

CARACTERÍSTICAS MAGNETICAS DE LA CORTEZA DE INTEMPERISMO Y SU BASAMENTO EN LA REGION NORORIENTAL DE CUBA.

Alfredo de J. Hernández Ramsay, Dra. Adis Rodríguez Cardona, Sergio Chavéz Gómez

Empresa Geominera de Oriente, Carretera Siboney, Km 2¹/₂ Santiago de Cuba
C. Eléct. : geominstgo@stg.minbas.cu

RESUMEN

Con el objetivo de ayudar a los geólogos, mineros y tecnólogos de la industria del Níquel a conocer las características físico-geológicas de la corteza de intemperismo y su basamento, a partir del año 1996 nos dimos a la tarea de establecer un complejo de métodos geofísicos, capaz de resolver problemas en la minería del Níquel, tales como:

- Mapeo Geológico Regional: utilizando la Aerogeofísica./2/
- Mapeo Geológico detallado: utilizando los métodos de Superficie (SEV-PI, Magnetometría)./1,2/
- Geometrización de la Corteza de Intemperismo, determinación del espesor de corteza y el relieve del basamento: utilizando los métodos de superficie(SEV-PI, Magnetometría, Gravimetría y Georradar)./1,2,4/
- Caracterización del mineral laterítico y mapeo de corteza y basamento máfico y ultramáfico: utilizando la Magnetometría Terrestre y los valores de la Susceptibilidad Magnética medidos a muestras de pozos criollos y de perforación./3/

En el presente trabajo se expone la metodología empleada para la medición de la Susceptibilidad Magnética a muestras fundamentalmente de la corteza, aunque se trabajó con muestras de la corteza y basamento, además se muestran ejemplos de la distribución de los valores de la Susceptibilidad Magnética en la corteza y el basamento y su relación con el quimismo y los litotipos de la corteza y el basamento.

INTRODUCCIÓN

La Susceptibilidad Magnética es una propiedad física más de cada mineral relacionada con el origen y formación del mismo. Su magnitud puede ser fácilmente medible e indica muchas veces los procesos geológicos (el grado e intensidad de alteración) sufrido o que posee dicho mineral, es capaz de revelar el punto o estadio en que se encuentra un mineral dentro de su transformación de un mineral por otro y como los minerales son los que constituyen las rocas, entonces el estudio de éste parámetro físico nos lleva al conocimiento de las características físico-geológicas de los mismos y al completamiento de la información geológica.

El estudio de la Susceptibilidad Magnética en la corteza de Intemperismo y el basamento posibilitó:
Caracterizar Magnéticamente la corteza y el basamento laterítico, contribuyendo a la interpretación de la Magnetometría área y de superficie.
Mapear del material Ultramáfico y Máfico de la corteza y el basamento laterítica.
Determinar la correlación del parámetro con los datos Geológicos, Químicos.
Crear y establecer una metodología de medición de la Susceptibilidad Magnética a las muestras de la corteza de intemperismo.

Durante la caracterización de la corteza de intemperismo y el basamento se realizaron mediciones a:

- ❖ Muestras de pozos de perforación.
- ❖ Frente de cantera
- ❖ Pozos criollos
- ❖ Muestras en puntos clave dentro del Proceso Fábril de Empresa Cdmte. Che Guevara.

Los estudios de la Susceptibilidad Magnética abarcaron los siguiente Yacimientos:

1. Camarioca Este
2. Punta Gorda
3. Martí Grupo VII
4. Vega Grande
5. Luz Norte
6. Pinares de Mayarí Oeste
 - Cuerpo A
 - Cuerpo B
 - Cuerpo D
 - Cuerpo E
7. San Felipe

METODOLOGÍA EMPLEADA EN LA REALIZACIÓN DE LAS INVESTIGACIONES GEOFÍSICAS DE CAMPO.

Se realizaron mediciones a todas las muestras que el geólogo tomó en el campo para realizarle análisis químicos, mineralógicos y tecnológicos. El número de mediciones a realizar estuvo en dependencia del tipo de muestra y el volumen (húmeda de campo. Seca de campo y Seca pulverizada). La caracterización magnética de la corteza y el basamento se realizó con un volumen de material similar al que se tomó para caracterizar químicamente la corteza y el basamento por los geólogos, mineros y tecnólogos. En los estudios e investigaciones mineralógicas y tecnológicas las mediciones de la Susceptibilidad Magnética se realizaron para caracterizar y correlacionar solamente el material de la muestra analizada con sus atributos y parámetros mineralógicos y tecnológicos.

EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE LAS MEDICIONES

Durante las mediciones se emplearon 2 Equipos: El SM-5 que mide en unidades $\times 10^{-3}$ y el IMV-2 $\times 10^{-6}$ (el mas usado), de fabricación Canadiense y Rusa respectivamente, con los cuales se realizaron mediciones conjuntas (**ver Figura No. 2**) calculándose las diferencia y el error absoluto y relativo de ambas mediciones y equipo, así como el coeficiente de llevar una medición de un equipo a otro, utilizando el software **CONTROLE /5/**, llevándose todos los datos a la unidad $\times 10^{-3}$. Actualmente se incorporó un nuevo equipo, el KT-5, de fabricación Checa, comparando sus mediciones con el IMV-2 y realizándole el mismo procedimiento mencionado.).

El control de la calidad se efectuó mediante la repetición y la realización de mediciones conjuntas con dos equipos y fue evaluada por medio de la fórmula del **Error Relativo**, (según la norma ramal) y mediante la utilización del software **CONTROLE /5/**, el cual fue siempre menor del 10 %.

Con el objetivo de verificar la calidad de las mediciones realizadas a las muestras secas y pulverizadas y comprobar que no se estaba produciendo una remediación de partículas y minerales implicando una amplificación o un apantallamiento de la intensidad de la Susceptibilidad Magnética por el movimiento de ellas en el saquito o cartuchito de nylon o papel, (**aunque siempre se presionaba el recipiente para evitar movimiento del material**) se realizaron mediciones con tales recipientes y con recipiente donde el material estaba comprimido y no podía moverse (Tubitos de Plástico, desodorante) cuyos resultados se muestran en la **Figura No. 4**. Tales mediciones como puede observarse son idénticas, presentan las mismas forma pero por el grosor del tubito son muy apantalladas.

Además se realizaron mediciones a la Muestra de Húmeda de Campo y a la misma Muestra secada en la estufa y pulverizada, la cual está lista para realizarle análisis químico, como puede observarse en la **Figura No. 5b-c**, las diferencias entre ambas mediciones no son groseras y se observa las mismas tendencias.

También se realizaron mediciones comparativas con las muestras mineralógicas de granulometría <0.074 mm (arcilla), muestra en forma de torta, la cual hubo que seccionarla en forma de pequeños turroncitos y medir cada uno, después se pulverizó cada muestra y se volvió a medir y el resultado se muestra en la **Figura No. 5a**, apreciándose una misma tendencia general.

Los pasos seguidos en las mediciones de la Susceptibilidad Magnética se enumeran a continuación.

1. Preparación del equipamiento (calibración, verificación del estado óptimo del equipo).
2. Toma de los datos específicos a cada muestra (datos georeferenciales y geológico-mineralógicos-tecnológicos en dependencia del caso así como el nombre del equipo, rango de medición, operador y la fecha).
3. En caso de que la muestra sea seca, y esté en recipiente de nylon o papel, puede agitarse el recipiente con las manos intentando una homogenización del material, después comprimir el tamaño del mismo hasta lograr que el material tenga el menor movimiento posible.
4. Garantizar en cada medición que la superficie de contacto de la muestra con el detector sea plana y abarque toda el área del detector del equipo.
5. En caso de muestra húmeda de campo, se le dará una forma a la muestra de un rectángulo cuyas caras tienen que ser planas para lograr un mayor acoplamiento entre la muestra y el sistema de medición del equipo.
6. La cantidad de mediciones a una muestra estará en dependencia del volumen, tamaño y del grado de homogenización de la misma, para el caso del volumen y tamaño puede recomendarse analizar la y de acuerdo con el grado de homogenización pueden simplificarse mediciones.
7. El número de mediciones a controlar y la evaluación de la calidad, estará en dependencia del volumen de muestra medida, según las normas ramales vigentes.

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS Y DISCUSIÓN

Yacimiento Pinares de Mayarí Oeste.

En los 4 sectores o cuerpos estudiados no se observa una regularidad, una dependencia de éste parámetro con la profundidad y la litología, los valores intensos pueden aparecer en cualquier capa litológica y en cualquier nivel dentro de la corteza de intemperismo y su basamento, Se concentran adoptando formas disimiles, (**ver Figura No. 6**) las cuales deben coincidir geológica y espacialmente con concentraciones de minerales magnéticos entre ellos la Maghemita y Magnetita (según análisis de Rayos X realizados en la Universidad de Barcelona y en el CIPIN Habana).

Independientemente que no se observan asociación espacial entre las capas litológicas y la Susceptibilidad Magnética, si debemos de resaltar que los valores más intensos (7.0×10^{-3} UCGSM) se localizaron dentro de los Ocre Inestructurales con perdigones, (**ver Figura No. 6, Límites de valores de la Susceptibilidad Magnética**), se observa además una buena diferencia entre los valores de la Susceptibilidad Magnética de la corteza Ultramáfica y la de los Garbos. Entre las cortezas de los 4 cuerpos estudiados también se observan diferencias, pues en la corteza del cuerpo "E", se localizan los valores mas altos de la Susceptibilidad Magnética, sin embargo de acuerdo a la media, la corteza del cuerpo "D" posee los valores más intensos.

En cuanto al quimismo, (**ver Figura No. 6, Correlación de la Susceptibilidad Magnética y la Geoquímica en la corteza**), se observan ligeras correlaciones directas con el Fe, Co, MnO, de acuerdo con el primer umbral del valor crítico e inversa con el SiO₂, Al₂O₃, MgO, algo similar ocurre cuando correlacionamos todos los datos de la corteza y el basamento.

CONCLUSIONES

1. Con los equipos utilizados se puede medir la Susceptibilidad Magnética de las muestras tomada de la corteza de intemperismo y su basamento, utilizando la metodología empleada y descrita anteriormente, **la cual consideramos que no es absoluta.**
2. Con los resultados de la mediciones de la Susceptibilidad Magnética, se pudo conocer las características magnéticas de la corteza de intemperismo, completando su conocimiento y ayudando a la interpretación de la magnetometría.
3. No se observó una relación entre la Susceptibilidad Magnética y los distintos tipos litológicos en la corteza de intemperismo y su basamento,
4. Desde el punto de vista de la Susceptibilidad Magnética existen diferencias bien marcadas en cuanto al mineral que constituyen los diferentes Yacimientos, Cuerpos, Bloques y Pozos, importante a tener en cuenta a la hora de mezclar un mineral con otro y mandar para la industria, pues no todos van a tener un mismo comportamiento industrial.
5. El conocimiento del valor de la Susceptibilidad Magnética del mineral que vamos a explotar puede ayudar a completar la información sobre éste y a realizar una mejor selección al mezclar material de diferentes puntos.
6. Se observan dos tipos de minerales desde el punto de vista de la Susceptibilidad Magnética:
 - Mineral con contenido de Níquel industrial y alto valor de Susceptibilidad Magnética ($>1.0 \times 10^{-3}$ UCGSM o SI)
 - Mineral con contenido de Níquel industrial y bajo valor de Susceptibilidad Magnética ($<1.0 \times 10^{-3}$ UCGSM o SI), los cuales deben tener diferentes comportamiento tecnológico.
7. En muestras con Susceptibilidad Magnéticas altas se encontró Maghemita y Magnetita.
8. En los trabajos o estudios mineralógicos, fundamentalmente en la separación de la fracción magnética, electromagnética y no magnética, la medición de la Susceptibilidad Magnética puede ayudar a evaluar la calidad del trabajo, pues en general todas las muestras Magnética se enmarcan en un intervalo mayor de 1.0×10^{-3} UCGSM, la electromagnética en un intervalo menor de 1.0×10^{-3} UCGSM, mientras que la no magnéticas en un intervalo menor que 0.001×10^{-3} UCGSM.
9. Todas las muestras a las cuales se le midió Susceptibilidad Magnética en el yacimiento Pinares Oeste de la corteza de composición gabroide o máfica posee valores menores o iguales a 0.22×10^{-3} UCGSM, por lo que el método promete ayudar al mapeo del material Ultramáfico y Máfico.
10. Puede utilizarse (para las lateritas), como medición para evaluar la calidad con que se realiza el cuarteo y la toma de la Muestra para el Químico y la Muestra Duplicado, pues los valores medidos de Susceptibilidad Magnética de ambas muestras coincidirán si son idénticas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- /1/ Hdez. Ramsay A., Chávez Gómez S. "Informe de los Trabajos Geofísico Metodológico Experimental en Corteza laterítica" 11-1996
- /2/ Hdez. Ramsay A., "Informe Tema Laterítica "1999
- /3/ Hdez. Ramsay A., "Informe Tema Laterítica "2000
- /4/ Hdez. Ramsay A., Acosta Brark J. "Informe dde los trabajos Geofisicos Experimentales en el Yacimiento Pinares de Mayarí Oeste "1998
- /5/. Cadete L. M, Lavawt C.W.; "SOFTWARE CONTROLES", EGMO, 1999.

Fig. No. 2 Mediciones Conjuntas IMV-2 y SM-5

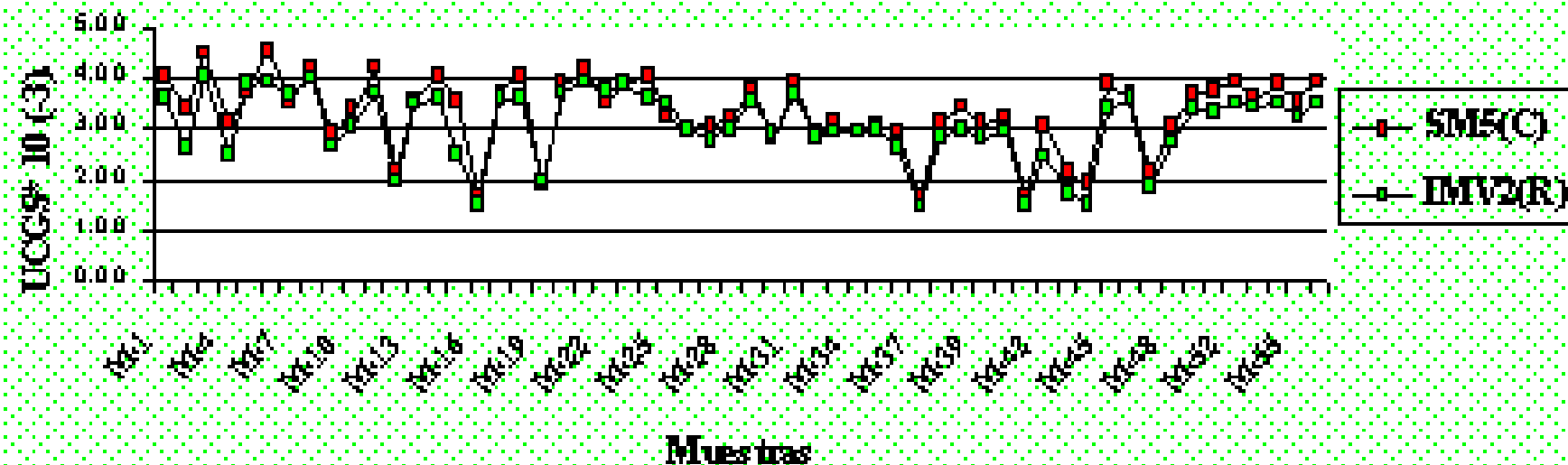


Gráfico # 1B. Estadísticas Desv.

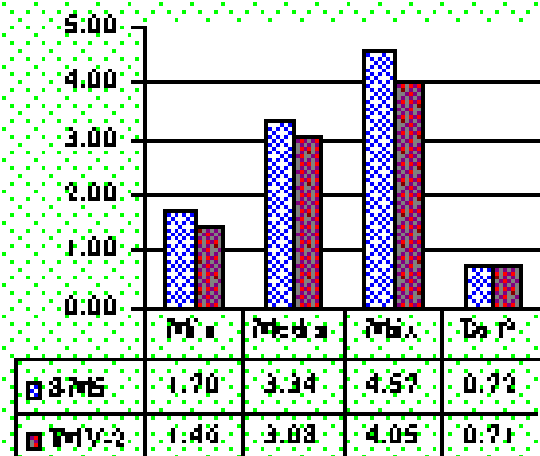


Gráfico # 1C. Diferencias.

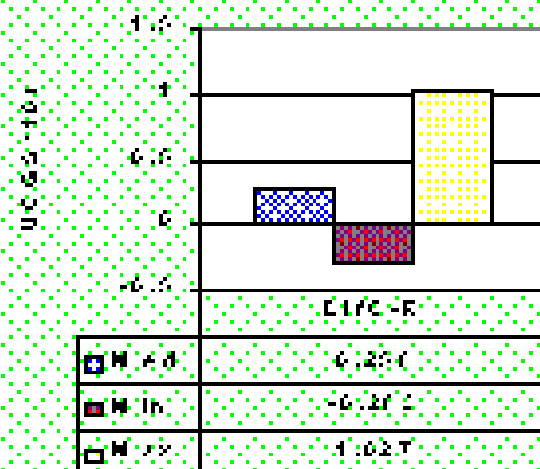


Gráfico # 1D. Diferencia Relativa
Coeficiente de Corrección (K) para S/d=5

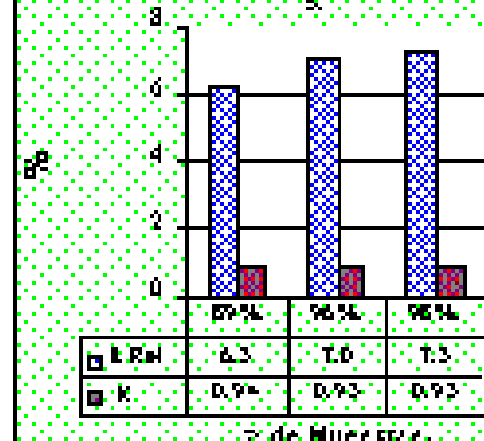


Fig. No. 4. Mediciones con Cartuchitos (SM.C)y Tubitos de Plástico (SM.P)

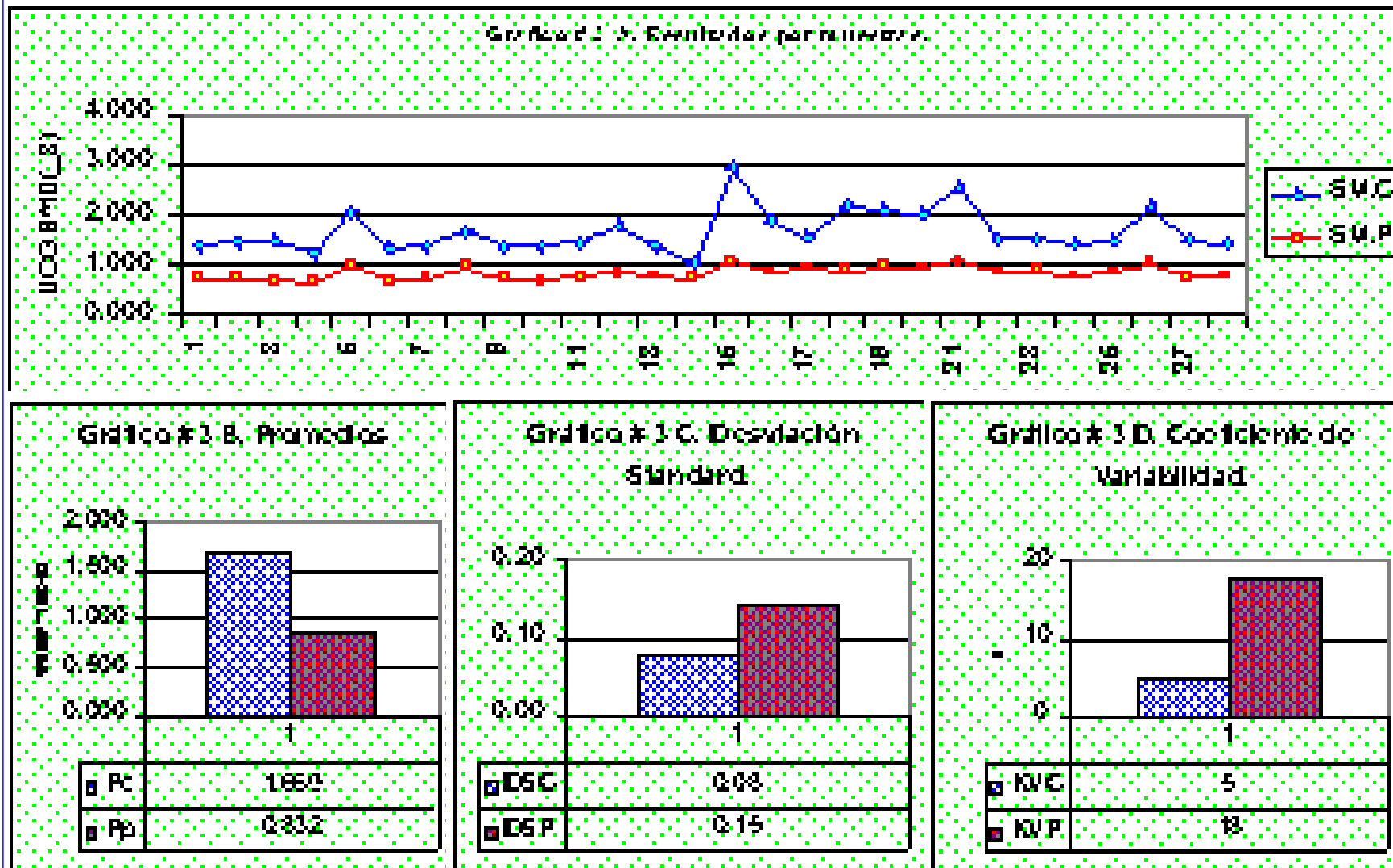


Fig. No. 5a Comparacion de las Mediciones en Muestras de granulometría <0.074, (arcilla) en forma de turrones (H<0.074) y después que se pulverizó (H.A.P074)

