperación de las áreas minadas, es preciso evitar la pérdida de suelo, recuperar en lo posible el impacto visual y la integración paisajística y restablecer la cobertura vegetal, con la utilización de esta como medio de estabilización del suelo.

Todas estas correcciones para el control de la erosión deben corresponderse con la problemática específica, la preparación del sitio, la restauración y/o remediación del suelo y el monitoreo, seguimiento y mantenimiento de la medida aplicada o establecida.

Como parte del monitoreo, se debe chequear cada cierto tiempo la adaptación de las plantas al nuevo hábitat, el porcentaje de supervivencia de las posturas, la compatibilidad entre especies, la efectividad de la protección del suelo y la influencia en todo esto de la preparación técnica del terreno. Igualmente, es necesario realizar el análisis del suelo para comprobar la incorporación de nutrientes y detectar a tiempo la aparición de alguna enfermedad.

De no existir una buena adaptación al medio, se observará que las especies crecen muy lentamente, con apariencia raquítica y mal formadas, con coloración pálido amarillenta de las hojas y un porcentaje de supervivencia por debajo de la expectativa.

Después de rehabilitada el área, debe prohibirse la tala de cualquier tipo de árbol, la quema en el área, el derrame de productos tóxicos y el depósito de desperdicios.

Según los resultados que se obtengan, se irá realizando una mejor selección de las especies tanto para las nuevas plantaciones como para la reposición de las fallas que existan, se le realizarán las atenciones culturales previamente planificadas y se declarará el sitio como área vedada.

Programa de seguimiento y control de las medidas de mantenimiento

Para tener la seguridad del cumplimiento de los objetivos del plan de rehabilitación, es necesario planificar medidas de mantenimiento por un tiempo determinado. No solo se cuidan y reponen materiales en mal estado, sino que se recoge toda la información posible.

La manera de realizar un seguimiento y control óptimo queda determinada en gran medida por el contenido que recoge el pliego de condiciones técnicas, tanto las evaluaciones de impacto ambiental como el análisis de impactos producidos, de acuerdo con la ejecución del plan elaborado para el seguimiento y control.

En esta fase, es necesario tener en cuenta las características del proyecto previo de explotación minera, recogido en las diferentes etapas (investigación, explotación y abandono), y la capacidad de modificar la explotación minera o tomar medidas correctoras cuando los efectos imprevistos afecten al medio ambiente. De la misma forma, es preciso verificar las prevenciones a fin de comunicar las experiencias incorporarlas en las actividades futuras de las explotaciones mineras.

El objetivo fundamental de este plan es conocer el rendimiento de las plantaciones y las técnicas empleadas en la rehabilitación de la zona como una medida correctora del impacto causado. La reposición vegetal se considera exitosa si se consigue que la rehabilitación biológica sea duradera y con un alto grado de superficie cubierta, lo que permite una introducción progresiva y espontánea de la flora autóctona.

El plan de seguimiento y control consiste en un programa de inspecciones visuales periódicas para detectar cualquier problema existente. Para esto, se establece el monitoreo, que permite evaluar los aspectos de la vegetación y el suelo, así como conocer la evaluación en tiempo y forma de las siembras y plantaciones realizadas. Con este plan es posible detectar cualquier problema en el desarrollo, u otros aspectos relacionado con la evaluación del proyecto de rehabilitación.

CONCLUSIONES

- La rehabilitación de los terrenos minados con la metodología propuesta tiene en cuenta todas las posibilidades para que

sea efectiva y los terrenos se mantengan el menor tiempo posible sin protección vegetal. El efecto paisajístico se observa a mediano plazo, la flora y la fauna se restablecen paulatinamente y el impacto ambiental queda minimizado.

- Con la aplicación de esta metodología de rehabilitación biológica en terrenos minados se demostró la importancia de cumplir con las exigencias agrotécnicas y tecnológicas y la sistematicidad de los controles. Como resultado se obtuvo la elevación de la supervivencia de las especies plantadas y la calidad del trabajo, y disminuyó la necesidad de reposición de fallas. Igualmente, disminuyó el tiempo que se mantiene el suelo sin protección vegetal y aumentaron los impactos positivos de la rehabilitación.
- Con el diagnóstico de las particularidades y necesidades del sustrato rocoso del yacimiento es mas viable la aplicación de la metodología propuesta.
- La metodología de rehabilitación propuesta permite recuperar a mediano y largo plazo los terrenos afectados por la explotación minera.

USO DE ONDAS ULTRASÓNICAS (OU) PARA MEJORAR LOS ÍNDICES EN EL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ORO

ALEJANDRA NAIDA HERNÁNDEZ MARTÍNEZ¹, MARCELA FIGUEREDO, EDUARDO MÉRIDA LA O, MISAEL PÉREZ PÉREZ, JOSÉ CASTELLANOS, JOSÉ ANTONIO ALONSO, ILEANA CABRERA, AYLIN DE LA CRUZ, ISIS HERNÁNDEZ, ISMARI SALGADO

Centro de Investigaciones para la Industria Minero Metalúrgica

Correo: (1) nayda@cipimm.minem.cu

RESUMEN

El elevado precio del oro en el mercado mundial impone un desarrollo impetuoso de procesos para la recuperación del metal, desde las menas más sencillas hasta las más complejas y refractarias, siempre teniendo en cuenta indicadores técnicos y económicos que pueden limitar su implementación, tales como el consumo de cianuro (por su elevado costo) y el grado de liberación del oro, que a veces requiere de una molienda muy fina (es una etapa con cierto grado de complejidad y su operación es costosa). En la actualidad se han desarrollado nuevas técnicas que permiten mejorar los índices de extracción de oro en menas refractarias, de cinética lenta, que requieren un elevado grado de molienda, con oro finamente diseminado en la matriz mineral u ocluido en las especies mineralógicas como los sulfuros y la materia carbonosa.

El objetivo de este trabajo fue evaluar el empleo de OU en el procesamiento de una mena aurífera en la que el oro se encuentra finamente diseminado en la matriz mineral, la cinética de disolución es lenta y requiere un grado de molienda alto (90 % bajo 0,074 mm) para obtener altas recuperaciones del metal (95,5%).

Se realizó una síntesis bibliográfica y se experimentó la cianuración del mineral en a escala de laboratorio con variaciones del grado de molienda, la concentración de cianuro y la intensidad de las ondas. Se obtuvieron resultados alentadores, con los que se logran altos niveles de extracción.

Los resultados teóricos y prácticos obtenidos arrojaron perspectivas de desarrollo de este procedimiento en soluciones técnicas de la Metalurgia Extractiva del oro. El uso de OU en la lixiviación por cianuración de dos muestras produjo un efecto significativo en la extracción de oro, ya que mejoró la cinética de disolución con recuperación de 98,2 % a 98,8 %, el grado de molienda de 70 % bajo 0,074 mm y la concentración de CN- de 1 g/L, superiores a los obtenidos sin OU con igual y mayor grado de molienda (90 % bajo 0,074 mm) e igual y mayor concentración de CN- (2 g/L). El nivel máximo de extracción de oro se obtuvo en las pruebas sin empleo de OU, de 95,5%.

Se recomienda profundizar en la determinación de los mejores parámetros de lixiviación, grado de molienda y comportamiento de las impurezas, con atención a indicadores técnico económicos y a la influencia de otros parámetros como la presión, viscosidad, intensidad del ultrasonido, el uso de carbón para evitar el efecto *pregrobbing* y el uso total o parcial de aire en el proceso de cianuración. Igualmente, se recomienda determinar las características de las pulpas cianuradas desde el punto de vista de separación de fases y el comportamiento en las etapas siguientes a la disolución del oro.

ABSTRACT

The elevated price of gold in the International Market imposes an impetuous development of processes to the recovery of the metal, from the simplest ore to the most complex and refractory one, taking always into account technical and economical indicators which could limit its putting into effect, such as: the consume of cyanide (due to its high price), the liberation degree of gold that sometimes requires a fine milling (it is a stage with certain degree of complexity and its operation is expensive). Nowadays, new techniques have been developed which permit to improve the gold extraction indexes in refractory ores of slow kinetic, that request a high degree of milling, with a tiny-disseminated gold on the mineral matrix or occluded in mineralogical phases such as sulfides and carbonaceous material.

The aim of this work was to evaluate the use of Ultrasonic Waves (UW) in the processing of an auriferous ore in which the gold is tiny- disseminated in the mineral matrix, the kinetic of dissolution is slow and requires a high milling degree (90 per cent under 0,074mm) to obtain a high recovery of the metal (95,5 per cent).

A bibliographic resume was made and the leaching with cyanide was experimented on the mineral, at the laboratory scale, changing the milling degree, the cyanide concentration and the waves intensity, obtaining encouraging results which make possible to reach high levels of extraction. Theoretical and practical outcomes acquired threw expectations of development of this technique in technical solutions of the Extractive Metallurgy of gold:

The practice of using Ultrasonic Waves in the leaching with cyanide of 2 patterns produced an important effect in the extraction of gold, improving the kinetic of dissolution, recovering 98,2%-98,8%, the milling degree of 70% under 0,074mm and the concentration of cyanide of 1g/L, higher in rank than the obtained ones without Ultrasonic Waves with the same and bigger milling degree (90% under 0,074mm) and equal and major concentration of cyanide (2 g/L), being the highest level of extraction of gold on the proofs, without using UW of (95,5%).

It is recommended to deepen in the determination of the best parameters of leaching with cyanide, the milling degree and the behavior of the impurities, taking into account technical- economical indicators, as well as the influence of other parameters such as the pressure, the viscosity, the intensity of the ultrasound, the use of carbon to avoid the *pregrobbing*; and the total or partial use of air in the process of leaching, as well as determine the characteristics of the leached pulps, from the point of view of the separation of phases and the behavior of the phases that follow the gold dissolution.

INTRODUCCIÓN

El empleo de ondas ultrasónicas en los procesos industriales se ha incrementado durante los últimos años. El estudio de sus efectos en la química de los procesos se está desarrollando a gran velocidad en áreas de la investigación entre las que se cuentan la emulsificación, homogeneización, desaglomeración, sonoquímica, aceleración de reacciones químicas, rotura de moléculas complejas, cristalización, filtración, desgasificación, cribado, limpieza, separación, pulido, soldaduras, recubrimientos y mediciones, entre otras. Algunos procesos aún no han sido introducidos en la industria y permanecen a escala de laboratorio, por lo que no han sido comercialmente desarrollados, a pesar de esto, representan un campo prometedor de aplicación que no se ha explotado suficientemente. Los efectos del ultrasonido se derivan fundamentalmente de cavitaciones acústicas producto de los colapsos de burbujas en líquidos, que provocan una enorme concentración de energía, debido a la conversión de energía cinética del movimiento del líquido en calentamiento de los contenidos de las burbujas. Las altas temperaturas y presiones locales, combinadas con el extraordinariamente rápido enfriamiento provocan un medio único para producir reacciones químicas bajo condiciones extremas (Lippolis *et al.*, 2003).

Los procesos de recuperación de oro desde sus menas se basan en la alta densidad del oro con respecto a la ganga y en su solubilidad en soluciones diluidas de cianuros alcalinos. Una cantidad significativa de oro puede estar íntimamente asociada con sulfuros y/o arseniuros y finalmente diseminado en su estructura como occlusión, por lo cual recibe el nombre de *mineral refractario*. Estos minerales contienen cuarzo como ganga principal y sulfuros tales como piritita, arsenopiritita y pirrotita, además de materia carbonosa en la cual muchas veces el oro se encuentra químicamente asociado (Benavides y Rojo, 2002).

El oro en el cuarzo puede ser liberado mecánicamente, mientras que el que se encuentra asociado a sulfuros o al material carbonoso, se dificulta su liberación por cualquier tipo de método mecánico convencional.

La mayoría de las veces, la cianuración de estos minerales requiere largos periodos de lixiviación y, desafortunadamente, bajas recuperaciones de oro. La presencia de materia carbonosa produce la adsorción del oro disuelto durante la cianuración, por lo que estos minerales no responden a la cianuración directa y es necesario concentrarlos para descomponer los sulfuros y la materia carbonosa liberando el oro para su lixiviación. Para esto se emplea la tostación, la oxidación acuosa o la oxidación biológica. La materia carbonosa se descompone parcialmente o no se descompone en estos procesos de oxidación. Por esta razón es removida durante la flotación de los sulfuros o pasivada durante la lixiviación de oro, por lo que se produce una pérdida inevitable del oro asociado a la materia carbonosa. De igual manera, las menas que contienen oro en forma de teluros se disuelven lentamente, lo que produce efectos semejantes a los refractarios en el tiempo y recuperación del metal (Benavides y Rojo, 2002).

El empleo de ondas ultrasónicas (OU) se puede concebir como pretratamiento a la cianuración o usarse durante la misma. Al igual que la biolixiviación, de una u otra manera facilita la conversión de los compuestos presentes que acompañan al

oro en las especies refractarias, de manera que resulte menos complicada la liberación de las partículas metálicas de oro, para luego entrar en contacto íntimo con la solución cianurada.

En particular, la aplicación de ultrasonido de alta frecuencia en fluidos no homogéneos, como gases, líquidos con partículas en suspensión, gotas o burbujas, representa un campo prometedor de aplicación. Recientes estudios muestran su uso en áreas como la emulsificación, homogeneización, desaglomeración, sonoquímica, aceleración de reacciones químicas, rotura de moléculas complejas, cristalización, filtración, desgasificación, cribado, limpieza y separación, entre otras (Benavides y Rojo, 2002).

Los efectos producidos por este proceso son causados por el fenómeno de cavitación acústica que se produce en los sistemas líquido - sólidos, en los que genera alta energía, de ahí su aplicación en muchos procesos de la industria minero - metalúrgica, en particular en la Metalurgia Extractiva de los minerales de oro.

Entre los objetivos de este proyecto está el estudio del tratamiento ultrasónico como una vía de mejora a los procesos de lixiviación con carbón CIP o CIL empleados en la recuperación de oro de minerales auríferos, para aumentar su eficiencia sin variar las condiciones de operación, basado fundamentalmente en la experiencia internacional y en la del CIPIMM en relación con el empleo de ondas ultrasónicas en el proceso de extracción de oro (Cianuración con CIP y Flotación de oro laminar), así como facilitar la elución de oro de céticas que se generan carbones cargados basado en las condiciones energéticas (Hernández, 2005, 2008).

Aspectos teóricos

El ultrasonido es una vibración mecánica que se trasmite a través de un medio físico. Es orientado, registrado y medido en Hertz (Hz), con ayuda de un aparato creado para este fin. Es la parte del espectro del sonido (aproximadamente 16 Hz) que esta fuera del rango normal del oído humano (Cuadro 1).

Cuadro 1. Rangos de sonido.

Infrasónica	Sónica o audible	Ultrasónica
1 - 16 Hz	16-20 KHz	20 KHz a más

Las ventajas de su aplicación en materiales se deben a que presenta las siguientes características:

- Se propagan en todos los medios elásticos donde existan fracciones de materia (átomos o moléculas capaces de vibrar).
- La intensidad de vibración depende de la separación interpartículas.
- Permite la detección y caracterización de discontinuidades por su alta capacidad de penetración.
- Alta velocidad de transmisión de energía sonora a través del medio acuoso.
- Mínima dispersión y absorción de energía de la onda ultrasónica.

El ultrasonido de alta densidad (US) produce un efecto químico o fenómeno conocido como *cavitación acústica*, en el cual existe una creación, expansión y destrucción de burbujas pequeñas cuando un líquido se está irradiando con US. Este fenómeno genera temperaturas altas y presiones en los puntos definidos dentro del líquido. El líquido circundante enfría rápidamente estas partes del medio, por eso una gruta del tamaño de unas micras desaparece en menos de 1/1000000 de segundos. La temperatura de cavitación varía hasta 10000 K, más frecuentemente en el rango de 4500 a 5500 K.

Para el éxito de la aplicación del US, se debe tener en cuenta cómo influyen en el proceso determinados factores tales como la frecuencia, el solvente, la temperatura, la aplicación de gases, la presión externa y la intensidad del ultrasonido. En la Figura 1 se muestra un ejemplo de esto.

Un aumento de la frecuencia lleva al descenso de la producción e intensidad de cavitación en los líquidos. El cambio de frecuencia del ultrasonido puede cambiar las rutas de reacciones químicas con participación de metales e influir en las propiedades de los catalizadores (Pt, Pd) si el cambio se realiza durante su producción. La implosión calienta los gases dentro de la cavidad a 5500 °C y produce un desplazamiento del líquido a 400 km/h. Ambos efectos contribuyen a la reacción química (Figura 2).

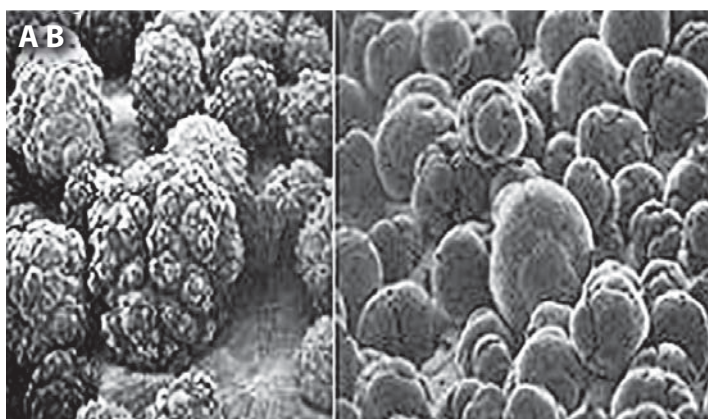


Figura 1. Superficie metálica alterada por ultrasonido. A: Polvo de Ni antes de la irradiación de US. El polvo está cubierto por una capa cristalina no reactiva. B: Polvo de Ni después de la irradiación de US. La capa se va y queda expuesta la superficie del polvo de Ni, que desarrolla su reactividad.

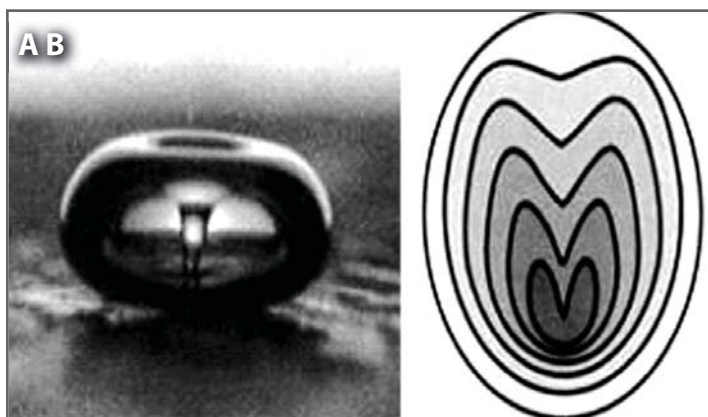


Figura 2. Fotografía (A) y esquema (B) de implosión cavitacional en un líquido irradiado con US.

La cavitación produce efectos considerablemente menores en líquidos viscosos o estos con tensiones superficiales más altas.

En cuanto a la temperatura, un aumento de la misma permite llevar a cabo la cavitación a intensidades acústicas más bajas, a consecuencia del aumento de la presión de vapor del solvente con el aumento de la temperatura. Las temperaturas más bajas causan una viscosidad más alta, que hace que la formación de la burbuja sea más difícil.

Si se aplican gases (pocos o bien solubles en el solvente), la intensidad de cavitación disminuye, debido a la formación de un gran número de núcleos adicionales en el sistema.

El aumento de la presión externa lleva al aumento de la intensidad de destrucción de burbujas de cavitación. Los efectos del US en este caso son más rápidos y más violentos, en comparación con la presión normal.

El aumento de la intensidad del OU fortalece los efectos producidos, y favorece la formación de los sólidos iónicos estratiformes y las reacciones de intercalación.

El tratamiento ultrasónico se utiliza muy a menudo para activar metales. Es un método relativamente simple en el que, durante la acción del ultrasonido, se forman nuevas superficies que son afectadas posteriormente por los agentes de la solución. El ultrasonido limpia la superficie de las impurezas mecánicas, óxidos y otros. Como resultado, se aumenta el área de superficie y se disminuye el área de las partículas metálicas.

La selectividad del proceso ultrasónico podría deberse al efecto de limpieza de la cavitación ultrasónica sobre las partículas en tratamiento, lo que puede hacerlas más reactivas a los tratamientos superficiales propios de la flotación. De todas formas, para determinar esto es necesario realizar una investigación que busque los mejores reactivos para el acondicionamiento ultrasónico.

Los efectos de la acción ultrasónica tienen influencia en la cinética de las reacciones en presencia de catalizadores. Además, pueden ocurrir reacciones que no tienen lugar en ausencia del ultrasonido, como sucede con la interacción entre Cu o Ni metálico y ligandos azometínicos.

En la síntesis de sulfuros másicos a través del ultrasonido en medio acuoso, el colapso implosivo de las burbujas de cavitación para generar especies H^+ por la disociación del agua, debido a la interacción directa con un precursor de azufre puede generar H_2S , el cual reacciona con el metal presente en la solución (como el molibdeno o el níquel) para generar el sulfuro correspondiente.

El mecanismo de acción del ultrasonido a las superficies metálicas ocurre, en primer lugar, cuando el flujo acústico (movimiento del líquido inducido por la onda sonora) realiza una conversión del sonido a la energía cinética, y no representa un efecto cavitacional.

La formación de cavidades asimétricas sobre la superficie metálica es un resultado directo de la destrucción de burbujas de corta duración cerca de la superficie. Como resultado de la cavitación, tiene lugar la deformación de la superficie, junto con la fragmentación y reducción del tamaño de partículas que aparecen.

Existen numerosos criterios acerca de cómo la radiación sónica puede romper los enlaces químicos. Todas las teorías que dan explicación a este fenómeno coinciden en que el evento principal en la sonoquímica es la creación, crecimiento y ruptura de una burbuja que se forma en el líquido (Kharisor, 1999).

El primer enigma es cómo una burbuja puede formarse, considerando el hecho que las fuerzas necesarias para separar las moléculas de agua a una distancia de dos radios de Van Der Waals, requerirán una potencia de 105 W/cm^2 . Es bien conocido que en un baño sónico, con un poder de $0,3 \text{ W/cm}^2$, el agua se convierte en peróxido de hidrógeno. Diferentes explicaciones manifiestan que la existencia de partículas inadvertidas, o burbujas de gas, que disminuyen las fuerzas intermoleculares y permiten la creación de las burbujas (Lippolis *et al.*, 2003).

La segunda fase es el crecimiento de la burbuja, que ocurre a través de la difusión de vapor del soluto al volumen de la burbuja. La tercera fase es la ruptura de la burbuja, que sucede cuando la burbuja alcanza su tamaño máximo. Según el mecanismo, estas implosiones provocan un aumento de la temperatura local de hasta 5000 K y las presiones a unos cientos de atmósferas y causan las condiciones extremas que provocan la ruptura de enlaces químicos.

Se ha demostrado que de la sonificación se obtienen partículas amorfas del orden de los 5 a 20 nanómetros. La causa de la amorficidad de los productos se relaciona con la velocidad de enfriamiento muy alta ($\geq 10^{11} \text{ K/sec}$), que se produce durante la ruptura de la burbuja, la cual no permite a los productos reorganizarse y cristalizar. Estas velocidades de enfriamiento tan altas son el resultado de la ruptura rápida, que dura menos de un nanosegundo.

El tamaño estimado de la burbuja varía de 10 a unos cientos de micras. Además de la región dentro de la burbuja (fase gaseosa) donde ocurre la reacción, existe una segunda región de gran importancia, la región interfacial que rodea la burbuja que colapsa. Su anchura es calculada en 200 nm , y la temperatura alcanzada después de la ruptura es de 1900 K . Las reacciones sonoquímicas de compuestos no volátiles como las sales ocurrirán en esta región. En este caso, las reacciones sonoquímicas ocurren en la fase líquida. Los productos son nanopartículas amorfas o cristalinas que dependen de la temperatura en la región del anillo donde la reacción tiene lugar.

Sobre la base de los resultados de la búsqueda bibliográfica, es posible señalar que el empleo de OU puede facilitar el alcance de niveles de recuperación de metales por encima de los de la operación normal, así como otros procesos de la Metalurgia Extractiva, debido a la propiedad que tiene la vibración mecánica de transmitirse a través de un medio físico y de causar efectos entre los que se encuentra la reducción del tamaño de las partículas.

Desde el punto de vista de la implementación, esta técnica existe a escala industrial, con mucha versatilidad en las operaciones que se realizan.

Generalmente, las frecuencias de ondas ultrasónicas son del orden de 25 kHz . Se han desarrollado equipos con capacidad de cientos de m^3/h . En la Figura 3 se presenta una vista del UIP 16000, un modelo industrial (Hernández, 2005, 2008).



Figura 3. UIP 16000, el procesador ultrasónico más poderoso del mundo: 16000 watts de potencia para procesamiento de volúmenes grandes en procesos para homogeneizar, dispersar o desaglomerar. Diseñado para trabajar en clusters de tres o más unidades.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales utilizados

1. Muestras de menas auríferas, denominadas M1 y M2, ambas de mineral de oro finamente diseminado.
2. Papel de filtro.
3. Recipientes para envasar las muestras.
4. Óxido de calcio.
5. Cianuro de sodio.
6. Indicador para valorar cianuro.
7. Solución buffer.

Equipos empleados

1. Procesador ultrasónico.
2. Baño ultrasónico.
3. Phímetro.
4. Estufa.
5. Bomba de vacío.
6. Pipeta de 5 ml , aforada con pera.
7. Bureta de cristal ámbar.
8. Erlenmeyer.
9. Balanza técnica de precisión $\pm 50 \text{ g}$.
10. Frasco lavador, vaso de precipitado.
11. Balas magnéticas.
12. Probetas graduadas.
13. Agitador magnético.
14. Agitador mecánico.

Métodos

- Caracterización de las muestras y preparación de las pulpas:

Caracterización de las muestras:

Las muestras M1 y M2 fueron caracterizadas mediante Análisis Químico (AQ), Análisis Mineralógico (AM) y Análisis Granulométrico (AG).

Se determinó además la densidad real por el método del picnómetro. Se reportó para M1 $\rho = 2,65 \text{ t/m}^3$ y para M2 $\rho = 2,63 \text{ t/m}^3$.

Para el Análisis Químico (AQ) se determinó la composición química mediante el método de docimasía para el oro y la plata; el ST la sílice por método gravimétrico, el As por digestión ácida y el resto de los componentes por el método de fusión con metaborato de sodio.

El Análisis Mineralógico (AM) se realizó mediante el empleo del método de Difracción de Rayos X (DRX) en las fracciones más finas de las dos muestras (- 0,074 mm y - 0,063 mm), previamente clasificadas.

La composición cuantitativa de las fases se determinó a partir de la composición química de los materiales asociada a la composición cualitativa de las fases.

El análisis granulométrico se realizó empleando el procedimiento establecido en el Manual de Procedimientos del Departamento de Investigaciones Tecnológicas, con la muestra molida a - 1 mm.

Preparación de las pulpas:

La preparación de la pulpa se realizó en un molino de bola con una relación peso de 14,5 kg de Bolas/kg de mineral seco, con un 50 % de sólido. Se obtuvieron pulpas a diferentes tiempos de molienda, según el procedimiento que muestra la Figura 4.

Una vez pesado el retenido, por diferencia de peso se determina el porcentaje bajo 0,074 mm (malla 200) y el tiempo de molienda que se requiere en cada prueba.

La carga de bolas en el molino se distribuyó, según el procedimiento, de la siguiente forma (Tabla I):

Tabla I. Distribución de la carga de bolas en el molino.

Diámetro de bolas (mm)	Peso (kg)	% en Peso
40	1,0	7,1
30	5,6	38,5
25	3,0	20,8
20	4,9	33,6
TOTAL	14,5	100

Ensayos de cianuración

Los ensayos de cianuración (lixiviación con cianuro) se realizaron en reactores del tipo botella, que constituyen pruebas standard que emplean las condiciones más severas para obtener la máxima recuperación posible en la mena ensayada; y en reactores tipo tanque agitado con y sin el empleo de ondas ultrasónicas para determinar el efecto de las mismas en la lixiviación. Las ondas ultrasónicas se suministraron por dos vías:

- Con el equipo generador de ondas tipo electrodo, introducido en el seno de la pulpa.
- Con un equipo de baño ultrasónico, en el que se sumerge el reactor con la pulpa contenida.

En todos los casos se emplearon diferentes condiciones de lixiviación que pueden mejorar la eficiencia de extracción de oro en cada muestra, tales como mayor grado de molienda y mayor concentración de cianuro.

El procesador ultrasónico trabaja a una amplitud de 30 %, en un tiempo de 12 h, con una pausa de 2 s. El mismo se detiene al tomar las muestras. La medida de amplitud leída en el procesador ultrasónico se correlaciona con la intensidad que es el parámetro de onda evaluado con el baño.

Procedimiento realizado

Las pulpas preparadas se cianuran teniendo en cuenta la concentración a añadir y se agitan durante media hora. Inmediatamente luego de encender el equipo generador de ondas ultrasónicas, comienza la prueba.

Transcurrida media hora, se toman muestras para análisis químico y para determinar pH y concentración de cianuro. El volumen extraído se repone con agua.

En caso de que se necesite se adiciona la cantidad de cianuro por reposición. Si el pH es menor que 10,5, se debe adicionar la cal necesaria. El mismo proceso se realiza a la hora, a las dos horas, a las cuatro horas, a las seis horas, a las ocho horas y a las 12 horas.

Al concluir la prueba se filtra la pulpa, se mide el volumen y se toma una muestra para análisis. El sólido obtenido se pesa y se calcula la cantidad de agua necesaria para realizar los tres lavados correspondientes. Se lava el sólido, se mide el volumen filtrado y se recoge una muestra para análisis.

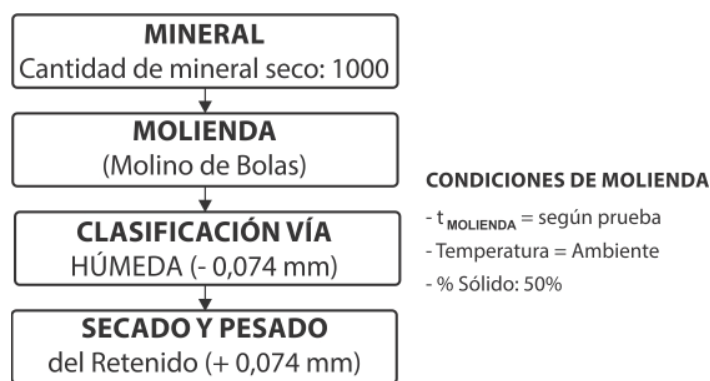


Figura 4. Procedimiento estándar para la preparación de las pulpas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización de las muestras y preparación de las pulpas

Análisis Químico (AQ):

Los resultados de la composición química de las muestras M1 y M2 se presentan en la Tabla II.

Tabla II. Caracterización química de las muestras M1 y M2.

Muestra	(g/t)		(%)								
	Au	Ag	St	Cu	Pb	Zn	Sb	Fe	Ca	As	SiO ₂
M1	6,23	<5,0	0,2	1,1*10 ⁻²	0,067	2,3*10 ⁻²	<1*10 ⁻³	2,91	1,34	1,7*10 ⁻³	79,4
M2	6,5	<5,0	0,18	1*10 ⁻²	<0,19	1*10 ⁻²	<1*10 ⁻³	2,06	1,25	<1*10 ⁻³	77,8

En la Tabla II se observan en ambas muestras contenidos de oro considerados industriales, por lo que se justifica el procesamiento de las menas mediante la tecnología de lixiviación con cianuro por agitación. Los contenidos de elementos tales como Cu, Fe, Zn, As y Sb son muy bajos, lo cual es favorable al proceso de cianuración, ya que éstos metales son cianicidas (consumidores de cianuro) y cuando se presentan en grandes cantidades influyen muy negativamente en la recuperación del oro y en la economía del proceso.

Es posible observar además que ambas muestras presentan contenidos similares de los componentes útiles.

Análisis Mineralógico (AM)

Los registros obtenidos permitieron identificar la composición sustancial de las muestras, en las cuales se evidencian los máximos de difracción del cuarzo como fase mayoritaria, seguida de la presencia de feldespatos. Esto se pudo observar con la aparición de los máximos de difracción fundamentales, cuyas distancias interplanares ($d = 3,18 \text{ \AA}$, $4,02 \text{ \AA}$, $3,76 \text{ \AA}$) corresponden a la plagioclasa sódica (variedad albíta). Con reflexiones menos intensas se encuentra la ortoclasa potásica (variedad adularia), que presenta sus máximos de difracción en valores de distancia interplanar de $d = 3,32 \text{ \AA}$, $3,23 \text{ \AA}$ y $3,78 \text{ \AA}$ (Figuras 5 a 10).

En las muestras se evidencia la presencia de piroxenos de tipo augita, cuyos principales máximos de difracción se encuentran interferidos por la presencia de los feldespatos identificados, aunque es recomendable corroborarlo con el empleo de otra técnica analítica complementaria como la Microscopía Óptica. Se identificaron las fases de arcillas clorita, hidromica y sericita, así como otros minerales minoritarios, entre los que se encuentran la calcita, material amorfo y escasamente pirita.

El análisis cuantitativo de la fase mayoritaria se realizó a partir de la determinación de la reflexión más intensa de cada una de las muestras y de la muestra patrón de cuarzo. En la Tabla III se presenta la composición cuantitativa del cuarzo obtenida a partir de las reflexiones del análisis por DRX en las diferentes fracciones granulométricas de cada muestra.

Tabla III. Determinación semi cuantitativa del cuarzo por DRX.

Muestra	M1 (1 + 0,075 mm)	M2 (-1 + 0,075 mm)	M1 (- 0,075mm)	M2 (- 0,075mm)	M1 (- 0,063 mm)	M2 (- 0,063 mm)
Contenido de cuarzo (%)	52	39	23	30	26	

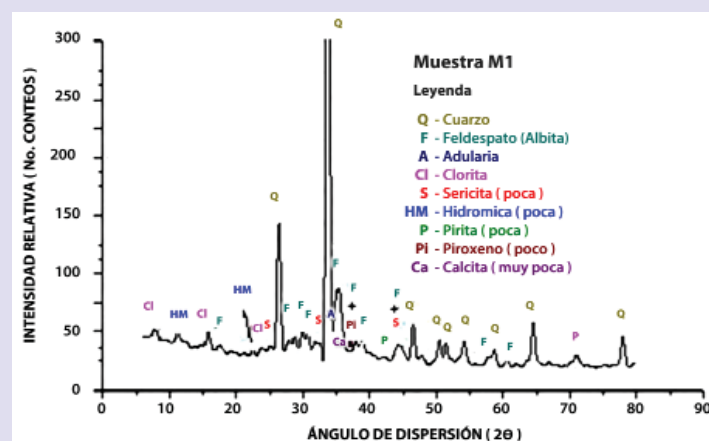


Figura 5. Difractograma de la muestra de partida M1.

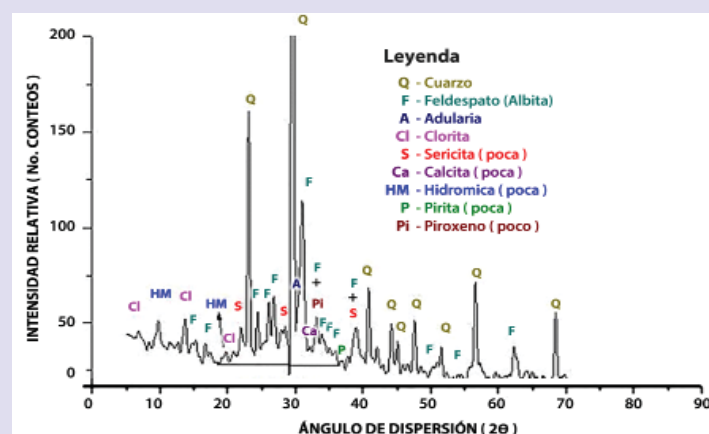


Figura 6. Difractograma de la muestra de partida M2.

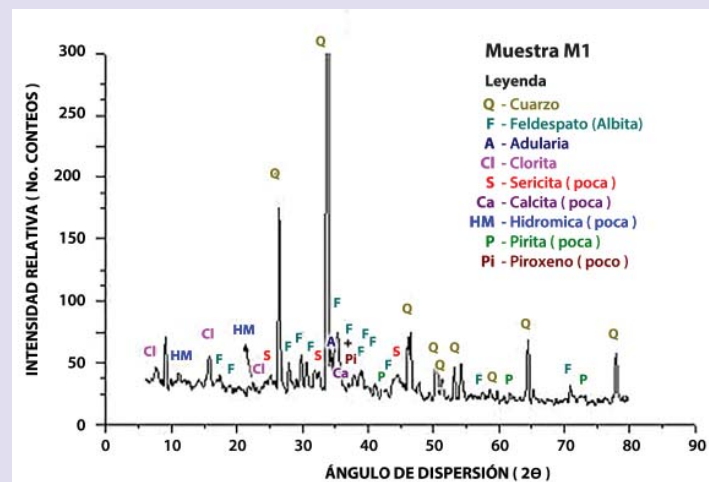


Figura 7. Difractograma de la fracción - 0,75 mm de la muestra M1.

Tabla IV. Composición química asociada a la composición cualitativa de fases en las muestras M1 y M2.

Muestra	Contenido (%)						
	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	CaO	Na ₂ O
M1	4,8	79,4	10,0	2,1	1,6	0,9	1,5
M2	4,1	77,8	11,2	2,1	1,1	0,8	1,5

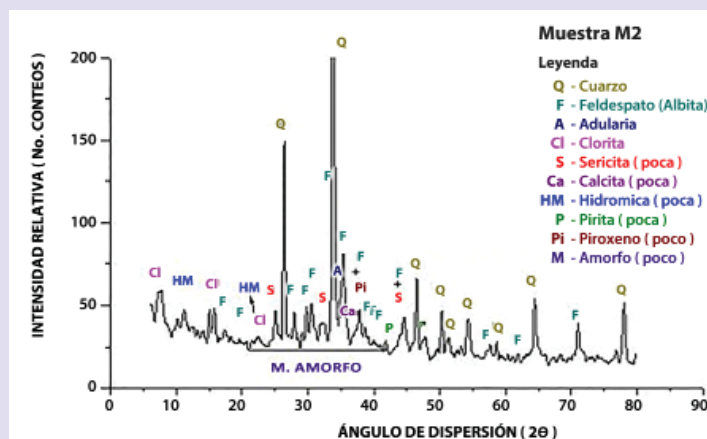


Figura 8. Difractograma de la fracción - 0,75 mm de la muestra M2.

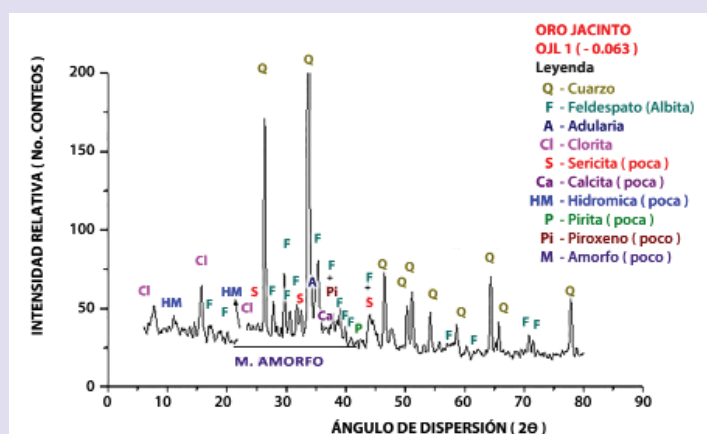


Figura 9. Difractograma de la fracción - 0,063 mm de la muestra M1.

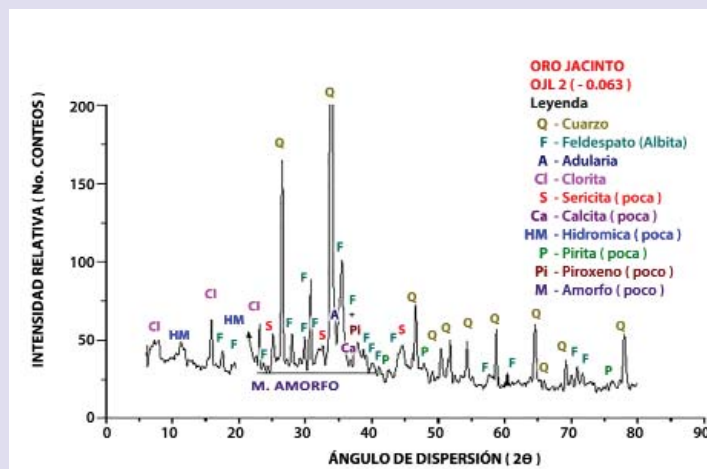


Figura 10. Difractograma de la fracción - 0,063 mm de la muestra M2.

En los difractogramas se observa la composición cualitativa de las fases, muy similar en todas las fracciones analizadas, y la presencia cuarzo y feldespatos como fases mayoritarias.

Los resultados de la composición química de las muestras asociados a la composición cualitativa de fases, empleados para determinar la composición cuantitativa de las mismas, se muestran en la Tabla IV.

Como se aprecia, los contenidos de SiO₂ en ambas muestras coinciden con los resultados reportados por DRX de las fases mayoritarias de cuarzo y feldespato. Otro tanto sucede con el aluminio que se encuentra asociado a las hidrómicas, plagioclasas y feldespatos.

La composición sustancial mineralógica de las muestras M1 y M2 se presenta en la Tabla V.

Del estudio mineralógico se pudo constatar que la composición mineral no difiere ni cualitativa ni cuantitativamente. Se corroboran las fases identificadas por DRX, en las que el cuarzo es el mineral mayoritario, en cristales y en agregados granulares con inclusiones de minerales metálicos como pirita, calcopirita raros cristales de hematita y oro (Figuras 11 y 12).

Tabla V. Composición mineralógica (%) de las muestras M1 y M2.

Minerales presentes en las muestras	Composición Sustancial (%)	
	Muestra M1	Muestra M2
Cuarzo	53	51
Adularia + Ortoclasa	13	15
Albita	12	11
Clorita	5	4
Piroxeno	5	4
Hidromica + sericita	6	7
Material amorfo (ópalo)	3	6
Calcopirita	1	1
Calcita	2	1
Pirita	<1	<1
TOTAL	100	100



Figura 11. Cristales de cuarzo con inclusiones de oro y grano de oro libre tamaño 53X (M1, + 0,074 mm).

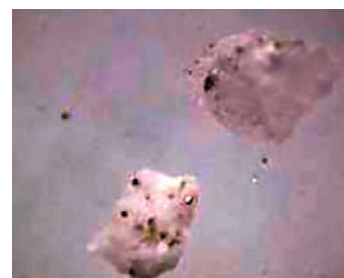


Figura 12. Agregado granular de cuarzo con inclusiones de pirita, calcopirita y oro, tamaño 26X (M2, + 0,106 mm).

El feldespato se encuentra muy entrelazado con las demás fases, fundamentalmente con el cuarzo y la clorita. Esta última se encuentra como un proceso de alteración de roca propilitizada. En la Figura 13 es posible observar una mezcla de color rosado blanco y verde, con inclusiones de mineral metálico.

Se observó también la presencia de calcopirita, en forma de granos irregulares afilados en las granulometrías intermedias, como la fracción + 0,212 mm, de colores que van desde amarillo latón hasta tornasolado. Su tamaño oscila entre 0,2 y 0,074 mm (Figuras 13 y 14).



Figura 13. Agregado de feldespato, clorita y cristal de pirita oxidada (+ 0,5 mm).



Figura 14. Cristales de calcopirita alargados y puntiagudos, fracción (+ 0,212 mm).

Análisis Granulométrico

Los resultados del análisis granulométrico de las muestras M1 y M2 trituradas bajo 1 mm se reportan en las Tablas VI y VII, respectivamente.

De los resultados del análisis granulométrico, se aprecia en general que en las muestras estudiadas el oro se concentra en las fracciones superiores a 0,25 mm e inferiores a 0,074 mm.

En la muestra M1 el análisis indicó que el 45,4 % del oro se encuentra en la fracción - 1,0 + 0,25 mm y el 34 % en la fracción - 0,074 mm, mientras que en la muestra M2 el 50,5 % del oro se encuentra en la fracción - 1 + 0,25 mm y el 30 % en la fracción - 0,074 mm. Aunque la diferencia no es grande, en la muestra M1 se concentra un 4 % más de oro en la fracción más fina (- 0,074 mm) y un 5 % menos en las fracciones más gruesas (-1 + 0,5) que en la M2. La ley promedio obtenida fue de 6,33 g/t para la M1 y 6,45 g/t para M2.

Tabla VI. Resultados del análisis granulométrico de la muestra tecnológica M1.

Fracción (mm)	Rendimiento γ (%)	Au	
		Contenido β(g/t)	Recuperación en la fracción € (%)
-1+0,5	24,28	6,2	23,78
-0,5+0,25	22,53	6,35	22,60
-0,25+0,15	8,24	8,16	10,63
-0,15+0,074	10,03	6,02	9,54
-0,074	34,92	6,06	33,44
Total	100,00	6,33	100,00

Tabla VII. Resultados del análisis granulométrico de la muestra tecnológica M2.

Fracción (mm)	Rendimiento γ (%)	Au	
		Contenido β(g/t)	Recuperación en la fracción € (%)
-1+0,5	26,29	6,29	25,6
-0,5+0,25	25,74	6,24	24,9
-0,25+0,15	7,79	8,27	10,0
-0,15+0,074	9,90	6,38	9,8
-0,074	30,28	6,32	29,7
Total	100,00	6,45	100,0

Las leyes de Au obtenidas en ambas muestras por análisis directo y por fracciones fueron similares, con valores en el orden de 6,3 y 6,5 g/t respectivamente.

Preparación de pulpas

La curva de molienda resultante para la preparación de pulpas a diferentes grados de molienda en función del tiempo se presenta en la Figura 15.

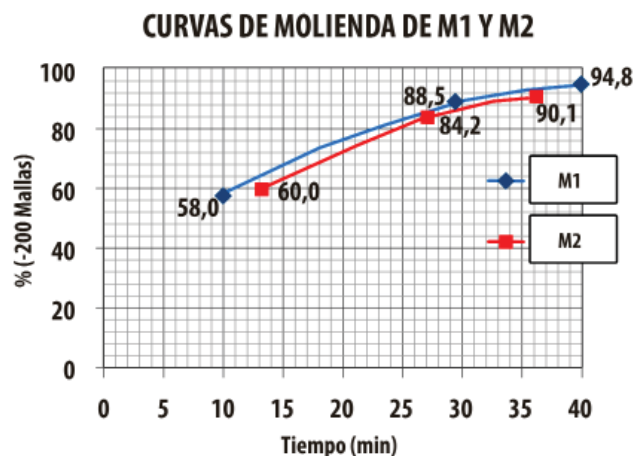


Figura 15. Curva de molienda de las muestras M1 y M2 molidas bajo 1 mm.

Tabla VIII. Resultados del análisis granulométrico de la muestra tecnológica M1.

Fracción (mm)		Grado de Molienda (% bajo 0,074mm)	C(NaCN) g/L	Consumo de NaCN (kg/t)	Consumo de cal (kg/t)	Conc. de Au (mg/L)	Ley de Au en cola (g/t)	Extracción (%) Au
								Por sólidos
M1 SU	1	90	1,0	1,81	2,6	4,32	0,32	95,30
	2	80	2,0	3,94	2,5	4,35	0,34	94,80
	3	90	2,0	3,99	2,5	4,27	0,32	95,05
	4	70	1.0	2,20	2,6	4,23	0,42	93,70
M2 SU	5	90	1,0	1,57	2,6	4,35	0,36	94,97
	6	80	2,0	3,30	2,5	4,45	0,32	95,26
	7	90	2,0	3,23	2,5	4,46	0,33	95,11
	8	70	1,0	1,89	2,5	3,30	0,54	91,70

Ensayos de cianuración

Fueron realizados ensayos en botella con diferentes condiciones de lixiviación que pueden mejorar la eficiencia de extracción de oro con ambas muestras; se emplearon mayor grado de molienda y mayor concentración de cianuro, todas sin utilización de OU (SU). Las condiciones y resultados de estas pruebas se presentan en la Tabla VIII.

Es posible observar que las mejores recuperaciones de oro se obtienen cuando se muele el mineral a 80 % y 90 % bajo 0,074 mm. En la muestra M2, es un poco más perceptible debido a que, como se vio en el análisis granulométrico, ésta tiene menores contenidos de oro en la fracción más fina (- 0,074 mm) y más contenido de oro en las fracciones más gruesas.

En la Tabla IX se presentan las condiciones y resultados de las pruebas con empleo de OU (COU) producidas por el generador de OU (G) y por el equipo de baño ultrasónico (B).

En todos los casos se empleó un grado de molienda de 70% bajo 0,074 mm y la concentración de NaCN de 1 g/L.

Los consumos de cianuro y de cal en todas las pruebas se correspondieron con los reportados en estudios con minerales similares.

El comportamiento obtenido en la ley de oro en cola mostró una tendencia a disminuir con la aplicación de las ondas ultrasónicas. Los mejores resultados se reportan en las pruebas realizadas con el baño ultrasónico con recuperaciones de oro del orden de hasta 98 % en las muestras estudiadas.

En la Tabla X se muestra el análisis granulométrico de las colas en los ensayos realizados con baño ultrasónico y sin ultrasonido en el reactor con agitación. Las colas de las pruebas que emplearon el generador no tienen realizado análisis granulométrico debido a que las cantidades de pulpa empleadas no eran suficientes para obtener la muestra.

Como se puede apreciar en la Tablas IX y X, existe un efecto significativo en la extracción del oro con el empleo de las ondas ultrasónicas en la lixiviación de este tipo de mena pues aún

Tabla IX. Condiciones y resultados de las pruebas de cianuración en reactores con agitación con empleo de OU.

Ensayo	Consumo de NaCN (kg/t)	Consumo de cal (kg/t)	Conc. de Au (mg/L)	Ley de Au en cola (g/t)	Extracción (%) Au
					Por sólidos
M1B 9	2,40	3,0	3,18	0,08	98,80
M1G 10	1,99	2,5	3,30	0,25	96,70
M2B 11	1,86	2,5	3,17	0,12	98,20
M2G 12	1,89	2,5	3,72	0,49	92,80

Tabla X. Resultados del Análisis granulométrico de las colas.

Muestra	M1B	M1G	M2B	M2G
Fracción (mm)	% en peso			
-1,06 + 0,074	30,25	22,53	26,75	26,70
- 0,074 + 0,045	15,78	18,81	15,39	17,28
- 0,045	53,98	58,65	57,86	56,03
Total	100,00	100,00	100,00	100,00

cuando se realizaron pruebas estándar en botella (que reportan la máxima extracción teórica en las condiciones dadas), incluso con valores más intensos de las condiciones de lixiviación, ninguna superó las extracciones obtenidas en las pruebas con empleo de las OU y el índice de consumo de cianuro fue inferior en las últimas.

Esto sugiere la posibilidad de operar con una molienda más gruesa en el procesamiento de menas auríferas en las que el oro se encuentre finamente disperso, como es el caso de los materiales ensayados, por lo que resulta interesante continuar los estudios y, sobre todo, profundizar en la determinación de los mejores parámetros de lixiviación y grado de molienda y comportamiento de las impurezas, teniendo en cuenta entonces indicadores técnico económicos.

CONCLUSIONES

- El uso de ondas ultrasónicas (OU) en la lixiviación por cianuración de las muestras M1 y M2 produce un efecto significativo en la extracción de oro, ya que se obtuvieron niveles de 98,2 % - 98,8 % de recuperación de oro, con un grado de molienda de 70 % bajo 0,074 mm y una concentración de CN- de 1 g/L, superiores a los obtenidos sin OU con igual y mayor grado de molienda (90 % bajo 0,074 mm) e igual y mayor concentración de CN- (2 g/L).
- El nivel máximo de extracción de oro en las pruebas sin empleo de OU fue de 95,5%, aún cuando se molió muy finamente.
- Se ha comprobado el efecto producido de disminución del tamaño de las partículas por la irradiación de ondas ultrasónicas, debido al fenómeno de cavitación acústica que se produce en los sistemas líquido - sólidos, en los que se genera alta energía.
- Sobre la base de los resultados de la búsqueda bibliográfica, es posible señalar que el empleo de OU facilita el alcance de niveles de recuperación de metales por encima de los de la operación normal, así como de otros procesos de la Metalurgia Extractiva, debido a la propiedad que tiene la vibración mecánica de transmitirse a través de un medio físico.

RECOMENDACIONES

Se recomienda continuar las investigaciones, profundizando en la determinación de los mejores parámetros de lixiviación, grado de molienda y comportamiento de las impurezas, teniendo en cuenta entonces indicadores técnico económicos. Se debe analizar la influencia de otros parámetros como la presión, viscosidad, intensidad del ultrasonido, el uso de carbón para evitar el efecto pregrobbing, así como el uso total o parcial de aire en el proceso de cianuración con ultrasonido; y determinar las características de las pulpas cianuradas desde el punto de vista de separación de fases, así como el comportamiento en las etapas siguientes a la disolución del oro.

BIBLIOGRAFÍA

- Benavides, M. D., Rojo, J. 2002. Aplicación de ultrasonido en CIP para minerales auríferos. Venezuela: Universidad Experimental Politécnica.*
- Hernández, A. N. 2005. Ultrasonido. La Habana: CIPIMM. Inédito*
- Hernández, A. N. 2008. Aplicación de técnicas físicas para minerales de Au, Ag, Ni y Fe. La Habana: CIPIMM. Inédito*
- Kharisor, B. J. 1999. Uso de ultrasonido en procesos químicos. Rev. Ingeniería UANL. II (5): 13 – 20.*
- Lippolis, L., Guzmán, H., Uzcanga, I., Morgado, M., Urbina de Navarro, C., Scott, C. 2003. Síntesis sonoquímica de sulfuros de Ni-Mo para ser empleados como catalizadores de hidrotratamiento. Acta Microscopica, 18 (A): 1 – 5.*

PROCEDIMIENTO PARA LA REHABILITACIÓN DE CANTERAS ABANDONADAS DE MATERIALES PARA LA CONSTRUCCIÓN

REYNALDO IVÁN FUENTES SARDIÑA, ARLENE HERNÁNDEZ ÁLVAREZ

Empresa de Investigaciones, Proyectos e Ingeniería de Matanzas (INRH)

San Vicente Final s/n Pueblo Nuevo, ciudad de Matanzas.

Correo: reynaldo@eipi.mtz.hidro.cu

RESUMEN

La persistencia en el tiempo de las áreas degradadas por la explotación de materiales para la construcción constituye uno de los pilares fundamentales de su incompatibilidad con el entorno. La rehabilitación de estos espacios es un tema débilmente tratado en la bibliografía, tanto a nivel internacional como nacional. Los estudios se concentran fundamentalmente en los yacimientos metálicos.

La estructura y constitución geológica de la provincia de Matanzas ha favorecido la existencia de numerosas canteras de materiales para la construcción. Más del 75 % de las mismas se encuentran en franco abandono. Esto determinó la selección del área para la investigación, en la que, a partir de la identificación y validación de 16 variables y su evaluación *in situ* en 250 canteras, pudo obtenerse una base de datos que refleja las características de cada uno de estos espacios.

La aplicación a los datos obtenidos del análisis de *cluster* (método de Ward) contribuyó a la agrupación de las canteras en cuatro grupos de manejo, claramente distinguibles por sus características físicas y niveles de peligrosidad ambiental. Según la complejidad que significaría su reutilización o minimización del riesgo que implican, a cada uno de estos grupos se les asignó posibles variantes de uso, así como propuestas de objetivos y programas para el manejo, lo cual resultó la base para elaborar un procedimiento objetivo y coherente para la rehabilitación de las canteras abandonadas de materiales para la construcción mediante la confección de planes de manejo. El procedimiento puede ser aplicado en otras regiones del país.

ABSTRACT

The persistence in time of areas degraded by the exploitation of materials for the construction constitutes one of the fundamental pillars of its incompatibility with the environment. The rehabilitation of these spaces is a topic weakly treated in the bibliography, so much at international level as national. This study is concentrated fundamentally on the metallic locations. The structure and geologic constitution of the province of Matanzas has favored the existence of numerous quarries of materials for construction, more than 75 % of them are currently abandoned. This situation determined the selection of the area for the investigation, in which a database that reflects the characteristics of each space was obtained, starting from the identification and validation of 16 variables, and its evaluation *in situ* in 250 quarries.

The application of the cluster (method of Ward) analysis to the data, clearly contributed to the grouping of the quarries in four handling groups differentiated for its physical characteristics and levels of environmental danger. To each one of these groups, according to the complexity that would mean their reuse or minimization of the risk that imply, were assigned possible variants of use, as well as proposals of objectives and programs for the handling, which was the base to elaborate an objective and coherent procedure for the rehabilitation of the abandoned quarries of materials for the construction with the making of handling plans. This procedure can be applied in other regions of the country.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de las infraestructuras sociales requiere de grandes cantidades de materiales de origen geológico. Sobre cada hectárea urbana puede haber miles de metros cúbicos de ladrillos, bloques, cemento, y piedra.

Cuando alguien se acerca a una gran ciudad, antes de ver las edificaciones o el trazado urbano, se percata de su proximidad por la profusión de tajos y cicatrices que dislocan el paisaje, en los pies de montes, en las laderas de los cerros, cerca de los cursos de los ríos. Por todas partes, donde los materiales son adecuados, se han excavado extensas áreas y removido importantes volúmenes de suelos y rocas para la construcción y el aprovechamiento industrial (Fernández, 2004).

Como consecuencia de este tipo de intervención se generan impactos negativos al medio, en ocasiones irreversibles, que llegan a provocar daños ambientales. Una vez que los tajos y canteras dejan de ser utilizados para la minería, suelen permanecer como oquedades baldías que, a menudo, se usan sin licencia como rellenos “sanitarios” o simples basureros, asentamientos de pobladores marginales, cuerpos receptores de residuales líquidos, entre otros usos, que incrementan los efectos negativos.

La persistencia en el tiempo de estos espacios degradados constituye un pilar de su incompatibilidad con el entorno (Vick, 2011). Las minas y canteras explotadas por los romanos y vikingos en Italia y Escandinavia, respectivamente, continúan sin rehabilitación hasta hoy en día.

La inexistencia de normas precisas que regulen el cierre de minas en muchos países y el no reconocimiento de la minería no metálica como fuente generadora de problemas ambientales, debido a la prioridad de los yacimientos metálicos, son elementos que caracterizan el panorama de la rehabilitación minera en el mundo.

En Cuba, como respuesta a esta problemática y con el propósito de minimizar la degradación ambiental, el 23 de enero de 1995 la Asamblea Nacional del Poder Popular aprobó la Ley No. 76, Ley de Minas de la República de Cuba, en armonía con la realidad socioeconómica del país. Dicha ley se implementó en aras de lograr la elevación del conocimiento geológico y la explotación más eficiente y racional de sus recursos minerales, garantizar la protección del medio ambiente, así como reducir el impacto ambiental relacionado con el uso del terreno. Sin embargo, la puesta en vigor de esta ley no ha resuelto la problemática relacionada con la rehabilitación y no ha impedido que los problemas ambientales generados en las canteras de materiales para la construcción sean mínimos.

Durante los años 2005 y 2007, el autor principal de este trabajo desarrolló investigaciones en la provincia de Matanzas, las que le permitieron identificar numerosas canteras abandonadas de materiales para la construcción, que ocasionan diversos problemas ambientales (Fuentes, 2007). Esto, unido a los elementos aportados por la revisión bibliográfica sobre la rehabilitación minera en otras regiones del mundo, condujo

al diseño de la presente investigación, la cual plantea como meta general la elaboración de un procedimiento objetivo y coherente para la rehabilitación de las canteras de materiales para la construcción mediante la confección de planes de manejo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Identificación y propuesta de variables para la caracterización de las canteras

La identificación de variables es una exigencia para la caracterización de las canteras abandonadas de materiales para la construcción.

El procesamiento de la información obtenida a partir de aplicación del método brainstorming (tormenta de ideas) entre los especialistas permitió identificar 19 variables para caracterizar las canteras abandonadas de materiales para la construcción. De estas, ocho estuvieron referidas a sus características físicas, siete a las relaciones que se establecen entre la cantera y el entorno, y cuatro vinculadas a la explotación.

Una vez elaborado el listado de variables, se realizó una consulta a expertos aplicando el método Delphi, dirigido a validar la propuesta, de acuerdo a sus conocimientos, experiencias, investigaciones y estudios bibliográficos. Los cálculos y valores de referencia para los intervalos de clasificación de los coeficientes en la aplicación del método se realizaron a través de las recomendaciones ofrecidas por Legrá y Silva (2012). Fue aceptado un nivel de concordancia (Cc) mayor o igual a 85 %, que permitió la selección de las variables finales (Tabla I).