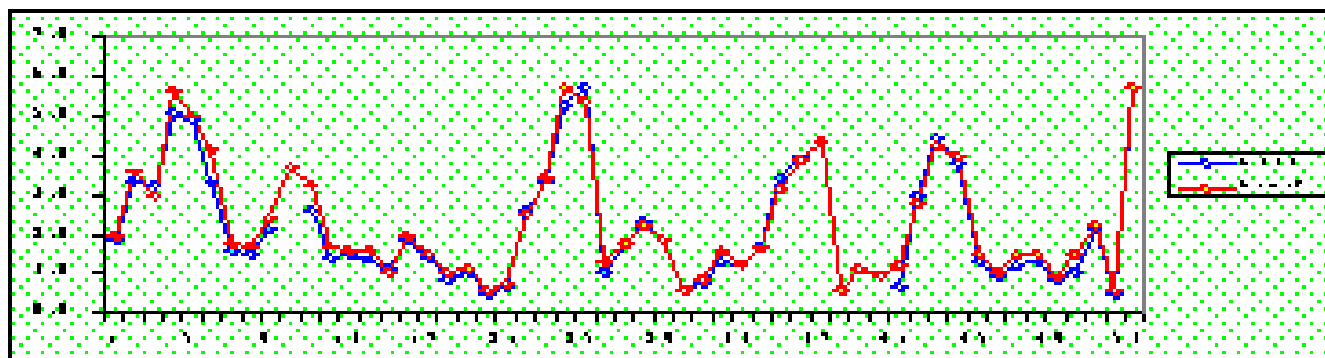


Fig. No 5b. Comparación de las Mediciones en las Muestras Humeda de Campo (SM.C) y la misma muestra después que se seca en la estufa y se pulveriza (SM.Q) Región Nicaro

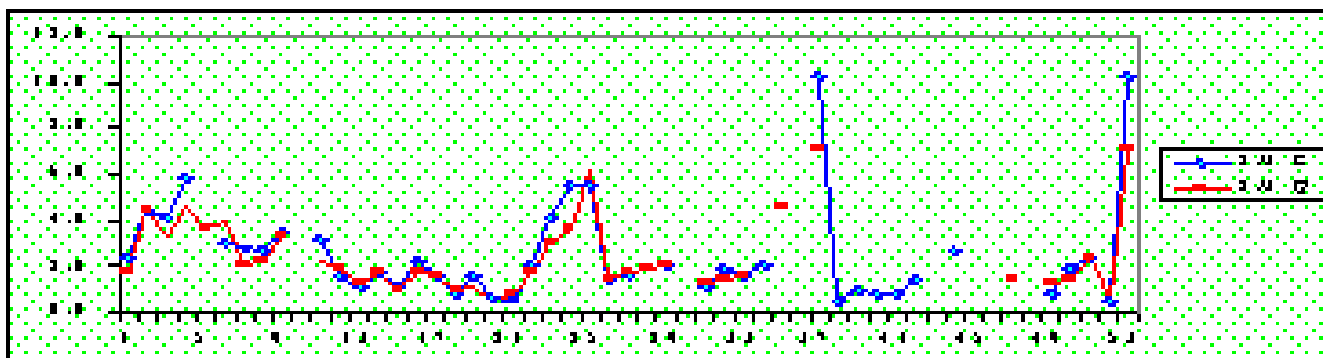


Fig. No. 5c. Comparación de las Mediciones en las Muestras Humeda de Campo (HHC) y la misma muestra después que se seca en la estufa y se pulveriza (HSP) Región Moa, Yacimiento Punta Gorda

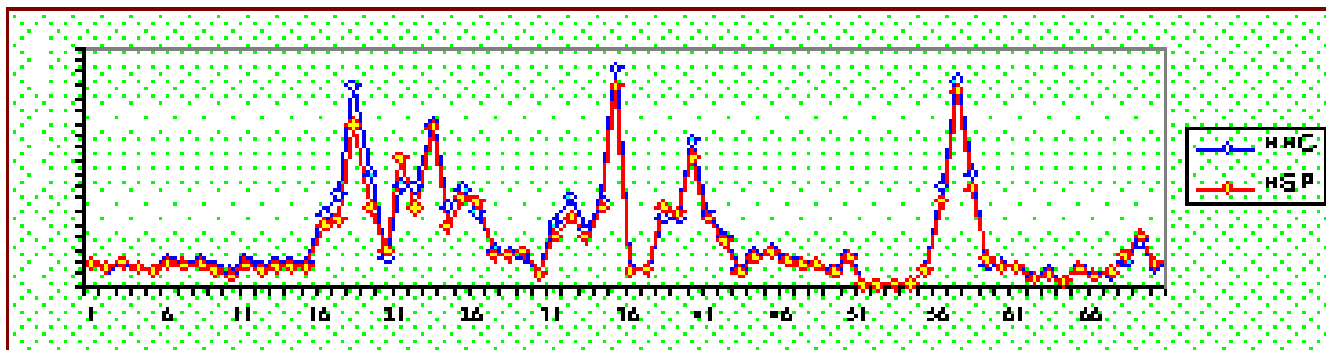
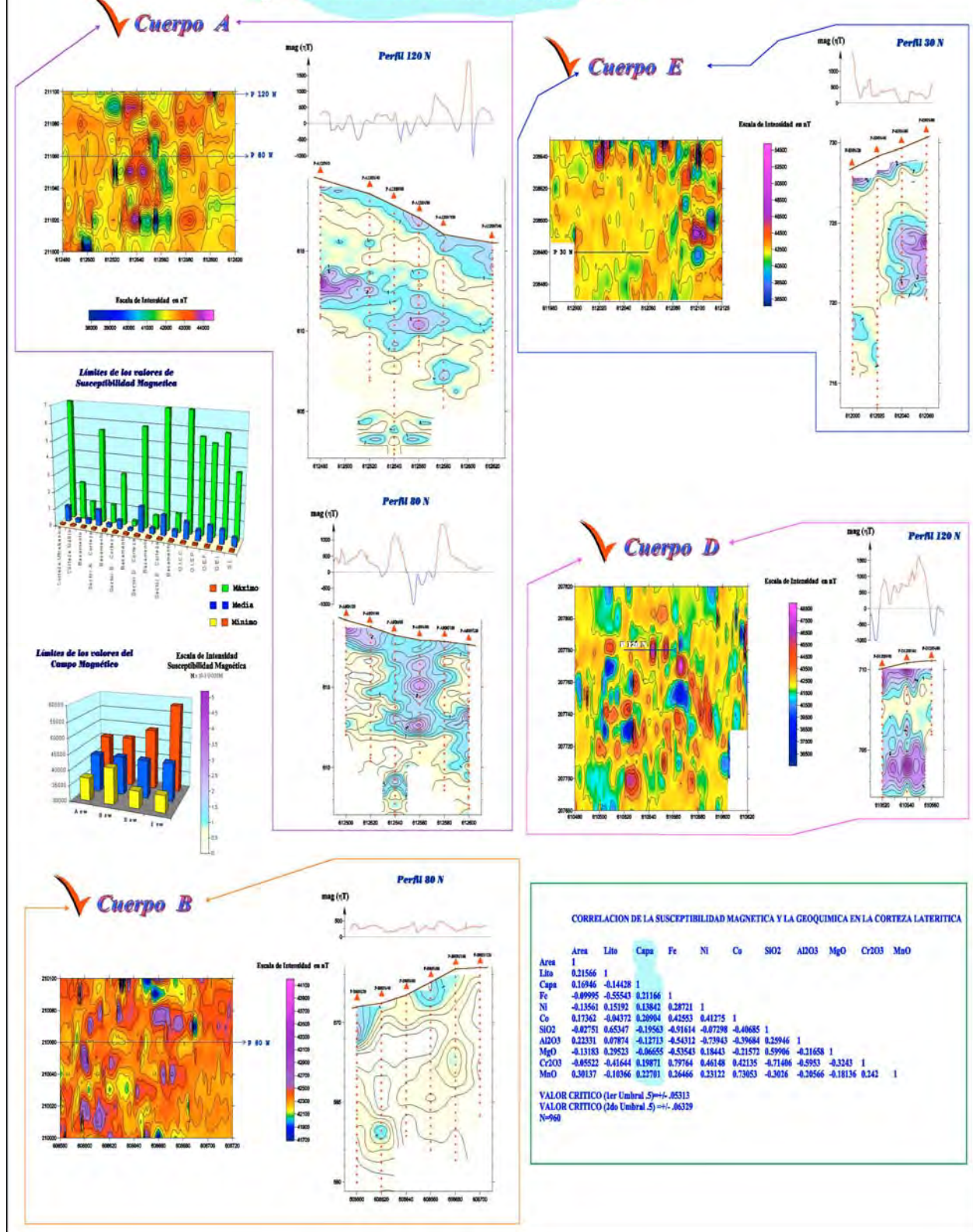


Fig. No. 6 Yacimiento Pinares de Mayarí Oeste





ANÁLISIS DE LOS POLOS PALEOMAGNETICOS PARA ALGUNAS AREAS DE CUBA Y REPUBLICA DOMINICANA

José Pérez Lazo (1) y Manuel J. Fundora Granda(2).

(1) Departamento de Geociencias, Instituto Superior Politécnico “José A. Echeverría”, La Habana, Cuba. E-mail: jperezl@civil.ispjae.edu.cu.

(2) Departamento de Geofísica Regional y Riesgos, Instituto de Geofísica y Astronomía, CITMA, La Habana, Cuba. E-mail: fundora@geoastro.inf.cu.

RESUMEN

En Cuba, un grupo de paleomagnetólogos, solos o en cooperación con otros investigadores de Europa y Norteamérica, han conducido investigaciones paleomagnéticas por mas de 12 años en Cuba y la Española, pero pocos resultados han sido publicados (Renne P. et al., 1991, Perez Lazo J. et al, 1991, Chauvin A. et al, 1994, Bazhenov M. Et al, 1995, Garcia A. et al, 1995) o presentados en resúmenes de eventos (Perez Lazo J, et al, 1989, Fundora Granda M. et al, 1994, Perez Lazo et al, 1994, Fundora Granda M. et al, 1994, Fundora Granda M., et al, 1996, Perez Lazo J. et al, 1998, Alva Valdivia L.M., et al, 2000).

Para La Española la situación es similar y sólo algunos resultados preliminares han sido publicados (Vincenz S.A. & Dascuota S.N., 1978, Kent D.V. & Maurrasse F.J., 1981, Van Fossee M. C. And Channell J.E.T., 1988, Thomas S., 1995) o reportados en eventos científicos (Perez Lazo J et al, 1994, Perez Lazo J. et al, 1998), no realizando generalizaciones de esos resultados.

En este reporte se presenta un análisis integral de los datos paleomagnéticos disponibles, calculándose los paleopolos correspondientes a diferentes unidades de origen continental u oceánico de Cuba y La Española para los tiempos del Jurásico, Cretácico y Paleógeno y comparándolos con sus correspondientes para la placa Norteamericana. Se dan algunas conclusiones generales acerca de las rotaciones y desplazamientos latitudinales que han sufrido esos terrenos.

ABSTRACT

In Cuba a group of cuban paleomagnetologists, alone or in cooperation with other europeans, mexicans and americans have conducted for more than 12 years paleomagnetic researches in Cuba and Hispaniola, but only a few results have been published (Renne P. et al., 1991, Perez Lazo J. et al, 1991, Chauvin A. et al, 1994, Bazhenov M. Et al, 1995, Garcia A. et al, 1995) or reported in abstracts (Perez Lazo J, et al, 1989, Fundora Granda M. et al, 1994, Perez Lazo et al, 1994, Fundora Granda M. et al, 1994, Fundora Granda M., et al, 1996, Perez Lazo J. et al, 1998, Alva Valdivia L.M., et al, 2000). For Hispaniola, people from europe, america and the Caribbean countries have carried out some paleomagnetic studies, with both magnetostratigraphic and tectonic purposes and there have only been a few papers (Vincenz S.A. & Dascuota S.N., 1978, Kent D.V. & Maurrasse F.J., 1981, Van Fossee M. C. And Channell J.E.T., 1988, Thomas S., 1995) and reports (Perez Lazo J et al, 1994, Perez Lazo J. et al, 1998). There have no been generalizations of these works in the last 10 years.

In this paper an integral analysis of paleomagnetic data is done by assessment of the paleomagnetic poles derived from all available paleomagnetic information about different units of continental and oceanic origin belonging to the Cuban and Hispaniolan foldbelts, basically for Upper Jurassic, Cretaceous and Paleogene times.

Some conclusions concerning the rotations and latitudinal displacements of the different blocks are given.

Introducción

En los últimos 20 años se han desarrollado varias propuestas de modelos geológicos que tratan de explicar la evolución geológico-tectónica del área del caribe desde el Jurásico hasta el presente (Pindell J.L., Mann W. P., Iturralde-Vinent M., Cobiella-Reguera J.L. y otros) Algunos de estos autores le dan un origen Pacífico que dio origen a las diferentes islas caribeñas, planteandose



desplazamientos fuertes hacia el noreste desde latitudes algo mas bajas que las actuales (Pindell J.L., 1994, Mann W. P., Draper G. And Lewis J.F., 1991); otros autores dan un origen caribeño a dicha placa planteandose su formación mucho más al suroeste de las posisiocnes actuales, la cual en sumovimiento al noreste sufre desmembramientos en el proceso de colisión de esta con la placa norteamericana y su posterior movieminto hacia el Este-Noreste predominante a través de la falla de corrimiento sinestral Oriente (Pindell J.L. and Dewey J.F., 1982). Una explicación para la zona Occidental de Cuba y más específicamente para el terreno Guaniguanico se expresa por una posible derivación del terreno de Yucatán en el proceso de apertura del Golfo de México con movimiento de rotación desde latitudes superiores la de su posición actual(Pindell J.L, 1994, Iturralde-Vinent M. A.,1994).

Los trabajos paleomagnéticos realizados y los que se proyectan para el futuro en el país tienden a dar respuestas a las diferentes interrogantes planteadas en los distintos modelos.

Son conocidos algunos de los trabajos presentados por el grupo de paleomagnetólogos cubanos (Pérez Lazo José, Fundora Granda Manuel J., García Rivero A. y Cruz Ferrán C.) desarrollados básicamente en algunas áreas de las partes Central y Oriental del país., los cuales han llegado a conclusiones preliminares sobre los movimeintos latitudinales y /o rotaciones que han sufrido las áreas investigadas (Pérez lazo J., Fundora Granda M., García Rivero A y Cruz Ferrán C, 1991, García Rivero A, 1995, Chacón R, García A. y Cruz C., 1993). Asi mismo este grupo de investigadores han trabajado con algunos investigadores extranjeros en el proceso de meustreo de afloramientos cubanos fundamentalmente en las partes occidental, central y oriental del país (Elming S.A.,1992, Renne O.,1990, 1992, Bazhenov M., 1992,1993, Pruner P.,1998, Urrutia Fucugauchi J., 1998 y Alva Valdivia L.M., 1999).

En la República Dominicana trabajaron como grupo, entre los años 1992-1995, los investigadores cubanos J. Pérez Lazo y M. Fundora Granda y Sten-Ake Elming, en las Cordilleras central, Septentional y Oriental asi como en las áreas del Suroeste de ese país antillano, llegando a obtener resultados interesantes sobre los movimientos paleotectónicos de estas áreas (Fundora Granda M., et al, 1995). Otro interesenate y abarcador trabajo en ese país fue el llevado a cabo por el alemán Stefan Thomas (1995), quien estudió las mismas regiones aunque en otros afloramientos y sitios de meustreo, llegando a conclusiones preliminares que permitieron tener los primeros criterios sobre el proceso evolutivo de esta isala. Otros autores trabajaron de forma parcial en la República Dominicana, como, Vincenz S. A. y Dasgupta N., D. V. Kent y Maurrase J.F., y Vanfossen M.C. y J.E.T. Channell, todos con objetivos muy puntuales.

Materiales y métodos.

En este trabajo, partiendo de los resultados parciales obtenidos por los diferentes grupos en las zonas estudiadas en ambas islas, se realizan un agrupamiento de los paleopolos geomagnéticos publicados y comparándolos con los paleopolos de referenciade la placa norteamericana para los diferentes intervalos de tiempo geológico(Harrison C.G.A., 1997), calcularon las rotaciones y desplazamientos latitudinales de los bloques, según el método desarrollado por Beck (1976, 1980).

En todos los trabajos realizados por los diferentes grupos, se utilizó una metodología similar de toma de muestras, tratamiento físico experimental de las muestras y procesamiento estadístico de los datos, establecidos para los trabajos de paleomagnetismo (Buttler R., 1998) y utilizando equipameinto estandar con que cuentan la mayoría de los laboratorios paleomagnéticos modernos.

Entre otras particularidades, los trabajos de los diferentes grupos indicaron que:

1. El proceso de meteorización sufrido por las rocas en nuestras condiciones tropicales afecta en muchos casos la estabilidad paleomagnética de las muestras , lo que conlleva a dessecar un número considerable durante eltratamiento experimental.
2. En general la desmagnetización térmica permite obtener los mejores resultados, pudiendose extraer buenas Componentes Remanentes Características para cada formación y período geológico estudiado, asi como otras componentes de origen secundario asociadas a diferenntes procesos histórico-geológicos y por componentes viscosas de la magnetización y otras asociadas a la acción de componentes no dipolares del campo geomagnético.
3. En prácticamente todos los casos se han podido determinar los protadortes de las magnetoremanencias características a través de las determinaciones de los puntos de Curie de los minerales, los experimentos de obtención de la Magnetoremanencia isotérmica y su desmagnetización gradual térmica o por campo alterno, los análisis minerográficos o de lazos histerésicos, etc. identificandose por lo general como portadores, la magnetita, las titanomagnetias y la hematita, asi como algunos hidróxidos de hierro productos de alteraciones secundarias.

Partiendo de la consideración de la validez de la infromación obtenida, se procedió a determina ren cada área los polos promedios para cada período geológico (en caso de exitis más de uno) y a calcular las rotaiones sufridas por las áreas. Además se obtuvieron las paleolatitudes de formación de las rocas según diferentes terrenos:

Para Cuba

Arco Volcánico Cretácico o terrerno Zaza

- Cuba Occidental

- Cuba Central
- Cuba Oriental Norte

Arco Volcánico Paleógeno o terreno Turquino

- Cuba Suroriental

Cuencas Superpuestas paleogénicas del Sur

Terreno Guaniguanico

Para República Dominicana

Arco Volcánico Cretácico

- Cordillera Central (terreno Tireo)
- Cordillera Oriental (terreno Seibo y Oro)

Formaciones del Paleógeno

- Terreno de Neiba

A partir de los paleopolos promedios obtenidos se calcularon los resultados de las rotaciones y transporte de cada bloque hacia los polos de referencia, en el espacio polar según el método de Beck y otros (1986) (ver figura No.1).

En la figura No. **R.-** es la rotación determinada para cada bloque y **p .-** el movimiento sufrido por el bloque correspondiente producto de la rotación.