Tabla I. Variables finales para la caracterización de las canteras.

Grupo	Variable
Referidas a características físicas	1- Formación geológica
	2- Composición litológica del fondo
	3- Material extraído
	4- Tipo de cantera
	5- Profundidad
	6- Amplitud
	7- Disposición
Referidas a la relación entre la cantera y el entorno	8- Afloramiento del nivel de las aguas subterráneas
	9- Erosión
	10- Tipo de vegetación predominante.
	11- Regeneración vegetal
	12- Efecto estético - paisajístico
	13- Existencia de fuentes de abasto aguas abajo
	14- Valor patrimonial
Vinculadas a la explotación	15- Existencia de reservas de materiales para la construcción
	16- Uso actual

Conceptualización y operacionalización de las variables seleccionadas

Una vez identificadas las variables, se procedió a su conceptualización y operacionalización.

Variables referidas a las características físicas de las canteras

- Formación geológica

Variable cualitativa que designa la formación rocosa sobre la cual fue excavada la cantera. La información se refiere al Mapa Geológico de Cuba a escala 1:250 000 elaborado por la Academia de Ciencias de Cuba (Colectivo de autores, 1988).

- Composición litológica del fondo

Variable cualitativa que identifica el tipo de roca existente en el piso de la cantera. Según Lomtadze (1983), se clasifican en dependencia del grado de permeabilidad y atendiendo al tipo litológico (Tabla II).

Tabla II. Clasificación de las rocas según su permeabilidad (Tomado de Lomtadze, 1983).

Tipo de rocas	Coefficiente de filtración (m/día)	Clasificación
Rocas no carsificadas y no agrietadas	Menos de 0,01 hasta 0,1	Impermeables
Rocas semipermeables al agua, débilmente carsificadas y/o agrietadas	0,1 hasta 10,0	Permeables
Rocas permeables, fuertemente carsificadas y/o agrietadas	Más de 10,0	Muy permeables

- Material extraído

Material (industrial o no metálico) explotado en la cantera antes de ser abandonada.

- Tipo de cantera

Cantidad de oquedades que componen el área de explotación. Es posible identificar dos tipos:

- o Aislada: una sola oquedad.
- o Grupo: dos o más oquedades.

- Profundidad

Distancia en la vertical, expresada en metros (m), medida desde el punto más bajo del piso de la cantera hasta el nivel de la superficie natural. De acuerdo a la experiencia del autor sobre el área experimental, puede ser evaluada mediante la siguiente escala de valores:

- o Muy profunda: más de 10 m
- o Medianamente profunda: de 5 a 10 m
- o Poco profunda: menos de 5 m.

- Amplitud

Es toda el área ocupada por la cantera. Se evalúa teniendo en cuenta la siguiente escala de valores, que responde a la experiencia del autor sobre el área experimental:

- o Grande: mayor o igual a 6 400 m².
- o Mediana: de 6,400 a 2 500 m².
- o Pequeña: menor de 2 500 m².

Para la definición de este indicador se puede utilizar como apoyo el mapa cartográfico de Cuba a escala 1:50 000 (Instituto Cubano de Geodesia y Cartografía, 1987) o imágenes satelitales.

- Disposición

Es la dirección en que fueron ejecutadas las excavaciones durante la explotación de las canteras, en dependencia de las características geomorfológicas del yacimiento. Se basa en la clasificación de Plá (2002) para las canteras. Solo se utilizaron aquellos tipos presentes en la zona de estudio y se modificó el término canteras en laderas, por el de pie de talud, por ser este último de mayor manejo y arraigo en el área experimental. Se clasifican en:

- o Fosos: abiertos en zonas llanas, con sentido de la excavación hacia la profundidad.
- o Pie de talud: la extracción comenzó por los niveles inferiores, con aumento de la altura y el número de bancos del frente de explotación. En ciertos casos puede comenzar por los bancos superiores y profundizándose en la vertical.

Variables referidas a las relaciones de la cantera con el entorno

- Afloramiento del nivel de las aguas subterráneas

Afloramiento o no de agua subterránea en el fondo de la cantera, en toda o parte de la misma. La información se obtiene por reconocimiento directo. Se clasifican en:

- o Toda el área de la cantera (100 %)
- o Más de la mitad de la cantera (50 – 99 %)
- o Partes aisladas de la cantera (menos del 50 %)
- o No se observan afloramientos

- Erosión

Evidencias de procesos erosivos como el arrastre del material suelto por las aguas superficiales o el desplome de bloques desde las laderas. Se definen como:

- o Derrumbes, desprendimientos o deslizamientos de tierra.
- o Material suelto por arrastre de las aguas de escorrentía.

- Tipo de vegetación predominante

Describe el tipo de vegetación presente en el área de la cantera, según la clasificación propuesta por Capote (1984). Puede no existir vegetación.

- Regeneración vegetal

Hace referencia al espacio cubierto por la vegetación, expresado en porcentaje del área total. Se basó en la propuesta de Herrero (2005) para la reforestación de préstamos, canteras y áreas minadas. Se adecuó a criterios que permitan evaluar el proceso regenerativo de la vegetación de forma natural. La presencia o ausencia de vegetación se considera un elemento condicionante de problemas ambientales. Se expresa mediante la fórmula:

$$SRN (\%) = \frac{SRN}{STA} * 100 \quad (1)$$

Donde:

STA – Superficie Total Afectada (hm²)

SRN – Superficie de Regeneración Natural (hm²)

La valoración se realiza en la cantera a partir de los resultados obtenidos con la fórmula, mediante los criterios siguientes:

SRN = 100 %: Totalmente regenerada.

SRN entre 80 a 99 %: Medianamente regenerada.

SRN entre 69 a 79 %: Poco regenerada.

SRN menos del 69 %: No regenerada.

- Efecto estético – paisajístico

Grado de contraste que impone la cantera dentro del contexto paisajístico. Es un criterio subjetivo, que depende de la opinión y percepción de quien evalúa. El análisis debe partir de la ubicación de la cantera dentro del contexto natural, sobre todo del paisaje y su entorno como elemento funcional (recreativo, contemplativo, habitacional). Debe considerarse su posición respecto a zonas turísticas, ciudades u otro tipo de asentamiento poblacional, Áreas Protegidas, carreteras nacionales o de acceso a lugares de interés turístico y miradores naturales.

La valoración que se realice, debe ser argumentada considerando la opinión ciudadana. Se enfoca en la intensidad del impacto estético a partir de la escala siguiente:

- o Fuerte: cuando la presencia de la cantera rompe la continuidad natural de los componentes visibles y genera una imagen contraria a la esperada por los visitantes y turistas. Por ejemplo, cuando se ubica en las proximidades de un área protegida, o cuando se encuentra dentro o muy próxima al perímetro urbano de algún asentamiento poblacional.
- o Media: cuando es menos apreciable desde las vías de acceso a lugares turísticos, ciudades, carreteras nacionales y accesos a instalaciones de interés histórico, sitios arqueológicos, aeropuertos internacionales, entre otras.
- o Baja: cuando están ausentes las características anteriores. Se refiere a canteras situadas en zonas alejadas de lugares muy visitados, que para llegar a ellas se utilizan vías de comunicación no

convencionales (terraplenes, caminos vecinales), lejos de la vista y de accesos principales o en zonas que se encuentran enmascaradas por la vegetación.

- Existencia de fuentes de abasto aguas abajo

Existencia o ausencia de tomas de abasto de agua potable. Se debe valorar la distancia entre la cantera y la toma, sobre la base de las condiciones del flujo subterráneo y de la consulta a la Empresa de Acueducto y Alcantarillado del territorio.

- Valor patrimonial

Presencia o ausencia de elementos geológicos y mineros con valor patrimonial, como tipos de formaciones geológicas, yacimientos fosilíferos u otros.

Variables referidas a la explotación de la cantera

- Existencia de reservas de materiales para la construcción

A partir de la observación directa, se constata la existencia o no de reservas de algún mineral industrial.

- Uso actual

Uso de la oquedad en el momento de la evaluación.

Sobre la base de las variables seleccionadas, se diseñó una planilla para el censo y caracterización de las canteras.

Identificación de canteras de materiales para la construcción

Para efectuar la identificación de las canteras de materiales para la construcción, se realizó una revisión de los antecedentes de explotaciones mineras realizadas en el área de investigación y se solicitó información a aquellos organismos que, para el cumplimiento de su objeto social, necesitan de la explotación de materiales de la construcción. De esta manera, se procedió con el Ministerio de la Construcción (MICONS), el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH), el extinto Ministerio del Azúcar (MINAZ) y el Ministerio de la Agricultura (MINAGRI), a los cuales se les solicitó la información referente a la apertura de canteras en el territorio.

Dada la antigüedad de los datos recopilados y por lo dinámico que resulta el proceso de extracción de materiales para la construcción, se consideró conveniente actualizar la información obtenida, así como revelar la existencia de otras canteras explotadas y no registradas. Para esto, se efectuó la fotointerpretación del área investigada a partir del uso de imágenes satelitales y con el uso del contraste que aportan las tonalidades claras de las canteras de materiales para la construcción sobre los colores oscuros de los suelos y la vegetación (Figura 1).

Para el análisis se utilizó con éxito el software GvSIG (GEOCUBA, 2011), que procesa las imágenes del sitio <http://maps.google.com>.



Figura 1. Imagen satelital de canteras de materiales para la construcción (tomado de <http://maps.google.com>).

Observaciones y mediciones de campo

Dentro de este aspecto se encuentran las actividades de verificación de la existencia de canteras y su *status*, además de la medición *in situ* de las variables a partir de su evaluación directa en la planilla diseñada. Incluye también la toma de fotos en cada cantera, que avalan la caracterización realizada.

Para efectuar las visitas a las canteras, fueron planificados recorridos en los que pudieran ser vistas la mayor cantidad de canteras por itinerarios. Cada cantera fue ubicada mediante un GPS de la serie LEICA (SR 20) y apoyados en las hojas del mapa topográfico de la provincia de Matanzas a escala 1: 50 000 (Instituto Cubano de Geodesia y Cartografía, 1987).

Digitalización de datos y construcción de la matriz de información

La digitalización de las bases de datos primarias fue concebida a partir de la unificación de toda la información resultante de las observaciones y mediciones de campo.

A cada cantera le fue asignado un número consecutivo. La carpeta digital correspondiente a cada una está integrada por la planilla en formato *Word* y una galería de imágenes. Luego, en un fichero de *Excel*, que contiene una cantidad de hojas de cálculo equivalentes al número de canteras a procesar, se registran las características de las variables de cada una de ellas de forma binaria (uno si la posee y cero en caso contrario). Esto hace que una variable con k niveles, al hacerla binaria, tendrá k nuevas variables de presencia - ausencia. También en formato de *Excel* fue diseñada una tabla en forma de matriz, la cual recoge de forma automatizada los datos de las hojas

antes descritas mediante la asignación de las canteras a las filas y las características de la evaluación de las variables a las columnas (incluye todas las características posibles para el universo observado de las variables, evaluadas según el sistema binario), mediante el establecimiento de vínculos activos entre las planillas de las diferentes canteras y la matriz de información.

Todo esto garantizó una actualización consecutiva y simultánea de ambas bases de datos y una mayor homogeneidad de los mismos, facilitó los métodos de agrupamiento y permitió realizar la evaluación de todas las canteras en un documento único.

Procesamiento estadístico multivariado

Para el procesamiento de los datos fueron utilizados métodos estadísticos multivariados (análisis de *cluster* o taxonomía numérica) (Miranda, 1997), que se fundamentan en el cálculo de una matriz de semejanza entre los individuos (Everitt, 1980). Este tipo de métodos estadísticos es utilizado para establecer grupos de individuos, en los que se unifica dentro de un mismo grupo a aquellos elementos que tengan características similares. Su función fundamental es la de clasificar y calificar los objetos y a la vez transformar esta información en un objeto más simple, de tal manera que se puedan caracterizar los mismos dentro de los grupos como un total, en vez de tratar cada objeto de forma individual. Específicamente, en este caso fue utilizado el método de Ward.

Los datos procesados fueron los referidos a las variables, registrados en la matriz de información binaria para las canteras abandonadas. Para realizar el procesamiento, se utilizó el software SPSS 15.0. El método ofrece como salida un dendrograma.

Una vez obtenido el dendrograma correspondiente, y sobre la base de que una buena solución *cluster* es aquella que considera un salto repentino (hueco) en el coeficiente de distancia, la distancia euclidiana que se elija debe cumplir con la condición de que las canteras se agrupen en una cantidad de grupos suficientes (4 a 6) y que cada uno de estos sea el reflejo de las similitudes que existen entre las características de las variables más distintivas.

Validación de los resultados y asignación de categorías de manejo

Para corroborar la validez del método empleado, Figueras (2011) refiere que es necesario poseer suficientes conocimientos sobre la temática analizada, de forma tal que sea posible realizar una verificación que compruebe si las características de los grupos formados son representativas de la mayor parte de los objetos que lo conforman.

Para la presente investigación, se realizó la comprobación y validación de los resultados según el proceder descrito por dicho autor. Se procedió entonces a determinar las características que distinguen a cada grupo con este orden:

- Tamaño de la cantera
- Profundidad

- Aislada o en grupo
- Disposición (en fosos o pie de talud)
- Permeabilidad del fondo
- Presencia de aguas subterráneas
- Fenómenos erosivos y de qué tipo
- Efecto estético paisajístico

Una vez descritos los grupos, fueron ordenados de menor a mayor de acuerdo a la complejidad para su manejo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Evaluación de las variables

La provincia de Matanzas posee un marcado desarrollo de la actividad de explotación de canteras para la extracción de materiales para la construcción, entre los que se encuentran la arcilla, materiales rocosos, cantos, serpentinitas, caliza para áridos, arena de sabana, material de mejoramiento, entre otros.

A partir de los trabajos realizados, pudieron ser identificadas en el territorio 377 canteras de materiales para la construcción, de las cuales 250 (66,3 %) se encuentran abandonadas y constituyeron el objeto de esta investigación. Las cifras expresan que por cada cantera que se explota existen dos abandonadas, sin que se hayan realizado en ellas acciones de rehabilitación. A partir de la evaluación *in situ* de las variables en cada cantera fue posible caracterizarlas desde el punto de vista de sus caracteres físicos, de su relación con el entorno y de su explotación.

Características físicas de las canteras evaluadas

La provincia de Matanzas está representada en superficie por rocas del llamado Neoaútoceno cubano, que se formaron en el mismo lugar donde hoy se encuentran, solo que bajo condiciones y ambiente de sedimentación predominantemente marino, lo cual condiciona muchas de sus características (Iturralde - Vinent, 2007). Por esto, los yacimientos del grupo de minerales no metálicos tienen especial relación con las formaciones geológicas en las que se desarrollan.

Formaciones geológicas

La Formación Güines es la más representada en la provincia y en la que más canteras se han explotado (32 %). De ella se extrae mayoritariamente material rocoso, pero también caliza en bloques para relleno, arcillas de su cobertura, cantos, caliza para la elaboración de áridos y otros.

La segunda formación más explotada es la Formación Canimar (16 % del total), de la cual se extrae rocoso como material fundamental, además de caliza en bloques para relleno, cantos, arcilla, caliza para la elaboración de áridos y material de mejoramiento. A continuación se ubica la Formación Colón, en la cual han sido abiertas un total de 37 canteras (15 %), de las que se extrae fundamentalmente rocoso y cantos.

Son explotadas además, en este orden de importancia, canteras en las rocas del Complejo Ultramáfico (serpentinitas y hazburgitas) y en las formaciones Güines + Cojimar, Caobas, Villa

Roja, Cojimar, Jaimanitas, Nazareno, Guevara, Peñón, Tinguaro, Universidad, Veloz, Bellamar, Chirino, Santa Fe, Vedado, Perla, Vía Blanca, Arabos y Santa Teresa.

Material explotado

Los materiales para la construcción más explotados en Matanzas son el rocoso (122 canteras) y el canto (36 canteras) (Figura 2).

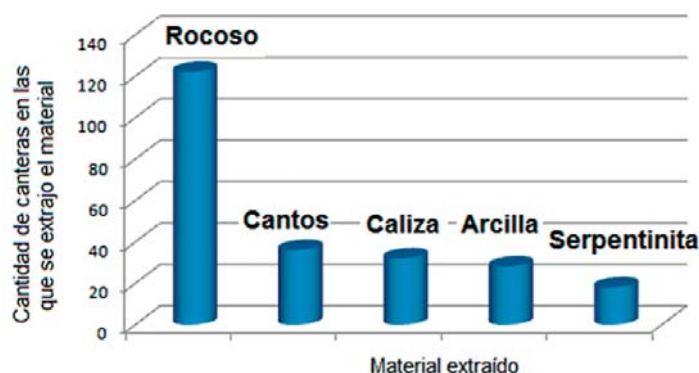


Figura 2. Materiales de mayor extracción en la provincia de Matanzas.

Lo anterior se refleja totalmente en la sociedad matancera, donde el rocoso es el material por excelencia utilizado en la conformación de caminos, basamento de carreteras, plataformas para la construcción de viviendas y edificios. El canto es también el bloque de mayor uso en la provincia de Matanzas.

Permeabilidad del fondo

Del total de canteras estudiadas, la mayor cantidad corresponde a canteras cuyos fondos están constituidos por materiales impermeables (142, 57 % del total), seguido de canteras con fondos catalogados como permeables (76, 30 % del total) y canteras con fondos evaluados como muy permeables (32, 13 % del total).

Profundidad

Más de la mitad de las canteras existentes en Matanzas tienen una profundidad menor o igual a cinco metros (127, 51 % del total) y clasifican como poco profundas. Les siguen, en orden de prevalencia, las que poseen profundidades entre los cinco y diez metros (73, 29 % del total), que clasifican como canteras medianamente profundas, y 50 canteras que fueron evaluadas como muy profundas. Además, de las 250 canteras abandonadas estudiadas, 213 están dispuestas de forma aislada y 37 forman parte de un grupo. Excavadas en forma de fosos existen 229 canteras, distribuidas por todo el territorio matancero.

Relación entre la cantera y el entorno

A partir de la evaluación de las variables que describen la relación entre la cantera y el entorno, se refieren a continuación las características de las canteras abandonadas de materiales para la construcción en la provincia de Matanzas.

Afloramiento de las aguas subterráneas

En el 18 % de las canteras estudiadas (44) aflora el agua subterránea, o sea, sus niveles de fondo han sido llevados más allá de los límites y regulaciones permisibles y constituyen vías abiertas que conectan la superficie con las aguas subterráneas. Esto se debe a que sus límites de explotación respondían únicamente a factores tales como la dureza de la roca, las posibilidades tecnológicas de explotación y la demanda del material, entre otros. En ningún caso el proceso respondió a un proyecto basado en los factores geológicos y medioambientales.

Existen pozos que son utilizados como fuente de abasto de poblaciones en las inmediaciones y aguas abajo en la dirección del flujo en ocho de las canteras en las que aflora el agua subterránea:

- Cantera 3 "Renato Guitart", municipio Cárdenas.
- Cantera 172 "Bloquera 1", municipio Colón.
- Cantera 173 "Bloquera 2", municipio Colón.
- Cantera 174 "Bloquera 3", municipio Colón.
- Cantera 184 "La Rosita", municipio Jovellanos.
- Cantera 214 "Viradero", municipio Ciénaga de Zapata.
- Cantera 219 "La Criolla", municipio Ciénaga de Zapata.
- Cantera 225 "La América", municipio Jagüey Grande.

Estas canteras representan un peligro potencial para las aguas subterráneas y las poblaciones que de ellas se abastecen, ya que resultan una vía expedita de comunicación entre la superficie y este recurso natural. Un simple descuido incidental pudiera ocasionar una contaminación irreversible en las aguas subterráneas.

Valor patrimonial

Al excavar las formaciones geológicas con el propósito de extraer de ellas los recursos minerales, a menudo se ponen al descubierto rocas con características peculiares que las hacen representativas de una determinada formación. Otras excavaciones han sido fuentes de verdaderos yacimientos fosilíferos. Estos hechos guardan tras de sí el patrimonio geólogo minero del país que, junto a minas y canteras de antigua explotación, constituyen sitios de interés histórico y valor patrimonial asociados a la geología y a la minería (Gutiérrez, 2007).

Fueron identificadas tres canteras las cuales poseen valor patrimonial, desde el punto de vista geológico:

- Cantera 172 (Bloquera 1)

En una de las paredes de esta cantera existe un corte geológico, en el cual fue descrito el Lectoestratotipo de la Formación Colón (Franco y Pszczółkowski, 1981, citados en Instituto de Geología y Paleontología de Cuba, 2002). Este sitio posee la categoría de Geositio (Gutiérrez, 2011), para el que se ha propuesto la realización de acciones por parte de las autoridades municipales, en aras de rescatar la sección representativa de la cantera e impedir el vertimiento indiscriminado de basura.

- Cantera 114 (Minas Margot)

Fue una de las primeras minas explotadas en Cuba. Data de la época de la colonia y se comenzó a explotar como mineral de cobre. Está asociada a yacimientos hidrotermales y relacionada con fallas profundas, razón por la que al llegar a determinada profundidad se inundó y fue abandonada su explotación. Con posterioridad se reinició su utilización hacia los laterales, pero esta vez como material de mejoramiento para caminos, hasta que nuevamente fue abandonada en la década de 1990. Este sitio también posee la categoría de Geositio (Gutiérrez, 2011) y se ha propuesto para ser utilizado en el turismo especializado.

- Cantera 150 (Cueva Quintana)

Llamada así porque durante el proceso de explotación de la misma fue descubierta una cavidad cársica inundada por aguas subterráneas parcialmente salinas, hecho que obligó a abandonar su utilización. Sin embargo, puso al descubierto una maravilla de la naturaleza geológica del territorio matancero, la cual es utilizada como área de esparcimiento por visitantes de las poblaciones vecinas (Figura 3).



Figura 3. Vista de la cantera Cueva Quintana.

Del análisis de las variables vinculadas a la relación cantera - entorno fueron identificados los principales problemas ambientales generados por las canteras abandonadas de materiales para la construcción. Entre estos se incluyen:

- La aparición de agua subterránea en el fondo de canteras abandonadas, que constituyen una vía directa de contaminación de este recurso.
- El deterioro paisajístico, a partir de lo agresivo que resulta el contraste de los colores claros de las canteras de cantos (caliza margosa), calizas y otros, con el verde del paisaje.
- El peligro de desprendimientos de bloques y partes de las paredes de las canteras.
- Los cambios en las pautas del comportamiento de la fauna.
- El incremento de las áreas afectadas por los efectos de la erosión.
- El peligro de caída hacia las oquedades de personas y animales.

Existencia de reservas y uso actual de las canteras

Existencia de reservas

De las 250 canteras abandonadas de materiales para la construcción que existen en Matanzas, 82 aun poseen reservas de determinado tipo de material, que no necesariamente coincide con el objetivo original de explotación de la cantera. Esto constituye una fortaleza, aunque parezca contradictorio, ya que estas canteras pueden tener una segunda vida de explotación y serles asignado un nuevo concesionario que tendría a su cargo la rehabilitación de la misma.

Un listado de estas canteras con el plano de ubicación incluido a escala 1: 250 000 fue entregado a la Dirección Provincial de Planificación Física en la provincia de Matanzas al final de la investigación.

Uso actual de las canteras

Durante la ejecución de este trabajo fueron identificadas 45 canteras a las cuales se les habían dado los siguientes usos:

- Utilizado por las FAR: en este caso referido fundamentalmente a la construcción de túneles y campos de tiro.
- Depósito de basura, de forma fortuita y sin supervisión: es el segundo uso más frecuente en estos espacios en la provincia de Matanzas (17 canteras).
- Como laguna de oxidación para la deposición de residuos albañales de poblaciones, prisiones, centros de cría porcina y otros de características similares: este uso se lleva a cabo en siete canteras abandonadas.
- Cría intensiva de peces: este uso sólo lo posee una cantera en Matanzas.
- Cultivo de piña
- Siembra de toronja
- Siembra de caña
- Potrero

Estos cuatro últimos usos se corresponden con canteras abiertas fundamentalmente para explotar pequeños espesores de material útil y, luego de algunos años de autorecuperación de la capa de suelo, se han utilizado los mismos con simples acciones de drenaje de las áreas.

Otros usos de las canteras abandonadas son:

- Vertedero oficial de residuos sólidos de poblados y ciudades: en este caso particular se encuentran sólo dos oquedades, que constituyen vertederos oficiales de una ciudad y de un poblado. No se conoce de la existencia de estudios previos al uso, ni de medidas preventivas de impermeabilización.
- Piscinas para el almacenamiento de residuos de petróleo: dos canteras abandonadas se utilizan con esta finalidad.
- Construcción de viviendas: este uso representa un caso aislado, en el que un grupo de pobladores ilegales utilizó parte de una cantera abandonada para levantar en ella sus viviendas, con el mínimo de condiciones y muy baja calidad de vida para sus habitantes.

- Depósito de arcilla de destape
- Vivero forestal
- Lugar de esparcimiento del CITMA

Los tres últimos casos resultan únicos en sus usos y son de los que menos problemas ambientales generan. El caso de la construcción de un vivero forestal representa uno de los más hermosos y eficaces usos detectados. Las paredes de la cantera protegen de los fuertes vientos a las posturas de árboles que allí se cultivan y la forma de la oquedad fue modificada en una parte del área para permitir el correcto drenaje (Figura 4).



Figura 4. Cantera abandonada utilizada como vivero forestal.

Los usos dados a las canteras de materiales para la construcción en la provincia de Matanzas tienen en común el hecho de que en ninguno de los casos se ha cumplido la legislación vigente: no poseen estudio ni evaluación de impacto ambiental ni existen evidencias de solicitud de Licencias Ambientales, lo que ha provocado que a partir del nuevo uso los problemas ambientales se hayan exacerbado.

Bases de datos digitalizadas y matriz de información

A partir de las bases de datos primarias de cada cantera en hojas de cálculo de Excel, se generó una tabla en el mismo sistema, con filas correspondientes a la información básica referida a las 250 canteras abandonadas en la provincia de Matanzas y 87 columnas que incluyen el número asignado a la cantera, su nombre y sus coordenadas, la formación geológica a la que pertenecen, el resto de las variables operacionalizadas con información binaria (82) y una última columna de observaciones finales. Esta tabla devino en la matriz de información, a partir de la cual se puede acceder a toda la información disponible sobre cada cantera estudiada desde un único documento. Además, en su concepción se asignaron rangos de colores para los diferentes atributos, con una combinación de diversas tonalidades de un mismo color para una misma variable; la más oscura corresponde a la que está presente en esa cantera, lo que facilita su rápida interpretación.

Catastro de canteras abandonadas

Con la información referida en la matriz y a partir del uso de las herramientas disponibles en el software AutoCad, se confeccionó un mapa a escala 1:250 000 de la provincia de Matanzas, que posee la ubicación de las canteras, georeferenciadas y con una simbología que depende de los 16 posibles tipos de material extraído. Este mapa representa el catastro de canteras abandonadas en la provincia de Matanzas a escala 1:250 000.

Al estar georeferenciadas, resulta sencillo exportar la ubicación de las canteras hacia otros mapas en formato digital, con la finalidad de realizar interpretaciones referidas a la temática del mapa en cuestión.

De la misma forma, la conformación de los datos primarios permitió su representación en un Sistema de Información Geográfico, preparado con el software ArcGIS v. 9.2 y la base de datos enlazada a este, con las características descritas para las variables en cada cantera. El sistema utiliza como base y pantalla principal el propio catastro y permite realizar consultas sobre las características de las canteras estudiadas con solo clicar sobre el número correspondiente.

Grupos de manejo de canteras abandonadas de materiales para la construcción

Previo al proceder para la obtención de los grupos de manejo, fue necesario discriminar, de los 250 casos estudiados, los que no debían ser procesados debido a la existencia de criterios que los invalidaban. Debido a esto, no fueron procesadas:

- 82 canteras, por poseer reservas de material útil explotable
- 45 canteras, por estar en uso actualmente
- 48 canteras, cuya vegetación se ha regenerado totalmente de forma natural o provocada

Mediante este proceso se redujo a 96 el número de canteras a procesar.

Resultados del análisis multivariado

La aplicación del análisis de cluster (método de Ward) a la matriz de información binaria de las 96 canteras que quedaron después de la discriminación, partió del establecimiento de la distancia euclidiana más favorable para la generación de un número racional de grupos que incluyeran en cada uno canteras con un significado distintivo de sus características. En este caso, resultó favorable adoptar una distancia euclidiana de 10. El dendrograma resultante visualizó la existencia de 4 grupos con saltos repentinos en las distancias, lo que los hace diferentes en cuanto a sus características fundamentales y válidos para su análisis.

Luego de obtenidos los grupos, se comprobó la validez del método a partir del análisis de las características de los miembros que conforman cada uno y la verificación de si realmente la mayor cantidad de los elementos poseen características similares que los distinguen de otros. Adicionalmente, se realizó una representación gráfica de los grupos obtenidos y las diferencias existentes entre ellos, en la que se muestra la composición de

cada grupo por amplitud, afloramiento del nivel de las aguas subterráneas y efecto estético paisajístico.

La mayor parte de las canteras pequeñas pertenecen al Grupo I, mientras que la mayoría de las que poseen un fuerte efecto estético paisajístico se encuentran en el Grupo IV. Por otro lado, el mayor porcentaje de canteras con afloramiento del nivel de las aguas subterráneas en sus fondos se concentra en el Grupo III.

Todos estos resultados corroboran la validez del método.

Obtención de los grupos de manejo

Fueron identificados y caracterizados cuatro grupos de canteras abandonadas de materiales para la construcción, los cuales, a partir del análisis de sus características, fueron reunidos en cuatro grupos, en dependencia de la mayor o menor complejidad para el manejo:

Grupo I

Es el mayor de los cuatro grupos de manejo. Está compuesto por 32 canteras que presentan las siguientes características distintivas:

- Mayormente pequeñas, poco profundas
- Aisladas, dispuestas en fosos
- Fondo principalmente impermeable
- No se observan afloramientos de aguas subterráneas.
- Existen evidencias de erosión relacionadas con el arrastre de material suelto.
- La regeneración vegetal es mediana a ninguna y el efecto estético paisajístico es bajo.