Figura No 1.- Geometría requerida para determinar la rotación del bloque alrededor del eje vertical y su desplazamiento hacia el polo de referencia al comparar los polos observado y de referencia. RP es el polo paleomagnético de referencia (φ_r, λ_r) con $\alpha_{95} = A_r$; OP es el paleopolo Observado en (φ_o, λ_o) con $\alpha_{95} = A_o$; S es el sitio de muestreo (φ_s, λ_s); N es el norte geográfico; la línea discontinua une S, OP y RP a N, la región sombreada oscura es un triángulo esférico con vértices S, OP, RP y lados p_o, p_r y s, los círculos con sombreado claro son los círculos de confianza alrededor de los polos observado y de referencia, R es el ángulo de rotación del bloque alrededor de un eje vertical que pasa por su centro.

Resultados y Discusión

En la tabla No.1 se muestran los resultados obtenidos a partir de los cálculos realizados.

De acuerdo con estos resultados se puede hacer la siguiente interpretación geodinámica:

1. El desarrollo del Arco Volcánico Cretácico de Cuba en las partes Central y Occidental del país ha tenido un comportamiento muy similar, ubicándose durante su formación en paleolatitudes del orden de los 14° , teniendo un movimiento de rotación antihoraria de aproximadamente 39° . Esto implica que los dominios volcánicos cretácicos cubanos fueron formados a unos 1 000 Km más al Sur de su actual posición.
2. Similar comportamiento en su rotación exhiben el Arco Cretácico de la parte Oriental del país ($48,5^{\circ}$ antihoraria) y el Arco Volcánico Cretácico en la Cordillera Central en república Dominicana (53° antihoraria), con paleolatitudes del orden de 16° y 14° , respectivamente.
3. Por otra parte en el Arco Volcánico Paleógeno Cubano (terreno Turquino), se observan menores desplazamientos latitudinales y rotaciones antihorarias de solo 17° , similar a las de las rocas del Arco Volcánico Cretácico en la Cordillera Oriental de República Dominicana que es de $17,5^{\circ}$.
4. La Sierra de Neiba en República Dominicana y las Cuenca Superpuesta del Paleógeno de Cuba Oriental, presentan rotaciones y movimientos mucho menores, de $10,6^{\circ}$ y $12,9^{\circ}$ respectivamente.

Para el caso del terreno Guaniguanico, la situación es aún más compleja. Algunos autores (Pérez Lazo- Fundora y otros, 1991, García A. y Chacón R y Cruz C., 1994) según datos paleomagnéticos preliminares de la Formación San Cayetano, ubican su procedencia más al Sur de su posición actual, manteniendo el mismo criterio que para el resto de las unidades vistas hasta ahora, mientras que otros plantean (Alva-Valdivia L. M. et al, 2000).que puede haber estado ubicada en paleolatitudes más al Norte que las actuales, sin grandes rotaciones ni movimientos de traslación .

Los autores partiendo de los datos más recientes de Alva-Valdivia L. M. y otros (2000), calcularon las rotaciones esperadas para el Jurásico y el Cretácico, por separado, a modo de comparar los movimientos en ambos períodos. Así se obtienen rotaciones horarias de aproximadamente 50° para las formaciones del Cretácico y de 150° para las del Jurásico. Al parecer esto podría apoyar la hipótesis del arrastre de estas formaciones desde Yucatán por



TABLA DE LOS RESULTADOS DE LOS CÁLCULOS DE LOS DESPLAZAMIENTOS DE LAS DIFERENTES ÁREAS DE CUBA Y REPÚBLICA DOMINICANA.

ÁREAS	Coordenadas Geográficas		Latitud del Polo calculado (ϕ_p)	Longitud del Polo calculado (λ_p)	Latitud del Polo de referencia (ϕ_r)	Longitud del Polo de referencia (λ_r)	Rotación del bloque ($^\circ$)	Paleolatitud En grados (ϕ_m)	Edad (10^6 años)
	Latitud en $^\circ$ (ϕ)	Longitud en $^\circ$ (λ)							
Terreno Zaza (AVC)									
Cuba									
Occidental	22,45	276,7	31,8	196	68,9	192	36,5		80-100
Central	22,01	280,2	28,2	198	68,9	192	39,9		85-100
Oriental	20,5	284,75	18,8	218	68,9	192	48,5		85-100
Rep. Dominicana									
Coord. Central	18,70	289,5	22,0	228	68,9	192	53		80-90
Coord. Oriental	18,45	291,5	56,0	215	68,9	192	17,5		80-90
Coord. Septent.									
Cuba									
Terreno Turquino (AVP)	19,95	283	52,0	187	70,6	195,1	16,9		70-80
Cuencas Pg									
Guaniguanico									
K	22,30	276,45	77,1	101,8	68,9	192	50,7		80-100
J₃	22,30	276,45	55,4	82,2	66,2	164,3	128		130
Rep. Dom.									
S. de Neiba Pg	18,50	289	35,1	344,6	83,4	165,4	12,9		40

colisión de la placa Caribe con esa península, (en el Cretácico temprano) durante el movimiento hacia el Noreste de esta última, luego de que Yucatán girara a favor de las manecillas del reloj, unos 120°, (durante el Jurásico) para dar lugar a la apertura del Golfo de México.

En cuanto a las paleolatitudes, los datos de las formaciones Jurásicas las colocan en paleolatitudes del orden de los 26°, más al norte de su posición actual, posiblemente en el Golfo de México, mientras que las formaciones Cretácicas exhiben paleolatitudes de alrededor de 12°, quizás la que tenía la península de Yucatán, después de girar durante el Jurásico, en el momento de ser colisionada por la placa Caribe, durante el Cretácico inferior. Tanto en este caso como en el anterior, los autores no pretender dar un carácter definitivo a cualquier hipótesis de este tipo, sino llamar la atención sobre la necesidad de que se requieran más datos para dar por confirmada una u otra hipótesis.

Conclusiones

1. Los resultados paleomagnéticos obtenidos hasta la fecha en Cuba y República Dominicana sugieren una formación de los Arcos Volcánicos durante el Cretácico en Paleolatitudes del orden de 12 a 16°, lo que concuerda con los principales modelos evolutivos del área.
2. Por las semejanza establecidas entre los AVC de Cuba y República Dominicana es posible decir que estos formaban parte de un Gran Arco Volcánico único o sufrieron una evolución geologo-tectónica del mismo ambiente (placa Caribe), al menos desde el Cretácico hasta el Eoceno Medio Superior.
3. El Arco Volcánico Paleógeno cubano fue formado en las latitudes superiores al del AVC, teniendo movimientos de rotaciones menores en magnitud (17°) y menos complicados que su antecesor.
4. De acuerdo con los datos paleomagnéticos, las Cuencas Superpuestas del Paleógeno presentan de forma general, tanto para Cuba como para La Española, rotaciones mucho menores y latitudes de formación muy cercanas a las actuales.
5. El Terreno de Guaniguanico debe ser más estudiado desde el punto de vista paleomagnético para poder dar conclusiones más clara sobre su papel en la evolución del Caribe y el Golfo de México.

Bibliografía

Alva-Valdivia L. M., Goguitchaichvili A., Cobiella-Reguera J. L., , urrutia fucugauchi J., Fundora-Granda M. J. , Grajales-Nishimura J. M. and Rosales C. (2000), "Paleomagnetism of the Guaniguanico Cordillera, Western Cuba: A pilot study", en Resúmenes de la III Conferencia Internacional sobre Geología Regional de Cuba, el Golfo de México y el Caribe Occidental, Pinar del Río, Editor Dr. Jorge Cobiellas-Reguera, Universidad de Pinar del Río " Hermanos Saíz", Cuba.

Cobiella-Reguera J. L., (2000), " Jurassic and Cretaceous geological history of Cuba", International Geology Review, 4,(7), 594-616.

Chacón R ,(1993), "Estudio paleomagnético de la Formación San Cayetano de Cuba Occidental", Tesis de Trabajo de Diploma, Centro Universitario de Pinar del Río, " Hnos Saínz", Cuba

Chauvin A., Bazhenov M. and Blandouin T., (1994): "A reconnaissance paleomagnetic study of Cretaceous rocks from Central Cuba", Geophysical Res. Letters, 21, 16, 1691-1694.

Elming S.A., J. Pérez, M. Fundora, A. García, C- Cruz, J. Pajón, M. Campos y R. Izquierdo, (1992): "Estudios paleomagnéticos de formaciones geológicas del paleoceno al eoceno medio en Cuba Oriental", en XIII Conferencia del Caribe, Pinar del Río, Cuba.

Fundora- Granda Manuel, Perez-Lazo J., García Rivero A., Cruz Ferrán C., Pajón J. (1989): "Escala paleomagnético-estratigráfica preliminar para el Fanerozoico cubano", en Resúmenes del II Congreso Cubano de Geología y Minería, Stgo. de Cuba, Cuba.

Fundora Granda Manuel, J. Pérez Lazo, A. García, C. Cruz, M. Iturralde Vinent, (1989): "Presencia del límite K/T en la formación Mícaro en Cuba Oriental según los datos paleomagnéticos", en Resúmenes del II Congreso Cubano de Geología y Minería, Stgo de Cuba, Cuba.

Fundora Granda M. y J. Pérez-Lazo, (1996), " Una década de estudios paleomagnéticos en Cuba, resultados y perspectivas", en Memorias del III Simposio Cubano de Geofísica, Palacio de las Convenciones, La Habana, Cuba.

García Rivero Alberto, (1995), . " Investigaciones petrofísicas en la zona Centro de Cuba Central", Tesis de Doctorado, Instituto de Geofísica y Astronomía, La Habana, Cuba

Gose W. A., (1985); " Caribbean tectonic from a paleomagnetic perspective", in STEHLI F. G. Y WEBS, E. D., Topics in geobiology, 285-301, New York.

Harrison C.G.A. and T. Lindh (1990): " A polar wandering curve for Northamerica during the Mesozoic and Cenozoic", Journal of Geoph. Res., Vol 37, No. 55.

Iturralde-Vinent M. A., (1994): Cuban geology. A new Plate-Tectonic synthesis, Journal of petroleum geology, Vol 17 (1), pp 39-70.

Mann W. PO., Draper G. And Lewis J.F. (1991): " An overview of the geologic and Tectonic development of the North American-Caribbean plate boundary in Hispaniola" , geol. Soc. Amer., Spe. Pap., 262, -28, Boulder, Col.

-Pérez-Lazo J., S.A. Elming, M. Fundora, A. García, C. Cruz, J. Pajón y M. Campos, 1989: "Estudios paleomagnéticos en Cuba y República Dominicana para el Cretácico. Primeros resultados", en Resúmenes del II Congreso Cubano de Geología y Minería, Stgo de Cuba, Cuba.

-Pérez-Lazo J., M. Fundora, A. García y C. Cruz. (1989): "Investigaciones paleomagnéticas en Cuba. Implicaciones Tectónicas", reporte de <Investigaciones del IGA, Academia de Ciencias de Cuba, Edit. Academia, La Habana, Cuba.

-Pérez-Lazo J., M. Fundora e Ida Pedroso Herrera, (1998). "Estudio de las paleolatitudes del Cretácico al Neógeno para Cuba y República Dominicana", en III Congreso Cubano de Geología y Minería, Memorias (1), , pag 570-576., Edit. CNIG IGP La Habana, Cuba.

Pindell J., and J.F. Dewey (1982): "Permo.Triassic reconstruction of Western Pangea and the evolution of the Gulf of Mexico/Caribbean region", tectonicz, 1, 179-2111, Washington. USA.

Pindell J. (1995): "Evolution of the Gulf of Mexico and the Caribbean geology, UWI, Publishers Association, pp 13-39, Kingston , Jamaica.

Renne P. and G. Scott, Sheilla Doppelhammer, E. Linares-Cala and R. Hargraves, (1991): "Discordant Mid-Cretaceous paleomagnetic Pole from the Zaza Terrane of Central Cuba", *geoph., res. Letters*, Vol 18, no 3, pp 455-458.

Thomas S. (1995): " Zur Driftgeschichte Karibischer terranes palaomagnetische Untersuchungen auf Hispanipola", tesis de Doctorado, Universidad de Munster, Alemania, pp 139.

Vincenz S.A. and S.D. Dasgupta (1978): "Paleomagnetic study of some Cretaceous and Tertiary rocks of Hispaniola", *Pure and Applied Geophysics* 116, 1200-1210, Basel.

RESULTADOS DEL EMPLEO DE LA GEOFÍSICA DE SUPERFICIE PARA LA UBICACIÓN DE ZONAS DE INFILTRACIÓN DE AGUAS RESIDUALES TRATADAS. EXPERIENCIAS EN CHILE.

Armando Rodríguez Novo

Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos, Humboldt # 106 esq. a P, Vedado, Ciudad de la Habana, Cuba, C. Eléct.: thic@ceniai.inf.cu

RESUMEN

Como parte del trabajo realizado por el Consorcio Cubano – Chileno denominado Consultora Case Ingeniería Técnica Hidráulica Ltda. y a solicitud de la Empresa de Servicios Sanitarios de Coquimbo (ESSCO), que administra y controla todo el trabajo de acueducto y alcantarillado de la IV Región de Chile, se realizaron varios estudios con vistas a evaluar el destino final del efluente de las plantas de tratamiento de aguas residuales proyectadas en dos localidades turísticas de la citada Región, con el fin de viabilizar las soluciones en cuanto a la tecnología, y exigencias en la calidad del efluente de dichas plantas de tratamiento, diseñadas para las localidades de Tongoy y Guanaqueros.

Tongoy es una población costera que constituye uno de los mejores balnearios de la IV Región, y se encuentra ubicado aproximadamente a 50 km al sur de La Serena, capital de la citada región, con una población permanente de unos 4.000 habitantes, que aumenta hasta unos 20.000 en la temporada de verano.

Guanaqueros es una localidad costera ubicada a unos 40 km al sur de La Serena, que cuenta con un balneario, de gran importancia turística en la época de verano, donde además existen extensas zonas de cultivo de ostiones, así como otros moluscos y mariscos muy preciados tanto en el mercado interno como externo.

De gran importancia para ESSCO, resulta la disposición final del efluente de ambas plantas de tratamiento, por las implicaciones catastróficas que puede implicar un vertimiento no controlado al ecosistema de la región, tanto inmediatas como a mediano y largo plazos, considerando que la misma está ubicada en una zona turística costera.

Esta situación genera la tendencia de no permitir la incorporación de residuales líquidos en la bahía, ni en los acuíferos en explotación en ambas zonas, ni siquiera con un alto grado de tratamiento, por lo que se considera más práctica la reutilización del efluente mediante el riego de algunos cultivos que se piensan desarrollar en la zona o la infiltración del mismo sin la afectación de los acuíferos ni de la zona costera.

Una forma económica de estudiar el área, es mediante el empleo de los métodos geofísicos de superficie, en su variante del Sondeo Eléctrico Vertical, que nos permite caracterizar los diferentes estratos, según el comportamiento de sus resistividades eléctricas. A partir de los resultados de la

interpretación de los SEV realizados y del procesamiento geoestadístico de la información obtenida, fueron ubicadas varias calicatas en los lugares óptimos detectados, en las cuales se realizaron los ensayos para la determinación de los coeficientes de permeabilidad, mediante pruebas de infiltración in situ.

Los resultados obtenidos permitieron recomendar una forma satisfactoria de como resolver la problemática planteada, en un mínimo de tiempo y con un bajo costo, viabilizando además la participación de nuestra Empresa en futuras propuestas y licitaciones de trabajos similares en diferentes Regiones de Chile. Se analizó además, la posibilidad de evacuar el efluente en caso que no se necesite regar, producto de la lluvia.

INTRODUCCIÓN.

Para dar solución a la tarea técnica planteada en ambos estudios, consistente en dar solución definitiva, a la disposición final del efluente en ambas plantas de tratamiento de aguas residuales, se decidió emplear el método de **Sondeo Eléctrico Vertical (SEV)**, teniendo en cuenta su reconocida efectividad en los estudios hidrogeológicos de todo tipo y fundamentalmente en las zonas con un alto grado de complejidad geológica e hidrogeológica, como ocurre en las áreas mencionadas, teniendo en cuenta además el alto grado de heterogeneidad existente en las mismas, lo cual demuestra la imprecisión de realizar este estudio de forma puntual mediante una o varias perforaciones aisladas.

De forma general este método está basado en la determinación en superficie, del parámetro **resistividad o resistencia específica** de los diferentes litotipos o capas litológicas presentes en terreno, lo cual permite separar el corte geológico por capas, siempre que sus resistividades sean diferentes. La resistividad está estrechamente vinculada con el estado físico de los suelos y rocas, así como con su contenido de agua.

MATERIALES Y MÉTODOS EMPLEADOS.

En la zona de Tongoy se realizaron en total 14 puntos de SEV, los cuales quedaron distribuidos de la siguiente forma: 12 puntos fueron ubicados en 4 perfiles cortos con dirección aproximada Suroeste-Nordeste que abarcan la zona de interés con un área aproximada de 2,2 km² y los dos puntos restantes se realizaron en las quebradas Los Almendros y Los Litres, a 3 y a 7 km aproximadamente de la ubicación de la planta, en las cuales se ubican algunos pozos de abasto de agua potable a la zona y de los cuales se poseen los parámetros hidrogeológicos obtenidos a partir de los aforos realizados con anterioridad, siendo considerados estos dos últimos puntos como paramétricos de acuerdo con la tarea a resolver.

En la zona de Guanaqueros se realizaron otros 14 puntos de SEV, los cuales quedaron distribuidos en 5 perfiles cortos distribuidos en los 3 sectores o sitios de interés. En este caso no se realizaron SEV paramétricos, pues no existen perforaciones con documentación geológica a lo largo del trazado de los perfiles, ni cercanas a los mismos.

Todos los SEV fueron realizados mediante un autocompensador electrónico AE- 72. La interpretación automatizada fue realizada mediante el paquete de programas SIS. Los resultados de la interpretación fueron optimizados y procesados estadísticamente.

Todos los puntos de SEV fueron ubicados geográficamente en el terreno mediante un equipo GPS modelo Magellan.

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS.

A partir de los resultados de la interpretación cuantitativa de los SEV en la zona de Tongoy, y teniendo en cuenta su correlación con los SEV paramétricos y la información obtenida en los recorridos en el terreno, se definió que tipo de litología correspondía a cada una de las capas determinadas por el método empleado.

En toda el área se observa la presencia de posibles fallas o contactos de tipo tectónico, que están asociadas a la presencia de la roca, como consecuencia de intrusiones ígneas que tuvieron lugar en períodos geológicos anteriores.

De forma general se detectaron cortes geólogo-geofísicos de 3 y/o 4 capas. Se construyeron en total 7 cortes geólogo-geofísicos cuya descripción general se presenta a continuación. Se presenta un corte geólogo – geofísico típico de la zona estudiada en la Figura No. 1.

La primera capa o cobertura se caracteriza por un espesor variable entre 0,5-2,0 m, estando conformada por arenas finas, arenas limosas y limos, manifestándose casi siempre con resistividades bajas. En la zona del SEV-2, se observa que la capa de arena limosa se extiende en profundidad con un espesor entre 60 y 100 m.

La segunda capa presente en el área se caracteriza en general por la presencia de una mezcla de arenas con material calcáreo (abundantes conchuelas), con un contenido variable de cada uno de estos elementos en los diferentes puntos, como lo demuestran los diferentes valores de resistividad obtenidos, siendo por supuesto mucho más calcáreo el corte en la medida que el parámetro medido es mayor; existen incluso algunos puntos aislados en que pudieran manifestarse dichos materiales por separado (arena o material calcáreo); el espesor de esta capa es variable desde 1 m en el área de los SEV-1 y 2 hasta más de 35 m en los alrededores de los SEV- 4 y 5.

En ocasiones se observan aumentos muy bruscos de la resistividad para la segunda capa, lo cual se encuentra vinculado con la presencia de rocas alteradas en diferente grado, según el rango de variación del parámetro medido, como puede observarse en los SEV-8, 9, 10 y 12, manifestándose la misma con espesores que varían en general entre 17 y más de 50 m.

La tercera capa está caracterizada en general por resistividades extremadamente grandes, las cuales se asocian con la presencia de la roca compacta, la cual se presenta como cuarta capa solamente en los alrededores del SEV-11.

Se recomendó la excavación de 6 calicatas en los alrededores de los puntos de SEV- 1, 3, 4, 6, 8 y 9, teniendo en cuenta la heterogeneidad de la zona de estudio, así como la necesidad de realizar los

ensayos siguientes: descripción litológica, granulometría, permeabilidad (método de carga constante ASTM D 2434), y pruebas de infiltración.