Grupo II

Es más pequeño en cuanto a cantidad de canteras que lo conforman. Se compone solamente por 15 oquedades, las cuales se distinguen por:

- Amplitud grande a mediana, de profundidad media
- Fondo impermeable
- No se observan afloramientos de aguas subterráneas.
- Las evidencias de erosión están relacionadas con el arrastre de material suelto.
- La regeneración vegetal es de poca a media y el efecto estético paisajístico es medio.

Grupo III

Está conformado por 20 canteras y es el tercero en cuanto a cantidad. Las características distintivas de estas canteras son:

- Mayoritariamente medianas, muy profundas
- Aisladas, dispuestas en fosos
- Es frecuente encontrar afloramientos de aguas subterráneas en su fondo.
- Existen evidencias de erosión que están más relacionadas con el arrastre de material suelto. Sin embargo, existe un 36% de las canteras en las que se evidencian desprendimientos de bloques y de taludes.

- No existe regeneración natural de la vegetación y el efecto estético paisajístico es bajo.

Grupo IV

Es el segundo grupo en cuanto a cantidad de canteras, con 29. Sus miembros se distinguen por presentar las siguientes características:

- Tamaño grande, muy profundas
- Aisladas y en fosos
- Fondos mayoritariamente permeables, aunque no se observan afloramientos de las aguas subterráneas.
- Las evidencias de erosión están relacionadas con el arrastre de material suelto.
- La regeneración natural de la vegetación es mediana a poca y el efecto estético paisajístico es de medio a fuerte.

El resultado de la aplicación práctica del proceder descrito en el área experimental (provincia de Matanzas) constituye la base en la que se sustenta el procedimiento para la elaboración de planes de manejo de canteras de materiales para la construcción.

Procedimiento para la rehabilitación de canteras abandonadas de materiales para la construcción

El manejo de un área protegida, de una zona costera o de un elemento natural es un tema recurrente en la bibliografía actual. Sin embargo, manejar un área degradada por la minería con el propósito de que el terreno alterado vuelva a ser útil para un determinado uso, sin que este implique perjuicios adicionales al medio ambiente y contribuya a minimizar los problemas ambientales causados por la minería, resulta un hecho novedoso como solución generalizadora.

Este procedimiento fue concebido para dar respuesta a los diversos casos que se puedan presentar en el proceso de rehabilitación de áreas degradadas por la actividad de explotación de materiales para la construcción, lo que se logró a partir de la identificación de los grupos de manejo y de recomendar posibles usos capaces de modelar, a través de programas, los procesos futuros que mitigen dichos problemas.

La elaboración del procedimiento se basó en la experiencia acumulada por el autor principal de este estudio durante años en el trabajo de recomendación del uso de materiales de construcción para obras hidráulicas y su preocupación por los problemas ambientales que se generan en estos espacios, al no realizarse los trabajos de rehabilitación una

vez finalizada la explotación. Además, se utilizó el apoyo de la revisión, compilación y análisis de los valiosos aportes realizados por otros autores sobre la temática.

La estructura del procedimiento se diseñó en cinco capítulos, de manera que resultara sencilla y de fácil aplicación, y que fuera posible iniciar el análisis de la problemática de la rehabilitación de una cantera, desde los aspectos más generales hasta particularizar en los problemas ambientales específicos que genera, así como la identificación del marco legal vigente y que se aplica en cada caso (Figura 5).

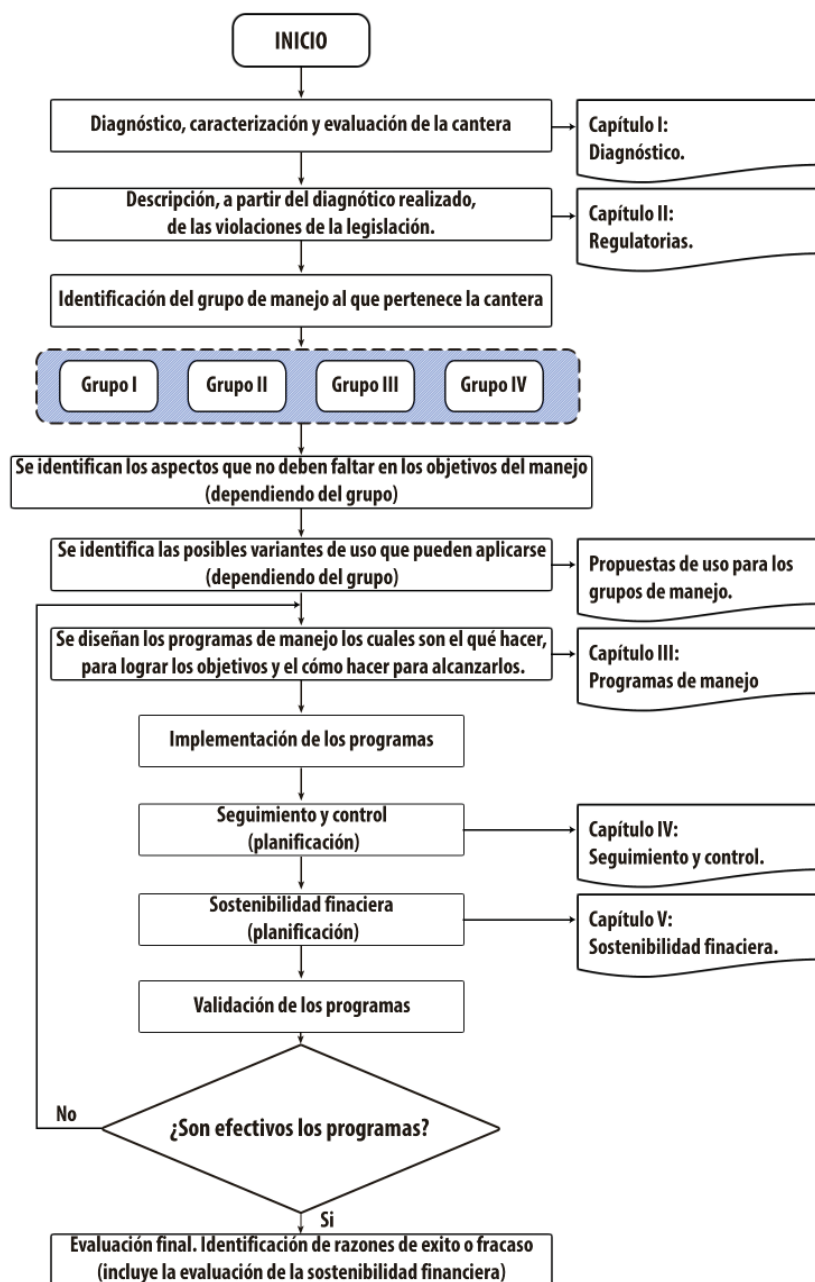


Figura 5. Esquema general de la estructura del procedimiento para la confección de planes de manejo para canteras de materiales para la construcción.

El procedimiento se conforma de cinco capítulos: Diagnóstico, Regulatorias, Programas de Manejo, Seguimiento y Control y Sostenibilidad Financiera, además de la bibliografía consultada y algunos anexos que incluirán listados, tablas, planillas para el diagnóstico y evaluación de la cantera y mapas que ayuden a una mejor comprensión de lo descrito en el procedimiento.

El Capítulo I, Diagnóstico, está dedicado a dos aspectos fundamentales: uno referido a la caracterización del área de ubicación de la cantera abandonada desde el punto de vista geográfico, de su estatus legal actual y de sus elementos naturales y socioeconómicos (*Generalidades*); y otro en el que se identifiquen las problemáticas que este espacio genera sobre el medio ambiente (*Situación Medioambiental*).

El Capítulo II, Regulatorias, se describirá a partir de la realización del diagnóstico de la cantera el estado actual de la misma, desde el punto de vista de las violaciones de la legislación vigente, lo cual podrá ser avalado por la presentación de imágenes. Incluirá la identificación y caracterización del Grupo de Manejo al que pertenece la cantera en cuestión y los objetivos del manejo de la cantera abandonada, que deben estar encaminados a dar solución a los problemas ambientales previamente detectados.

Dentro de los objetivos para cada Grupo de Manejo de canteras abandonadas de materiales para la construcción, no deben faltar los siguientes:

- Grupo I
 - o Restaurar el espacio.
- Grupo II
 - o Señalizar el espacio.
 - o Reforestar el espacio (se deberán tener en cuenta acciones complementarias como la conformación del modelado morfológico, la preparación de camas de suelo orgánico y la selección y uso de especies vegetales, riego, fertilización y abonamiento).
 - o Evaluar potencialidades de uso.
- Grupo III
 - o Señalizar el espacio.
 - o Minimizar o eliminar los procesos de contaminación hídrica.
 - o Minimizar los peligros geológicos.

Tabla III. Ejemplo de tabla de propuestas de uso para canteras abandonadas.

No	PROPUESTAS DE USO	GRUPO I	GRUPO II	GRUPO III	GRUPO IV
1	Campo de tiro.	X	X		X
2	Vertedero.	X	X		X
3	Área de parqueos colectivos.		X	X	X
4	Depósito de agua.		X	X	X
5	Discoteca (paredes amortiguan el ruido)		X		X
6	Área de concierto al aire libre.		X	X	X
7	Área de ensayo de bandas musicales.		X	X	X
8	Área para la práctica de tenis, pelota Vasca u otros deportes similares (paredes altas y rectas, evitan el uso de grandes mayas)		X	X	X
9	Área para entrenamiento de escaladas (Rocódromos)			X	X
10	Pista de motocrós.		X	X	X
11	Área de acampada (pioneros exploradores u otros)	X	X		X
12	Cría intensiva de peces.		X	X	X
13	Cría intensiva de aves con fines comerciales (solo maya superior)		X		X
14	Cría de especies protegidas o en peligro de extinción (ejemplo: la Cotorra Cubana)		X	X	X
15	Laguna de oxidación.	X	X		
16	Área de organopónico, u otras variantes de siembra concentrada de la agricultura urbana y sub urbana (incluye el cultivo de flores)	X	X		
17	Viveros forestales (las paredes protegen las posturas de los fuertes vientos)		X		X
18	Área de descanso al aire libre.	X	X	X	X
19	Área de apreciación geológica.	X	X	X	X
20	Área didáctica para el aprendizaje de las técnicas de cantería.	X	X	X	X
21	Construcción de túneles de uso militar.		X		X
22	Sitios incluidos en itinerarios turísticos para apreciar tradición en cantería y formaciones geológicas de Cuba	X	X	X	X

- Grupo IV
 - o Minimizar los procesos erosivos.
 - o Evaluar potencialidades de uso.
 - o Mejorar el estado estético paisajístico.
 - o Señalizar el espacio.

Los objetivos del manejo de la cantera se enfocaran además en función de la posible variante de uso a implementar (Tabla III).

El programa de manejo para una cantera no solo es una guía del qué hacer para lograr los objetivos de manejo, sino también del cómo hacer para alcanzarlos. Cada programa que se diseñe constituirá una herramienta para desarrollar el trabajo de manejar dicha cantera, en función de la variante de uso y la mitigación y/o eliminación de los problemas ambientales a ella asociados.

Los programas de manejo que se presenten como parte del Capítulo III (Programas de manejo) contendrán la relación detallada y el fundamento de las actividades a desarrollar, así como su plazo de ejecución en función de resolver alguno de los problemas detectados. Como mínimo, los programas poseerán la siguiente estructura:

- Nombre del programa
- Fundamentación
- Objetivos
- Actividades
 - o Cronograma
 - o Prioridad de la actividad
 - o Responsable
 - o Participantes
- Resultados esperados
- Materiales y equipos necesarios
- Infraestructura necesaria
- Costos estimados
- Posibles ingresos

Los posibles programas a implementar, lo que no significa que en todos los casos se deben establecer todos, son los siguientes:

- Programa de Administración
- Programa de Señalización
- Programa de Seguridad y Protección
- Programa de Protección Contra Incendios
- Programa de Mitigación de Riesgos Geológicos Naturales o Inducidos
- Programa de Manejo Estético Paisajístico
- Programa de Manejo Forestal
- Programa de Manejo de Especies y Hábitat
- Programa de Orientación Laboral, Educación, Información e Interpretación de Fenómenos Geológicos
- Programa de Recreación y Ecoturismo

- Programa de Monitoreo
- Programa de Relaciones Públicas
- Programa de Inversiones.

Como parte del Capítulo IV, Seguimiento y control, se debe planificar el seguimiento a partir del establecimiento de indicadores que permitan medir el cumplimiento y desempeño de las acciones de los programas. De igual forma, es necesario planificar los indicadores, las acciones de control y su periodicidad, así como el responsable de efectuarlo. Un punto de partida para la selección de los indicadores lo constituyen los propios programas de manejo, sus objetivos y los resultados que de estos se esperan.

Seis meses después de puestos en práctica todos los programas diseñados, se realizará la validación de los mismos y su necesaria corrección en los casos que lo ameriten. Esta validación se efectuará a partir de la evaluación de factibilidad de cada programa y sus acciones. Como resultado, podrán surgir nuevos programas o se modificarán las acciones de los existentes.

La evaluación final del plan medirá y evaluará los impactos de este con relación a sus expectativas iniciales. Un objetivo esencial de la evaluación final del plan sería identificar las razones del éxito o fracaso del mismo, con el fin de tenerlas en cuenta para planes posteriores.

Para el Capítulo V, Sostenibilidad financiera del proyecto de plan de manejo, se realizará una evaluación costo – beneficio del plan de manejo. En muchos casos, esta será difícil, ya que el costo es un resultado numérico en pesos y el beneficio es de carácter cualitativo; no obstante, se procurará ilustrar con la mayor cantidad de argumentos posibles la viabilidad de ejecución del plan.

Luego de la Bibliografía, deben ser presentados los Anexos. Los aspectos cartográficos deben cumplir con las siguientes especificaciones:

- El mapa de ubicación se realizará a una escala que permita visualizar la ubicación de la cantera en el contexto físico – geográfico, de forma tal que pueda verse el poblado más cercano a la misma, las vías de acceso, el relieve, entre otras características importantes. Se recomienda una escala 1:25 000 o mayor (obligatorio).
- El mapa geológico debe presentarse sobre la base geológica 1:250 000 (Academia de Ciencias de Cuba, 1988). Se realizará una ampliación de la escala de forma tal que pueda visualizarse la ubicación de la cantera dentro del contexto de las formaciones geológicas (obligatorio).
- El mapa topográfico se presentará a escala 1:10 000 o menor. En este caso es válido el apoyo en imágenes satelitales, pues en muchas ocasiones no se cuenta con un mapa que incluya el detalle del relieve de la cantera (obligatorio). Este mapa podrá constituir la base cartográfica sobre la cual se ubiquen los elementos que constituyan medios a desarrollar para el manejo, además sobre él se realizarán las actualizaciones del relieve una vez comenzados a ejecutar los planes de manejo de los diversos programas.

- Podrá utilizarse el mapa de suelos ampliado a escala 1: 25 000 de la II Clasificación Genética de Suelos (Dirección de Suelos y Fertilizantes del Ministerio de la Agricultura de Cuba, 1975). (opcional).
- El mapa de uso y tenencia de la tierra incluirá el área específica de la cantera, pero además las áreas colindantes con la misma. Se presentará a escala 1:25 000 o menor (obligatorio).
- Podrán incluirse el mapa geomorfológico, el mapa de vegetación, un mapa de ubicación de especies y otros que se consideren de importancia para ofrecer información que ayude a la mejor interpretación de los programas y el impacto de las acciones, a escalas que permitan visualizar los aspectos que se desee resaltar.

CONCLUSIONES

- La aplicación del análisis de cluster (método de Ward) a los datos obtenidos de la evaluación de las variables, demostró su efectividad para la clasificación en cuatro grupos de las canteras abandonadas de materiales para la construcción en la provincia de Matanzas, contribuyendo a la identificación de una cantidad equivalente de grupos de manejo.
- La existencia de 377 canteras de materiales para la construcción en Matanzas, condicionado por la estructura geológica del territorio, evidencia el papel que su explotación ha jugado en la economía regional. Sin embargo, al no cumplirse la legislación vigente, resultó en la existencia de 250 canteras abandonadas cuyos diversos usos han generado múltiples problemas ambientales que se deben encarar para proceder a su reducción paulatina.
- La estructura del procedimiento para la rehabilitación de canteras de materiales para la construcción prevé su distribución en cinco capítulos (diagnóstico, regulatorias, programas de manejo, seguimiento y control, y sostenibilidad financiera). El contenido de los capítulos, al vincular los objetivos del manejo en función de mitigar y/o eliminar los problemas ambientales, y el consiguiente establecimiento de programas de rehabilitación con variantes de uso reporta índices de aplicabilidad y su posible generalización al resto del país, orientando tanto a los concesionarios como a los decisores en el proceso de rehabilitación de estos espacios degradados.

BIBLIOGRAFIA

- Capote, R., 1984. Clasificación de las formaciones vegetales de Cuba.** *Revista Jardín Botánico.* 5 (2).
- Pushcharovski, Y.M., (Editor) 1988. Mapa geológico de la República de Cuba, a escala 1:250 000.** *Academias de Ciencias de Cuba y la URSS, 40 hojas.*
- Everitt, B., 1980. Cluster analysis. 2th Edition. New York: McGraw-Hill Book Company.** P. 63 – 98.
- Fernández, R., 2004. Problemática generada por tajos y canteras.** Disponible en: <http://www.men.gon.va/marcolegal/marcolegalminas>
- Figueras, S., 2011. Análisis de conglomerados o clusters.** Disponible en: <http://www.5campus.org.Estadística>.
- Fuentes, R., 2007. Principales impactos ambientales generados por tajos y canteras de materiales para la construcción en la provincia de Matanzas. Matanzas. Tesis en opción al título de Máster en Gestión Ambiental y Protección de los Recursos Naturales.** Centro de Estudios de Medio Ambiente y Energía, Universidad de Matanzas.
- Gaceta Oficial de la República de Cuba, 1995. Ley No.76: Ley de Minas de la República de Cuba.** La Habana.
- Gutiérrez, M. R., 2007. La conservación del Patrimonio geológico una medida de protección del medio ambiente.** VI Convención Internacional sobre Medio Ambiente y Desarrollo, Geociencias '2007. V Congreso de Áreas Protegidas (CD – ROM).
- Gutiérrez, M. R., 2011. Geositos de interés patrimonial y práctico de la provincia Matanzas.** Cuarta Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, Geociencias '2011 (CD-ROM). La Habana.
- Herrero, E., 2005. Criterios de indicadores de manejo forestal sostenible.** *La Habana: Ministerio de la Agricultura.* P. 115.
- Instituto Cubano de Geodesia y Cartografía, 1987. Mapa cartográfico de Cuba a escala 1:50 000.**
- Instituto de Geología y Paleontología de Cuba, 2002. Léxico Estratigráfico de Cuba.** Versión Digital.
- Iturralde - Vinent, M. A., 2007. Geología de Cuba para todos. Primera edición.** La Habana: Editorial Científico – Técnica. . 145p.
- Legrá, A. A., Silva, O. R., 2012. La Investigación Científica: Conceptos y Reflexiones.** Holguín: Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.
- Lomtadze, V. D., 1983. Geología aplicada a la ingeniería. Geodinámica aplicada a la ingeniería.** Moscú: Editorial Vneshtorgizdat. P. 250.
- Miranda, I., 1997. Análisis de cluster como estrategia multivariada de clasificación. Solución a un problema taxonómico.** Tesis en opción al título académico de Máster en Matemática Aplicada a las Ciencias Agropecuarias. La Habana: CENSA.
- Plá, F., 2002. Fundamentos de Laboreos de Mina.** España: Universidad Politécnica de Madrid. P. 288.
- Vick, S., 2011. Stability aspects of long - term closure for sulfide tailing.** Disponible en: <http://www.eclac.org/dnri/noticias/seminarios/4/13604/InformePasivosAmbientalesMinerosenSudamylafrica.pdf>.



SERIE EDUCATIVA

PROTEGE A TU FAMILIA DE...

para prepararte a enfrentar los desastres naturales



INVESTIGACIÓN GEOFÍSICA CON FINES DE ABASTO CON AGUA SUBTERRÁNEA A BAYAMO

REBECA FERNÁNDEZ ENRÍQUEZ

Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos Camagüey

Avenida de la Libertad # 20 entre Alonso Fruto y Candelaria, Camagüey. CP 70300.

Correo: *espsup23-5@eipi.cmg.hidro.cu*

RESUMEN

El área de estudio para esta investigación se localiza próxima a las comunidades Pompita y Malvango, a 3 km al oeste de la ciudad de Bayamo, y ocupa un área aproximada de 87 Km². Las investigaciones geofísicas se realizaron con el objetivo de determinar la salinidad del agua, la composición litológica del corte en profundidad y en planta, la presencia de estructuras geológicas y el límite de las áreas más perspectivas para ubicar nuevas fuentes de abasto.

Se utilizó el método eléctrico en su variante de Tomografía eléctrica y la Prospección Electromagnética en el dominio del tiempo (TDEM). Como resultado final, en cada perfil, planta y tomografía realizadas se proponen las zonas perspectivas para la acumulación de agua subterránea. Se plantean como valores de resistividad perspectivas los que se encuentran en un rango superior a 7,5 ohm.m y se ubican las posibles zonas de fallas. A los 15 metros de profundidad, se determinó que en un 61 % del área de estudio (centro y este) predominan las rocas con posibilidades de acumular agua subterránea; a los 40 m de profundidad se encuentran las posibles rocas acuíferas, que se localizan al noreste y sur del área y se estiman en un 37 %; a los 60 m de profundidad, las posibles rocas acuíferas se localizan al oeste del área y se estiman en un 24 %; a los 100 m de profundidad predominan las arenas acuíferas en un 53 %, se localizan al norte del área; y a los 300 m de profundidad no hay posibilidad de encontrar agua subterránea.

ABSTRACT

The study area is located closed to the communities of Pompita and Malvango, among of 3 km at west of the Bayamo City, occupies an area of 87 Km². The geophysical investigations had the objectives of determining: the waters salinity, composition of the earth's crust in depth and in plan, to determine the presence of geologic structures and define areas more perspectives than a new supply source. The electric method was used in its variant of electric Tomography and Electromagnetic Prospecting TDEM (Time Domain Electromagnetic). As a final result, we obtained profile, map and tomography with the areas more perspectives than the accumulation of groundwater (resistivity mayor 7.5 ohm.m). The possible areas of fractures are also located. At 15 meters of deep in 61% of the areas center and east prevail the rocks with possibilities of accumulating groundwater. At 40 m of depth the possible aquifer's rocks are located at northeast and south of the area and they are estimated in 37%. At 60 m of depth the possible aquifer rocks are located at west of the area and they are estimated in 24%. At 100 m of depth the sands prevail in 53%, they are located at north of the area. At 300 m of depth there is not possibility to find groundwater.

INTRODUCCIÓN

Las investigaciones geofísicas concernientes a esta investigación fueron realizadas cerca de las Comunidades Pompita y Malvango, aproximadamente a unos 3 km al oeste de la ciudad de Bayamo, con el objetivo de determinar los siguientes aspectos:

- Condiciones de interacción agua superficial/agua subterránea.
- Salinidad en profundidad y en planta, teniendo en cuenta que hacia la parte norte del área las aguas son ligeramente salinizadas (interfaz agua dulce / agua salada).
- Potencia acuífera.
- Condiciones de fronteras y alimentación del área de estudio.
- Composición litológica del corte, tanto en profundidad como en planta.
- Presencia de estructuras geológicas, como dislocaciones tectónicas.

Dichas investigaciones geofísicas fueron efectuadas mediante el uso del método electromagnético de superficie en el dominio del tiempo (TDEM) y la tomografía eléctrica. En total se obtuvieron datos de 52 sondeos electromagnéticos y 19 tomografías eléctricas.

MATERIALES Y MÉTODOS

En el marco de este trabajo, se realizó una recopilación de los datos de archivo obtenidos de la UEBPI de Bayamo, posteriormente se preparó y confeccionó el programa de investigación y por último se efectuaron los trabajos de campo y gabinete. Para los cálculos y el dibujo se emplearon versiones de sistemas automatizados

Fue estudiada la geología de la zona de trabajo y se consultaron todas las calas existentes. Con ambos métodos, el electromagnético y la tomografía eléctrica, se realizaron mediciones en calas conocidas y en pozos productivos, que facilitaron establecer patrones de búsqueda de las zonas más favorables para la acumulación de agua subterránea.

Los esquemas que se utilizarán a continuación para explicar cada uno de los métodos utilizados para el trabajo fueron tomados de la literatura especializada (e.g. Ferrás, 2005; Yabuta, 2010).

Método electromagnético (TDEM)

Para realizar los trabajos correspondientes a este estudio, se trató de hacer una red de sondeos uniforme, a pesar de las difíciles condiciones de acceso a los sitios escogidos. Se utilizó un lazo de 100 * 100 m, dentro del que se situaron el transmisor y receptor. Fue estudiado el corte geológico hasta una profundidad de 500 m y se midió en el tiempo con las frecuencias 30, 7,5 y 3 Hz.

En este método, el suelo se excita por medio de un campo magnético artificial y se mide su respuesta como una función de tiempo para determinar la resistividad del terreno debajo del punto de observación como una función de profundidad. La corriente directa estable en el lazo transmisor genera un campo magnético constante alrededor del lazo y la abrupta interrupción de la corriente induce corrientes de remolino cerca de la superficie del terreno, en tanto se intenta mantener el mismo campo magnético de antes. La Figura 1 muestra cómo las corrientes de remolino penetran en la tierra con el tiempo.

El decaimiento de estas corrientes de remolino representa la función de la resistividad a lo largo del recorrido de la corriente. Al medir el decaimiento del campo magnético por medio de la espiral de inducción (Figura 2) en la superficie del terreno se puede determinar la resistividad de los estratos del suelo.

Para el cálculo de la resistividad se utilizó la ecuación:

$$\rho_a(t) = \frac{K_2 M^{2/3}}{e(t)^{2/3} t^{5/3}}$$

Donde:

ρ_a : resistividad del terreno (ohm.m)

K_2 : una constante

M : producto de la corriente Tx (A) * área del lazo (m²)

t : tiempo (s)

$e(t)$: voltaje de salida de una sola vuelta con un área espiral receptora de 1 m²

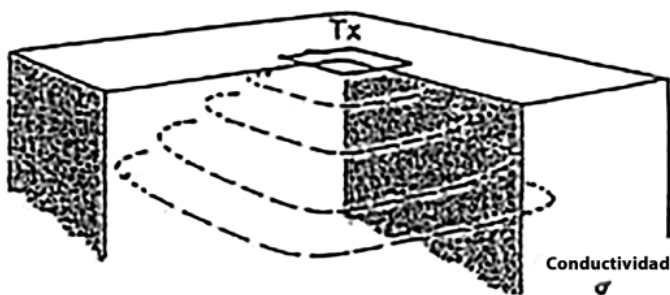


Figura 1. Penetración en la tierra de las corrientes de remolino.



Figura 2. Antena receptora utilizada.

En el método TDEM, los buenos conductores muestran un tiempo de decaimiento mayor que los malos conductores. La profundidad de penetración es una función de tiempo, luego de la interrupción de la corriente. En momentos posteriores, la espiral receptora detecta corrientes de remolino a profundidades mayores. En general, la profundidad de penetración del método TDEM resulta mayor que la alcanzada con otros métodos electromagnéticos.

Para la descarga de los datos se utilizó el programa PROTEMW. Estos datos fueron filtrados con el programa PROTIX y salvados en formato USF con el programa USFXLT. Los sondeos electromagnéticos fueron interpretados con el software IX1D.

Tomografía Eléctrica

Este método constituye una técnica de investigación en 2D del corte en profundidad, con un alto grado de detalle y un mínimo error en las mediciones. Para esta investigación se realizaron en total 19 tomografías eléctricas.

En el trabajo con este método fueron utilizadas tres trenzas con un total de 36 electrodos, con una distancia entre ellos de 10 m. Se comprobó la toma a tierra para cada uno de los electrodos y luego se procedió a medir. Variando la distancia entre pares de electrodos emisión - receptor por múltiplos de un valor n de profundidad, se realizaron mediciones del potencial y corriente al introducir corriente externa en el suelo, con el objetivo de determinar la resistividad aparente.

La *resistividad aparente* (ρ_a) es la variable que expresa los resultados de las mediciones eléctricas en la Tomografía Eléctrica. Se toma como base de la inversión y posteriormente en la interpretación de los datos. Está definida por la siguiente ecuación:

$$\rho_a = k \Delta U * \Delta I^{-1}$$

En dicha fórmula, k es la constante del dispositivo o *factor geométrico*, el cual para el dispositivo Wenner - Schlumberger es $2\pi a(n+1)$, para Polo - Dipolo es $2\pi a(n+1)$ y para Polo - Polo es $2\pi a$. Para estas ecuaciones particulares:

a : distancia entre los electrodos de medición

ΔU : diferencia de potencial

ΔI : corriente medida en los electrodos

En el caso de los registros de campo, se utilizó para su carga y descarga los programas Electre II y el Proxys II, respectivamente.

Se utilizaron los dispositivos Wenner - Schlumberger, Polo - Dipolo y Polo - Polo, con una distancia entre los electrodos de 10 m. El dispositivo Wenner - Schlumberger mapea con gran efectividad los primeros metros de profundidad y sirve para detectar con precisión el espesor del primer acuífero. Con este se realizaron 2 tomografías. La profundidad de investigación alcanzada fue de 60 m.

Para lograr una profundidad cercana a los 100 m se emplearon los dispositivos Polo - Dipolo y Polo - Polo. Con estos dispositivos se realizaron 5 y 12 tomografías, respectivamente. Por la calidad en

la obtención de los datos y la mayor cobertura en la horizontal y vertical se tomó como mejor dispositivo el Polo - Polo.

Dispositivo Wenner - Schlumberger

Es una configuración híbrida entre los dispositivos Wenner y Schlumberger (Pazdirek & Blaha, 1996). Una forma modificada del dispositivo Schlumberger con un espaciado constante se muestra en la Figura 3. Nótese que el factor n es la relación entre la distancia de los electrodos C1 - P1 (o P2 - C2) y el par potencial P1 - P2 (C1 y C2 son los electrodos de corriente, P1 y P2 son los electrodos en donde se mide la diferencia de potencial).

Este conjunto es moderadamente sensible a estructuras horizontales y verticales. En áreas en donde ambos tipos de estructuras geológicas son esperadas, puede ser utilizado convenientemente. La combinación de estos dos dispositivos permite obtener los beneficios conjugados de ambos en uno: mayor efectividad en el mapeo de estructuras verticales y horizontales, mayor cobertura horizontal y mayor profundidad.

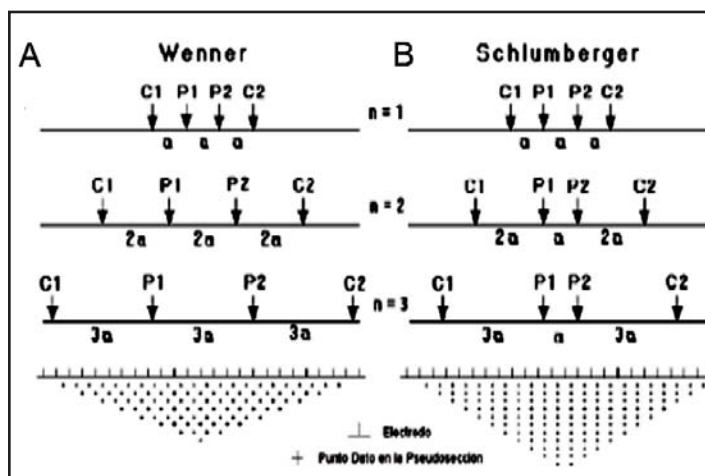


Figura 3. Dispositivos Wenner - Schlumberger.

Dispositivo Polo - Dipolo

El conjunto Polo - Dipolo requiere también un electrodo remoto (el electrodo C2) que debe ponerse suficientemente lejos de la línea del sondeo. Debido a su buena cobertura horizontal, este es un conjunto atractivo para medir resistividades con un sistema multielectrodo que posea un número relativamente pequeño de electrodos (Figura 4).

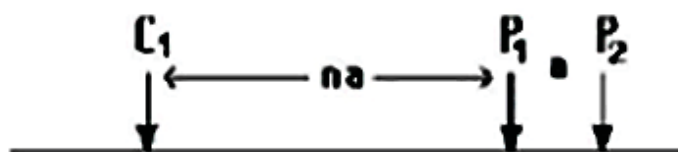


Figura 4. Dispositivo Polo - Dipolo directo.

Dispositivo Polo – Polo

Este conjunto no es tan usado como los anteriores. En la práctica, el dispositivo Polo - Polo posee un único electrodo de corriente y un electrodo de potencial. El segundo electrodo de corriente y el electrodo de potencial (C2 y P2) deben ponerse a una distancia mayor de 20 veces la separación máxima entre los C1 y P1 que se utilizaron en el sondeo (Figura 5).

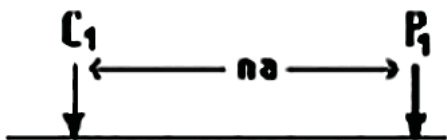


Figura 5. Dispositivo Polo – Polo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para cada perfil, tomografía y planta se proponen las zonas perspectivas para la acumulación de agua subterránea. Fueron mapeadas con precisión las zonas de fracturas y los diferentes tipos litológicos presentes en el corte.

La geología presente en la zona está representada por rocas de la Formación Cauto; son más comunes las arcillas y arenas con

abundantes cantos rodados y material gravoso. Se detectaron acuíferos a diferentes profundidades. Los más productivos se localizan en las arenas con abundantes cantos rodados y material gravoso. En la Tabla 1 se presentan los valores de resistividad en relación con la litología asociada.

Tabla 1. Valores de resistividad asociados a los diferentes tipos de rocas.

Tipo de roca asociada	Valor de resistividad (ohm.m)
Arcillas, arcillas y otras en medio salobre	< 3
Arcillas poco arenosas, aleurolitas en medio salobre	3 - 5 ohm.m
Arcillas arenosas, arenas con agua un poco salobre	5 – 7,5
Arenas, arcillas arenosas con gravas o c/r o carbonatadas, areniscas	> 7,5

Fueron realizadas plantas a diferentes profundidades, 10 perfiles con los resultados de los sondeos electromagnéticos y un plano con las tomografías realizadas. Seguidamente, en las Figuras 6, 7, 8, 9 y 10 se muestra un ejemplo de cada resultado derivado de la investigación realizada.

En la Figura 8 es posible observar espesores considerables de arenas con presencia de cantos rodados y gravas a diferentes profundidades. En este caso, el acuífero es confinado y se caracteriza por presentar grandes caudales.

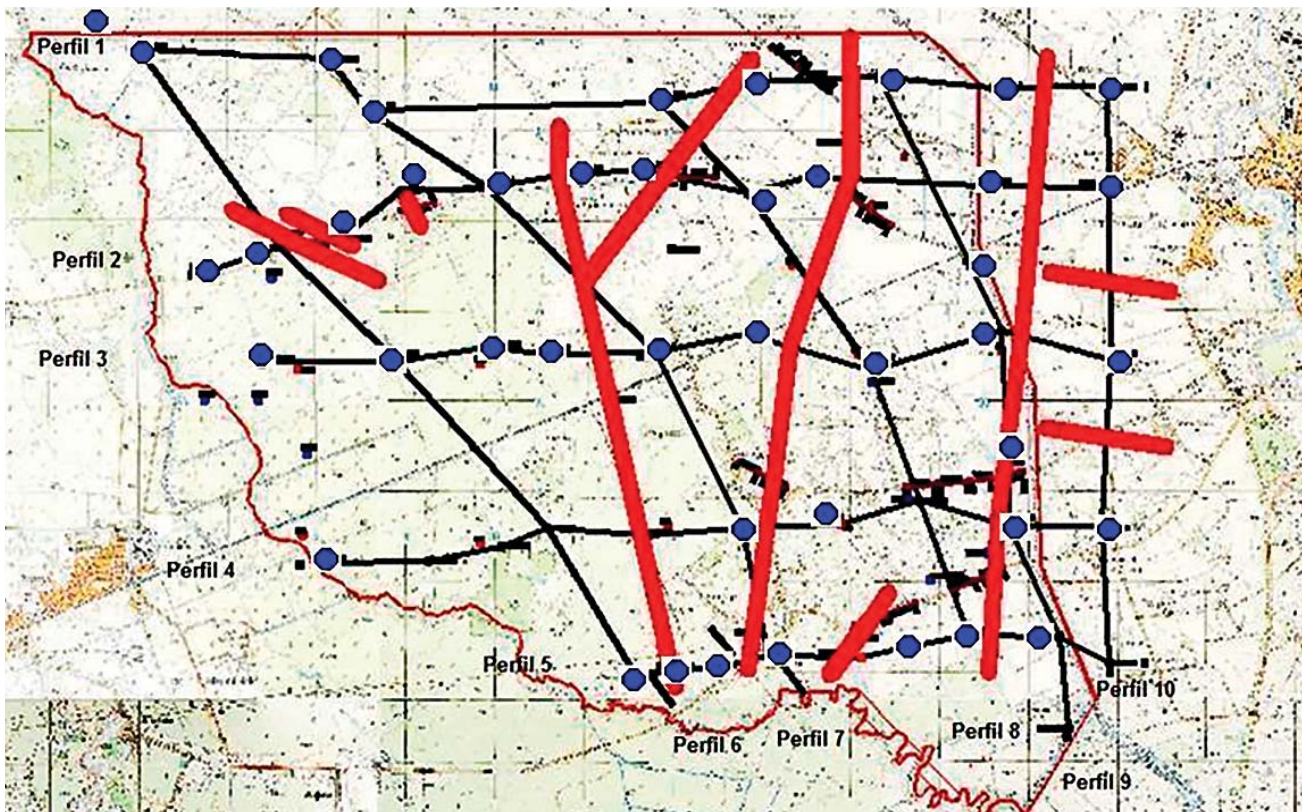


Figura 6. Esquema de ubicación de los sondeos electromagnéticos realizados (azul), perfiles y zonas de fallas (rojo).

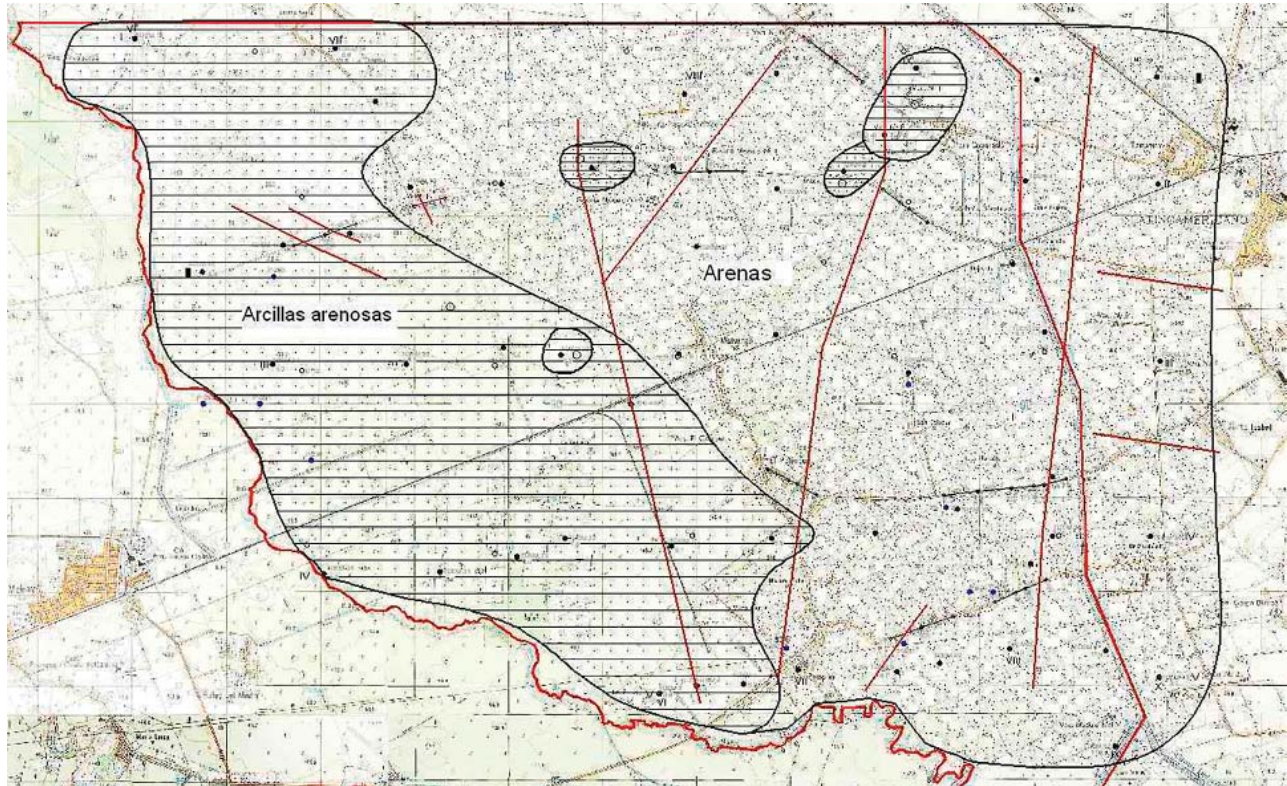


Figura 7. Planta confeccionada a 15 m de profundidad, en la cual las rocas más acuíferas se localizan hacia el este.

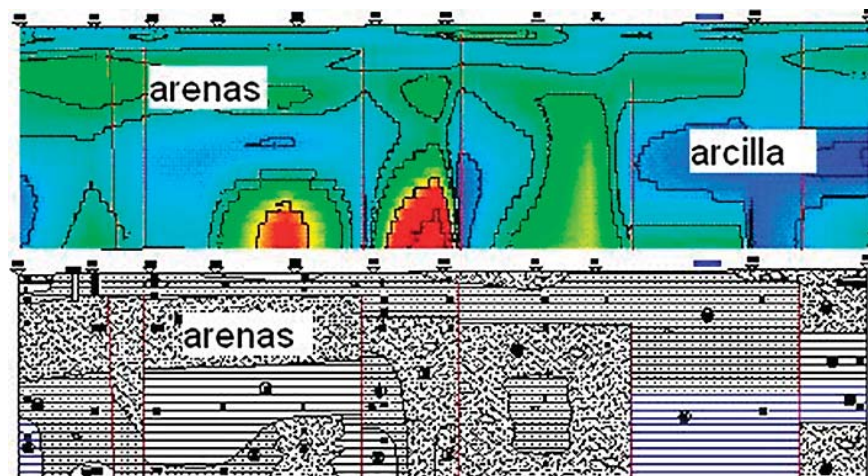


Figura 8. Perfil II, obtenido con el resultado de los sondeos electromagnéticos. Profundidad total alcanzada: 500 m.

En los lugares donde se ubicarán pozos de abasto, se realizaron previamente tomografías eléctricas. Las rocas con posibilidades de acumular agua subterránea se caracterizan por presentar valores de resistividad mayores de 7,5 ohm.m. En las imágenes aparecen con color carmelita.

En las figuras 9 y 10, 1 cm en la vertical corresponde a 20 m. Los espesores del acuífero son de aproximadamente 40 m. A los 15 metros de profundidad, en un 61% del área de trabajo (centro

y este) predominan las rocas con posibilidades de acumular agua subterránea. Debido al corte obtenido y los valores de resistividad similares, en los primeros 15 metros en ambos lados del canal de la derivadora Bayamo debe haber interrelación de las aguas del canal y las aguas subterráneas.

A los 40 m de profundidad predominan las arcillas arenosas (58%). Las posibles rocas acuíferas (denotadas con el número 3) se localizan al noreste y sur del área y se estiman en un 37%.

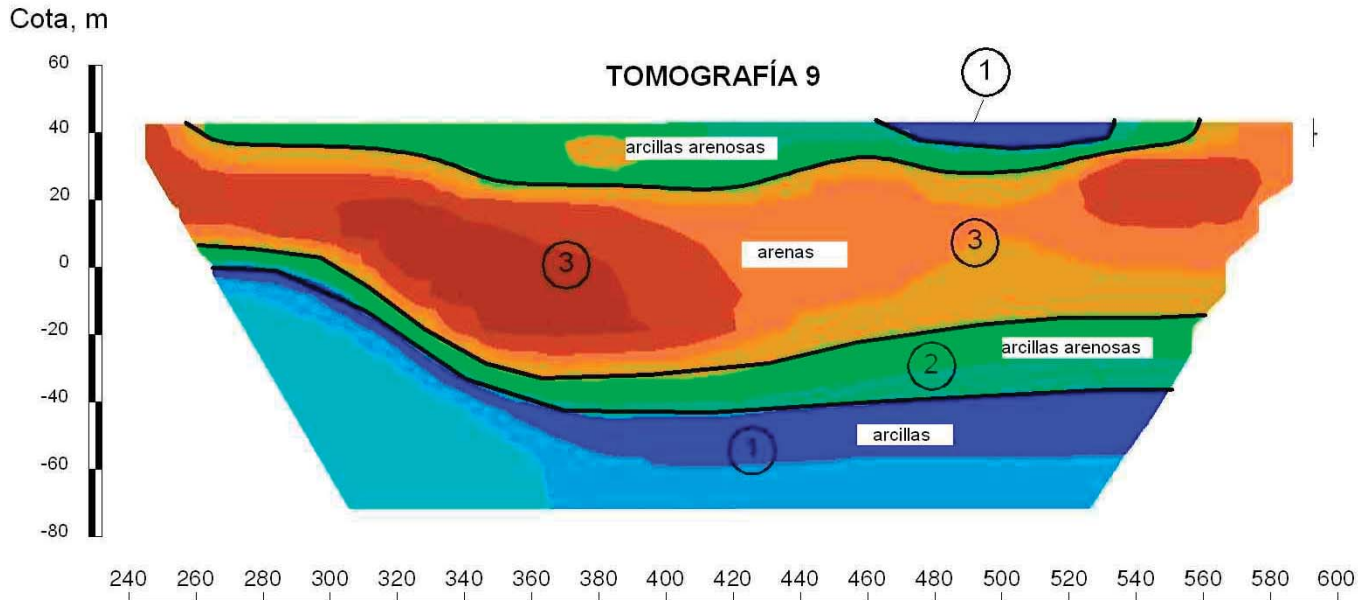


Figura 9. Tomografía eléctrica con dispositivo Polo – Polo. En carmelita se observan las arenas con abundantes gravas.

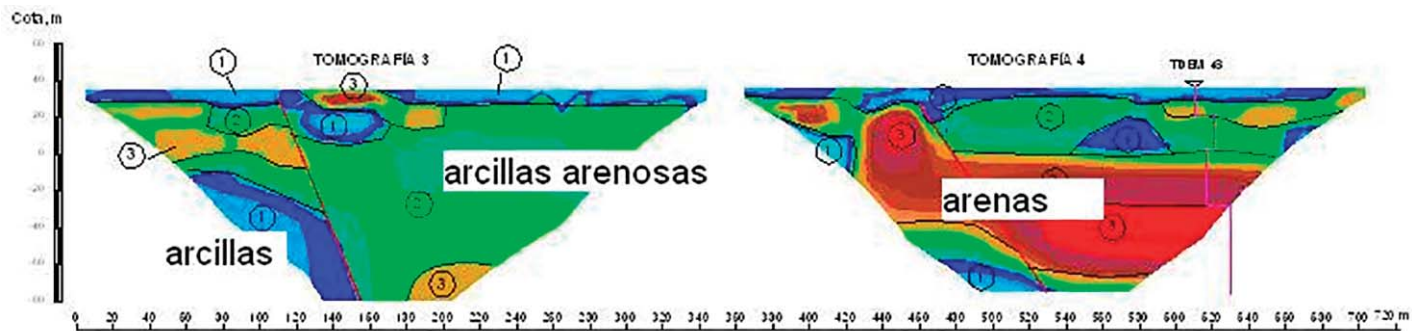


Figura 10. Tomografía eléctrica con dispositivo Polo – Dipolo. En carmelita se observan las arenas con abundante gravas. Obsérvense las zonas de fallas y la correlación del sondeo TDEM48 en la tomografía.

A los 60 m de profundidad predominan las arcillas arenosas (70%). Las posibles rocas acuíferas (3) se localizan al oeste del área y se estiman en un 24%.

A los 100 m de profundidad predominan las arenas (3) en un 53%, se localizan al norte del área.

A los 300 m de profundidad predominan las arcillas con muy poco contenido de arena (1) en un 82%, de ellas el 37% se estima en un medio salobre.

CONCLUSIONES

- En cada perfil, planta y tomografía descrita se proponen las zonas perspectivas para la acumulación de agua subterránea y se plantean como valores de resistividad perspectivas los que se encuentran en un rango superior a 7,5 ohm.m. También se ubican las posibles zonas de fallas.

- Las rocas acuíferas se encuentran en diferentes acuíferos y poseen un espesor variable de 15 hasta 70 m.
- Las tomografías presentan en profundidad un corte similar al obtenido en los perfiles con los sondeos electromagnéticos, por lo que se validan entre sí y con las calas estudiadas en la zona.

BIBLIOGRAFÍA

- Ferrás, L., 2005. *Manual de prospección geoelectrica con corriente continua*. GEPI: 70 – 85.
- Pazdirek, O., Blaha, V., 1996. *Examples of resistivity imaging using ME-100 resistivity field acquisition system*. EAGE 58th Conference and Technical Exhibition Extended. Amsterdam.
- Yabuta, T., 2010. *Prospección Electromagnética en Dominio de Tiempo (TDEM)*. Disponible en: <https://www.jamstec.go.jp/maritec/j/>

TERMODINÁMICA DE LA LIXIVIACIÓN ÁCIDA DE LOS RESIDUALES SÓLIDOS DE LA TECNOLOGÍA CARBONATO AMONICAL

EVANGELIA GARCÍA PEÑA, AMAURY PALACIOS RODRÍGUEZ

Instituto Superior Minero Metalúrgico

Las Coloradas S/N, Moa, Holguín, Cuba.

Correo: egpena@ismm.edu.cu

RESUMEN

El propósito de este trabajo fue determinar las posibilidades termodinámicas del proceso de lixiviación ácida con sulfato de hierro (II) como agente reductor, para la extracción del cobalto desde los residuales sólidos de la tecnología carbonato amoniacal, materia prima actualmente poco estudiada para su tratamiento. A partir del mecanismo más general de las reacciones de lixiviación, se usó el cálculo de la energía libre por el método de Gibbs – Helmholtz como vía termodinámica para cumplir el objetivo. Posteriormente se utilizó la expresión integrada de cálculo del potencial isobaro isotérmico, para determinar la expresión modelo de equilibrio del elemento de estudio. A partir de las reacciones directas de los compuestos de cobalto, se obtuvo que la de mayor espontaneidad es aquella donde interactúa el óxido de cobalto (III) con el sulfato de hierro (II) en medio ácido, con el sulfato de cobalto como producto. Las reacciones secundarias son las de interacción del óxido de cobalto con el sulfato de manganeso que se forma a partir de las reacciones primarias. Además, se simuló el proceso a partir del modelo termodinámico. Se demostró que es posible realizar la lixiviación ácida en presencia de sulfato de hierro (II) como agente reductor para la extracción del cobalto de los residuales sólidos de la tecnología carbonato amoniacal.

ABSTRACT

The intention of this work was to determine the thermodynamic possibilities of the acid leaching process with iron sulphate (II) like reductive agent for the extraction of cobalt from residual solids of the ammoniacal carbonate technology, raw material at the moment less studied for its treatment. From the most general mechanism of the leaching reactions the thermodynamic route that was used to fulfill the objective was to calculate the free energy by the method of Gibbs - Helmholtz and later the integrated expression of calculation of the isobaric - isothermal potential was used to determine the expression model of balance of the compound or element of study. From the direct reactions of cobalt compounds it was obtained that the one of greater spontaneousness is that where interacts cobalt oxide (III) with iron sulphate (II) in the middle acid obtaining like product cobalt sulphate. The secondary reactions are those of interaction of cobalt oxide with manganese sulphate that forms from the primary reactions in addition simulated the process from the thermodynamic model. One demonstrated that it is possible to make the acid leaching in the presence of iron sulphate (II) like reducer agents for the extraction of cobalt of residual solids of the ammoniacal carbonate technology.

INTRODUCCIÓN

La tecnología carbonato amoniacal para la obtención de sinter de níquel como producto final, a partir de la mezcla de limonita y serpentina de las menas lateríticas, es aplicada en industrias niquelíferas cubanas. Las principales deficiencias que se reportan al respecto consisten en un elevado consumo energético y altos costos de producción. Existen además indicadores que motivan la no rentabilidad de la tecnología en algunos casos, como la baja ley de los metales en el yacimiento y la inestabilidad de los precios en el mercado mundial, así como la baja recuperación de algunos elementos metálicos. Por esta razón, los investigadores buscan nuevas alternativas para el aprovechamiento integral y racional de las menas lateríticas. Los residuales sólidos de la tecnología representan una fuente de cobalto, con contenidos entre 0,08 y 0,12 %.

El objetivo de este trabajo es mostrar la posibilidad de tratamiento de los residuales sólidos de la tecnología de carbonato amoniacal para la recuperación de cobalto principalmente, mediante la lixiviación ácida (Carlson & Simons, 1961; Sobol, 1968; Simons, 1974), favorable para la industria del níquel y cobalto cubano, pues mediante el proceso se logra recuperar no más de un 30 % del cobalto que se alimenta a la fábrica y más del 70 % se pierde en residuales sólidos de este elemento.

Para los metalurgistas es bien conocido el hecho de que los minerales de diferentes yacimientos o de diferentes zonas de los mismos no se comportan de igual manera frente a un proceso tecnológico, especialmente cuando se produce la disolución de alguno de los componentes. Dicho comportamiento se debe a la diferencia de actividad en la interacción con las soluciones, producida por la presencia de defectos o diferencias en la red cristalina de los minerales, que influyen en las propiedades físicas y en la actividad química. Esta última está determinada por las leyes de la cinética de reacción sólido - líquido, en las que juega un papel predominante la energía de Gibbs (Cotton y Wilkinson, 1973; West, 1993; Smart y Moore, 1995).

La variación de la energía de Gibbs (ΔG) en los cristales con defectos es superior a la de los cristales perfectos, por lo que es más alta su capacidad de reacción. De ahí que el comportamiento químico físico está determinado por factores termodinámicos y cinéticos. Las estructuras cristalinas tienen diferentes energías de formación, que hacen que la variación de energía libre de la reacción de lixiviación $\Delta G = -RT \ln K_e$ sea también diferente; entonces son distintos también el grado de lixiviación o el exceso de reactivos necesarios para lixiviar los minerales de la misma naturaleza química y mineralógica, pero con diferente red cristalina (Kakovski, 1979; Levenspiel, 1986).

La variación de los enlaces en la red cristalina y de la interacción de las moléculas adsorbidas son electrones y huecos en la superficie del mineral, que conducen a la variación de la energía de activación y, consecuentemente, a la variación de la constante de velocidad de la reacción, de acuerdo a la fórmula:

$$K = Ae^{-E/RT}$$

MATERIALES Y MÉTODOS

La probabilidad y magnitud de ocurrencia de las principales transformaciones físicoquímicas se evaluó a través de la ecuación de Gibbs – Helmholtz (Zelikman *et al.*, 1975):

$$\Delta G = \Delta H - T \Delta S$$

Donde:

ΔG : Variación del potencial isobárico isotérmico (kJ/mol)

ΔH : Variación de entalpía (kJ/mol)

ΔS : Variación de entropía (kJ/mol K)

T: Temperatura (K)

De manera más detallada:

$$\Delta G = \Delta G_{298}^0 + \int_{298}^T \Delta C_p dT - T \int_{298}^T \frac{\Delta C_p}{T} dT$$

$$\Delta H = \Delta H_{298}^0 + \int_{298}^T \Delta C_p dT$$

$$\Delta S = \Delta S^0 + \int_{298}^T \frac{C_p}{T} dT$$

Como resultado, se obtuvo la expresión siguiente:

$$\Delta G = \Delta H_{298}^0 - T \Delta S_{298}^0 + \int_{298}^T C_p dT - T \int_{298}^T \frac{C_p}{T} dT$$

Donde:

ΔG^0 : Variación de energía libre en condiciones estándar (kJ/mol).

ΔH^0 : Variación de entalpía en condiciones estándar (kJ/mol).

ΔS^0 : Variación de entropía en condiciones estándar (J/mol K).

C_p : Capacidad calorífica a presión constante (kJ/mol K).

T: Temperatura (K).

El valor de la constante de equilibrio se calculó a partir de la expresión integrada del potencial isobárico isotérmico:

$$\Delta G = -RT \ln K_e$$

A esta se le realizaron transformaciones:

$$\ln K_e = -\frac{\Delta G}{RT}$$

En ambas ecuaciones, R es la constante universal de los gases (J/mol K).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las principales transformaciones físicoquímicas que pueden ocurrir durante la lixiviación de los residuales sólidos de la tecnología carbonato amoniacal con ácido sulfúrico y en presencia de sulfato de hierro (II) como agente reductor, atendiendo a la forma en que se encuentran los minerales en ellas, son:

1. $\text{Co(s)} + 2\text{FeSO}_4(\text{ac}) + 2\text{H}_2\text{SO}_4(\text{ac}) = \text{CoSO}_4(\text{ac}) + \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3(\text{s}) + 2\text{H}_2(\text{g})$
2. $\text{Co(s)} + \text{H}_2\text{SO}_4(\text{ac}) = \text{CoSO}_4(\text{ac}) + \text{H}_2(\text{g})$
3. $\text{Co(OH)}_2(\text{s}) + \text{H}_2\text{SO}_4(\text{ac}) = \text{CoSO}_4(\text{ac}) + 2\text{H}_2\text{O}$
4. $\text{Co}_2\text{O}_3(\text{s}) + 2\text{FeSO}_4(\text{ac}) + 3\text{H}_2\text{SO}_4(\text{ac}) = 2\text{CoSO}_4(\text{ac}) + \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3(\text{s}) + 3\text{H}_2\text{O}$
5. $\text{Co}_2\text{O}_3(\text{s}) + 2\text{H}_2\text{SO}_4(\text{ac}) = 2\text{CoSO}_4(\text{ac}) + \frac{1}{2}\text{O}_2(\text{g}) + \text{H}_2\text{O}$
6. $\text{CoO(s)} + \text{H}_2\text{SO}_4(\text{ac}) = \text{CoSO}_4(\text{ac}) + \text{H}_2\text{O}$
7. $\text{Cr}_2\text{O}_3(\text{s}) + 3\text{H}_2\text{SO}_4(\text{ac}) = \text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3(\text{ac}) + 3\text{H}_2\text{O}$
8. $\text{MnO}_2(\text{s}) + 2\text{FeSO}_4(\text{ac}) + 2\text{H}_2\text{SO}_4(\text{ac}) = \text{MnSO}_4(\text{ac}) + \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3(\text{s}) + 2\text{H}_2\text{O}$
9. $\text{MnO}_2(\text{s}) + \text{H}_2\text{SO}_4(\text{ac}) = \text{MnSO}_4(\text{ac}) + \frac{1}{2}\text{O}_2(\text{g}) + \text{H}_2\text{O}$

Para el compuesto de cromo, la principal transformación físicoquímica que ocurre está dada por la reacción 7, pero el sulfato de cromo (III) ($\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3$) que se obtiene puede interactuar con los óxidos superiores de manganeso, cobalto e hierro, con la producción de reacciones secundarias y la posterior obtención del cromo en forma hexavalente por las transformaciones 10, 11 y 12:

10. $3\text{MnO}_2(\text{s}) + \text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3(\text{ac}) + 2\text{H}_2\text{O} = 3\text{MnSO}_4(\text{ac}) + 2\text{H}_2\text{CrO}_4(\text{ac})$
11. $3\text{Co}_2\text{O}_3(\text{s}) + \text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3(\text{ac}) + 3\text{H}_2\text{SO}_4(\text{ac}) = 6\text{CoSO}_4(\text{ac}) + 2\text{H}_2\text{CrO}_4(\text{ac}) + \text{H}_2\text{O}$
12. $3\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{s}) + \text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3(\text{ac}) + 3\text{H}_2\text{SO}_4(\text{ac}) = 6\text{FeSO}_4(\text{ac}) + 2\text{H}_2\text{CrO}_4(\text{ac}) + \text{H}_2\text{O}$

En la Figura 1 se muestra la posibilidad termodinámica de ocurrencia de las reacciones 1 a la 9.