Los coeficientes de permeabilidad (K) determinados fueron los siguientes:

- Calicata No. 1 (SEV- 1); $K = 5,8 * 10^{-5}$ m/s
- Calicata No. 2 (SEV- 4); $K = 6,2 * 10^{-7}$ m/s
- Calicata No. 3 (SEV- 3); $K = 2,0 * 10^{-7}$ m/s
- Calicata No. 4 (SEV- 8); $K = 7,3 * 10^{-5}$ m/s
- Calicata No. 5 (SEV- 9); $K = 2,3 * 10^{-6}$ m/s
- Calicata No. 6 (SEV- 6); $K = 5,8 * 10^{-6}$ m/s

El ensayo de granulometría reflejó que más del 90 % del material pasa por los tamices No. 40 (0,63 mm) y No. 200 (0,08 mm), caracterizando materiales de fracción muy fina y por tanto de muy baja permeabilidad.

Los valores de los coeficientes de permeabilidad determinados mediante los ensayos de permeabilidad y las pruebas de filtración realizadas en el campo, así como la granulometría, corroboran los resultados de la geofísica.

Para la zona de Guanaqueros, se realizó la interpretación definitiva de los resultados, teniendo en cuenta las características geológicas generales, observadas durante la ejecución de los trabajos de terreno, y la descripción de las tres calicatas excavadas, pues no existen sondajes o perforaciones con documentación geológica que sirvan de apoyo para una interpretación más detallada.

De forma general, se presentan cortes geólogo-geofísicos de 3 y/o 4 capas, al igual que en el caso anterior.

Se construyeron 5 cortes geólogo - geofísicos cuya descripción general se presenta a continuación. Se presenta un corte geólogo – geofísico típico de la zona estudiada en la Figura No. 2.

De forma general se manifiestan 4 capas; la primera con un espesor entre 0,5 y 1,0 m que al parecer se asocia con la capa vegetal arenosa; a continuación se presenta una capa con un espesor entre 3 y 5 m con una resistividad mayor, que se pudiera asociar con un material calcáreo muy compacto; posteriormente se refleja una capa de resistividad menor y espesor entre 10 y más de 50 m, que pudiera vincularse con una arenisca muy compactada con limo y material calcáreo. La última capa se presenta con un aumento de la resistividad, por lo que pudiera asociarse con un material calcáreo muy compacto.

Según pudo apreciarse durante la ejecución de los trabajos de terreno, los sectores estudiados ubicados al Norte de la carretera de acceso a Guanaqueros, aparecen cortados por varias quebradas, que pudieran asociarse con fallas o contactos de tipo tectónico.

Los resultados de la geofísica indican que los materiales presentes en los cortes geólogo – geofísicos tentativos construidos, pudieran caracterizarse por permeabilidades bajas o muy bajas, pues sus porosidades efectivas también son en general muy pequeñas.

Se recomendó la excavación de tres calicatas de 2,0 - 2,5 m de profundidad en los alrededores de los puntos de SEV- 6, 8 y 9, en las cuales se realizarían los ensayos de laboratorio correspondientes, para determinar los coeficientes de permeabilidad y de infiltración.

La prueba de infiltración, para la determinación de la permeabilidad en terreno, se realizó mediante el permeámetro Guelph, obteniéndose un coeficiente de permeabilidad (K) de $2,1 \cdot 10^{-7}$ m/seg, que obviamente es una permeabilidad baja, corroborando las conclusiones que se obtuvieron mediante el estudio geofísico.

CONCLUSIONES.

Para la zona de Tongoy y teniendo en cuenta las características geológicas e hidrogeológicas presentes en el área estudiada determinadas a partir de las investigaciones geofísicas, las características físicas y bioquímicas del efluente a infiltrar, los resultados de los ensayos de terreno y de laboratorio (descripciones estratigráficas, granulometría, densidad, coeficientes de permeabilidad y pruebas de infiltración in situ), consideramos:

- La zona de interés estudiada es extremadamente heterogénea desde el punto de vista geológico e hidrogeológico, como puede verse en los cortes geólogo – geofísicos construidos, por lo cual hubiera sido imposible llegar a conclusiones generales de la misma a partir de un estudio puntual mediante pocas perforaciones.
- La geología está determinada fundamentalmente por depósitos de limos, arenas limosas, arenas finas, gravas cementadas con arena fina y limo, material calcáreo (conchuelas) con limo y arena, que como puede apreciarse de forma general presentan una granulometría muy fina y permeabilidades muy bajas. Se presentan numerosos contactos y algunas fallas.
- La geofísica permitió agrupar los materiales presentes en 5 grupos fundamentales: 1- arena limosa y limo arenoso, 2- arenas, 3- gravas con limo y arena, 4- material calcáreo con limo y arena, 5- roca compacta.
- Las pequeñas capas de arena de grano algo más grueso detectadas, tienen espesores muy pequeños y solo se manifiestan superficialmente.
- Las descripciones litológicas realizadas como parte de los ensayos de laboratorio, demuestran el predominio de materiales finos con baja permeabilidad. En ocasiones se describen materiales ligeramente más gruesos pero con espesores muy pequeños.
- Los resultados de la granulometría son muy concluyentes, con relación al predominio de partículas muy finas, pues los mayores % pasan a través del tamiz No. 40 (0,63 mm), y % considerables pasan a través del tamiz N° 200 (0,08 mm). Solo en el caso de las calicatas No. 1, 4 y 5 se observan % bajos de fracciones inferiores a los 0,08 mm.

- Los coeficientes de permeabilidad determinados por el laboratorio son en general bajos, pues varían entre $5,8 \cdot 10^{-5}$ (Calicata No. 1) y $2,0 \cdot 10^{-7}$ m/s (Calicata No. 3), característicos de arenas finas y arenas limosas.
- Se realizaron 2 pruebas de infiltración in situ en las Calicatas No. 1 y 2 respectivamente; el cálculo de los ensayos reflejó valores del coeficiente de permeabilidad de $1,5 \cdot 10^{-4}$ y $6,6 \cdot 10^{-6}$ m/s respectivamente. Estos valores aunque son relativamente mayores que los obtenidos en el laboratorio, se mantienen en el mismo orden que estos, considerándose válidas ambas pruebas, teniendo en cuenta la gran heterogeneidad del suelo.
- Uno de los aspectos a tener en cuenta, al infiltrar aguas residuales, es la composición del líquido a infiltrar y en el caso de las aguas residuales hay que tener en cuenta además de los sólidos en suspensión que contienen estas aguas, los elementos que aportan nutrientes como Nitrógeno, Fósforo y Potasio que propician el desarrollo de microorganismos en el ecosistema y como consecuencia nuevos sólidos.
- Con relación al contenido de nutrientes admisibles en las aguas a infiltrar, estos deben ser mínimos a la salida de la planta, para que los dispositivos de infiltración no sean obstruidos.
- Para llevar a cabo la infiltración debe tenerse en cuenta el tamaño de las partículas en suspensión, de forma tal que no colmaten el acuífero; es por eso que debe tenerse en cuenta la granulometría de los estratos que funcionarán como órgano receptor.
- Teniendo en cuenta los altos % de material más fino que el tamiz N° 40, con una fracción menor a 0,63 mm, podemos concluir que los espacios entre granos por donde circularía el fluido a infiltrar son del orden de las micras, por lo que partículas sólidas de ese tamaño serían suficientes para obstruir el medio.
- Dadas las características granulométricas de los estratos en las áreas de mayor permeabilidad, no es recomendable la infiltración de residuales a menos que los mismos sean filtrados o tamizados hasta alcanzar las características necesarias para su infiltración. En ningún caso se admitirá la infiltración de aguas servidas crudas (sin tratar), si esto llega a ocurrir por cortos períodos de tiempo, en un caso de emergencia, debe tenerse en cuenta la limpieza total del pozo mediante equipos de presión inmediatamente después, de lo contrario se perdería este pozo; para estos casos generalmente se diseñan pozos adicionales.
- De emplearse la variante de pozos de infiltración, el caudal a infiltrar sería de 2,3 l/s para cada pozo, por lo que serían necesarios entre 20 y 50 pozos, distanciados entre sí 200 m, teniendo en cuenta los caudales que se proponen infiltrar, lo cual no constituye una solución viable.
- En caso de emplearse la variante de un dren de infiltración, el caudal a infiltrar sería 0,2 l/s/m, lo que implicaría la excavación de un área entre 250 y 500 m² en función de los caudales a infiltrar.

Para la zona de Guanaqueros se llegó a las siguientes conclusiones:

- La zona estudiada presenta cierta heterogeneidad desde el punto de vista geológico, como puede verse en los cortes geólogo – geofísicos construidos, lo cual demuestra la necesidad del empleo de la geofísica de superficie para estudiar toda la zona, pues de otra forma hubiera sido prácticamente imposible obtener una información integral de toda el área.
- La información obtenida de la interpretación de la geofísica de superficie, conjuntamente con la descripción estratigráfica de las tres calicatas excavadas, refleja que la geología está determinada en general por depósitos de limos, arenas limosas, arenas con conchuelas y material calcáreo, materiales calcáreos y areniscas muy compactadas, cementadas con limo y material calcáreo.
- De forma general, todos los materiales detectados presentan permeabilidades bajas o muy bajas.
- Como puede observarse en los perfiles, los contenidos de limo en la capa vegetal son variables en las diferentes partes del área estudiada, lo cual provoca que de forma general, las permeabilidades del suelo también sean diferentes.
- La prueba de infiltración se realizó en la zona donde el material presente debe ser más permeable, debido a la presencia de una capa de arena (SEV- 9), lo cual quedó demostrado con la excavación de la calicata No. 1 en ese lugar.
- Las descripciones litológicas realizadas como parte de los ensayos de laboratorio, demuestran el predominio de materiales finos de baja permeabilidad y materiales compactados fuertemente cementados, los cuales presentan también muy bajas permeabilidades.
- Los resultados de la granulometría reflejan, que un 57 % del material tomado como muestra pasa por el tamiz No. 40 (0,63 mm), lo cual demuestra el predominio de partículas muy finas.
- Se realizó una prueba de infiltración en las arenas presentes en la calicata No. 1, empleando un permeámetro Guelph, obteniéndose que el factor de conductividad hidráulica saturada (K) es $2,1 \times 10^{-5}$ cm/s, lo cual demuestra que es muy poco permeable.
- La propia prueba de infiltración y las características del relieve de la zona estudiada, indican que el gradiente hidráulico está dirigido en dirección noroeste, es decir en dirección al mar.
- En caso de decidirse efectuar el riego con el efluente de la planta, este debe dirigirse fundamentalmente a la zona de relativamente mayor permeabilidad, que se considera precisamente los alrededores del SEV- 9, aunque quedó bien demostrado que incluso esta zona presenta muy baja permeabilidad.
- En caso que se decidan otras variantes de destino del efluente de la planta de tratamiento, deberán realizarse los estudios complementarios requeridos para esos fines.
- Se recomienda el empleo de pruebas con trazadores, para definir la posible afectación de las aguas residuales tratadas, que pudieran infiltrarse e ir a parar al mar, como consecuencia del gradiente hidráulico existente en el área y la evidente intrusión marina presente, la cual fue detectada a partir de la geofísica y además se ha hecho presente en al menos uno de los pozos existentes en esa área.

BIBLIOGRAFÍA.

- Alfonso Roche J. R., N. Pérez, et al (1991): SIS.Versión 1.0. Sistema de interpretación de Sondeo Eléctrico Vertical (software).
- Aravena Fernández S.L. (1997): Hidrogeología y Evaluación del Riesgo de Intrusión Salina en las Cuencas Costeras del Sector de Tongoy.
- Case Ingeniería - Técnica Hidráulica Ltda. (1998): Revisión de Proyecto Sistema de Recolección de Aguas Servidas de Tongoy.
- Case Ingeniería - Técnica Hidráulica Ltda. (1998): Evaluación del Sistema de Elevación y Tratamiento de Aguas Servidas de Puerto Velero.
- Jachatrian, D.A. (1978): Utilización de las investigaciones eléctricas en la solución de algunas tareas geológicas. Revista Voluntad Hidráulica No. 45, La Habana, Cuba.
- Llamas, M.R. y E. Custodio (1976): Hidrología Subterránea. Editorial Omega, Barcelona, España.
- Orellana E. (1972): Prospección geoelectrica en corriente continua. Editorial Paraninfo, Madrid, España.
- Rodríguez Novo A. (1999): Posibilidades de infiltración de aguas servidas tratadas en Tongoy.
- Soto G. (2000): Estudio de suelos para determinar las posibilidades de riego de zona de cultivo en Guanaqueros.
- Swedish Geological Co. (1985): Versión 1.0 VES. Vertical Electric Sounding. Modelling Program (software).
- Yakubovskii Yu. V. (1980): Prospección Eléctrica. Editorial Nedra, Moscú.

TONGOY

**CORTE GEÓLOGO-GEOFÍSICO POR EL PERFIL I-I' (SEV- 6, 5 Y 2) .
ESCALA H. 1 : 10.000 V. 1 : 500**

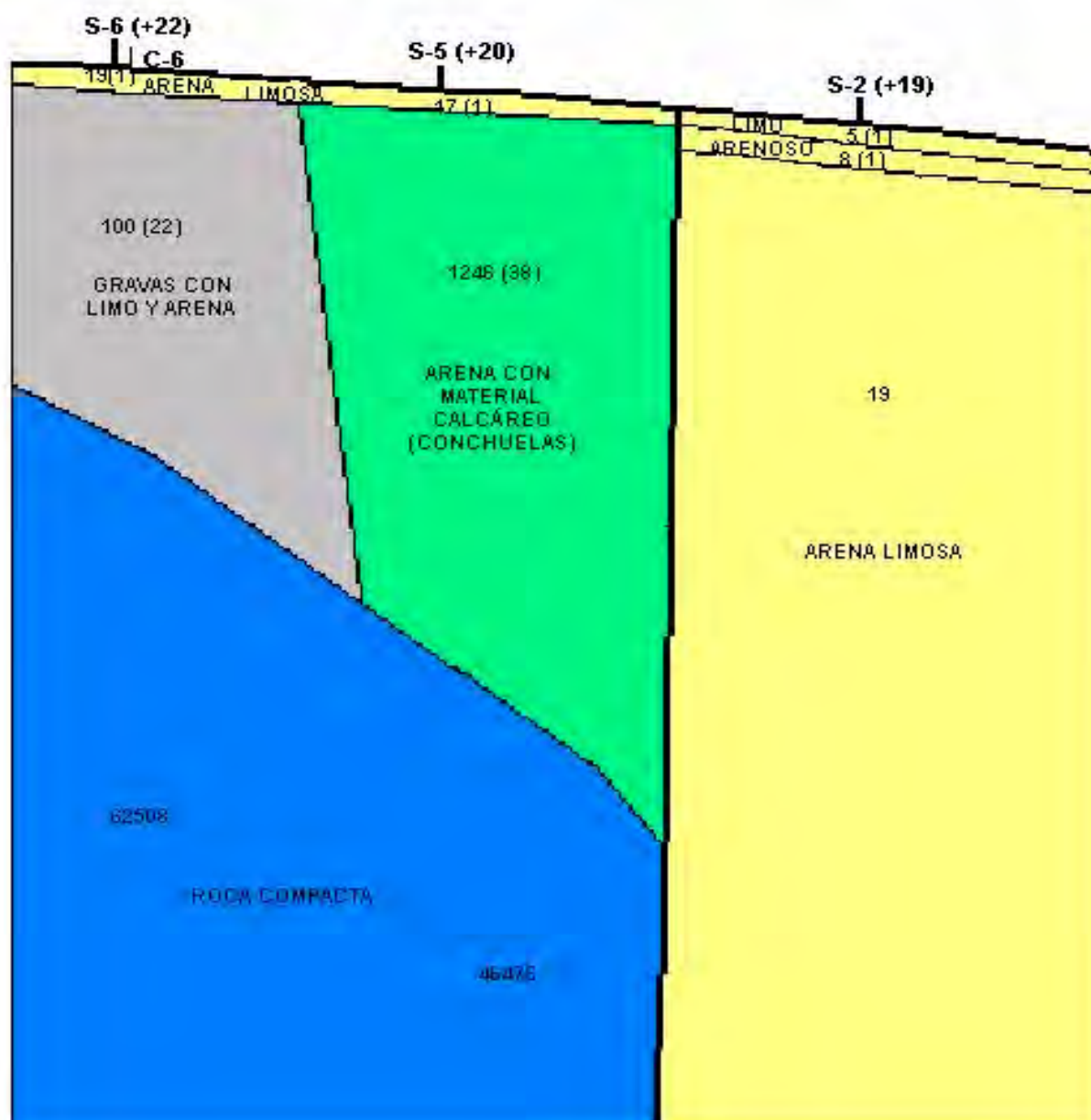


FIGURA No.1

GUANAQUEROS

**CORTE GEÓLOGO GEOFÍSICO TENTATIVO POR EL PERFIL I-I' (SEV- 1, 2 Y 3).
ESCALA APROXIMADA H. 1:10.000 V. 1:500**

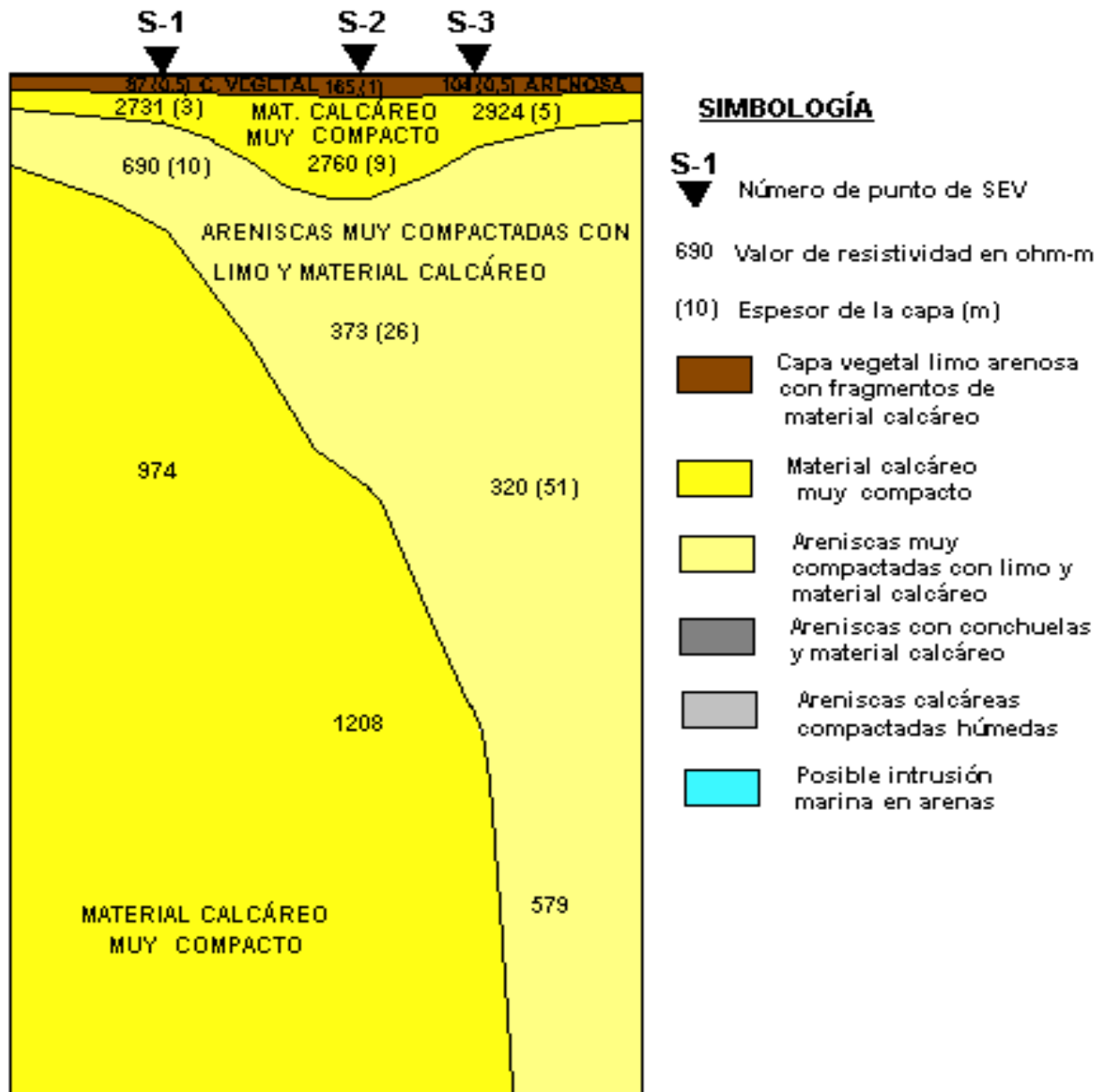


FIGURA No. 2

PSEUDOCORTES DE RESISTIVIDAD APARENTE UTILIZANDO DATOS ELECTROMAGNÉTICOS AÉREOS Y SUS POSIBILIDADES.