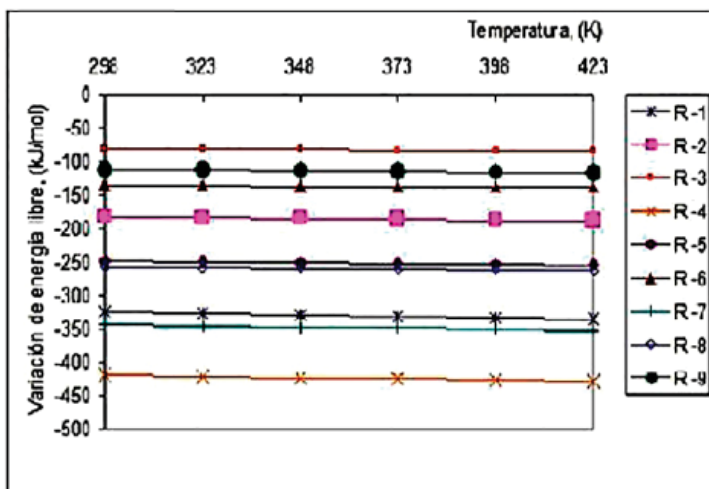
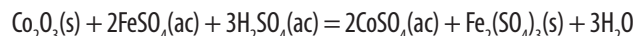


Figura 1. Posibilidad termodinámica de ocurrencia de las reacciones 1 a la 9.

La reacción de mayor espontaneidad es la 4, en la cual interactúa el óxido de cobalto (III) con el sulfato de hierro (II) en medio ácido, seguida por la reacción 7, donde interacciona el óxido de cromo (III) con el ácido sulfúrico y se obtiene como producto el sulfato de cromo (III), el cual posteriormente reacciona con los óxidos superiores de cobalto, manganeso e hierro. La tercera reacción más probable es la 1, donde el cobalto metálico parcialmente reducido en los hornos interactúa con el sulfato de hierro (II) en medio ácido. La otra transformación que ocurre en orden es la 8, en la cual reacciona el óxido de manganeso (IV) con sulfato de hierro (II), también en presencia del ácido sulfúrico.

Es posible señalar entonces que las transformaciones de mayor posibilidad son las que se lixivian con ácido sulfúrico y sulfato de hierro (II). Todas son reacciones de oxidación - reducción, excepto la reacción del óxido de cromo (III), que reacciona con ácido sulfúrico solamente.

De manera general, las transformaciones de los óxidos trivalentes de cobalto con ácido sulfúrico en presencia de sulfato de hierro (II) como reductor se describen de la siguiente forma:



Las constantes de equilibrio que caracterizan estas reacciones son:

$$K_e = \frac{a^3(\text{H}_2\text{O}) * a(\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3) * a^2(\text{CoSO}_4)}{a^3(\text{H}_2\text{SO}_4) * a(\text{Co}_2\text{O}_3) * a^2(\text{FeSO}_4)} \quad 1$$

Donde:

a: actividad de los elementos y compuestos

En función de las concentraciones, quedaría como:

$$K_c = \frac{c^3(\text{H}_2\text{O}) * a(\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3) * c^2(\text{CoSO}_4)}{c^3(\text{H}_2\text{SO}_4) * a(\text{Co}_2\text{O}_3) * c^2(\text{FeSO}_4)} * \frac{\gamma^3(\text{H}_2\text{O}) * \gamma(\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3) * \gamma^2(\text{CoSO}_4)}{\gamma^3(\text{H}_2\text{SO}_4) * \gamma(\text{Co}_2\text{O}_3) * \gamma^2(\text{FeSO}_4)} \quad 2$$

Donde:

c: concentración

γ : coeficiente de actividad

Si los coeficientes de actividad (γ) se consideran constantes, se obtiene:

$$K_c = \frac{c^3(\text{H}_2\text{O}) * a(\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3) * c^2(\text{CoSO}_4)}{c^3(\text{H}_2\text{SO}_4) * a(\text{Co}_2\text{O}_3) * c^2(\text{FeSO}_4)} \quad 3$$

Si se consideran las soluciones como diluidas, la $c(\text{H}_2\text{O})$ constante y también la $a(\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3)$ y $a(\text{Me}_2\text{O}_3)$ igual a la unidad por ser compuestos sólidos, al realizar las transformaciones pertinentes, la constante de equilibrio en función de las concentraciones resultaría de la forma:

$$K_c = \frac{c^2(\text{CoSO}_4)}{c^3(\text{H}_2\text{SO}_4) * c^2(\text{FeSO}_4)} \quad 4$$

La variación de energía libre está dada por:

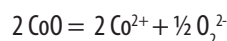
$$\Delta G = -RT \ln K_e \quad 5$$

Despejando en 5, se obtiene:

$$\ln K_e = -\frac{\Delta G}{RT}$$

Partiendo del proceso de lixiviación y tomando en consideración que el mecanismo de disociación del óxido superior de cobalto que se obtiene se expresa como $\text{Co}_2\text{O}_3 = 2\text{CoO} + \frac{1}{2}\text{O}_2$:

$$K_1 = \frac{c^{1/2} \text{O}_2^{2-} * a^2 \text{CoO}}{a(\text{Co}_2\text{O}_3)} = c^{1/2} \text{O}_2^{2-}$$

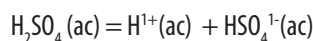


$$K_2 = \frac{c^{1/2} \text{O}_2^{2-} * c^2 \text{Co}^{2+}}{a^2 \text{CoO}} = c^{1/2} \text{O}_2^{2-} * c^2 \text{Co}^{2+}$$

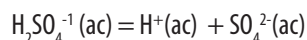
Queda como resultante:

$$K_3 = K_1 * K_2 = c \text{O}_2^{2-} * c^2 \text{Co}^{2+}$$

El mecanismo de disociación del ácido sulfúrico se realiza según las reacciones siguientes:

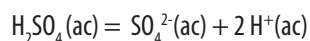


$$K_4 = \frac{c \text{HSO}_4^{1-} * c \text{H}^+}{c \text{H}_2\text{SO}_4}$$



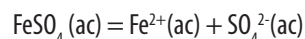
$$K_5 = \frac{c \text{SO}_4^{2-} * c \text{H}^+}{c \text{HSO}_4^{1-}}$$

Como resultado se obtiene:



$$K_6 = K_4 * K_5 = \frac{c \text{SO}_4^{2-} * c^2 \text{H}^+}{c \text{H}_2\text{SO}_4}$$

El mecanismo de disociación del sulfato de hierro II es:

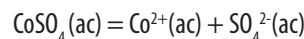


Su constante de equilibrio es:

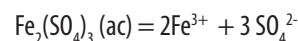
$$K_7 = \frac{c \text{SO}_4^{2-} * c \text{Fe}^{2+}}{c \text{FeSO}_4}$$

Y las combinaciones metálicas que son obtenidas se disocian

según las ecuaciones:



$$K_8 = \frac{c \text{Co}^{2+} * c \text{SO}_4^{2-}}{c \text{CoSO}_4}$$



$$K_9 = \frac{c^2 \text{Fe}^{3+} * c^3 \text{SO}_4^{2-}}{a \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3} = c^2 \text{Fe}^{3+} * c^3 \text{SO}_4^{2-}$$

Como resultante del mecanismo de las reacciones (se considera como reacción redox, según Xueyi *et al.*, 2003), la constante de equilibrio es:

$$K_e = \frac{K_3 * K_6 * K_7}{K_8 * K_9} = \frac{c^2 \text{CoSO}_4}{c^3 \text{H}_2\text{SO}_4 * c^2 \text{FeSO}_4}$$

Por lo que es posible llegar a la expresión siguiente:

$$\Delta G = -RT \ln \left[\frac{c^2 \text{CoSO}_4}{c^3 \text{H}_2\text{SO}_4 * c^2 \text{FeSO}_4} \right]$$

De ahí que se pueda determinar en función de la temperatura, del reactivo lixivante y del agente reductor, la cantidad de elemento metálico en equilibrio en la solución a través del modelo termodinámico siguiente:

$$c \text{CoSO}_4 = \sqrt{e^{\frac{-\Delta G}{RT}} * c^2 \text{FeSO}_4 * c^3 \text{H}_2\text{SO}_4}$$

Realizando simulaciones con la expresión matemática 13, es posible estimar la influencia de los principales factores termodinámicos de equilibrio de la reacción. Mediante la evaluación de estos últimos, se pueden obtener curvas de isotermas de equilibrio (Figuras 2 y 3).

En las Figuras 2 y 3 se muestra cómo varía la concentración de equilibrio del cobalto a diferentes concentraciones de ácido o de sulfato de hierro (II), formando familias de curvas acorde a la concentración constante de uno de los reactivos. Los comportamientos en todos los casos son directamente proporcionales.

CONCLUSIONES

- Termodinámicamente es posible la lixiviación ácida de los óxidos superiores de cobalto con el sulfato de hierro (II) que se forma durante el proceso, con preferencia de este sobre los óxidos superiores de manganeso.
- A partir del modelo termodinámico se demuestra que la concentración de cobalto en equilibrio aumenta cuando existe un incremento en la concentración de ácido, de sulfato de hierro II y de la temperatura.

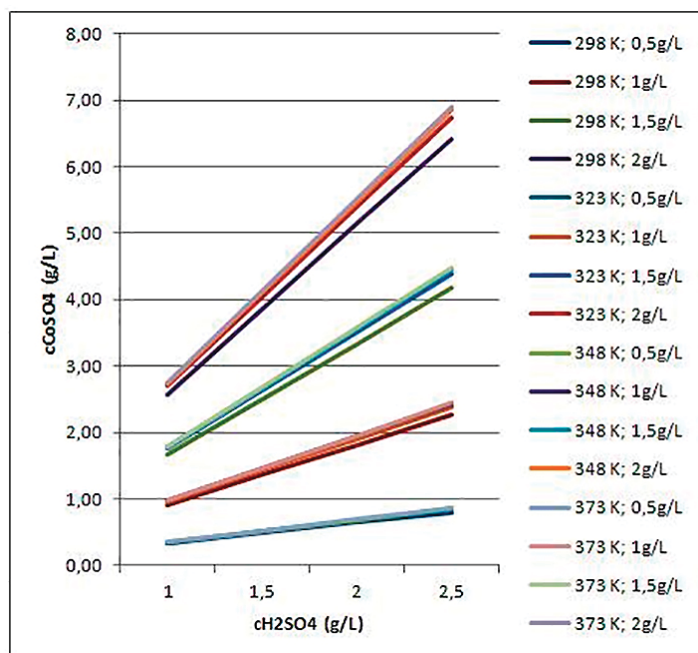


Figura 2. Isotermas de equilibrio de la lixiviación del Co_2O_3 con la variación de la concentración de ácido sulfúrico.

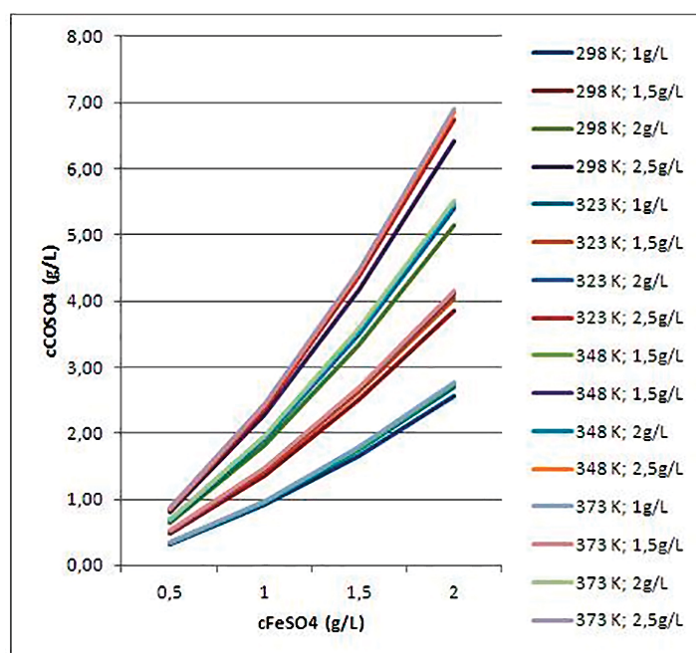


Figura 3. Isotermas de equilibrio de la lixiviación del Co_2O_3 con la variación de la concentración de sulfato de hierro (II).

BIBLIOGRAFÍA

Carlson, E., Simons, C. S., 1961. *Pressure leaching of nickeliferous laterites with sulphuric acid*. Extractive Metallurgy of nickel and cobalt. New York: Interscience. P. 363 – 397.

Cotton, F., Wilkinson, G., 1973. *Química Inorgánica Avanzada*. México: Limusa Wiley.

Kakovski, G., 1979. *Termodinámica y cinética de los procesos hidrometalúrgicos*. Moscú: Editorial Metalurgia. P. 217.

Levenspiel, O., 1986. *Ingeniería de las reacciones químicas*. La Habana: Pueblo y Educación. P. 638.

Simons, C., 1974. *Unit Processes in hydrometallurgy*. New York: Gordon and Breach Pull. P. 596 – 616.

Smart, L., Moore, E., 1995. *Química del estado sólido, una introducción*. EE.UU: Addison-Wesley Iberoamericana, S.A. (EEUU). ISBN 0-201-62582-2. p 1-62

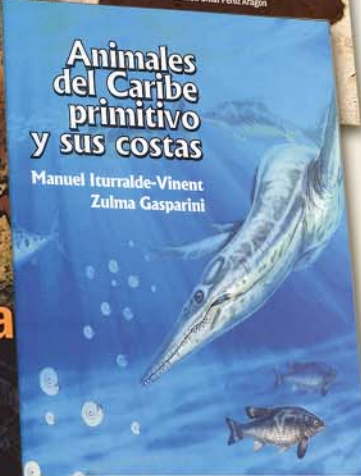
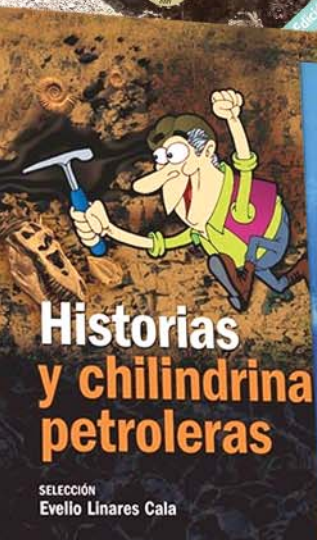
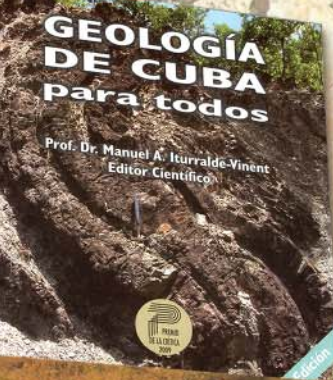
Sobol, S., 1968. *Composición mineralógica de las lateritas de Moa y su influencia sobre las formas de lixiviación de minerales por ácido sulfúrico en autoclave*. Revista Tecnológica. La Habana. Vol. VI N° 5 y 6: 3 – 32p.

West, A., 1993. *Solid state chemistry and its applications*. 2d Edition. Disponible en: www.wiley.com/go/west/solidstatechemistrystudent

Xueyi, G., Kai, H., Qihou, L., Duomo, Z., Dingfan, Q., 2003. *Electrochemical mechanism study of manganese dioxide dissolution in acidic chloride solution in presence of ferrous / ferric ions*. Hydrometallurgy Fifth International Conference in Honor of Professor Ian Ritchie. Vol. 1. The Minerals, Metals and Materials Society. P. 577 – 587.

Zelikman, A., Bolman, G. M., Beliauskaya, L. V., 1975. *Teoría de los procesos Hidrometalúrgicos*. Moscú: Editorial Metalurgia. P. 492.

PUBLICACIONES DE PROMOCIÓN DE LAS GEOCIENCIAS



- **Geología de Cuba para todos**
Editorial Científico-Técnica, 2009
- **Crónicas a piquetazos**
CEINPET, 2011
- **Venturas y aventuras de un geólogo**
Editorial Oriente, 2011 y 2014
- **Reptiles gigantes del Caribe primitivo**
Editorial Gente Nueva, 2013
- **Historias y chilindrinas petroleras**
CEINPET, La Habana, 2014
- **Animales del Caribe primitivo y sus costas**
Editorial Oriente, 2013
- **Gente de brújula, mochila y piqueta**
Centro Nacional de Información Geológica, 2014
Nuevo Milenum, 2015

VALIDACIÓN DEL MÉTODO ENSAYO AL FUEGO COMBINADO CON ESPECTROFOTOMETRÍA DE ABSORCIÓN ATÓMICA (EF-EAA)

YASET RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ ¹⁽¹⁾, IRAIDA VALENTÍN RODRÍGUEZ ², JULIO OMAR PRIETO GARCÍA ³, JORGE BASILIO DE LA TORRE ³, FELIPE ACOSTA MARTÍNEZ ²

1 Centro de Bioactivos Químicos (CBQ), Universidad Central Marta Abreu de las Villas

Carretera a Camajuaní km 51/2, Santa Clara, 54830 Villa Clara, Cuba.

2 Laboratorio Central, Empresa Geominera del Centro

Carretera a Malezas km 21/2, Santa Clara, 54830 Villa Clara, Cuba.

3 Facultad Química-Farmacia, Universidad Central Marta Abreu de las Villas

Carretera a Camajuaní km 51/2, Santa Clara, 54830 Villa Clara, Cuba.

Correo: (1) yasetr@uclv.edu.cu

RESUMEN

En el presente trabajo se valida el método Ensayo por Fuego Combinado con Espectrofotometría de Absorción Atómica (EF-EAA), para la determinación de oro en muestras geológicas. Los parámetros que se evalúan en esta validación son la especificidad, la linealidad, la sensibilidad, la precisión, la veracidad y la robustez. Se obtiene como resultado que el método es lineal en el rango de 2 a 7 mg/L, con valores de Límite de Detección y Límite de Cuantificación de 0,06 mg/L y 0,20 mg/L respectivamente. Los parámetros estadísticos que se determinaron en el análisis de precisión en términos de repetibilidad y de precisión intermedia, avalan que el método es capaz de emitir resultados con alta fidelidad. Se analizaron muestras en el Laboratorio Central de Minerales (LACEMI), las que son examinadas de forma paralela en el Laboratorio Central de la empresa Geominera del Centro (LABC-EGMC). Se analiza igualmente un material de referencia para evaluar la veracidad del método. Los valores que se obtienen en estos tests afirman que el método es veraz. La robustez se evaluó a partir de un diseño de experimento 2³. Como resultado se obtuvo que, en el rango en estudio, pequeñas variaciones de las variables que se estudian no afectan los resultados finales de las muestras. Se demuestra que este método puede ser utilizado por el LABC-EGMC, para determinar los contenidos de oro en muestras geológicas.

ABSTRACT

In this work, the Fire Assay Method Combined with Atomic Absorption Spectrophotometry (FA-AAS) for the determination of gold in geological samples is validated. The parameters evaluated in this validation are: specificity, linearity, sensitivity, precision, accuracy and robustness. As a result, the method is linear in the range of 2- 7mg/L, with values of detection limit and limit of quantification of 0.06 mg/L and 0.20mg/L respectively. The statistical parameters determined in the analysis of precision in terms of repeatability and intermediate precision guarantee that the method is able to deliver high accuracy results. Samples are analyzed that the Minerals Central Laboratory (LACEMI), which are studied in parallel in the Central Laboratory of the Geominera Center Company (LABC-EGMC), and a reference material is analyzed, all to assess the veracity of this method. The values obtained in these tests prove that the method is accurate. Robustness was evaluated from an experimental design 2³ and as a result, the ranges of small variations in the variables under study do not affect the final results of the samples. It is shown that this method can be used for the LABC-EGMC, to determine the gold content of geological samples.

INTRODUCCIÓN

La determinación de oro en muestras geológicas es una de las tareas más desafiantes en la química analítica. Constituye una labor exigente a causa de la variación en la composición química de los minerales asociados a este metal, lo cual dificulta su determinación. Además, debido al alto valor económico del oro, su cuantificación debe ser efectuada con una alta precisión y veracidad, ya que pequeñas cantidades del metal pueden incidir en la factibilidad de su explotación en yacimientos de baja ley (Marsden & House, 2006).

Los métodos analíticos establecidos actualmente para la determinación de oro en muestras geológicas en la mayoría de los laboratorios vinculados a la geología y minería del oro, utilizan la técnica combinada de Ensayo al Fuego con Espectrofotometría Absorción Atómica (EF-EAA) (Fletcher & Day, 1988; Barry, 2005) o la técnica de Ensayo al Fuego combinado con Espectroscopia de Plasma Inductivamente Acoplado (EF-ICP) (Services GL, 2001). Por lo general, cada vez que se propone una nueva metodología para la determinación de oro (e.g. Jotanovic *et al.*, 2012), el nuevo método se compara con el método del ensayo por fuego (EF), que se considera el método líder para determinar los contenidos de oro en muestras geológicas, ya que permite separar este metal de los demás elementos acompañantes en el mineral. Los avances de la analítica instrumental han permitido la combinación del EF con técnicas tan potentes como EAA e ICP, lo que permite la disminución de los Límites de Detección (LD) y Límites de Cuantificación (LC) (Petrovic *et al.*, 2001; Services GL, 2001; Standard™ A, 2002). Además, debido a la alta productividad de estos instrumentos (Konrad *et al.*, 2007), al combinar estas técnicas analíticas con el EF se facilita el trabajo en el laboratorio y es posible analizar un mayor número de muestras por jornada de trabajo.

A partir del año 2009, en Cuba se reinician las investigaciones geológicas dirigidas a la evaluación de depósitos con potencial aurífero, para determinar si es o no factible su explotación minera, debido a los altos precios del metal en el mercado internacional. En este sentido, en el Laboratorio Central de la Empresa Geominera Centro (LABC-EGMC), ubicado en la región central del país, se acondicionaron las instalaciones para realizar los análisis de las muestras geológicas y mineras de los proyectos Oro Descanso-Melonera y Oro San Fernando, ya que desde la última década del pasado siglo en el laboratorio no se efectuaba este tipo de investigaciones.

Esto implica que es necesario comprobarla fiabilidad de las determinaciones analíticas para la cuantificación de oro en muestras geológicas y mineras en las condiciones del LABC-EGMC, a través de la validación completa del método EF-EAA.

La validación de las técnicas analíticas proporciona un alto grado de confianza y seguridad en el método analítico y en la calidad de los resultados que se obtienen, lo que hace de este proceso una necesidad en todo laboratorio para garantizar la fiabilidad de los resultados obtenidos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Muestreo y preprocesamiento

Las muestras geológicas fueron tomadas del yacimiento San Fernando, en Manicaragua, Villa Clara, Cuba. Estas se trituran y pulverizan hasta a un tamaño de partícula menor de 0,088 mm, en molinos de modelos SK-100 y PM-400 de la firma Retsch (Meyer, 2004; Retsch, 2008). En este tipo de muestras, el oro es de fineza media hasta a un tamaño de $\leq 0,6$ mm.

Etapas de fusión de la muestra

Se pesan 25 g de muestra en balanza analítica modelo ACCULAB ATILON de la firma Sartorius (Sartorius, 1998), y se mezclan con 30 g carbonato de sodio anhidro, 15 g de tetraborato de sodio anhidro, 60 g de litargirio, 10 g arena sílice, 1 g de fluoruro de calcio, 3 g de harina de trigo y 1,5 mL de solución AgNO_3 5000 mg/L (como Ag). Toda esta carga se introduce en un crisol de chamota y se cubre la superficie con 5 g de tetraborato de sodio anhidro. Después se pone en un horno previamente precalentado hasta 1000 °C y se mantiene hasta que todas las reacciones se hayan efectuado y se observe quietud durante 10 minutos en la masa fundida.

Una vez realizada la fusión, se extrae el crisol del horno y se vierte el contenido en una lingotera, se espera que se enfríe, se rompe con un martillo el cristal formado por la escoria y se libera el botón de plomo. Para eliminar el resto de la escoria, se da forma de cubo a dicho botón mediante un martillo y un yunque.

Etapas de copelación de la muestra

El regulo de plomo se coloca en una copela de hueso de res o magnesita (secada previamente a 900 °C durante dos horas). Esta se coloca en un Horno Mufla a 900 °C y se cierra la puerta hasta que todo el plomo funde. Inmediatamente se abre un poco la puerta para que el plomo se oxide con el oxígeno del medio. Parte de este se absorbe en la copela y es necesario mantener la temperatura hasta que todo el plomo se haya eliminado.

Disolución del doré

El doré obtenido se coloca en un crisol de porcelana de 10 mL, y se adicionan 4 mL de HNO_3 (1:4) diluido, caliente con calor moderado (sobre plancha eléctrica) hasta que se disuelva toda la plata. La solución de plata formada se desecha por decantación. Luego se lava cuidadosamente con agua destilada (3-4) veces, hasta que toda la plata se haya eliminado. Se repite la adición de ácido nítrico diluido si es necesario. El botón de oro que se obtiene se lava tres veces con agua caliente y luego con agua destilada de tres a cuatro veces.

Determinación de los contenidos de oro por espectrofotometría de absorción atómica

Al botón de oro formado (libre de plata) se le adiciona 1 mL de agua regia (HNO_3 y HCl , 1:3) y se coloca nuevamente en la plancha hasta su disolución. Luego se trasvasa cuantitativamente a un matraz de 5 mL y se adicionan 0,5 mL de solución de cloruro de potasio (KCl al 1 %). Posteriormente, se enrasa con agua desionizada.

Preparación de la curva de calibración

Para cuantificar los contenidos de oro, se construye una curva de calibración y se grafican los valores de la concentración de oro contra los valores de absorbancia de cada estándar que se obtienen en el Espectrofotómetro de Absorción Atómica (modelo PG-990 de la firma PG – Instruments). Como guía se utilizan las condiciones de operación que se establecen en la Tabla I.

Para esto, se pesa 0,1 g de patrón de oro metálico de pureza 99,999%. Se adicionan 2 mL de agua regia (1:3HNO₃ y HCl), recién preparada, en un vaso de precipitado de 100 mL y se calienta moderadamente hasta su total disolución. Luego se trasvasa a un matraz aforado de 500 mL y se enrasa con agua desionizada. Esta solución se debe proteger de la luz en frasco ámbar.

Tabla I. Condiciones de operación del Espectrofotómetro de Absorción atómica PG-990 de la firma PG – Instruments, para la determinación de oro.

Parámetros	Medida
Corriente de la lámpara (mA)	5
Longitud de Onda (nm)	242,8
Ancho de ranura (nm)	0,4
Flujo de aire (L/min)	2
Flujo de acetileno (mL/min)	1100
Altura de quemador	6
Tiempo integración(s)	3

De la solución de 200 mg/L, se toman 50 mL. Estos se trasvasan a un matraz aforado de 100 mL y se enrasa con agua desionizada. En matraces aforados de 100 mL, se adicionan alícuotas de 2 a 7 mL de la solución de reserva de 100 mg/L, se añaden 20 mL de agua regia y 10 mL de HCl 1 %, y se llevan hasta la marca con una solución de HCl de 1 mol/L. Estas soluciones corresponden a concentraciones de 2 a 7 mg/L. Con dichas soluciones de estándar se determina la dependencia lineal de la curva de calibración.

Posteriormente, se mide la absorbancia de las soluciones de estándar y de las muestras, para lo cual se utilizan como guía las condiciones de operación establecidas en la Tabla I. Esto se obtiene con un Espectrofotómetro de Absorción Atómica modelo PG-990 de la firma PG - Instruments. Los datos se procesan con el software AA-Win 2.1.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para este trabajo, se midió un patrón mixto que contiene hierro, cobre, zinc, cadmio, plomo y plata, todos estos elementos presentes con una concentración de 0,03 mg/L, excepto para el hierro, cuyo contenido fue de 0,1 mg/L y no se detectó señal en el espectrofotómetro al utilizar la lámpara de cátodo hueco de oro.

En la Tabla II se muestran los valores de absorbancia obtenidos en los puntos de la curva de calibración del método EF-EAA para la determinación de los contenidos de oro en muestras geológicas.

Tabla II. Datos experimentales de absorbancia vs. concentración de oro, obtenidos por el método EF-EAA.

Item.	C(Au) (mg/L)	Abs.
1	2,00	0,098
2	3,00	0,145
3	4,00	0,187
4	5,00	0,231
5	6,00	0,272
6	7,00	0,313

Tabla III. Indicadores de linealidad para el método EF-EAA en el rango de 2 a 7 mg/L.

(a - intercepto con el eje de las x (a = 0,0148); t - valor umbral del estadístico t de Student (t = 6,34); $relS_b$ - desviación estándar relativa a la pendiente [$relS_b = (S_b/b) * 100$]. CV_f es el coeficiente de variación de los factores respuesta ($CV_f = S_f/X_f * 100$), para el cual S_f es el valor de la desviación estándar de los factores respuesta f; X_f es el valor de la media de los factores respuesta f; y f es el factor respuesta [$f = (y-a)/x$]. Para el factor respuesta, en este caso se utiliza la expresión $f = y/x$, ya que el intercepto a no es significativamente diferente de cero; en esta ecuación, y es el valor de absorbancia en el punto y x es el valor de la concentración en el punto.)

Parámetro	Valor calculado	Criterio
Coeficiente de correlación lineal (r)	0,9997	$r > 0,999$
Coeficiente angular (n)	0,92	$0,9 < n < 1,1$
a+t * Sa	0,0296	Inclusión de cero
a-t * Sa	0	
Prueba F-Fisher	7803,46	$F_{cal} > F_{crítica}$
Desviación estándar relativa a la pendiente ($relS_b$)	1,13	$relS_b < 2\%$
Coeficiente de Calidad	0	$CC < 2,5\%$
Coeficiente de variación de los factores respuestas CV_f	3,58	$CV_f < 5\%$

El test de linealidad del método EF-EAA fue realizado a partir de los datos que presenta la Tabla III y se obtuvo que en el rango de 2 a 7 mg/L el método es lineal. En el test de linealidad fue posible observar que los valores de todos los parámetros estudiados entran en el rango de aceptación de las normas (Órgano Oficial Regulatorio, Centro para el Control Estatal de la Calidad de los Medicamentos, 2007; Oficina Nacional de Normalización, 2010), por lo que se confirma la fuerte relación que existe entre los valores de absorbancia y concentración de oro en el rango bajo estudio. En la Figura 1 se presenta la curva de calibración obtenida en el espectrofotómetro EAA para la

determinación de oro en las muestras geológicas y la ecuación de la recta correspondiente, donde se observa la fuerte relación lineal que existen entre los valores absorbancia obtenidos y la concentración de oro. A partir de la relación entre los logaritmos de ambas variables, se calcula además el coeficiente angular y la sensibilidad del método, para la cual se obtuvo un valor de 0,052 mg/L.

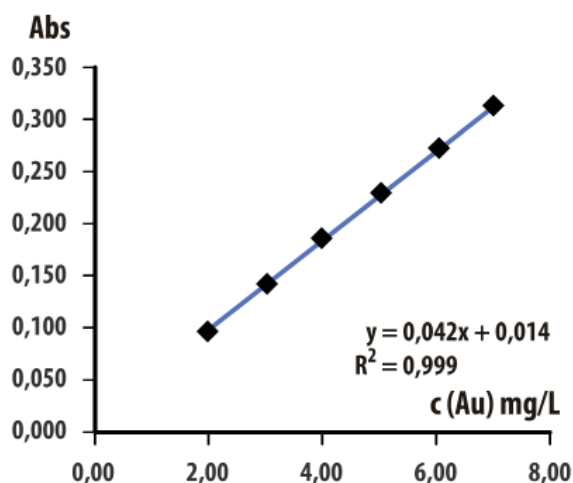


Figura 1. Curva de calibración del método EF-EAA, para la determinación de la concentración de oro.

El Límite de Detección (LD) y el Límite de Cuantificación (LC) del método EF-EAA se determinaron sobre la base de 34 muestras blanco, expresado como 3 y 10 veces la desviación estándar. Como resultado se obtuvieron valores de LD iguales a 0,060 mg/L Au y de LC iguales a 0,19 mg/L Au.

La Tabla IV muestra los resultados de la concentración de oro a partir del estudio de repetibilidad sobre la base de seis determinaciones con la aplicación de la técnica experimental EF-EAA. Los estadísticos descriptivos que se presentan fueron calculados usando las seis réplicas originales obtenidas para la muestra. c_{media} representa la concentración media, DS es la desviación estándar y CV es el coeficiente de variación expresado en por ciento, dado a partir de la fórmula $CV = DS/c_{media}$.

Tabla IV. Valores de una muestra geológica analizada para $n=6$ por el método EF-EAA, en condiciones de repetibilidad (mismo analista, día y equipos de trabajo) (n - número de réplicas).

No. Muestra	c_{media} (Au) (mg/L)	DS	CV%
SF-YI	2,66	0,042	1,59

A partir de estos resultados, es posible apreciar que el valor para el coeficiente de variación CV% de la repetibilidad es igual a 1,59% menor que el 3% para el nivel de concentración estudiado, lo que se corresponde con el criterio de aceptación utilizado para este parámetro.

En la Tabla V se presentan los resultados de la concentración de oro obtenidos para el estudio de reproducibilidad sobre la base de 18 determinaciones en tres días distintos y diferentes analistas, con el empleo de la técnica experimental EF-EAA. Los estadísticos descriptivos que se utilizaron fueron calculados a partir de las seis réplicas originales.

Tabla V. Valores de una muestra geológica analizada para $n=6$ por día de trabajo por el método EF-EAA, en condiciones de reproducibilidad (distintos analistas y diferentes días de trabajo) (n - número de réplicas).

No. Muestra	Día 1	Día 2	Día 3
	c_{media} (Au) (mg/L)	c_{media} (Au) (mg/L)	c_{media} (Au) (mg/L)
SF-YI	2,63	2,66	2,65
DS	0,077	0,042	0,054
CV%	2,94	1,59	2,05

Es posible notar que el CV % para cada día fue menor que el 3%, lo cual indica que hubo buena repetibilidad en los análisis (Órgano Oficial Regulatorio, Centro para el Control Estatal de la Calidad de los Medicamentos, 2007).

A través del análisis de la precisión intermedia, expuesto en la Tabla VI, los cálculos realizados para los coeficientes de variación entre los días y los coeficientes de Horwitz (Garfiel, 1993), confirmaron que el valor de $CV\%_{(Entre\ días)}$ de 3,87, fue menor que el 13,82 para $CV\%_{(Horwitz)}$. Por tanto, este criterio es considerado como de precisión aceptable del método.

La comparación de los valores de F-Fisher obtenidos de ANOVA evidencian que $F_{calculado}$, cuyo valor fue de 0,34, resultó menor que $F_{tabulado}$, para el que se obtuvo 3,68. Este criterio demuestra que los resultados obtenidos en los diferentes días no difieren entre sí y que el método es preciso.

La comparación del valor del estadístico C de Cochran calculado con el tabulado muestra que $C_{calculado}$ (0,557) fue menor que $C_{tabulado}$ (0,707), lo que significa que la variación del método es la misma para los tres días bajo estudio. Estos resultados avalan la precisión intermedia del método.

Otro criterio analizado fueron las determinaciones duplicadas, de acuerdo con las condiciones de la naturaleza de la muestra, con diferentes analistas y días (NRIB 269 MINBAS, 1985). En la Tabla VII es posible observar los resultados obtenidos a partir de 15 muestras analizadas en condiciones de reproducibilidad para un yacimiento de oro tipo b. En este caso, los valores de las diferencias permisibles P (1) son menores que los valores de las diferencias permisibles D tabulados, para un 95 % de confianza, lo cual demuestra que los resultados son reproducibles.

$$P = 2 * \left[\frac{(C_1 - C_2)}{(C_1 + C_2)} \right] * 100$$

A los grupos de muestras de los análisis básico y de control se les calcularon una serie de parámetros estadísticos (Tabla VIII). Al comparar la precisión entre los grupos (básico vs. control), se demostró que existe consistencia en el método debido a que

Tabla VI. Parámetros estadísticos del estudio precisión intermedia, de acuerdo con los resultados experimentales de los tres días.

PARÁMETROS ESTADÍSTICOS	VALORES
Media (mg/L)	2,65
Desviación estándar	0,057
Coeficiente de variación (CV%)	2,17
Desviación estándar entre los días ($S_{\text{entre días}}$)	0,10242
Coeficiente de variación entre los días ($CV\%_{\text{entre días}}$)	3,87
Coeficiente de variación teórico ($CV\%_{\text{Horwitz}}$)	13,82
F calculado	0,34
F tabulado ($F_{0,05;2;15}$)	3,68
$C_{\text{calculado}}$	0,557
C_{tabulado}	0,707

Tabla VII. Resultados para los análisis básicos y control de las muestras, con las diferencias permisibles (P) para un 95 % de confianza.

(Para la comparación se toman los valores modulares de las diferencias permisibles P. Los resultados tabulados de las diferencias permisibles D provienen de la NRIB 269 MINBAS (1985) para yacimientos de oro tipo b, en los que el oro presente tiene un tamaño de partícula < 0,6 mm.)

Item	Análisis Básico	Análisis Control	P	D
	c(Au) (mg/L)	c (Au) (mg/L)		
1	13,08	12,82	2,01	35
2	5,37	5,60	-4,19	50
3	1,67	2,03	-19,46	50
4	7,62	7,19	5,81	50
5	1,26	1,07	16,31	50
6	0,43	0,43	0,00	50
7	5,68	4,16	30,89	50
8	2,19	2,32	-5,76	50
9	0,47	0,49	-4,17	50
10	0,53	0,41	25,53	50
11	1,26	1,27	-0,79	50
12	0,75	0,79	-5,19	50
13	0,96	0,82	15,73	50
14	0,94	0,78	18,60	50
15	1,41	1,42	-0,71	50

Tabla VIII. Parámetros estadísticos calculados a los análisis básicos y control analizados en diferentes días y por distintos analistas.

PARÁMETROS ESTADÍSTICOS	VALORES
Media (mg/L)	2,84
Desviación estándar combinada	3,51184
t-experimental	0,038
t- tabulada ($n-2, \alpha$)	1,70
f- experimental	1,08
f- tabulada ($\alpha(14,14)$)	2,53
Coeficiente de variación teórico ($CV\%_{\text{Horwitz}}$)	13,67

no hay variación significativa dado por la comparación entre los valores de F-Fisher y F-tab ($1,078 < 2,53$). Lo mismo sucedió con la exactitud, ya que el valor de t_{exp} (0,038) resultó menor que el de t_{tab} (1,70). También se calculó el coeficiente de variación de Horwitz para estos dos grupos, el cual dio como resultado 13,67 %. El valor de la prueba t de Student se obtuvo de la siguiente expresión:

$$t_{\text{student}} = \frac{(X_1 - X_2)}{S \cdot \sqrt{(1/n_1 + 1/n_2)}}$$

Se utilizó además el valor de la desviación estándar combinada (Miller & Miller, 2010), que se calcula a partir de la ecuación:

$$S^2 = \frac{(n_1 - 1) S_1^2 + (n_2 - 1) S_2^2}{(n_1 + n_2 - 2)}$$

Al comparar los valores de los CV (los resultados de la repetibilidad, entre días y de Horwitz) se observa que $CVr\%(1,59) < CV\%_{\text{entre días}}(3,87) < CV\%_{\text{Horwitz}}(13,67)$. Esto indica que el $CV\%_{\text{entre días}}$ se acerca más a $CVr\%$, por lo que se demuestra que tanto los diferentes días como los distintos analistas no influyen significativamente en la reproducibilidad de los resultados. Al parecer, esta se afecta por otros factores, como la naturaleza de la muestra (es decir, el efecto pepita, debido a una pepita de diferentes tamaños en la ley de oro).

En la Tabla IX se presentan los valores obtenidos al analizar diez réplicas del material de referencia MRLJ. Los valores obtenidos están en el rango de concentraciones permisibles y el CV% es de 1,90 % (menos del 3%). También se observa que el valor de la t_{exp} (0,71) es menor que el de t_{tab} (1,83), lo cual indica que el valor medio obtenido para la concentración de oro (9,82 mg/L) no difiere significativamente del valor esperado (9,78 mg/L).

Tabla IX. Análisis realizado al material de referencia MRLJ preparado en el CIPIMM. Los resultados se obtuvieron en base a 10 réplicas analizadas al material de referencia (n=10).

Material de referencia	C (Au) esperada (mg/L)	C_{media} (Au) determinada (mg/L)	Desviación estándar (DS)	CV %	Resultado de t de Student
MRLJ	9,78	9,82	0,18630	1,90	$t_{\text{exp}}=0,71 < t_{\text{tab}}=1,83$

En la Tabla X se muestran los resultados de 22 muestras analizadas paralelamente por la misma técnica (EF-EAA) en el laboratorio de la EGMC y en LACEMI. Estos resultados fueron sometidos a tratamientos estadísticos para determinar la precisión entre los dos laboratorios (Tabla XI). El análisis de estos datos demuestra que existe consistencia en el método utilizado, debido a que no hay una variación significativa ($F_{\text{exp}} (1,01) < (2,12) F_{\text{tab}}$). De igual forma ocurre con la exactitud, ya que el valor de la t_{exp} (0,005) resulta menor que el de t_{tab} (1,684).

Tabla X. Resultados de los análisis obtenidos en el laboratorio EGMC y en el LACEMI por la técnica (EF-EAA).

Item	No.	LACEMI	EGMC
		c(Au) (mg/L)	c (Au) (mg/L)
1	321	2,64	2,33
2	330	0,51	0,50
3	331	0,44	0,51
4	332	1,11	1,41
5	403	2,33	3,03
6	407	1,15	1,17
7	3057	0,87	0,87
8	3059	0,98	1,02
9	3060	3,96	4,20
10	3091	1,45	1,67
11	3223	2,26	1,69
12	3224	1,39	1,54
13	3226	5,54	5,55
14	3227	3,28	2,86
15	3233	0,92	0,85
16	3234	0,90	0,76
17	3236	1,80	2,00
18	3258	0,68	0,62
19	3263	1,12	0,83
20	3285	0,98	1,16
21	3424	0,45	0,59
22	3428	0,99	1,15

Tabla XI. Parámetros estadísticos calculados a los análisis básicos y control analizados en diferentes días y por distintos analistas.

PARÁMETROS ESTADÍSTICOS	VALORES
Media (mg/L)	1,64
Desviación estándar combinada	1,2768
t-experimental	0,0051
t- tabulada _(n-2, α)	1,684
f- experimental	1,01
f- tabulada _{α(21,21)}	2,12

La robustez del método fue determinada a través un análisis de regresión múltiple, a partir de un diseño de experimento 2³. Las variables seleccionadas para este análisis fueron el flujo de gas (FG), la altura del quemador (AQ) y el paso de banda (PB). En la Tabla XII se presentan los resultados de las absorbancias obtenidas en el rango estudiado. La ecuación resultante del análisis de regresión múltiple fue la siguiente:

$$\text{Abs} = 0,178 - 8,12 \times 10^{-4} \times \text{AQ} + 5,62 \times 10^{-3} \times \text{PB} - 6,25 \times 10^{-6}$$

Para esta fórmula, R²=0,02 %, lo que indica que no existe correlación entre las variables estudiadas y la respuesta (Abs).

Tabla XII. Valores del diseño 2³ realizado para determinar la robustez del método EF-EAA.

Exp.	Flujo gas (mL/min)	Altura del quemador (mm)	Paso de banda (nm)	Abs 1 c(Au) = 2,0 mg/L	Abs 2 c(Au) = 5,0 mg/L
1	1200	8	0,4	0,098	0,234
2	1100	6	0,2	0,101	0,236
3	1100	6	0,4	0,099	0,240
4	1100	8	0,4	0,102	0,233
5	1200	6	0,4	0,099	0,234
6	1200	6	0,2	0,100	0,232
7	1200	8	0,2	0,102	0,233
8	1100	8	0,2	0,097	0,229

El valor de los coeficientes P, que indican el nivel de significación de la variable, en todos los casos fueron no significativos, ya que el valor de P resultó mucho mayor que 0,1. Esto quiere decir que estadísticamente no son significativas las variables, por tanto, en el rango estudiado, el método EF-EAA es robusto.

CONCLUSIONES

La validación del método Ensayo al Fuego Combinado con Espectrofotometría de Absorción Atómica (EF-EAA) bajo las condiciones experimentales del Laboratorio Central de la empresa Geominera del Centro, para la determinación de oro en muestras geológicas, permitió certificar una metodología analítica confiable.

Los parámetros evaluados en esta validación corroboran que el método es específico para la determinación de los contenidos de oro en muestras geológicas. Esta técnica presenta LD y LC de 0,060 y 0,20 mg/L Au respectivamente y se comporta linealmente en el rango de 2 a 7 mg/L de Au. Los análisis realizados en términos de precisión intermedia, veracidad y robustez, validan que el método es preciso, veraz y robusto bajo las condiciones estudiadas.

BIBLIOGRAFÍA

- Barry, W. S. 2005. *Part III: Exploration Sampling and Assaying*. Disponible en: <http://www.amebc.ca/primer3.htm>
- Fletcher, W. K., Day, S. J., 1988. *Determination of gold in heavy - mineral concentrates: Fire Assay and Atomic Spectroscopy (FA-AAS) versus Instrumental Neutron Activation Analysis (INAA)*. British Columbia Ministry of Energy Mines and Petroleum Resources Geological Fieldwork. 1:509- 510.
- Garfiel, F. M., 1993. *Principios de Garantía de Calidad para Laboratorios Analíticos*. Maryland: AOAC International.
- Jotanović, A., Memić, M., Suljagić, Š., Huremović, J., 2012. *Comparison of x-ray fluorescent analysis and cupellation method for determination of gold in gold jewellery alloy*. Bulletin of the Chemists and Technologists of Bosnia and Herzegovina. 38: 13 - 18.
- Konrad – Zuse – Straße, 2007. *Fundamentals Instrumentation and Techniques of Atomic Absorption Spectrometry*. Germany: Analytik Jena AG. Disponible en: www.analytik-jena.com
- Marsden, J., House, I., 2006. *The Chemistry of Gold Extraction*. Colorado: Society for Mining and Exploration.

Meyer, H. J., 2004. *La nueva generación de molinos planetarios de bolas*. Noticias Técnicas del Laboratorio.2: 33- 34.

Miller, J. N., Miller, J. C., 2010. *Statistics and Chemometrics for Analytical Chemistry*. Sixth Edition. Gosport: Limited PE.

NRIB269 MINBAS, 1985. *Control Interno de la Reproducibilidad de los resultados de los análisis básicos cuantitativos para el área geológica*. La Habana.

Oficina Nacional de Normalización, 2010. NC-TS 368: 2010. *Guía para la Validación de métodos de ensayos químicos para alimentos*. La Habana: Oficina Nacional de Normalización.

Órgano Oficial Regulatorio, Centro para el Control Estatal de la Calidad de los Medicamentos, 2007. *Regulación No. 41 – 2007, Validación de Métodos Analíticos*. La Habana: CECMED.

Petrovic, N., Budelan, D., Cokic, S., Nesic, B., 2001. *The determination of the content of gold and silver in geological samples*. Serb. Chem. Soc. 66(1): 45-52.

Retsch, 2008. *Operation & Application Videos*. Germany: RetschGmbH.

Sartorius, 1988. *Sartorius Micro. Analytical, Semi - micro and Microbalances. Installation and Operating Instructions*.

Services GL, 2001. *Determination of Platinum Group Elements and Gold by Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry*. Australia: Genalys Laboratory Services.

Standard™ A, 2002. AS 2678.5 - 2002: *Zinc sulfide concentrates - Chemical analysis. Part 5: Determination of silver and gold contents - Fire assay and flame atomic absorption spectrometric method using scorification or cupellation*. Sidney: Standards Australia International.



GeoMinera S.A.



GeoMinera S.A. es una Sociedad Mercantil Cubana, perteneciente al Grupo Empresarial GeoMinSal, cuenta con más de XX años de experiencia en el sector geólogo-minero. Opera bajo un Sistema de Gestión de la Calidad que satisface los requisitos establecidos en la norma NC-ISO 9001: 2008, debidamente avalado por certificado expedido por la Oficina Nacional de Normalización de Cuba, desde el 10 de julio de 2013.

Actualmente promociona la Cartera de Oportunidades para el Sector de la Geología y la Minería, con el objetivo de captar el interés de inversionistas extranjeros para desarrollar Proyectos en las fases de Reconocimiento e Investigación Geológica (*Prospección-Exploración*), Explotación, Procesamiento y Comercialización de metales preciosos (*oro y plata*), metales base (*cobre, plomo, zinc*) y otros minerales de interés, a partir del conocimiento actual.

Las oportunidades de negocios que promociona actualmente GeoMinera S.A. cubren básicamente las siguientes regiones:

- **Región Pinar del Río:** Depósito de cobre "Hierro Mantua".
- **Región Cuba Central:** Prospectos y áreas perspectivas para oro, plata, cobre, plomo y zinc.
- **Región Ciego - Camagüey - Tunas:** Prospectos y áreas perspectivas para oro, plata, cobre, plomo y zinc.
- **Región Holguín y Macizo Sagua - Baracoa:** Prospectos y áreas perspectivas para oro, plata, cobre, plomo, zinc y cromo.
- **Región Sierra Maestra:** Prospectos y áreas perspectivas para oro, plata, cobre, plomo y zinc.
- **Municipio Especial Isla de la Juventud:** Prospectos y áreas perspectivas para micas, caolines y wolframio.

Además, brinda los servicios técnicos profesionales especializados para el sector geólogo - minero.



UNA MINA

DONDE USTED PUEDE INVERTIR

Prolongación Carretera Central e/ Virgen del Camino y Línea de Ferrocarril, San Miguel del Padrón, La Habana, Cuba.

Teléfono: (537) 690 2741 / (537) 690 27 86

E-mail: direccion@gmsa.cu

Web: www.gmsa.cu



«www.redciencia.cu/geobiblio/inicio.html»

La Biblioteca Digital Cubana de Geociencias pone a disposición de los interesados (estudiantes, docentes, especialistas y público en general) referencias bibliográficas de las publicaciones y mapas cubanos, muchos de ellos en formato digital (*pdf* y *jpg*). Las temáticas abarcan distintas ramas de las Ciencias de la Tierra, con énfasis en geología, geofísica y minería sobre Cuba, o que de alguna manera sean relevantes para el mejor conocimiento del territorio, aunque se refieran centralmente a otras geografías. Estas contribuciones incluyen libros, monografías y artículos científicos, unos pocos resúmenes y mapas, a partir del año 1535.

Algunos documentos inéditos muy importantes se han referenciado, ya que se encuentran disponibles en la Oficina Nacional de Recursos Minerales (www.onrm.minem.cu), el Centro Nacional de Información Geológica (www.igp.minem.cu), y otras fuentes.

Las referencias están ordenadas alfabéticamente por autor y fecha de publicación y disponen de versión digital cuando tienen incorporado un enlace en la fecha de publicación o en el título de los capítulos si se trata de una obra muy grande. Sin embatgo, tiene un buscador que trabaja sobre la base de palabras claves.

Esta biblioteca se publica sin fines de lucro, si usted desea obtener los originales de los trabajos publicados en revistas internacionales, debe remitirse a las respectivas casas editoriales. La Biblioteca Digital Cubana de Geociencias se actualiza y perfecciona periódicamente, de modo que son bienvenidas observaciones y comentarios, nuevas referencias o completamiento de las ya existentes, así también como nuevos documentos en formato digital.

Contáctenos a geobiblioteca.cu@gmail.com.

www.redciencia.cu/geobiblio/inicio.html

DESARROLLO DE MEMBRANAS A PARTIR DEL EMPLEO DE MINERALES CUBANOS

BLASA C. DELGADO DIÉZ ¹⁽¹⁾, JOSÉ MARCHESE ²⁽²⁾, ARAMIS FERNÁNDEZ RODRÍGUEZ ¹, TANIA LUBIAN MARTÍNEZ ¹, ISMARI SALGADO MACHÍN ¹

1 Centro Investigaciones para la Industria Minero Metalúrgica

2 Facultad de Ciencias Físico - Matemáticas y Naturales, UNSL

Correo: (1) blasa@cipimm.minem.cu, (2) marchese@unsl.edu.ar

RESUMEN

Es conocida la utilización de membranas en el tratamiento de aguas y aguas residuales. Específicamente en los últimos años se han desarrollado tecnologías de síntesis de diversos tipos de membranas sobre materiales porosos que permiten intensificar su uso, lo que garantiza el cumplimiento de los requerimientos de los estándares vigentes en el tratamiento de estos recursos.

Las membranas son láminas muy delgadas de polímeros, geles, vidrio, metal, cerámica, carbón o compósitos de estos, de alta permeabilidad y estructura uniforme de poros con tamaños que oscilan entre varios micrómetros y fracciones de nanómetros.

El objetivo del presente trabajo fue el desarrollo de membranas cerámicas mediante el empleo de minerales cubanos, con vistas a ser utilizadas en el tratamiento de efluentes.

Las materias primas que se seleccionaron fueron: arcilla Pinar del Río, caolín gris y óxido de alúmina. Se empleó el procedimiento general de síntesis de membranas por el método cerámico de moldeo compuesto por la deposición de la capa precursora, crecimiento de la capa, secado y quema. La calidad final de la membrana depende críticamente de la calidad del soporte, de la composición y estructura de la solución precursora y de los detalles de los procesos de secado y calcinación, particularmente del secado.

Se obtuvo un lote de membranas tubulares activas y otro lote de membranas depositadas en el interior de los soportes, las cuales fueron caracterizadas. Los resultados obtenidos fueron satisfactorios, siempre dentro de los parámetros establecidos de este tipo de material.

ABSTRACT

The use of membranes is known in the treatment of waters and residual waters. Specifically in the last years, technologies of synthesis of diverse types of membranes have been developed on porous materials that allow to intensify its use, guaranteeing in this way the requirements of the effective standards in the treatment of these resources.

The membranes are very thin sheets of polymers, gels, glass, metal, ceramic, coal or mixtures of them, with high permeability and standard structure of pores with sizes that oscillate between several micrometers and nanometers fractions.

The objective of the present work was the development of ceramic membranes using Cuban minerals to being used in the effluents treatment.

The raw matters that were selected were: Pinar del Rio clay, gray kaolin and oxidizes of alumina. The general procedure of synthesis of membranes was used by the ceramic method of composed model by the deposition of the precursor cover, growth, drying and burns of the cover. The final quality of the membrane depends critically on the quality of the support, of the composition and structure of the precursor solution, and of the details of the drying and calcinations processes, particularly the drying.

A lot of active tubular membranes and another lot of membranes deposited inside the supports were obtained, which were characterized, and the obtained results were satisfactory, being in the established parameters of this material type.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años se han desarrollado tecnologías de síntesis de diversos tipos de membranas sobre materiales porosos, que permiten intensificar el uso de las mismas en el tratamiento de residuales y potabilización de aguas, lo cual garantiza los requerimientos de los estándares vigentes en el tratamiento de estos recursos. Las membranas son láminas muy delgadas de polímeros, geles, vidrio, metal, cerámica, carbón o composites de éstos, de alta permeabilidad y estructura uniforme de poros con tamaños que oscilan entre varios micrómetros y fracciones de nanómetros. Esta textura les proporciona propiedades muy valiosas para los procesos de separación de fases, de moléculas en estado líquido o gaseoso, de microorganismos e incluso de radioisótopos, con mayor eficiencia y menor costo que las técnicas convencionales.

En las operaciones de separación, la membrana ofrece varias ventajas básicas:

- La separación tiene lugar a temperatura ambiente sin cambio de fase, lo que ofrece una ventaja energética comparada con la destilación.
- La separación tiene lugar sin acumulación de productos dentro de la membrana. Las membranas están bien adaptadas para funcionar continuamente sin un ciclo de regeneración, como ocurre con las operaciones de intercambio iónico de resinas, o sin ciclo de elución como en cromatografía.
- No necesita la adición de productos químicos, como es el caso de la destilación azeotrópica o en la clarificación del agua por asentamiento y filtraje convencional. Esto representa una ventaja en la calidad del producto y deja menos residuos contaminantes (Burggraaf *et al.*, 1989; Yu y Klein, 1992).

El mercado total de membranas se encuentra desigualmente distribuido, con cerca del 75 % del mercado localizado en Estados Unidos, Europa y Japón. Mundialmente, más de 100 compañías están involucradas de una manera u otra en la tecnología de membrana, pero solo cerca de 60 son fabricantes de membranas o módulos. Las restantes compañías están implicadas solo en el diseño de procesos e ingeniería de plantas que utilizan membranas como componentes.

Las membranas cerámicas fueron las primeras que se obtuvieron. Han tenido un gran desarrollo y actualmente dominan una buena parte del mercado, debido a sus propiedades excepcionales de estabilidad para muchas aplicaciones en difíciles condiciones (Burgfels & Kochloeft, 1989; Kasabova *et al.*, 1988; Denbrovetskaya *et al.*, 1989). Estas son confeccionadas a partir de mezclas de óxidos como Al_2O_3 , ZrO_2 o TiO_2 , así como aluminosilicatos.

La mayor parte de las pastas cerámicas comerciales se preparan en base a polvos de ZrO_2 y Al_2O_3 para el soporte primario, y otros como TiO_2 y CeO_2 para la primera capa. Adicionalmente se usa el carbón, el acero inoxidable poroso, la mullita, el vidrio y la cordierita. Es evidente que la composición, la estructura y la textura porosa del soporte han de tener influencia sobre la

permeabilidad, así como las propiedades eléctricas del líquido filtrado, ya que el transporte a través de los sistemas capilares es muy dependiente de las interacciones de las especies con el material del soporte. En el proceso de preparación de la pasta se incluyen, además de la dosificación y la molienda previa de algunas materias primas, la molienda y homogenización de la mezcla, la filtración de la suspensión, el filtro - prensado y la extrusión al vacío de la pasta para eliminar el exceso de humedad y el aire ocluido respectivamente. Un número importante de soluciones se basan en los materiales aluminosilicatos tradicionales de la industria cerámica con adiciones de CaO , MgO , CMC, carbón activado, lignito y la cordierita (Egiazarov *et al.*, 1986).

En el campo del tratamiento del agua potable, las nuevas reglamentaciones sobre filtración, desinfección y subproductos de la desinfección han generado un considerable interés por el uso de las membranas para la eliminación de partículas, la remoción de materias orgánicas que pueden ser precursoras de subproductos de desinfección y la eliminación de organismos patógenos.

El tratamiento del agua se ha enfocado tradicionalmente en los procesos de separación sólido-líquidos más que sobre los procesos de remoción de contaminantes disueltos en el agua. Así, las presiones regulatorias actuales han forzado a los profesionales en el tratamiento de aguas a considerar el empleo de procesos de tratamiento no convencionales, tales como tecnologías de membranas que, solas o combinadas con la separación sólido-líquido, son capaces de cumplir las normas más exigentes.

En este trabajo se discuten los resultados de las investigaciones realizadas como continuación de Proyectos Nacionales de Investigación desarrollados en el laboratorio. En el primero se trató la síntesis de membranas cerámico-zeolíticas de microfiltración y ultrafiltración y su aplicación en la potabilización de agua y efluentes galvánicos, entre los años 2002 y 2004. Un segundo proyecto *Estudio de factibilidad para la producción de membranas cerámicas*, se llevó a cabo entre el 2004 y el 2006, con el objetivo de establecer, mediante una ingeniería básica, las soluciones técnicas fundamentales para realizar la puesta en explotación de la línea para obtención de las membranas cerámicas, así como la estimación de sus parámetros económicos y financieros, de acuerdo con la necesidad de sustituir importaciones. Un tercer proyecto, denominado *Diseño y estudio de viabilidad de una planta demostrativa de potabilización de aguas con membranas (2006-2007)*, fue realizado para demostrar la viabilidad de los métodos de potabilización de agua de pozo con las membranas cerámicas desarrolladas en el CIPIMM, mediante los análisis rigurosos de la factibilidad económica.

El objetivo del presente trabajo fue el desarrollo de membranas cerámicas a partir de minerales cubanos, con vistas a ser empleadas en el tratamiento de aguas y aguas residuales. Se abordaron las formas de obtención de las membranas y las materias primas utilizadas, centrando su actividad fundamental en la síntesis y caracterización de las membranas cerámicas y su potencial empleo en la potabilización de aguas subterráneas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales y equipamiento empleado

Para el desarrollo de la formulación, se realizó una búsqueda sobre las materias primas y las mezclas empleadas en las síntesis de membranas obtenidas en Argentina, las experiencias del trabajo del CIPIMM y la disponibilidad de las materias primas cubanas (Burggaaf & Cot, 1986; Marchese & Amaral, 1999; Almandoz, 2009 a, b). A partir de este análisis fueron escogidos los materiales siguientes:

- Materias primas:
 - o Arcilla Pinar del Río (moja hueva), 30 %
 - o Caolín gris, 30 %
 - o Óxido de Alúmina, 40 %
- Equipamiento empleado:
 - o Molino de bolas de porcelana, con capacidad de 5 litros
 - o Agitador digital
 - o Estufas
 - o Horno programable
 - o Tamices
 - o Moldes de yeso
 - o Difractómetro de Rayos X RIGAKU D/MAX-3C.
 - o Permeabilímetro
 - o Porosímetro de mercurio

Los difractogramas se realizaron por el método de polvo y se registraron en un equipo Philips modelo PW - 1710 con los parámetros de operación que se muestran en la Tabla I.