Noel Petrus Marcos.

Instituto de Geología y Paleontología. Vía Blanca y Carr. Central. San Miguel del Padrón. Ciudad Habana. C. Elect. : <igpcnig@ceniai.inf.cu>

RESUMEN.

En esta oportunidad se acomete la tarea de confeccionar programas y procedimientos para la obtención de pseudocortes de resistividad aparente a partir de datos electromagnéticos aéreos en el dominio de las frecuencias, basado en la teoría desarrollada por **Sengpiel K.P.(1988)** y aplicándola en un yacimiento mineral sulfuroso conocido.

Se obtuvo similitud en los contrastes de resistividad aparente que señala el método **PI** y una correspondencia de las zonas de más baja resistividad aparente, de los pseudocortes confeccionados, con las zonas mineralizadas de los cortes de los pozos.

Por otro lado, la obtención de los pseudocortes de resistividad aparente por cada línea de vuelo, permite la confección posterior de mapas de resistividad aparente a diferentes profundidades que completa un cuadro tridimensional de las resistividades aparentes del área estudiada, que de esta forma posibilita su evaluación desde el punto de vista resistivo, complementando la información para la correcta ubicación de los pozos de búsqueda.

La obtención de estos pseudocortes de resistividad aparente en lugares de difícil ó imposible acceso terrestre es de suma importancia, pues brinda una poderosa herramienta para obtener información adicional y segura para la orientación de trabajos geofísicos y geológicos de seguimiento.

ABSTRACT.

In this opportunity the target is making programs and procedures for obtain apparent resistivity pseudosection from the EM air data in the frequency domain, based on the theory developed by **Sengpiel K.P. (1988)** and applying it in a known sulfurous mineral location, of the Central Region of Cuba.

Similarity was obtained in the contrasts of apparent resistivity between the pseudosection obtained for PI method and the obtained for the EM air data.

On the other hand, the obtaining of the pseudosection of apparent resistivity for each flight line, allows the later making of apparent resistivity maps to different depths that it completes a three-dimensional of the apparent resistivities of the studied area that facilitates the evaluation for the correct location of the search wells.

The obtaining of these pseudosections of apparent resistivity in places of difficult or impossible terrestrial access is of supreme importance, because it offers a powerful tool to obtain additional and sure information for the orientation of geophysical and geologic following works.

INTRODUCCIÓN.

Sengpiel K.P. desarrolló una función compleja "**c**" ó "skin depth" generalizado que determina la relación existente entre la resistividad aparente(ρ_a), la frecuencia de trabajo (f) y su componente en fase (IP), para un modelo multicapa de la tierra.

Si se tienen varias mediciones EM con diferentes frecuencias de trabajo de diferentes poder de penetración, se pueden obtener pseudocortes de ρ_a por las líneas de medición.

Los datos EM aéreos cumplen con las características y requisitos exigidos por el desarrollo de la función compleja de Sengpiel, por lo que se creó un algoritmo y un procedimiento que nos permite primero obtener los pseudocortes de ρ_a por las líneas de vuelo y después en cualquier dirección, así como confeccionar mapas de ρ_a a las profundidades deseadas.

INFORMACIÓN DIGITAL UTILIZADA.

Los materiales utilizados son la información obtenida durante la adquisición de datos por las líneas de vuelo del levantamiento aerogeofísico realizado en el yacimiento mineral sulfuroso Mina Antonio con el método HEM.

Las frecuencias de trabajo del equipamiento EM fueron:

- Frecuencia 2 980 Hz: configuración de bobinas transmisora-receptora coplanar horizontal.
- Frecuencia 4 4180 Hz.: configuración de bobinas transmisora-receptora coplanar horizontal.
- Frecuencia 5 35.5 KHz:: configuración de bobinas transmisora-receptora coplanar horizontal.

con separación entre bobinas transmisoras-receptoras de 7 metros y altura de 30 metros sobre el terreno.

Estas frecuencias garantizan el estudio de las resistividades a distintas profundidades y suministran detallada información geométrica y geologo-estructural.

Durante la adquisición de datos fueron obtenidas las componentes en fase (IP) y fuera de fase ó cuadratura (Qd) para todas las frecuencias de trabajo, a partir de las que se obtuvieron mapas de resistividad aparente para cada una de ellas.

GENERALIDADES.

En los métodos EM el campo inductor primario produce un campo inducido secundario a una profundidad que depende entre otros factores de :

- Frecuencia del campo inductor.
- Resistividad de la parte superior del corte.
- Separación entre bobina transmisora y receptora.
- Contrastes de resistividades del corte.
- Espesores de las capas del corte.
- Coeficientes eléctricos y magnéticos de las rocas del corte.

Sengpiel K.P.(1988) desarrolló la función de transferencia compleja "**c**" ó "skin depth" generalizado definida por Schmuker (1970):

$$C_{\lambda} = [\lambda^2 + ((1+i) / p)]^{-1/2}$$

donde: p- "skin depth" contiene la ρ_a del semiespacio y puede derivarse desde el campo magnético secundario ó medido por un sistema dipolar con pequeño espaciamiento y altura "h" por encima del terreno.

La parte real de esta función "**c**" produce centros de profundidad **z*** del sistema de corrientes en fase (**IP**) como función de la frecuencia, que puede ser combinada con la resistividad aparente derivada por el método tradicional.

Conociendo la función $\rho_a(\mathbf{z}^*)$ de varias frecuencias, se puede obtener una aproximada distribución $\rho(z)$ sin un modelo adicional.

Sengpiel K.P. (1988) asume de Mundry (1984) que para una fuente dipolar a la altura "h" tal que: $h \Rightarrow 3.3s$, donde **s** es el espaciamiento entre bobinas transmisora y receptora, características cumplidas por los datos EM aéreos, el campo magnético secundario inducido a la altura "h" es:

$$\mathbf{z} = 4 / M \int_0^{\infty} R_1 K^2 e^{-2k} dk$$

donde : $M = (4/Gj)(h/s)^3$ Gj - 1 para bobinas coplanares horizontales.

y $R_1 = R_e R_1 + i_{lm} R_1$ h – Altura.

s – Espacio entre bobinas trasmisora – receptora.

Llegando a la conclusión de que la parte real de la función de transferencia compleja **c** produce Centros de Profundidad **Z***:

$$\mathbf{z}^* = h R_e C$$

Dependientes de la frecuencia y la resistividad calculada por el método convencional.

Podemos concluir que el algoritmo de Sengpiel nos da la posibilidad de a partir de los datos EM aéreos, previamente calculada su resistividad aparente por los métodos convencionales, y conociendo la altura

de vuelo y la frecuencia de trabajo, determinar los Centros de Profundidad Z^* al que se relaciona la resistividad aparente obtenida y de ahí conocer la función $\rho_a(z^*)$.

PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO.

Se programó el cálculo desarrollado por Sengpiel que con los datos de frecuencia de trabajo, resistividad aparente, valor en fase ó real (IP) y la altura de vuelo "h", por las líneas de vuelo, se obtienen los centros de profundidad Z^* .

Durante el desarrollo de Sengpiel, coincidiendo con varios autores y bibliografía, se define p ("skin depth") teóricamente como: $p=500 (\rho / f)^{1/2}$, en la práctica, se plantea que en medios geológicos reales, p (skin depth) tiene la forma: $p=100 (\rho / f)^{1/2}$ (Keller, Jaggard ep al.), esta última es la considerada en este trabajo.

El procedimiento confeccionado para obtener los pseudocortes de resistividad aparente, es combinando programas de los Sistemas de Procesamiento y Mapeo con el programa diseñado en este trabajo

Esto nos permite construir pseudocortes para todas las líneas de vuelo que comparados con la información geológica (litológica y estructural), se observan las correspondencias tectónicas, litológicas y de mineralización, que posibilitan el análisis conjunto para arribar a conclusiones en la localización de zonas minerales y su geometría.

Para aumentar la utilidad del cálculo programado se desarrolló un procedimiento que permite construir los pseudocortes de resistividad en cualquier dirección y no solo en la dirección de las líneas de vuelo.

RESULTADOS.

La aplicación de estos procedimientos combinando la ejecución del programa diseñado y las posibilidades de otros que nos brindan los sistemas de procesamiento y mapeo (Geosoft), a la información aeroelectromagnética obtenida en la Mina Antonio, nos posibilitó la confección de pseudocortes de ρ_a que coinciden con las líneas de vuelo y de estas construir mapas a diferentes profundidades.

La similitud de los pseudocortes de ρ_a por esta metodología con los obtenidos por el método de polarización inducida (configuración polo-dipolo con espaciamento de 25 m.) se muestra en la fig.1, en la que se observa la correspondencia de los contrastes de resistividades.

En la fig.2, pseudocorte por la línea de vuelo 9060 y en la que se localiza pozo PBA 1 que corta el cuerpo mineral piritocalcopirítico masivo, se observa buena correspondencia de la ubicación de la zona mineral y la zona de más baja resistividad aparente y cercana a los cambios a mayores resistividades definidas por el pseudocorte confeccionado mediante el procedimiento diseñado en este trabajo. La ubicación de la mineralización cercana a la transición de bajas resistividades a altas representa los contactos de diferentes rocas, favorable al enriquecimiento mineral.

Con estas informaciones obtenidas se precisa la decisión en la ubicación de los pozos de búsquedas.

Con la obtención de cortes de resistividad aparente sobre todas las líneas de vuelo de un levantamiento EM aéreo podemos confeccionar, mediante un procedimiento utilizando las posibilidades del Sistema de Procesamiento Geosoft, mapas de ρ_a a diferentes profundidades como las mostradas en la fig.3.

Teniendo en cuenta que el mapa de ρ_a obtenido a partir de la frecuencia EM de 35.5KHz.(Fig. 4 b), que es la de mayor frecuencia, representa la parte más superficial del corte por ser la de menor penetración, y utilizando el procedimiento para confeccionar mapas de ρ_a a diferentes profundidades se puede obtener un cuadro de resistividades que nos permita conocer cualitativamente en tres dimensiones, las zonas de más baja ρ_a y su distribución.

CONCLUSIONES.

La efectividad de los métodos EM aéreos conducidos por helicóptero en la exploración y búsqueda de yacimientos minerales sulfurosos, en disímiles condiciones y características geológicas, está probada mundialmente por diferentes entidades de exploración y búsqueda de yacimientos que la utilizan por su capacidad de resolución y rapidez.

En el caso particular de esta investigación realizada en un yacimiento conocido (Mina Antonio) de la Región Central de Cuba, no fue una excepción, pues lo ubica con precisión.

La efectividad de solución de este método puede ampliarse con la aplicación de nuevos procedimientos prácticos derivados de los logros y estudios más recientes de las bases teóricas físico-matemáticas que lo sustentan y las posibilidades que nos brindan los Sistemas de Procesamiento y Mapeo de datos geofísicos.

La utilización del procedimiento derivado del cálculo de centros de profundidad de Sengpiel nos provee de posibilidades muy útiles al poder construir pseudocortes de ρ_a aumentando las dimensiones del método.

Se observan resultados comparables entre los obtenidos por el método de polarización inducida (PI) y los obtenidos en este trabajo por las deducciones de Sengpiel.

Se pueden obtener pseudocortes de ρ_a en lugares de acceso terrestre limitado ó imposible.

La posibilidad de confeccionar mapas de ρ_a a diferentes profundidades nos permite conocer por debajo de la capa de intemperismo, como se comportan las resistividades aparentes y observar particularidades de la dirección de las zonas de bajas resistividades y su límite en profundidad.

El aporte económico se manifiesta al poder reducir en alto grado los trabajos geológicos y geofísicos de seguimiento terrestre más costosos y en la ubicación de pozos con diferentes objetivos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- Jaggar S., P. Wolfgram, R. Smith: (1994) "Geological Aplications of airborne EM methods."
- Keller G. V., F. C. Frischknecht: (1996) "Electrical Method in Geophysical Prospecting", Ed. Revolucionaria. Cuba..
- Mundry E: (1984) " On the interpretation of airborne EM data for the two – layer case.". Geophysical Prospecting, Vol. 32, pag. 336 – 346.
- Schmuker V.: (1970) "An introduction to induction anomalies". Journal of Geomagnetism and Geoelectricity 22.
- Sengpiel K. P.: (1988) "Aproximate inversion of airborne EM data from a multilayered ground.". Geophysical Prospecting, Vol. 36, No. 4, pag. 446 – 459.



Fig. 1 Pseudocortes de resistividad aparente: a- por el método de Polarización Inducida (PI); b- a partir de los datos aéreoEM dominio de la frecuencia.

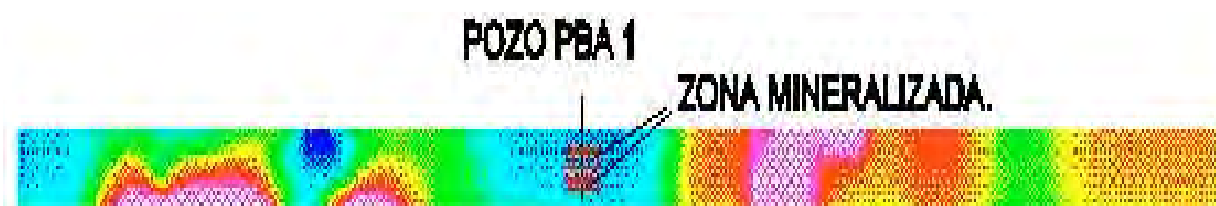


Fig. 2- Pseudocorte de resistividades aparentes por la línea de vuelo 9060, con zonas mineralizadas cortadas por el pozo PBA 1.

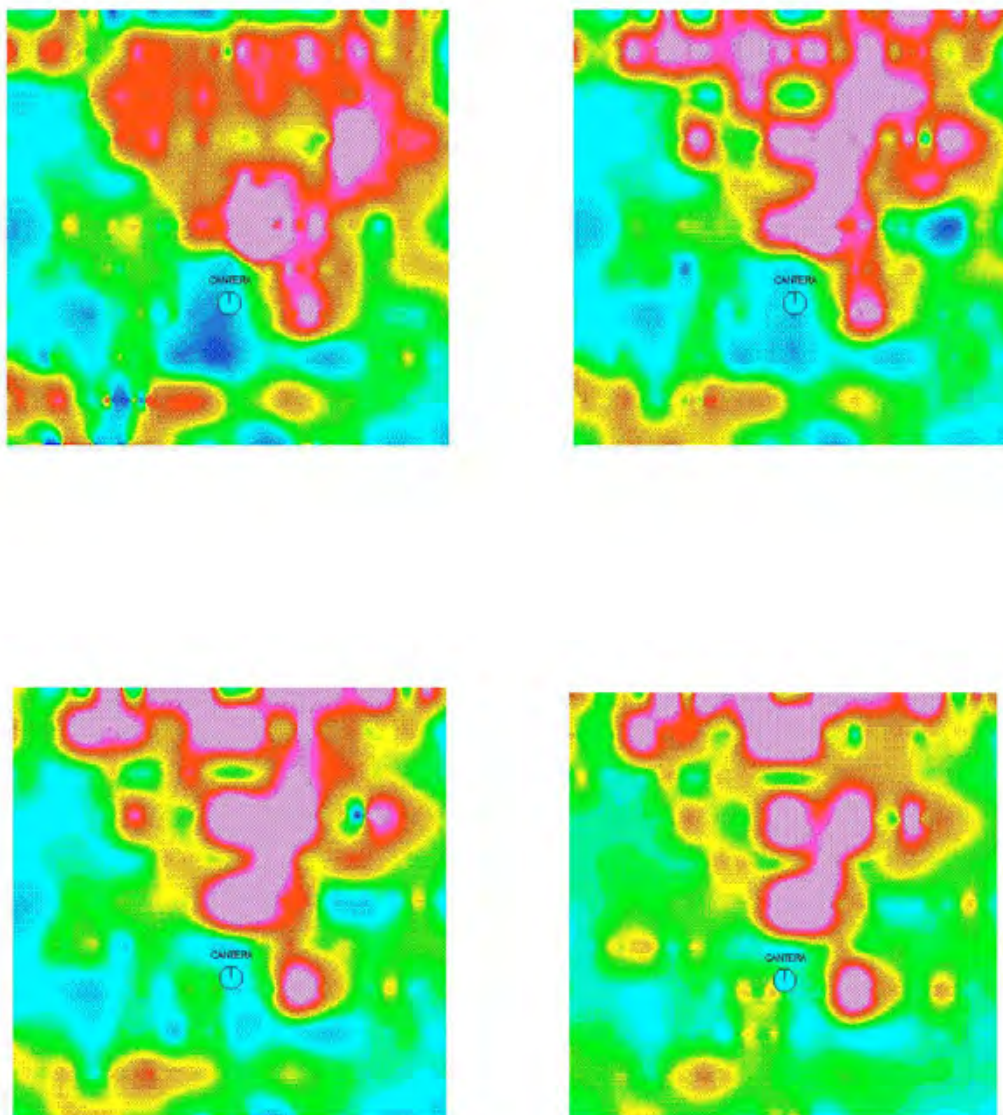
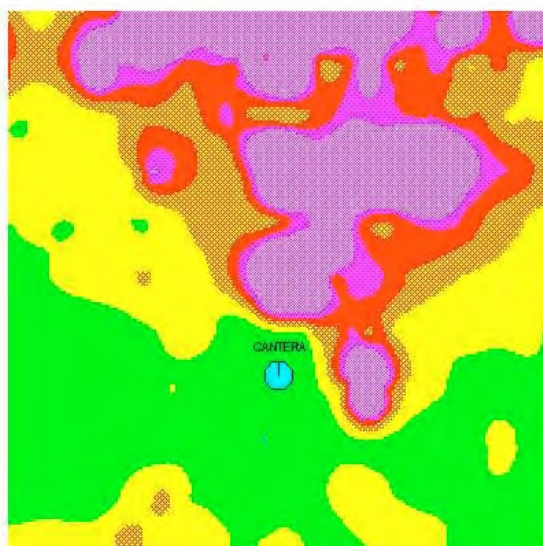


Fig. 3- Mapas de Resistividad Aparente: a) a la profundidad de 5 metros; b) a la profundidad de 25 metros; c) a la profundidad de 50 metros; d) a la profundidad de 75 metros.

a



b

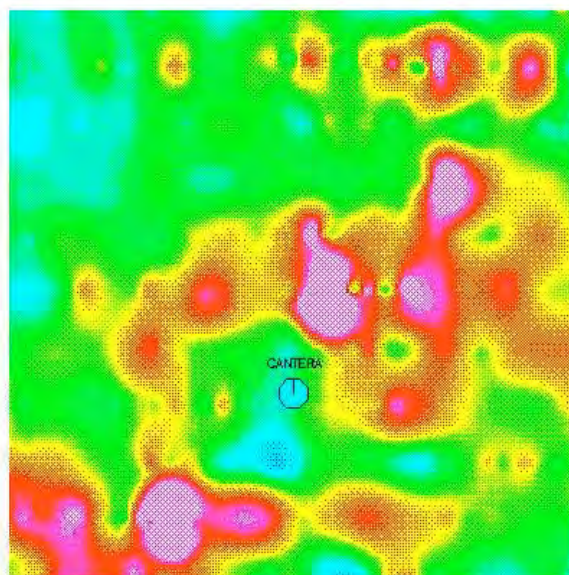


Fig.4. Mapas de Resistividad Aparente: a) Para la frecuencia 4180 Hz; b) Para la frecuencia 35.5 KHz.

RESULTADOS DE LOS MÉTODOS GEOFÍSICOS DE POLARIZACIÓN INDUCIDA Y MAGNETOMETRÍA EMPLEADOS EN EL YACIMIENTO AURÍFERO DE MIRAFLORES, QUINCHÍA, RISARALDA, COLOMBIA.

Eric Escobar Pérez ⁽¹⁾; **Jorge López Domini** ⁽²⁾

(1) Geominera de Oriente, Carretera Siboney, Km 2¹/₂ Santiago de Cuba. Cuba.
C. Eléct.: eescobar@geom.stq.minbas.cu

(2) Geominera S.A., Calle 13 e/ D y E, Vedado. Ciudad de la Habana, Cuba.
C. Eléct.: lopezdomini@yahoo.com

Resumen

La realización de los trabajos geofísicos terrestres de PI y Magnetometría en el yacimiento aurífero de Miraflores, se efectuó entre los meses de Junio y Julio del 2000, formando parte del Convenio INGEOMINAS-MINERCOL-GEOMINERA SA en un área de 0.4 Km².