Tabla I. Parámetros de operación del difractograma realizado.

PARÁMETRO	
Goniómetro	2,65
vertical	0,054
Sistema de focalización	Bragg-Brentano
Radiación Ka	Fe
Filtro	Mn
Diferencia de potencial aplicada	30 kV
Corriente anódica	20 mA
La calibración del equipo se chequea con patrón externo	Silicio
Registro angular	6-80° (2θ)

Todos los difractogramas se registraron según la variante de medición punto a punto, paso angular de 0,05°(2θ), a un tiempo de medición en cada posición angular de 3 s.

Los resultados numéricos de intensidades relativas y ángulos de difracción fueron convertidos en difractogramas continuos con el empleo del programa *Origin* 7.0. Las distancias interplanares se determinaron con el programa *Ttod* para PC. El análisis cualitativo de fases se realizara con la utilización de la base de

datos PCPDFWIN, versión 1.30, JCPDS-ICDD / 2002, compatible con Windows 98 para Office 2000.

Metodología empleada

El procedimiento general de síntesis de membranas que se empleó en este trabajo consistió en la deposición de la capa precursora, crecimiento de la capa, secado y quema. La calidad final de la membrana depende críticamente de la calidad del soporte, de la composición y estructura de la solución precursora y de los detalles de los procesos de secado y calcinación, particularmente el secado (González y Delgado, 2005).

La deposición de la capa inicial debe asegurar la creación de una interfaz armónica entre dicha capa y el soporte sin bloquear sus poros superficiales. Sería muy ventajoso poder confinar la capa al interior de los poros superficiales del soporte, pero hasta el momento no se ha logrado garantizar la homogeneidad en la penetración de la solución.

El procedimiento para la confección de la pasta se basó en el método cerámico mediante el uso de la técnica de moldeado, basado en:

1. Moler las materias primas en molino de bolas de porcelana de capacidad 5 litros.
2. Tomar muestras de la pastas a diferentes tiempos de molienda:
 - o 30 minutos
 - o 1 hora
 - o 2 horas
 - o 4 horas
3. Determinar el peso específico de cada pasta hasta peso específico ideal para formulación a emplear (1,5 - 1,7 g/cm³).
4. Realizar el análisis granulométrico de cada pasta (50, 100, 200, 250, 270, 325 mesh).
5. Realizar la prueba en molde cerámico (dedal) para establecer el tiempo necesario para las coladas con vistas a obtener las capas activas. Realizar el vertimiento por colada en el molde tubular cerámico y dejar secar durante 24 horas, para su posterior quema. Realizar la deposición de la capa activa en el interior del soporte cerámico, de ser necesario volver a ajustar el peso específico de la pasta a 1,3 g/cm³ para realizar las coladas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez revisada la disponibilidad de las materias primas cubanas empleadas en la actualidad en empresas cerámicas, se seleccionaron la arcilla Pinar del Río (amarilla), el caolín gris, el óxido de aluminio (alúmina, grado reactivo) y el agua para su empleo en la obtención de las membranas tubulares. Los resultados del análisis químico se presentan en la Tabla II.

Las Figuras 1 y 2 muestran los resultados de los difractogramas realizados a la materia prima empleada. Como se observa, la muestra de arcilla Pinar del Río es cuarzo (SiO₂) en su totalidad,

ya que no existen máximos que denuncien otra fase cristalina. Es necesario señalar que el análisis químico realizado presenta un 3,8 % de hierro, mientras que la muestra caolín gris es una mezcla de hidromoscovita.

Tabla II. Análisis químico de las materias primas cubanas utilizadas.

Muestra	Na (%)	K (%)	Mg (%)	Ca (%)	Fe (%)
Arcilla de Pinar del Río (Moja hueva) (M2)	0,26	0,48	0,32	0,49	3,80
Caolín Gris (M3)	0,14	1,47	0,22	0,21	0,82

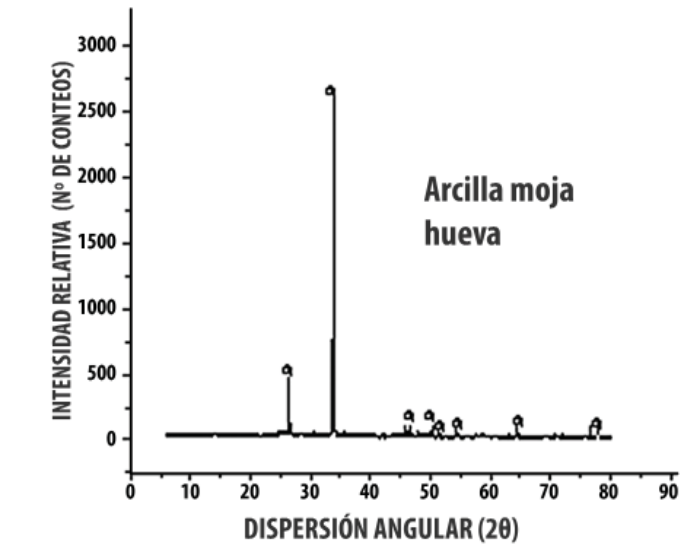


Figura 1. Resultados del difractograma de la arcilla Pinar del Río.

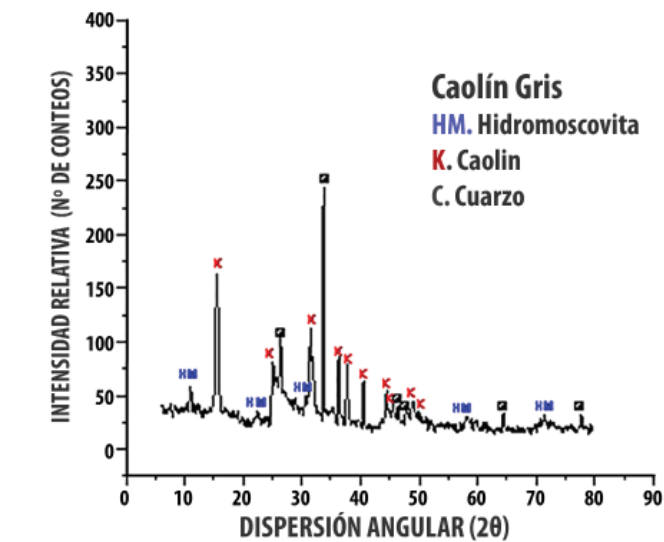


Figura 2. Resultados del difractograma del caolín gris.

Análisis cualitativo

Los datos fueron adquiridos a 3º min. para valores de 2 entre 10º y 90º. Las muestras en polvo fueron colocadas sin ningún tratamiento previo en portamuestra plano de vidrio. La identificación de las fases presentes en las muestras fue realizada utilizando las bases de datos del *Joint Commite for Powdwe Diffraction Sources* (JCPDS).

En la Tabla III se muestra el resultado de la composición de fases de las materias primas.

De las diferentes masas, la MB4 presentó el menor peso específico después de la molienda de 4 horas (Tabla IV), lo cual puede indicar un mayor grado de hinchamiento.

Tabla III. Composición de fases de las materias primas utilizadas (M2 - arcilla Pinar del Río filtrada (blanca); M3 - caolín gris filtrada; M22 - residuos arcilla Pinar del Río (moja hueva); M33 - residuos caolín gris).

Muestras	Nombre Archivo	Fases Presentes
M2	Z06810.dat	SiO ₂
M3	Z06811.dat	SiO ₂
M22	Z06827.dat	SiO ₂ Al ₂ SiO ₂ O ₅ (OH) ₄
M33	Z06828.dat	SiO ₂ Al ₂ SiO ₂ O ₅ (OH) ₄

Tabla IV. Parámetros de las masas de membranas.

Muestra	Tiempo de Molienda (h)	Cantidad de pasta muestreada (mL)	Peso específico (g/cm ³)	Peso del Sólido (g)
MB1	0,50	600	1,32	47,56
MB2	1,00	600	1,32	47,56
MB3	2,00	600	1,32	47,56
MB4	4,00	2240	1,25	37,79

Después de realizar la caracterización de las materias primas escogidas se procedió a la obtención de las membranas cerámicas, de acuerdo con el procedimiento descrito anteriormente. Dichas muestras fueron calcinadas en un horno programable hasta alcanzar una temperatura de 1200 °C y luego fueron sometidas a un análisis de poro simetría de mercurio.

Se obtuvo un lote de membranas tubulares mediante los pasos descritos en los acápites anteriores. Posteriormente se inició su caracterización.

Los resultados de esta caracterización pueden ser observados en la Tabla V. Puede notarse que la muestra MB4 presenta un área total de poro más alta que la restantes muestras, con diámetro promedio de poro menor, lo que la hace más perspectiva.

Aunque los resultados son preliminares, pueden considerarse satisfactorios, dado que la muestra MB4 tiene las mismas propiedades obtenidas por otros autores (con ensayos a mayor escala en el CIPIMM), como la porosidad total, la densidad aparente, entre otras. Los mejores valores o valores similares fueron obtenidos para las membranas MB4.

Tabla V. Caracterización de las muestras por porosimetría de mercurio.

Características	1-MB1	2-MB2	3-MB3	4-MB4
Volumen total de penetración [mL/g]	0.2701	0.2035	0.1806	0.1532
Área total del poro [m ² /g]	0.994	1.063	1.062	1.093
Diámetro medio del poro (Volumen) [mm]	1.3684	0.8593	0.7367	0.6113
Diámetro medio del poro (Área) [mm]:	0.9711	0.7545	0.6968	0.586
Diámetro promedio del poro (4V/A) [mm]	1.0872	0.7661	0.6804	0.5609
Densidad aparente [g/mL]	1.6401	1.8756	1.9581	2.0703
Densidad aparente (esqueleto) [g/mL]	2.9447	3.0333	3.0296	3.0319
Porosidad [%]	44.3036	38.1671	35.3689	31.7175

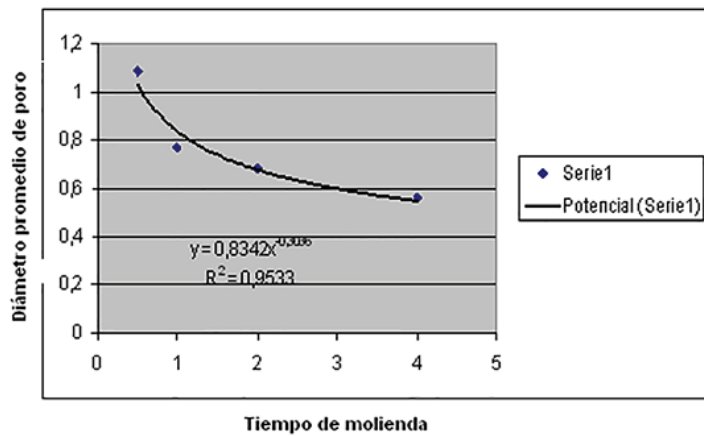


Figura 3. Relación entre diámetro promedio de poros (mm) contra tiempo (h).

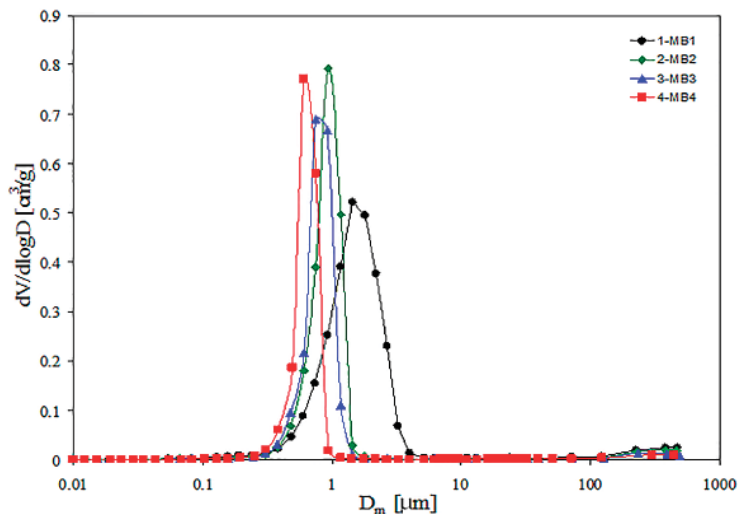


Figura 5. Distribución de poros.

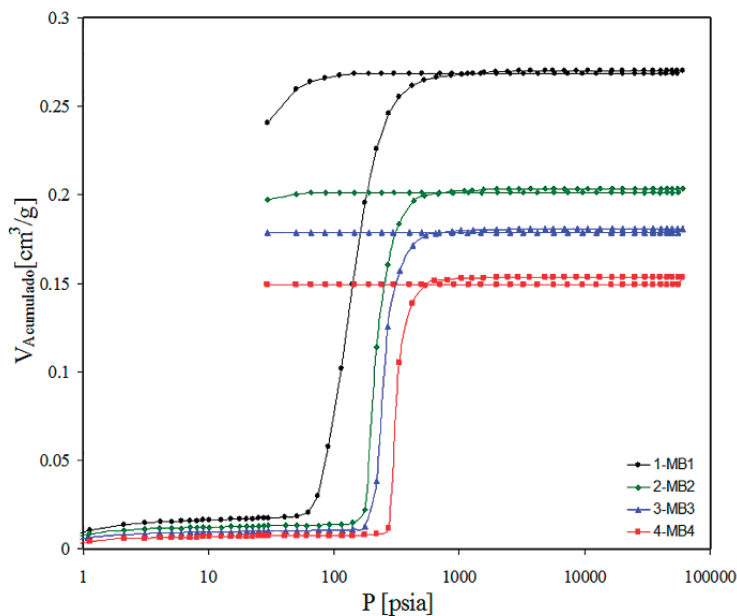


Figura 4. Volumen acumulado de poros.

Este comportamiento se puede observar cuando se grafica el diámetro promedio de poros contra el tiempo de molienda, con la tendencia que se muestra en la Figura 3.

De la figura se puede observar que a un tiempo de molienda de 4 h, las condiciones de la carga de bolas utilizadas y las revoluciones del molino son adecuadas, ya que se obtiene un diámetro de poros similar a las membranas obtenidas en el CIPIMM, las cuales dieron resultados positivos en los ensayos prácticos. En general responden a los parámetros normados para este tipo de membranas.

Para determinar el volumen acumulado total de poro en la muestra MB4 (Figura 4), se aplicó una mayor presión como resultado de una distribución del diámetro de partículas de los poros más estrecha, como puede verse en la Figura 5.

Es posible observar que la distribución de poros es muy estrecha para MB4, lo que es similar a muestras ensayadas en el CIPIMM. Esta distribución tiende a ser unimodal, y el diámetro de poros se encuentra aproximadamente entre 0,5 y 0,1 μm, centrados a los 0,67 μm, que corresponde al menor diámetro de poros y se encuentra en el rango de membranas de microfiltración.



Figura 6. Lote de membranas tubulares obtenidas.

En la Figura 6 se puede observar el lote de soporte y membranas tubulares obtenidas, las cuales presentaron buenas propiedades de resistencia mecánica.

En trabajos desarrollados en el CIPIMM se han obtenido resultados favorables en el tratamiento de agua con el empleo de membranas cerámicas similares obtenidas con otras materias primas.

CONCLUSIONES

- Se logra obtener membranas cerámicas mediante el empleo del método cerámico usando la técnica de moldeo.
- Las materias primas cubanas empleadas en la formulación cumplen con los parámetros establecidos para este tipo de material.
- Se obtuvo un lote de membranas tubulares cerámicas, con potencialidad para el empleo en el tratamiento de aguas y aguas residuales.

RECOMENDACIONES

Se debe realizar la caracterización estructural y funcional de las membranas cerámicas obtenidas (punto de burbuja, permeabilidad hidráulica).

BIBLIOGRAFÍA

- Almandoz, M. C., 2009 a. *Membranas cerámicas de microfiltración: preparación, caracterización y aplicaciones*. Tesis doctoral. Universidad de San Luis. Inédito
- Almandoz, M. C., 2009 b. *Flujo a través de membranas impulsado por presión*. Disponible en: <http://www0.unsl.edu.ar/~webseu/memoria2009.pdf>
- Burgfels, G., Kochloeft, K., 1989. *Nickel catalyst on alumina - calcium aluminate support for the steam reforming of hydrocarbons*. Pat. DE 3 705 183.
- Burggraaf, A. J., Cot L., 1996. *Membrane Science and Technology: Fundamentals of Inorganic Membrane Science and Technology*. Amsterdam: Elsevier.
- Burggraaf A. J., Keizer, K., Hassel, B. A., 1989. *Ceramic nanostructure materials membranes and composite layers*. *Solid State Ionics*, 32 - 33 (2): 771 - 772.
- Denbrovetskaya, E. N., Levanyuk, T. A., Zaichuk, I. A., Sichkov, O. N., 1989. *Effect of alkaline additives on the activity and coking of a nickel catalyst for natural gas conversion*. *Jim. Tekhnol. (Kiev)*, 3: 22 - 27.
- González, C; Delgado, B. 2005. *Tecnología para la producción de membranas*. Informe de investigación. La Habana: CIPIMM. Inédito
- Egiazarov Y. G., Potapova, L. L., Cherches, B. K., Savchits, M. F., 1986. *Support for a catalyst of pyrolysis of hydrocarbon raw material*. Pat. SU 1 243 8112.
- Kasabova, N., Shishkov, D., Velinova, T., 1988. *Structure formation of high-temperature supports in the presence of additions*. *Jim. Ind.*, 60 (10): 456 - 458.
- Marchese, J., Amaral, M., 1999. *Aplication of ceramic membrane to slaughterhouse. Wastewater treatment*. *Global symposium on recycling, waste treatment and clean technology*, Volume 11.
- Yu, C., Klein, L. C., 1992. *Supported alumina membranes by an in situ sol-gel method*. *J. Amer. Ceram. Soc.* 75 (9): 2613 - 2614.

PAUTAS PARA LA ENTREGA DE LOS ARTÍCULOS PARA SER PUBLICADOS EN EL ANUARIO DE LA SOCIEDAD CUBANA DE GEOLOGÍA

Los autores de las contribuciones deberán editar sus artículos con las pautas o reglas generales de preparación que se presentan en este documento. Los textos deben entregarse en formato digital Microfoft Word con las figuras insertadas y acorde con el formato establecido. Las figuras además, deben ser enviadas a parte con calidad (300 dpi) en formato *.jpg, debidamente identificadas (Fig 1, Fig 2, etc). Las ilustraciones pueden ser en tonos de grises o color, revisar que sean bien legibles los textos incluidos en las figuras. No se le debe colocar ningún encabezado "header" o nota al pie "footer", pues dicho espacio será utilizado por la editora para otros datos.

Debe procurarse mantener el formato lo más simple posible, sin añadir macros ni formatos escondidos, pues ello dificulta, sino impide su edición posterior. Todos los trabajos deben haber sido aprobados por el consejo científico, consejo técnico, o la dirección de la institución, y debidamente autorizados por esta en los casos necesarios. La SCG no se hacen responsables del contenido de las ponencias. Las contribuciones que no cumplan los requisitos serán eliminadas automáticamente y sin reclamación por los autores.

FORMA DE ENVÍO

Se enviará a La Sede de la SCG, en la Habana dirigido al Comité editorial. El fichero debe tener el nombre y apellidos del autor, así como las figuras adjuntas en formato jpg enumeradas según el documento. Puede enviarlo en formato comprimido (rar) si es necesario. Utilice las vías que entienda más expeditas y seguras para que nos llegue (CD Rom, correo electrónico u otro)(correo de la revista SCG *geociencias@mnhnc.inf.cu*).

REGLAS PARA LA PRESENTACIÓN DE LAS CONTRIBUCIONES

Los artículos deben ser sin falta revisados minuciosamente por los autores para eliminar los errores gramaticales y ortográficos. El Comité editorial no corregirá los textos por gramática ni ortografía, y si los mismos tienen muchas faltas no serán aceptados.

El título de letra tipo "arial 14", en negritas con alineación justificada. El título no debe sobrepasar las tres líneas, sin punto final.

Después de un espacio los autores, nombres y dos apellidos, justificado, letra arial 12, negrita y cursiva (itálica). Si son de más de una institución señalarlo con números en el súper índice. Si todos son de la misma institución, no es necesaria la numeración.

Después de un espacio las direcciones de las instituciones a las cuales pertenecen los autores precedidos del número correspondiente, justificado, en letra arial 10, cursiva, sin dejar espacio entre una y otra (institución, dirección y correo electrónico).

Dos espacios y la palabra Resumen, letra arial 12, mayúscula, negrita, alineada a la izquierda. Después de un espacio en no menos de 100 palabras ni más de 250, en línea simple, sin dejar una línea entre párrafos. Letra arial 10, justificada, sin sangría, el contenido deberá reflejar el estado de la temática o hipótesis de partida, los materiales y métodos utilizados y sobre todo los resultados principales.

Un espacio y la palabra Abstract, letra arial 12, mayúscula, negrita, alineada a la izquierda. Un espacio después y siguiendo las mismas pautas del resumen en Español, un resumen en Inglés. Todos los trabajos incluirán ambos resúmenes.

Cuerpo del trabajo: Después de dos espacios comienza el cuerpo del artículo, con el encabezamiento, en dos columnas de igual ancho y espacio entre ellas de 1 cm. Todos los encabezamientos en mayúsculas, se utilizará la misma tipografía. Letra arial 12, mayúscula, en negrita, alineada a la izquierda. (INTRODUCCIÓN, MATERIALES Y MÉTODOS, RESULTADOS, DISCUSIÓN, CONCLUSIONES, BIBLIOGRAFÍA)

Todo el texto del artículo letra arial 11, interlineado simple, justificado, un espacio entre párrafos. Dejando también un espacio después de los encabezamientos, entre tablas y figuras con el texto. Si fuera necesario utilizar algún otro subtítulo entonces sería letra arial 11, tipo oración, negrita, alineada a la izquierda.

OTRAS REGLAS GENERALES

Formato: Cada artículo deberá tener un mínimo de 5 páginas. En la configuración de la página (Papel) formato carta (21,59 * 27,94 cm. ó 8,5 * 11 pulgadas.), aplicar a todo el documento. En Diseño establecer pares e impares diferentes, primera página diferente, de encabezado y pie debe tener 1.25 mm. Márgenes, orientación vertical, en varias páginas: márgenes simétricos, interior: 3 cm; exterior, superior e inferior 2 cm.

El texto en Microsoft Word 2000 o superior (*.doc), justificado, debiendo incluir todo el texto y cualquier ilustración, tablas, etc. Debe ajustar todo a este formato de página.

Tablas: Las mismas deberán ser cuidadosamente escritas, y compactadas sobre cada hoja, para que esta no sobresalga de los límites de página establecidos. Podrán ser incluidas dentro del texto siempre y cuando las mismas no ocupen la hoja completa, en caso contrario se incluirán al final del trabajo. Las mismas deberán ser numeradas consecutivamente, utilizando numerales romanos (Tabla I, II, III...), debiendo incluir una descripción concisa, como título de la tabla, la cual aparecerá un espacio antes de la tabla (encima), en fuente arial a tamaño de letra 10, altas y bajas, cursiva, alineada a la izquierda. Las unidades deberán ser indicadas entre paréntesis en el tope de la columna, o a lo largo del lado, para no tener que repetir en cada línea de la tabla. Si usa abreviaturas en la tabla, que sean estas descritas (a modo de leyenda) entre paréntesis como parte del encabezado o título)

Figuras: Las figuras (incluyen dibujos, gráficos y fotos), pueden ser a color o blanco y negro, deberán estar limitados a los que necesariamente sirvan para dar claridad a la materia objeto de estudio de que se trate. Estas deben ser entregadas en ficheros a parte, en formato jpg. Deben además ser incluidas en el texto, con formato de ajuste de texto cuadrado, numeradas, consecutivamente, utilizando numerales arábigos (Figura 1, 2, 3...). Los caracteres o símbolos utilizados deberán tener un tamaño que garantice la legibilidad. Una descripción concisa deberá aparecer como pie de cada figura, en fuente arial a tamaño de letra 10, altas y bajas, cursiva, alineada a la izquierda. No debe en ningún caso la figura, salirse de los márgenes establecidos.

Unidades de las Mediciones: Todas las mediciones deberán ser expresadas en las unidades recomendadas por el Sistema Internacional de Medidas.

Referencias bibliográficas: La bibliografía deberá estar limitada a las publicaciones citadas en el texto, listadas en orden alfabético, en ningún caso enumeradas, dejando sangría en el segundo párrafo, (sangría especial francesa de 0,5 cm., letra arial 10), sin espacio entre una y otra, justificada. Se muestran algunos ejemplos para ilustrar la forma de poner las referencias bibliográficas.

Para publicaciones periódicas: Autor (por primer apellido del autor principal, e inicial del nombre; el resto de los autores inicial del nombre seguido del apellido), Año de publicación, título del artículo, nombre de la publicación en *itálicas*, lugar entre paréntesis, en el idioma de la publicación, volumen, en números arábigos, número entre paréntesis, en números arábigos, paginación precedida por dos puntos. Autor, Año. Título del artículo. Publicación (lugar), volumen (número): paginación

Pick, M., 1987. On the calculation of the gravity terrain corrections in Czechoslovakia. *Studia. Geoph. et Geod.*, 39 (4): 245-248.

Elbaz-Poulichet, F., D.M. Guan, J. M. Martin, 1991. Trace metal behaviour in a highly stratified Mediterranean estuary: the Krka (Yugoslavia). *Mar. Chem.* 32: 211-224.

Para libros u otros documentos: Autor (por primer apellido del autor principal, e inicial del nombre; el resto de los autores inicial del nombre seguido del apellido), Año de publicación, título, edición, , ciudad, editora, numero de volúmenes, si hay más de uno o numero de páginas si es uno solo, título de la serie y número, anotación. Autor, Año. Título. Edición, Lugar: Editora, páginas

Finó, F., 1950. Historia y técnica del libro. En Penna, C. V. Bibliotecología. Buenos Aires : Kapelusz, 132p.

Smith, G., 1989. Theories pertaining to the mass extinctions at the end of the Cretaceous. Ph.D. thesis, University of London: 109p.

Zavala, S., 1996. La defensa de los derechos del hombre en América Latina. 2. ed. Madrid : Grijalbo: 145 p. (Selección, 4).

Documento electrónico:

Autor, fecha. Título [en línea]. Disponibilidad o acceso

Van der Hoek, B., 1998. Study of Carbonate rocks: <http://www.elsevier.com/locate/jstrugeo>



SU INSTITUCIÓN PUEDE:

- **GANAR PRESTIGIO Y FORTALECER SU IMAGEN**
- **VENDER MÁS E INCREMENTAR SUS INGRESOS**

ANÚNCIESE EN NUESTRA REVISTA

CONTÁCTENOS

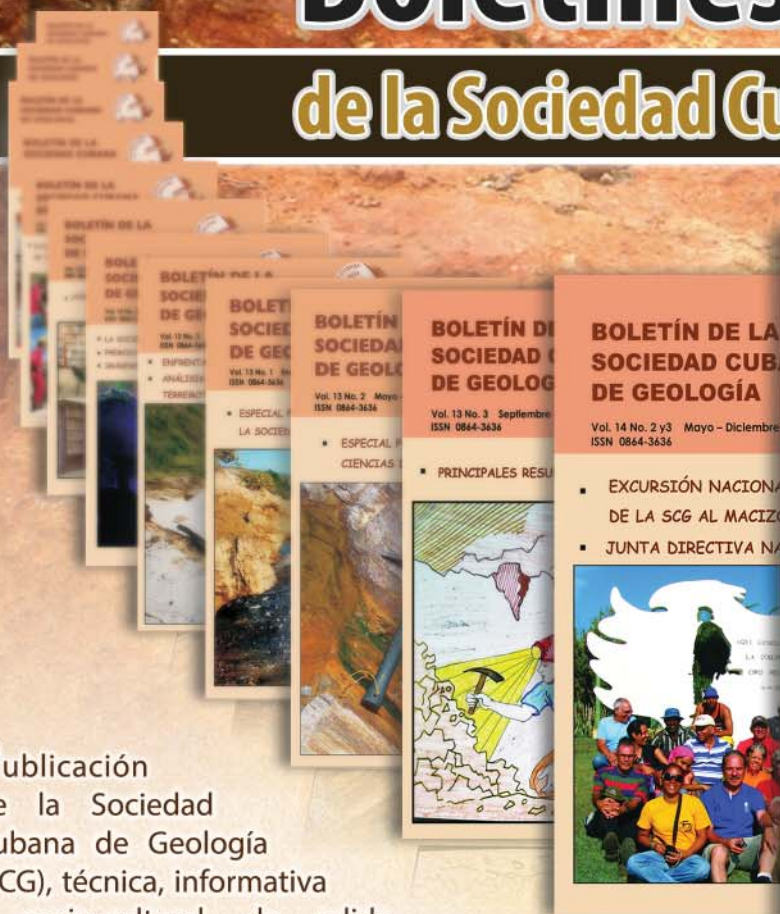
teléfonos: (53) 7 860 0197

correo: scg@mnhnc.inf.cu, geociencias@mnhnc.inf.cu

DISTINGA SU EMPRESA EN EL MERCADO

Boletines

de la Sociedad Cubana de Geología



Publicación de la Sociedad Cubana de Geología (SCG), técnica, informativa y socio-cultural, de salida cuatrimestral y con el objetivo principal de divulgar el quehacer de nuestra Sociedad. Creado en 1983, constituye la principal herramienta de divulgación de los objetivos y sueños de la SCG, hacia dónde nos dirigimos, qué queremos y qué hacemos, es el testigo de la historia social de nuestra organización.

Aparecen noticias de las actividades que desarrollan nuestros asociados y que nos envían ilustradas desde las Filiales Territoriales en todo el país. Se dan a conocer los principales eventos relacionados con las Geociencias, los premios otorgados así como los destacados en su labor por la sociedad.

Con su contenido de notas técnicas y artículos cortos de interés general para nuestras especialidades, es indiscutiblemente un material de consulta técnica. Echa a volar en su sección Geopoética el lado romántico y poético de nuestros afiliados. Divulga también el resultado de los diferentes concursos que la SCG realiza, especialmente el de niños "La Tierra está Viva" y el de Geofotos.

BOLETÍN DE LA SOCIEDAD CUBANA DE GEOLOGÍA



Vol. 14 No. 1 Enero – Abril 2014
ISSN 0864-3636

- 35 ANIVERSARIO DE LA FUNDACIÓN DE LA SOCIEDAD CUBANA DE GEOLOGÍA