En el área predominan los basaltos de tonalidades verdosas, reconociéndose con frecuencia variaciones texturales a diabasa. En ella se ha desarrollado un sistema de fallas y/o fracturas las cuales han creado los espacios abiertos que albergan la mineralización aurífera. La región es ampliamente conocida por sus recursos auríferos y en ella se han explotado amplias zonas de mineralización en vetas. El sulfuro predominante es la pirita y le siguen en orden de importancia la blenda, la galena y la calcopirita.

Dado las condiciones geológicas y de la mineralización expuestas con anterioridad y a las tareas geológicas planteadas a las investigaciones geofísicas se diseñó un complejo de métodos geofísicos compuesto por:

- Método Magnetométrico.
- Método de Polarización Inducida.

Estas tareas geólogo - geofísicas fueron las siguientes:

1. Determinar la extensión de la mineralización según su dirección y profundidad.
2. Apoyar la cartografía geológica y estructural de la zona.

Como resultado de la Interpretación Geofísica Compleja, por los datos magnéticos y sus transformaciones se pudo mapear las estructuras circulares que tienen su origen en las chimeneas de brechas y en otros tipos de estructuras más locales. Alrededor de ella y por su borde externo se sitúan las anomalías de dipolo del Gradiente Magnético Vertical y los máximos valores de cargabilidad de 12 mV/V. Se reflejan las anomalías de PI más importantes y que tienen correlación con la mineralización. Se sitúan igualmente las zonas anómalas de la interpretación del Modelo Inverso de PI, con su verdadera posición espacial. Se supone una zona de falla tectónica vertical, mapeada por una diferencia en el nivel del campo magnético.

Por los resultados del PI, las anomalías amplias de bajo valores de cargabilidad, no mayores a tres veces el fondo normal (12 mV/V) y bajos valores de la constante de tiempo (τ), sacamos la conclusión que la mineralización es diseminada y de granos finos, aumentando el grado de mineralización con la profundidad (hasta 160m, profundidad de estudio). Se propone y se recomiendan gráficamente las zonas de posibles investigaciones futuras al NE y al SW donde las anomalías de PI quedaron abiertas, además se marcan los puntos para los pozos de perforación, con orden de prioridad y profundidad máxima.

Abstract

The realization the geophysical works of IP and Ground Magnetics in the auriferous location of Miraflores, were carried out between the months of June and July the 2000, being part of the agreement INGEOMINAS-MINERCOL-GEOMINERA SA in an area of 0.4 Km².

In the area prevail the basalts of greenish tonalities, and frequently can be recognized textural variations to diabase. A system of faults and/or fractures has been developed, creating the open spaces that host the auriferous mineralization. The region is broadly well-known for its auriferous resources and its wide mineralized areas have been exploited in veins. The predominant sulphide is the pyrite, continuing in order of importance the sphalerite, the galena and the chalcopyrite.

Given the geologic conditions of the previously exposed mineralization and taking into account the geological tasks outlined to the geophysical investigations a complex of geophysical methods was designed, composed of:

- Magnetics.
- Induced Polarization.

As a result of the Complex Geophysical Interpretation, from the magnetic data and their transformations could be mapped the circular structures that have their origin in the chimneys of breaches and in other types of more local structures. Around these features and in their external outlines are located the dipole's anomalies of the Vertical Magnetic Gradient and the maximums in chargeability values (around 12 mV/V).

The most important anomalies of PI are delineated and have correlation with the mineralization. The anomalous areas, as result of the Inverse modeling of the IP anomalies, are located with their true spatial position. An area with a vertical fault, is mapped because of a difference the level of the magnetic field. New areas for following-up are recommended and shown graphically to the NE and the SW where the anomalies of PI are still open. The locations of the perforation wells are marked as well, with order of priority and maximum depth.

Introducción

La mina Miraflores se ubica sobre las estribaciones orientales de la Cordillera Occidental, aproximadamente a unos 4 Km, al noroccidente del Corregimiento de Irra, Municipio Quinchía, Departamento de Risaralda, Colombia (Fig.1).

Como características del área es necesario destacar que se ubica sobre una ladera de fuerte pendiente, aproximadamente 50-60 grados, y que la misma está cortada por tres quebradas principales, algunas creadas o ampliadas de forma manual, donde se vierten diariamente los materiales de desechos que se obtienen de la explotación minera. Estos desechos han ido creando una gran escombrera que ocupa alrededor del 40% del área de los trabajos y cuyo espesor oscila entre los 2 y 3 metros. Como aspecto negativo, las escombreras crean dificultad desde el punto de vista geoeléctrico, aumentando considerablemente la resistencia del terreno.

Las tareas geológicas a los métodos geofísicos fueron las siguientes:

1. Determinar la extensión de la mineralización según su dirección.
2. Determinar la mineralización en profundidad.
3. Apoyar la cartografía geológica y estructural de la zona.

Sobre la base de la morfología de los cuerpos minerales descritos en la zona de investigación, la red ejecutada de los trabajos geofísicos terrestres fue de 50 x 10 metros y de 100 x 25 metros para la

Magnetometría y la Polarización Inducida respectivamente, con la dirección de las líneas topográficas N66E, ellas perpendiculares a la dirección principal de la mineralización.

DISEÑO DE LA METODOLOGÍA EMPLEADA EN LA REALIZACIÓN DE LAS INVESTIGACIONES GEOFÍSICAS DE CAMPO.

Se utilizó el equipo ENVI-MAG (SCINTREX LTD) para la realización de las mediciones ordinarias magnetométricas en las estaciones y para las determinaciones de las variaciones diurnas del Campo Geomagnético, se utilizó el método de Tie-Line, por no contar con otro equipo para utilizar como estación base.

En el Método de Polarización Inducida se utilizó la variante Dipolo – Dipolo con 6 dipolos de medición ($n=6$), con separación entre electrodos de 25 metros ($a=25$ metros). Con la utilización de la variante Dipolo – Dipolo se pretendió resolver las variaciones laterales de los parámetros medidos (Cargabilidad y Resistividad), pues este dispositivo tiene bajo acoplamiento inductivo y las anomalías son simétricas. Con esta configuración de electrodos se investigó hasta la profundidad de 100 metros aproximadamente. Hay que tener en cuenta que debido al relieve abrupto, pendientes mayores de 50 grados, la relación de profundidad varía en toda la línea.

Se utilizó el complejo geoeléctrico de resistividad y polarización inducida IPR-12, motor generador y transmisor TSQ-3, todos de la SCINTREX LTD, el resto de la logística fue la comúnmente utilizada para estos fines, electrodos de acero para las líneas de corrientes y no polarizables del sistema Virg, para los potenciales.

El tiempo de transmisión tomado fue de 2 segundos, obteniéndose una sincronización total con el receptor. Este tiempo señaló con precisión las anomalías de PI, además de resultar muy productivo en las mediciones de campo. La ventana de medición fue la M09, es una ventana que se encuentra en el punto medio de la curva de descarga.

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS Y DISCUSIÓN.

El campo magnético total sobre el área de la mina de Miraflores es un campo tranquilo, indicando sobre las características de las propiedades magnéticas de las rocas presentes, ello muestra que estas rocas son medianamente magnéticas y que no existen diferencias notables que eleven el campo magnético y establezcan anomalías que por su amplitud difieran de los datos geológicos conocidos. Las diferencias son de índole estructural, estableciéndose variaciones solamente en el carácter del campo magnético (Fig.2).

El campo magnético regional (Fig.2), muestra las mismas características, hecho que valida estos resultados en profundidad, es decir las estructuras y profundidad de las fuentes anómalas se mantienen y se reflejan en este propio campo regional.

Si analizamos el espectro de energía de las fuentes anómalas, se señala que en su totalidad los estimados de profundidad no son mayores a los 60 metros, la curva del espectro de energía muestra una pendiente muy regular en la parte correspondiente a las fuentes superficiales.

Sobre las zonas mineralizadas, se destaca el aumento relativo del campo magnético anómalo en el exocontacto (borde externo) de la estructura de las brechas de composición de rocas verdes (basaltos o diabasas), con un aumento de hasta 200nT. A lo largo de la línea L100N-L150N, se manifiesta un pequeño mínimo que pudiera tener relación con una probable línea de falla tectónica de poco o casi ningún desplazamiento lateral, esta dirección es de N60E aproximadamente, Falla Miraflores.

En el mapa del Gradiente Magnético Vertical (GMV), mapa que resalta las anomalías producidas por fuentes anómalas superficiales, se manifiestan pequeñas anomalías que tienen seguramente su origen en procesos de alteraciones superficiales en las zonas de mineralización, variaciones en el contenido de minerales magnéticos que son usuales en estos tipos de yacimientos. Muy bien se mapea la estructura de la chimenea de brechas, como un mínimo del GMV.

El mayor problema para resolver los modelos de interpretación cuantitativa está en el desconocimiento de las propiedades magnéticas de las rocas del yacimiento, esto para futuros trabajos debe ser resuelto, por ello no se realiza una interpretación por perfil o línea de medición.

Al establecer la correlación entre las diferentes líneas de medición y los parámetros de resistividad (Res) y cargabilidad (M), se determina un fondo normal de aproximadamente 3 a 4 mV/V y de 40 a 60 Ohm-m, para la cargabilidad y la resistividad respectivamente. Partiendo de estos resultados podemos entonces realizar un análisis cualitativo línea a línea de la distribución de estos parámetros en área y profundidad.

Línea L200N: Las zonas resistivas se mantienen igualmente que en la línea anterior, aunque su distribución es muy caótica. Aquí los valores de M son los mayores para el área de estudio, llegando hasta el máximo de 13 mV/V. Al final de la línea disminuyen hasta llegar a los valores del fondo normal. Con los resultados de esta línea, podemos hablar de una mineralización diseminada, un halo muy amplio que constituye la zona anómala de PI.

Línea L300N: En esta línea se mapean altos valores de Res, al parecer asociado a las rocas aflorantes en una quebrada al comienzo de la línea. Al final de la línea aumenta la Res, también producto de atravesar otra quebrada aflorante. La zona anómala de M, se amplía y se distribuye formando una anomalía tipo **pant leg**, con máximo valor de hasta 12 mV/V, tres veces el fondo normal. Esta línea bordea la estructura de las brechas en su porción SW y muestra un incremento en la mineralización metálica.

Al realizar un análisis de los resultados del método de PI, ploteando los datos y confeccionando los mapas de imágenes - isóneas, vemos que para $n=2$, profundidad alrededor de los 40m, la anomalía de cargabilidad se manifiesta sobre la zona NE, aquí se localizan las mineralizaciones en la brecha y en los contactos exteriores. La anomalía queda abierta hacia el Norte.

En la Fig.3, profundidad mayor, alrededor de los 80-90 m, las características de la M y la Res se mantienen algo parecido, aunque aquí son mucho más claras las anomalías en el exocontacto de las brechas, pues en las partes superiores de estos tipos de yacimientos hay un incremento de las alteraciones minerales y pequeñas zonas de cizallas y fracturas, en muchos casos con mineralización sulfurosa.

En la profundidad se ve igualmente que la anomalía queda abierta al Norte y al Sur. En la Fig.3 las resistividades confirman las diferencias señaladas en las líneas o pseudo-cortes, el aumento de la Res en los afloramientos de las quebradas y en los destapes realizados por los mineros.

Interpretación Geofísica Compleja.

Primeramente, realizaremos un análisis de los Modelos de Inversión de Resistividad y Cargabilidad para las líneas L200N y L300N. Estas líneas son las óptimas para este modelaje de inversión, pues presentan buenas y claras anomalías de Res y M. Señalamos con anterioridad que el relieve abrupto distorsiona la posición de las anomalías, llevando a grandes errores en la interpretación. Aplicando el algoritmo de Respuestas de Inversión de Resistividad y Polarización Inducida (Win2DInv) se redujo considerablemente la posibilidad de errores en la determinación espacial de las fuentes anómalas, obteniéndose las siguientes conclusiones:

Línea 200N. La anomalía de M se ubica entre las estaciones 50E y 350E, aquí el halo anómalo es amplio por toda la línea, con una media de profundidad de 120 m. La Res mayor de 2000 Ohm-m se ubica entre las estaciones 350E-450E, con el centro de la anomalía a 60 m de profundidad (Fig.4).

Línea 300N. Dos zonas anómalas de M, la primera el centro se encuentra a 125m de profundidad por debajo de estación 150E y la otra entre las estaciones 250E –375E a la misma profundidad. La resistividad forma un centro en forma de esfera por debajo de la estación 275E y a la profundidad de 120 m aproximadamente (Fig.5).

Realizamos un análisis cualitativo de los parámetros espectrales Cole-Cole, la constante de tiempo (τ) y la cargabilidad verdadera (M_v), parámetros que indican sobre el tipo de mineralización y tamaños de los granos minerales y encontramos pequeños valores de τ y de M_v , que sugieren que la mineralización es diseminada de pequeños granos, esto se ajusta perfectamente al sector de los trabajos.

En la Fig. 6, Mapa de Interpretación Geofísica Compleja, se reflejan las respuestas geólogo - geofísicas a los campos físicos. Por los datos magnéticos y sus transformaciones se mapean las estructuras circulares que tienen su origen en las chimeneas de brechas y otro tipo de estructura más local que pudiera ser el reflejo de los diferentes procesos de formación de estas brechas, como alteraciones superficiales.

Prácticamente con pequeñas diferencias hay una total coincidencia con los límites geológicos de esta estructura de brecha, según mapeo geológico. Alrededor de ella y por su borde externo se sitúan las anomalías de dipolo del GMV.

Se reflejan en el mismo mapa las anomalías de PI, las más importantes y que seguramente tienen correlación con la mineralización. Se sitúan igualmente las zonas anómalas de la interpretación del Modelo Inverso de PI, con su verdadera posición espacial. Se supone una zona de falla tectónica, vertical, mapeada por una diferencia en el nivel del campo magnético.

Se propone y se recomienda gráficamente las zonas de posibles investigaciones futuras al NE y al SW donde las anomalías de PI quedaron abiertas, además se marcan los puntos para los pozos de perforación, con orden de prioridad y profundidad máxima.

CONCLUSIONES

Los resultados alcanzados con los estudios geofísicos en la Mina Miraflores, Quinchía, podemos considerarlo como positivos, atendiendo a las dificultades del relieve, de las escombreras mineras, de la falta total de conocimientos de las propiedades petrofísicas de las rocas y minerales del sector, la falta de un trazado topográfico para los estudios geofísicos y lo más importante la realización de los estudios geofísicos desplazados de los geológicos. No obstante estas dificultades, sacamos las siguientes conclusiones:

- Se localizan las zonas más perspectivas para la mineralización sulfurosa y posteriormente si los resultados geoquímicos en estas propias zonas son favorables en contenido de mena aurífera, entonces se podría realizar un cálculo pronóstico de las reservas del yacimiento dentro del área de estudio.
- Se mapea la estructura principal de la chimenea de brecha y una estructura local, reflejo de los procesos de alteración superficial propios de estos tipos de yacimientos.
- Por los resultados del PI, anomalías amplias de bajo valores de cargabilidad, no mayores a tres veces el fondo normal y bajos valores de la constante de tiempo (τ), sacamos la conclusión que la mineralización es diseminada y de granos finos, aumentando el grado de mineralización con la profundidad (ver líneas de los Modelos Inversos de PI, Figuras. 4 y 5).

- Se señalan las zonas para las futuras investigaciones geofísicas, según los resultados alcanzados en esta etapa de la investigación, así como también los puntos de las perforaciones de prospección con las profundidades máximas a alcanzar.
- Lograr cumplir las etapas de las investigaciones, con una estrategia bien definida para cada uno de los métodos de investigación proyectado. Hay que integrar los métodos en tiempo, que permita una correlación y reconocimiento adecuado de las zonas anómalas geólogo - geoquímica y geofísica.
- Realizar una evaluación de las características petrofísicas del sector para apoyar la interpretación geofísica y dar cumplimiento a todas las tareas geológicas planteadas.
- Proyectar trabajos geofísicos de Polarización Inducida y Magnéticos en las zonas abiertas de anomalías de cargabilidad al NE y SW, además crear condiciones técnicas para estudiar si es necesario a mayor profundidad.
- De comprobarse el aumento de la mineralización de granos gruesos (metálica) en profundidad, entonces se pudiera proyectar algún método electromagnético. También es posible aplicar la espectrometría (radioactividad), para la separación de las rocas de composición más ácidas y medias y estudiar de este modo el yacimiento en cuanto a las secuencias de estadios de la mineralización.

BIBLIOGRAFIA

Carrillo, Víctor L. Geología Detallada. Caracterización y Evaluación Preliminar del Yacimiento Aurífero de Miraflores, Quinchía, Risaralda, ECOMINAS, 1991.

Dieter Vogelsang, Environmental Geophysics. A practical Guide, Springer-Verlag, 1992.

Colin V. Reeves y otros. International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences, Holanda, 1992.

Geosoft, Inc. Geosoft Mapping and Processing System, 1994.

W.M. Telford, L.P. Geldart, R.E. Sheriff, Applied Geophysics, Cambridge, Second Edition, 1990.

Scintrex Limited, Manual del Operador, IPR-12, Time Domain, 1994.

Elías Sánchez, Elio y Roy, Jean. Herramientas computarizadas para el modelaje 2D de Resistividad y Polarización Inducida y la Inversión de datos de campo, 1999.

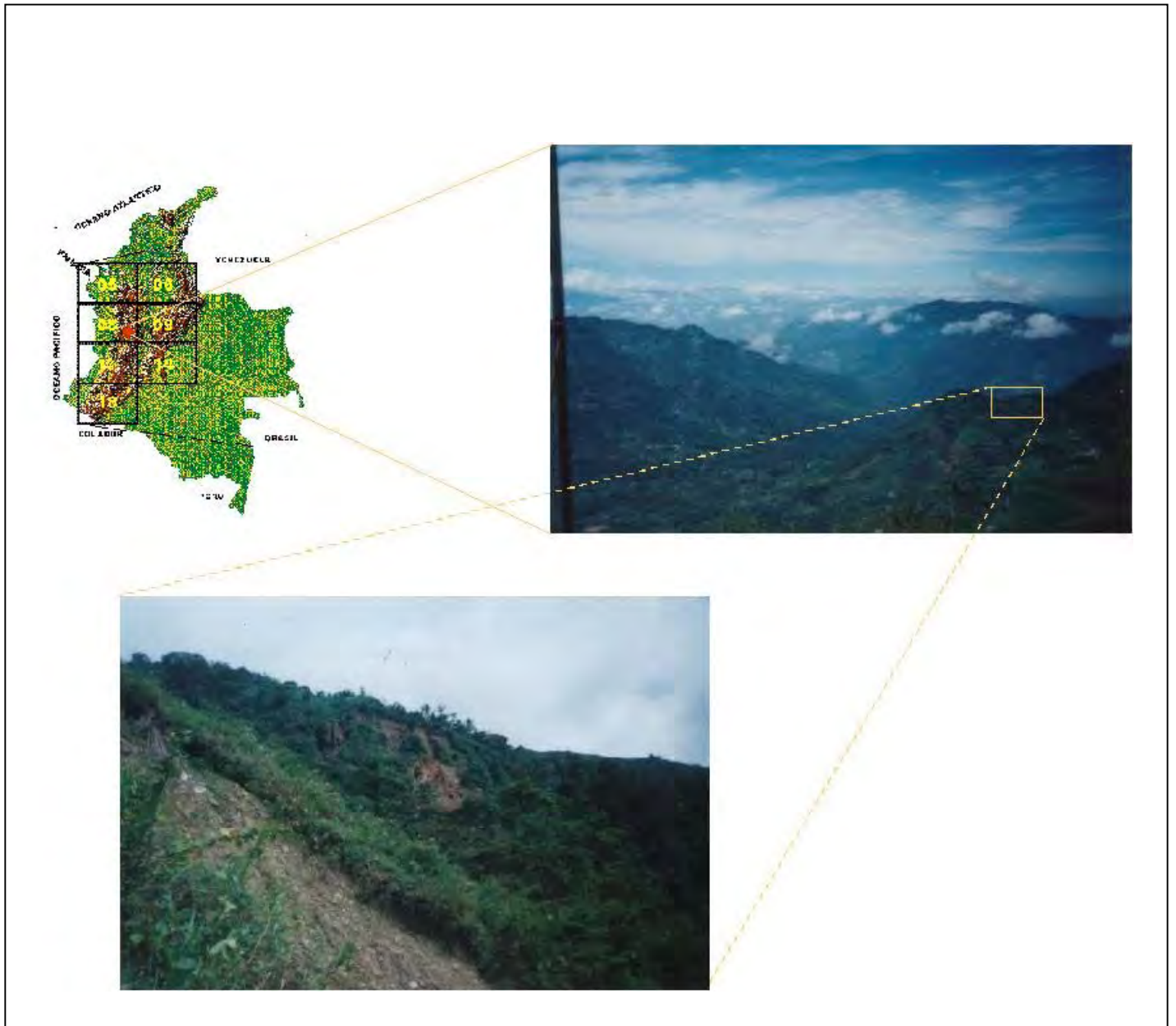


Figura 1. Mapa de Ubicación del sector de la Mina Miraflores, Quinchía. Colombia

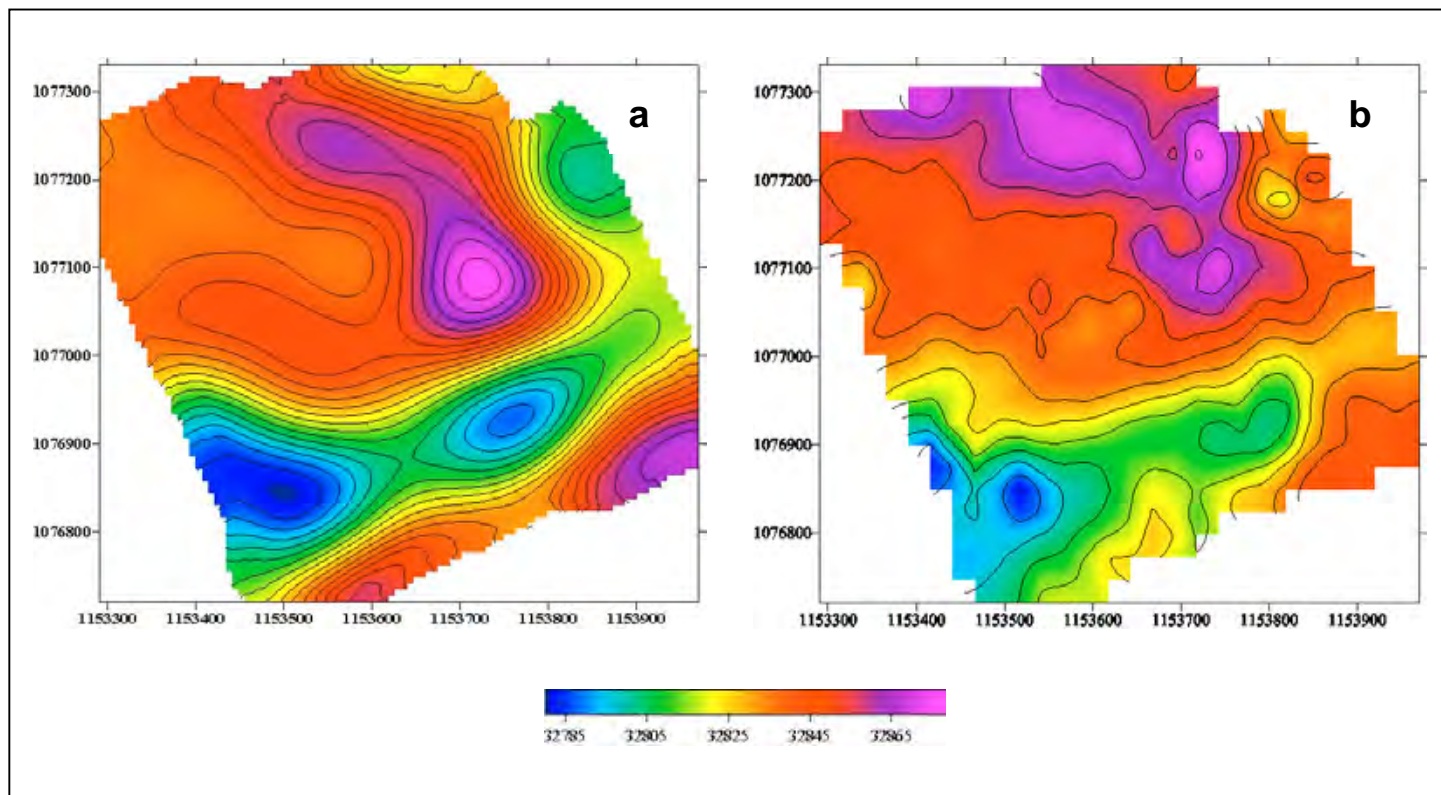


Figura 2. Mapa de imagen. a) Campo Magnético Regional b) Campo Magnético Total

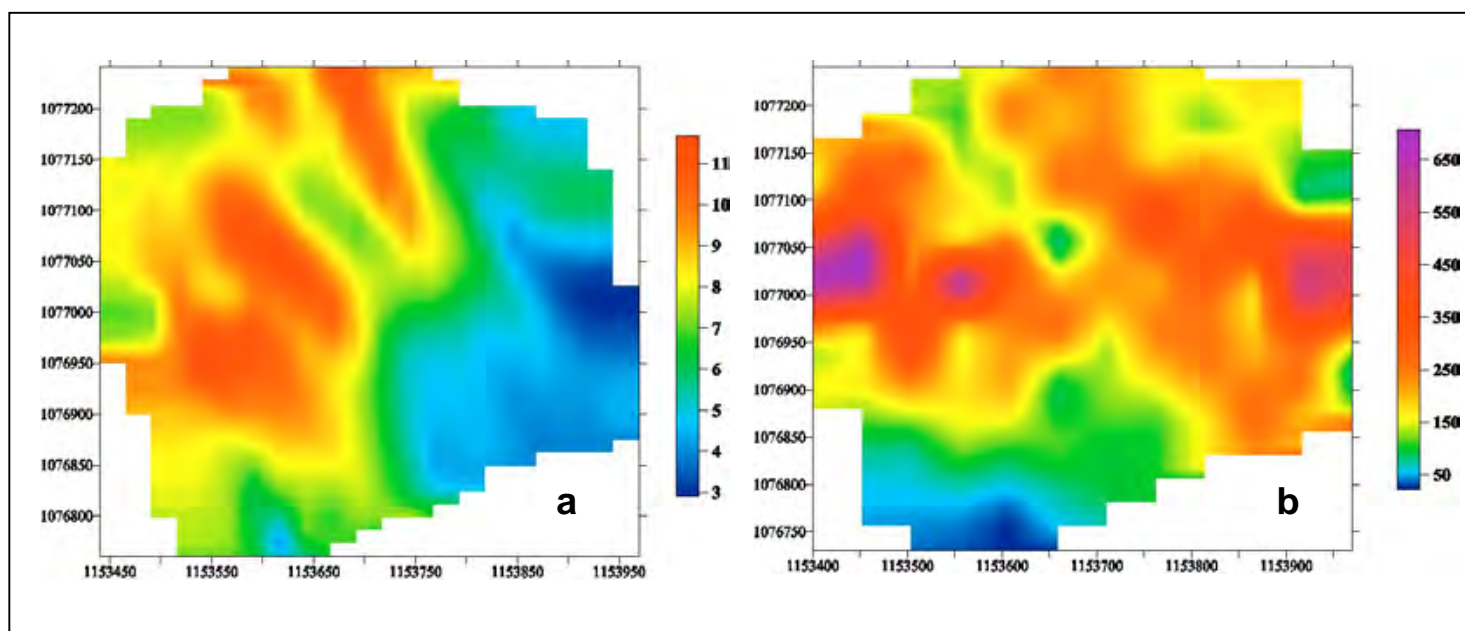


Figura 3. Mapa de imagen de PI para $n=5$. a) Cargabilidad b) Resistividad

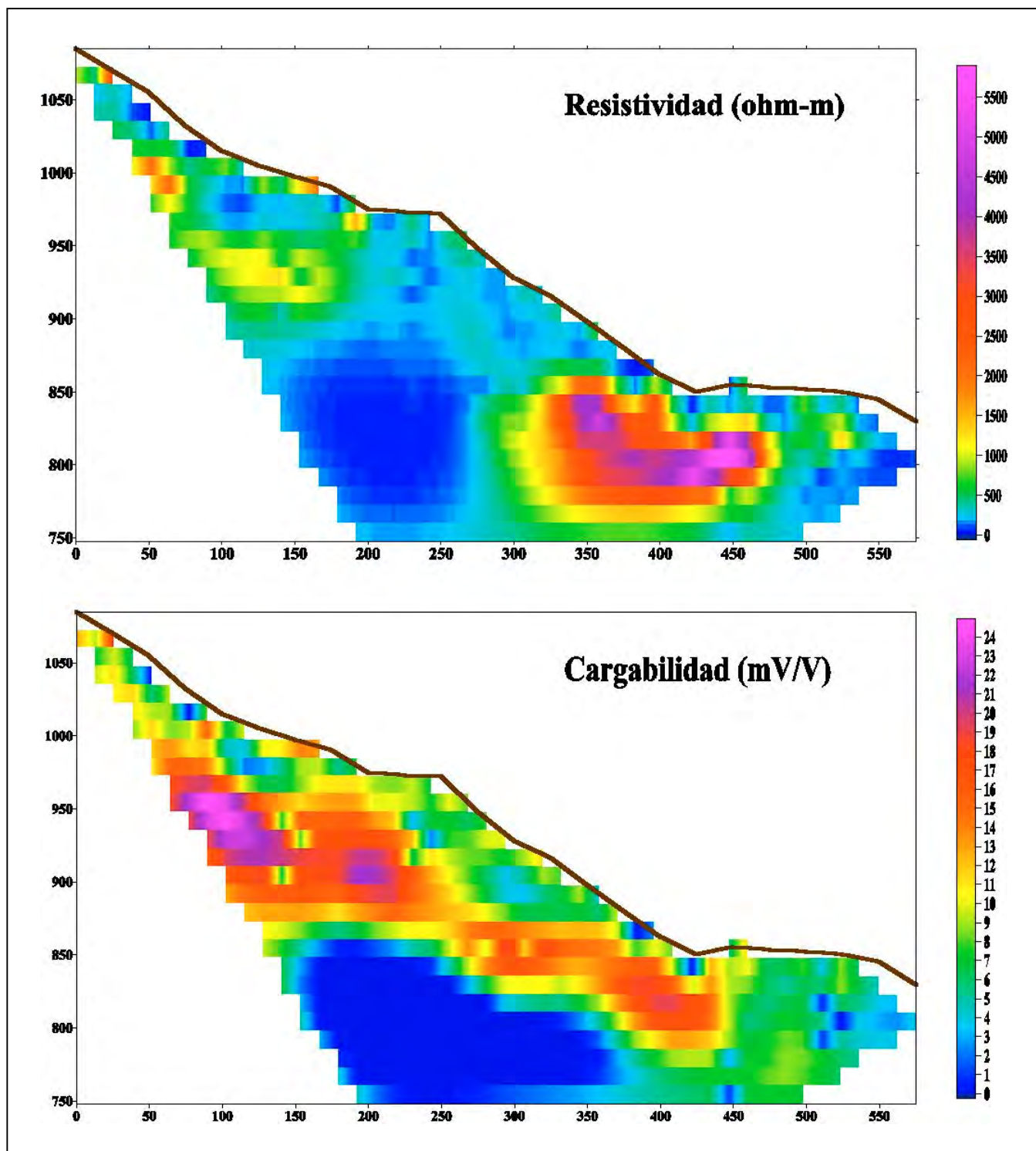


Figura 4. Modelo de Inversión en 2D, Línea 200 N.

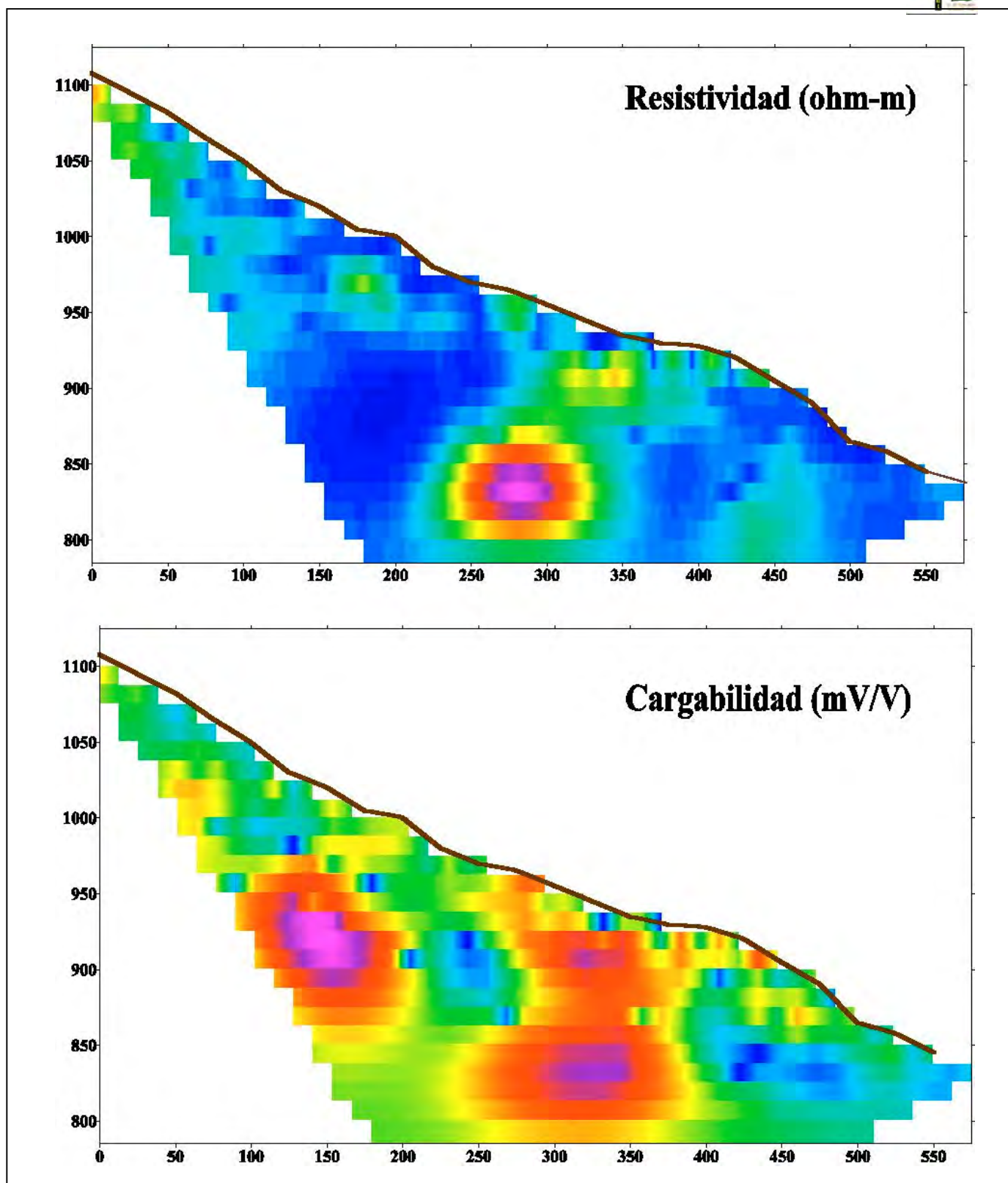


Figura 5. Modelo de Inversión en 2D, Línea 300 N.

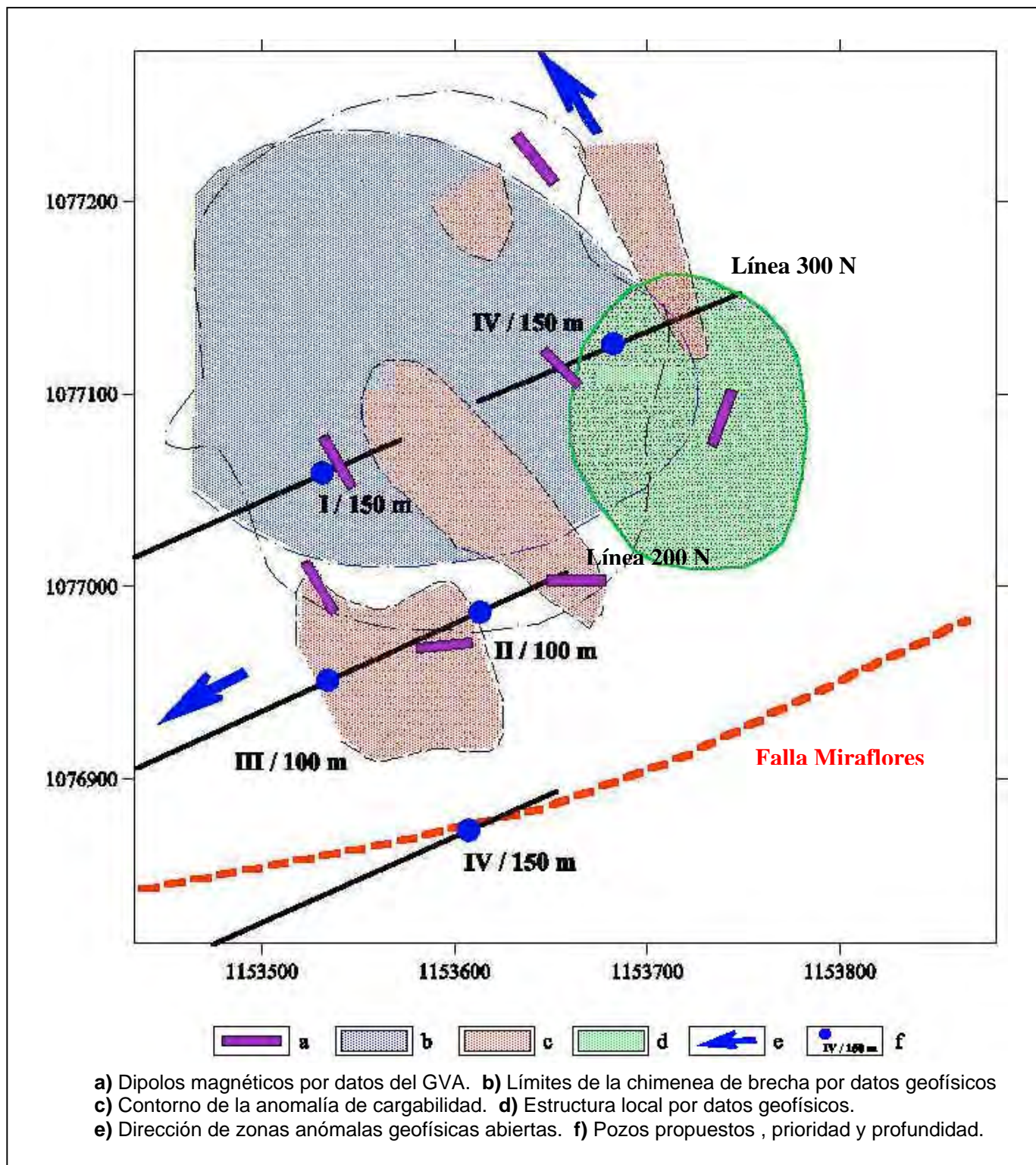


Figura 6. Mapa de interpretación geofísica. Mina Miraflores.

SONDEO DE RESONANCIA MAGNÉTICO NUCLEAR (SRMN) EN LAS INVESTIGACIONES HIDROGEOLÓGICAS.

Evelio Martínez del Pino¹, José L. Peñate Fleites¹

(1) Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos de Villa Clara, Av. Libertadores 201e/ Danielito y J. Menéndez, Santa Clara, V.C, Cuba. E-Mail: eiphvc@ip.etecsa.cu

RESUMEN

Según estimados de las Naciones Unidas la población global se incrementara en 2 billones de personas para el año 2025 provocando un aumento de la producción alimenticia y consecuentemente un incremento de las demandas de agua en un 20%. Por consiguiente la exploración y explotación de las aguas subterráneas constituyen prioridades para el desarrollo en países donde este recurso es escaso como África y países Americanos y Caribeños.

La técnica de SRMN permite investigar las propiedades físicas de los acuíferos con ahorro de recursos y tiempo ya que es directamente sensible al número de átomos libres de hidrógeno y consecuentemente a la presencia de agua extraíble del subsuelo. La inversión de los datos de SRMN indica la distribución espacial, la profundidad, potencia del acuífero y contenido de agua además de estimar la transmisibilidad y características del espacio poroso de las rocas. En el presente trabajo se procesan datos de SRMN obtenidos en un alto nivel de ruido e intensidad magnética baja. Para el planeamiento racional del SRMN se presenta un sumario de gráficos de RMN con diferentes características del campo y dispositivos de medición. Finalmente, algunas observaciones y surgencias para aplicación de la técnica en otras regiones son derivadas de las investigaciones realizadas en Sur África, Namibia y Holanda.

ABSTRACT

According to estimates of the United Nations the global population will increase in 2 billions of persons for the year 2025 provoking an increase in the nutritional production and consequently an increase of the water demands in a 20%. Consequently the exploration and use of the groundwater reservoirs constitute priorities for the development in countries where this resource is scarce as Africa, American and Caribbean countries.

The Magnetic Resonance Sounding methodology is able to resolve the aquifer characterisation of an area with a high degree of resolution in aquifer parameter estimation saving time and resources. Currently the technique is in development phase and refinement and several experiments have been carried out in order to increase its level of performance and reliability under different ambient conditions. In the present investigation a set of MRS data acquired in the presence of high ambient noise and low Earth's magnetic field is analysed and processed. As a complement for the MRS survey planning, a summary of graphs, which summarises the MRS response for different field characteristics and survey layouts, are presented. Finally some observations and suggestions are derived from the current research results (South Africa, Namibia and The Netherlands) in order to extrapolate the application of the MRS technique to other countries.

Introducción.

Desde el surgimiento de la humanidad el uso del agua ha constituido uno de los factores básicos en la vida del hombre. Actualmente este recurso natural es considerado como una de las prioridades esenciales de la vida y desarrollo económico-social en países del Africa y Latinoamérica. Una de las principales tareas durante la prospección de aguas subterráneas y el modelaje de los acuíferos lo constituye la determinación de la cantidad explotable de agua,

extensión y potencia de los acuíferos así como la estimación de los parámetros hidráulicos que los caracterizan. En muchos casos, las técnicas convencionales de la geofísica (Electromagnetismo, Geoelectricidad, Sísmica), perforación de pozos, muestreos hidrogeológicos, etc utilizadas con este fin no resuelven los requerimientos de las investigaciones o resultan ser muy costosos.

Recientemente (a finales de 1978) la metodología del Sondeo de Resonancia Magnético-Nuclear (SRMN) fue introducida como una técnica de exploración y caracterización de los acuíferos. La misma provee una herramienta única para la investigación no invasiva a partir de mediciones realizadas desde la superficie de las propiedades físicas de los acuíferos presentes en el subsuelo puesto que es directamente sensible al número de átomos (protones libres de hidrógeno) y consecuentemente a la presencia de agua extraíble de los acuíferos.

Básicamente la inversión e interpretación de los datos de SRMN nos suministra información de la distribución espacial del agua subterránea, la profundidad, potencia y contenido de agua de los acuíferos detectados así como la posibilidad de estimar las características hidro-físicas de los colectores (propiedades granulométricas, porosidad, trasmisividad, etc).

El presente trabajo estuvo dirigido fundamentalmente a:

- a. Procesar, interpretar y evaluar un grupo de Sondeos de Resonancia Magnético-Nuclear realizados en presencia de un campo magnético de baja intensidad y ruido natural alto (South Africa y Namibia) y en condiciones de campo favorables (Holanda).
- b. Validar la utilidad y aplicación práctica de la técnica de SRMN en la exploración y cuantificación de las reservas de aguas subterráneas en diferentes medios geológicos para su posible extensión a otros países como el caso de Cuba.
- c. Modelar el efecto de los parámetros que afectan la respuesta del método y producir un grupo de gráficos (en función de las variables más significativas como son el contenido de agua, la profundidad y potencia de los acuíferos, la magnitud e inclinación del campo magnético terrestre, el tamaño de espira) útiles para la aplicación de la técnica en diferentes condiciones geológicas y ambientales donde no se ha experimentado el uso de dicha técnica.

Es necesario destacar que actualmente la técnica de SRMN se encuentra en vías de desarrollo y perfeccionamiento aunque en la actualidad ya existen versiones comerciales de esta metodología de investigación como son el NUMIS y NUMIS^{PLUS} fabricados mayormente por la IRIS INSTRUMENTS, en Francia.

Principios Del Sondeo De Resonancia Magnético Nuclear (SRMN).

Los principios físicos del método se basan en el fenómeno de la Resonancia Magnético Nuclear empleado en los campos de la Medicina, Espectroscopia Nuclear, Química y Biofísica. La metodología del SRMN permite la detección directa del agua subterránea a través de mediciones del *campo magnético de relajación* producido por los protones de hidrógeno de las aguas subterráneas. Con estos fines se utilizan los equipos de Resonancia Magnético Nuclear como el NUMIS^{PLUS} fabricado y comercializado por la compañía francesa IRIS Instruments.

Usualmente, para la ejecución de un Sondeo de Resonancia Magnético-Nuclear, un pulso corto de campo electromagnético generado por una corriente alterna con frecuencia igual a la Frecuencia de Precesión de Larmor de los protones de hidrógeno es aplicado a la tierra a través de una espira de alambre dispuesta sobre la superficie. Un sondeo en profundidad es ejecutado variando el parámetro del pulso de corriente expresado como el producto de la amplitud de la corriente por su duración. De este modo el campo magnético inducido es medido y analizado para varios pulsos de corriente.

El *Campo Magnético Estático* H_0 (Campo Magnético Terrestre) determina la frecuencia de excitación de los protones de hidrógeno denominada *Frecuencia de Larmor* igual a $F_{L(Hz)} = 0.04258 \times H_{0(nT)}$, *Legchenko et al. (1997)*. El campo electromagnético H_1 generado por la espira tendida en la superficie del terreno romperá el equilibrio de los espines magnéticos (momento magnético) de los protones de hidrógeno del agua respecto al campo magnético estático causando su precesión alrededor del campo magnético terrestre. El momento magnético (M_0) se inclina del campo magnético estático con un ángulo θ , mientras se encuentra aun precesionando a la frecuencia de Larmor.

Después que el pulso es suprimido, el momento magnético precesiona libremente regresando a su posición de equilibrio (M_0 alineado con H_0) después de una caída de relajación caracterizada por una amplitud inicial y una constante de tiempo T_2^* . La señal sinusoidal de caída libre (voltaje) inducida durante este proceso es medida en la superficie utilizando la misma espira de excitación como dispositivo de medición.

Un posterior procesamiento e interpretación de las señales de RMN permite la estimación de las características hidrogeológicas de los horizontes acuíferos detectados. En la tabla presentada a continuación se muestra una relación de propiedades físicas de las rocas obtenidas a partir del método de SRMN; *Schirov et al. (1991)*, *Lieblich et al. (1994)*, *Goldman et al. (1994)* *Legchenko et al. (1997)*; *Legchenko and Shushakov (1998)*.

Tabla I. Relación de propiedades físicas de las rocas derivadas del procesamiento de los datos de SRMN.

Magnitud física de RMN	Símbolo	Propiedades físicas
Amplitud de la señal	E_0	Contenido de agua (porosidad)
Tiempo de caída	T_2^*	Tamaño de poros
Fase de la señal	φ_0	Conductividad eléctrica del acuífero
Intensidad del pulso	q	Profundidad de investigación.

Modelaje De La Respuesta Del SRMN.

Considerando la efectividad del método de SRMN y su posible extensión a otras latitudes se diseñó un programa de trabajo para modelar la respuesta de RMN considerando las variables más significativas como el contenido de agua, la profundidad y potencia de los acuíferos, la magnitud e inclinación del campo geomagnético, el tamaño y forma de espira.

La caracterización hidrogeológica de los acuíferos patrones se realizó en colaboración conjunta con el Dpto. De Ingeniería Geológica de la EIPH de Villa Clara. El modelo se conformó por un horizonte de 5m de potencia a diferentes profundidades con un contenido de agua del 10%. La intensidad del campo geomagnético se fijó en 44779 nT con inclinación igual a 54°. El tiempo de caída de la señal fue de 300ms, característico en sedimentos arenosos y gravosos.

La respuesta de RMN se calculó para 5 tipos de espiras: Circular, en Ocho, Cuadrada, Cuadrada en Ocho y Múltiple Cuadrada en Ocho. La amplitud máxima de la señal versus la profundidad hasta el centro de una capa acuífera de 5 metros de potencia para diferentes configuraciones de espira se muestra en la Figura 2, de la que se derivan los siguientes planteamientos:

- El modelo de acuífero empleado produce respuestas de RMN detectables por encima del nivel de ruido permisible (10 nV) por los instrumentos de medición actuales.
- La amplitud máxima de señal se obtiene preferentemente con espiras circulares y cuadradas.
- El uso de espiras en forma de ocho múltiples reduce considerablemente la profundidad de investigación.

Adquisición De Los Datos De SRMN.

El planeamiento y ejecución de los trabajos experimentales de SRMN de campo se realizó por el grupo de Exploración Geofísica del ITC-Delft (Dr. J. Roy, Msc. E. Martínez y MSc. M. Koogthlang) en colaboración con el Departamento de Asuntos del Agua (DWA), Levantamientos Geológicos de Namibia (GSN), el personal de la CSIR en South Africa y la IRIS Instruments de Francia. La adquisición de los datos se llevó a cabo utilizando los instrumentos IRIS-NUMIS y NUMIS^{PLUS}.

Detalles acerca de las características de los levantamientos y áreas de trabajo se presentan en las tablas II, III y IV.

Resultados.

Los resultados de la inversión de los datos de SRMN analizados en el presente trabajo se presentan en las figuras 4,5 y 6 en las que aparecen los siguientes gráficos.

- a) Amplitud inicial $E_0(q)$, ruido y curva de ajuste de inversión vs el parámetro de pulso q .
- b) Frecuencia de precesión vs el parámetro de pulso q .
- c) Cambio de fase (entre el campo de relajación y la corriente de excitación) vs el parámetro de pulso q .
- d) Distribución en profundidad del contenido de agua.
- e) Distribución en profundidad del tiempo de caída.
- f) Resistividad de capa obtenida de la inversión de los datos de SEV.

SRMN Realizado En Settlers (South Africa).

La descripción de la sección litológica (obtenida a partir de la interpretación de una cinta de video grabada por la compañía CSIR de South Africa y hecha disponible por cortesía del Sr. R. Meyer de la SCIR) indica que la misma esta formada por rocas basálticas (bloques de lava fracturados) y areniscas. A pesar de las propiedades magnéticas de las rocas basálticas no se evidenció respuesta alguna durante el levantamiento magnético realizado. La distribución de las resistividades del corte geológico se obtuvo de un Sondeo Eléctrico Vertical (CaIBH14) localizado en el pozo M-4 (cortesía de la CSIR). Durante la inversión de los datos de SRMN se detectaron básicamente dos horizontes acuíferos. Detalles acerca de su contenido de agua y tiempo de caída se muestran en la Figura 4.

El primer horizonte acuífero se localiza aproximadamente desde 3 hasta 9m de profundidad con un contenido de agua menor que el 1%. Se considera que esta capa esta representada por sedimentos arcillosos.

El segundo horizonte se estimó desde 20m hasta el alcance máximo de la espira utilizada. En el intervalo desde 20 hasta 24m se diferencia una capa con un contenido de agua menor que 2% y un tiempo de caída cercano a los 70ms. Este horizonte acuífero se representa por bloques de lava cementados con materiales de grano fino. A partir de los 24m subyacen las areniscas con un tiempo de caída T_2^* de 110ms indicando una conductividad hidráulica relativamente buena; dicho horizonte presenta un contenido de agua alrededor del 3%. Se considera que el intervalo formado por las areniscas es el principal aportador de agua hasta las profundidades investigadas por su mayor porosidad efectiva, potencia y mayor tiempo de caída de la señal.

SRMN Realizado En Hentisbay (Namibia).

Según la Figura 4 el principal horizonte acuífero se detectó aproximadamente desde los 14 hasta los 33m con un contenido de agua alrededor del 2%. El tiempo de caída T_2^* estimado para este intervalo fue de 30ms, características comunes en sedimentos arcillo arenosos con poca conductividad hidráulica.

SRMN Realizado En Waalwijk (Holanda).

La distribución de las resistividades en el área de estudio se obtuvo de los SEV W-1 y W-2 realizados en diferentes direcciones partiendo del centro de la espira de SRMN.

En la figura 5 se hace una representación de los resultados obtenidos de la inversión de los datos de SRMN colectados en Diciembre del 1997 y Enero del 2000 en la misma área usando la misma configuración y dimensiones de espiras con equipos de medición diferentes (NUMIS, NUMIS^{PLUS}).

La diferencia de frecuencias observada en ambos casos (Figura 5-b) puede ser asociada a las variaciones temporales (variaciones anuales) del campo geomagnético.

Como resultados de la interpretación se detectaron tres horizontes acuíferos con diferentes características hidrogeológicas. El primer horizonte se localiza desde 3 hasta 10m de

profundidad con un contenido de agua alrededor del 20%, el tiempo de caída observado sobre este horizonte se estimó alrededor de los 100ms asociándose en este caso a sedimentos arenosos de grano fino.

El principal horizonte acuífero se localizó aproximadamente desde 10 hasta 42m con un contenido de agua de 34%. Sobre esta capa se estimó un T_2^* de 200ms indicando la existencia de un horizonte con buena conductividad hidráulica (arenas de grano medio a grueso).

El techo del horizonte más profundo se detectó alrededor de los 42m de profundidad con un contenido de agua de 25%, el estimado del tiempo de caída de la señal (T_2^*) fue de 130ms lo que indica una conductividad hidráulica inferior a la del horizonte suprayacente. El piso de este horizonte no se alcanzó debido a las restricciones de profundidad impuestos por las dimensiones de la espira usada en la exploración.

Conclusiones Y Recomendaciones.

Evidentemente la metodología del SRMN introduce un salto cualitativo en la prospección y cuantificación de las reservas explotables de aguas subterráneas en comparación con las técnicas actuales (convencionales y no convencionales) que comúnmente se utilizan con tal propósito en el mundo de las investigaciones hidrogeológicas.

Dentro de las principales ventajas del SRMN podemos mencionar:

- La técnica de SRMN detecta la presencia del agua subterránea en diferentes ambientes geológicos (acuíferos horizontalmente estratificados y de fractura) así como selectivamente determina la estructura del corte geológico por el contenido de agua y el tiempo de caída sin contar con información a priori del área de estudio.
- El SRMN puede ser satisfactoriamente empleado para el planeamiento de la perforación de calas para el abasto de agua reduciendo el número de pozos improductivos.
- La aplicación conjunta del SRMN con otras técnicas geofísicas pueden mejorar la solución final de los modelos hidrogeológicos de una región específica.

Las principales componentes del presente trabajo se enfocaron al estudio, procesamiento, inversión, interpretación y validación de un conjunto de datos de SRMN realizados en presencia de un campo magnético terrestre de baja intensidad y ruidos ambientales altos. Además, se realizó una comprobación de los resultados de la técnica de SRMN con una nueva versión del equipo de medición (NUMIS^{PLUS}) en lugares donde dicha metodología se utilizó previamente (Waalwijk, Holanda).

Los resultados del presente trabajo y los modelos presentados prueban fehacientemente la posibilidad de extensión y aplicación de la metodología del SRMN a otras latitudes donde no ha sido implementada en la actualidad como en América y el Caribe.

Referencias.

- Goldman M., Rabinovich B., Rabinovich M., Gilad D., Gev I. y Schirov M., 1994. *Application of the Integrated NMR-TDEM Method in Groundwater Exploration in Israel*. Journal of Applied Geophysics, 31 (1994) 27-52. Amsterdam.
- Legchenko A., Beauce A., Guillen A., Valla P. y Bernard J., 1997. *Natural Variations in the Magnetic Resonance Signal Used in PMR Groundwater Prospecting from the Surface*.

- European Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 2, 173-190. Geophysical Press Ltd.
- Legchenko A. V., Shushakov A., 1998. *Inversion of surface NMR data*. Geophysics, Vol. 63, No. 1.
- Lieblisch D. A., Legchenko A., Haeni F. P. y Portselan A., 1994. *Surface Nuclear Magnetic Resonance experiments to Detect Surface Water at Haddam Meadows, Connecticut. Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*. Boston, Massachusetts.
- Schirov, M., Legchenko, A., y Creer, G., 1991. *A new direct non-invasive groundwater detection technology for Australia*. Exploration Geophysics, 22, 333-338.

Figura 1. Representación esquemática de las componentes de SRMN.

Figura 2. Respuesta del SRMN para un acuífero de 5m de potencia a diferentes profundidades y diferentes configuraciones de espiras de transmisión/recepción.

Tabla II. Características del levantamiento y el área de trabajo (Settlers, South Africa).

Area de estudio	Código SRMN	Ubicación	H ₀ (nT)	α (°)	f ₀ (Hz)	Tipo Espira	Tamaño Espira (m)	Fecha	VES	Pozo
Settlers	SETLRM4	S24° 58' 55" E28° 40' 54"	28883	-64	1230	SQ	115	07/12/98	CalBH14	M4

Figura 3. Resultados de la interpretación del SRMN, SEV y sección hidrogeológica en Settlers (South Africa).

Tabla III. Características del levantamiento y el área de trabajo (Hentisbay, Namibia).

Area de estudio	Código SRMN	Ubicación	H ₀ (nT)	α (°)	f ₀ (Hz)	Tipo Espira	Tamaño Espira (m)	Fecha	VES	Pozo
Hentisbay	OMA25991	S 22° 04' 16" E 14° 14' 31"	29241	-63	1246	SQ	115	98/12/02	No	OMA25991

Figura 4. Resultados de la interpretación del SRMN en Hentisbay (Namibia).

Tabla IV. Características del levantamiento y el área de trabajo (Waalwijk, Holanda).

Area de estudio	Código SRMN	Ubicación	H ₀ (nT)	α (°)	f ₀ (Hz)	Tipo Espira	Tamaño Espira (m)	Fecha	VES	Pozo
Waalwijk	Waalw17	N51° 39' 09" E05° 06' 57"	48359	67	2060	SQ	75	00/01/16	W-1,W-2	no

Figura 5. Resultados de la interpretación del SRMN y SEV en Waalwijk (Holanda).

ESTUDIO DE LA ANOMALIA GRAVIMETRICA PRODUCIDA POR EL DEPOSITO MUNICIPAL DE AGUA, ENTERRADO BAJO LAS PLANICIES DE ABRAHAM EN QUEBEC, CANADA.

Richard Fortier⁽¹⁾, Damián Febles Elejalde⁽²⁾

Universidad Laval, Pavillon Pouliot, Cité universitaire, Sainte Foy (Québec), Canada. Pavillon Pouliot, Cité Universitaire, Sainte-Foy (Québec), Canada. C.Elect: rifortie@ggl.ulaval.ca

Instituto Superior Politécnico "José A. Echeverría", Calle 114 s/n, Marianao 15, Ciudad de La Habana. C.Elect: damian@civil.ispjae.edu.cu

RESUMEN

Se exponen los resultados de un levantamiento gravimétrico realizado en las planicies de Abraham para localizar el depósito de agua de la ciudad de Québec y para comparar la anomalía gravimétrica residual observada con la calculada a partir de un modelo del terreno. Este depósito tiene un largo de 237,7 m, un ancho de 94,5 m y una altura de 7,19 m, con un espesor máximo de agua de 6,83 m y un volumen total de $1,32 \times 10^5 \text{ m}^3$. Más de 900 columnas soportan la base del depósito. La altitud del fondo del depósito con relación al nivel medio del mar es de 91 m. El depósito está enterrado bajo una cubierta de tierra de aproximadamente 1 m. A no ser por la existencia de una instalación de gas que delimita el depósito, nada hace suponer la presencia de este objetivo enterrado. La roca de caja es un esquisto, cuya densidad volumétrica se estima igual a $2,4 \text{ t/m}^3$.

La anomalía residual obtenida está bien delimitada por encima del depósito y su amplitud media es de $-0,45 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ (mgl). Dos modelos físico- geológicos del depósito :1) un prisma infinito y 2) una figura poligonal de forma variable (GM-SYS) que corresponden a las dimensiones físicas del depósito fueron utilizados para calcular la anomalía residual del depósito. Para obtener una anomalía residual comparable a aquella observada fue empleado un contraste de densidad de $-1,50 \text{ t/m}^3$ entre el depósito y la roca de caja.

ABSTRACT

This paper presents the results of the gravity survey performed in the Abraham's plains for the location of an underground water storage reservoir in Quebec City (Canada) and for the comparison between the observed residual anomaly and the calculated residual anomaly from the terrain model. This water reservoir has a length of 237,7 m with a maximal water thickness of 6,83 m and a total volume of $1,32 \times 10^5 \text{ m}^3$. More than 900 columns support the reservoir roof. The reservoir roof is 91 m above the mean sea level. Except gas installation, which delimits the water reservoir, nothing else indicates the existence of this underground water reservoir. The surrounding host rock is a schist with a volumetric density estimated to about $2,4 \text{ t/m}^3$.

The residual gravity anomaly is well delimited over the reservoir and his mean amplitude value is $-0,45 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ (mgl). Two physical-geological models were used to calculate the reservoir residual anomaly: 1) an infinite prism and 2) a polygonal figure of variable form (GM-SYS), both corresponding to the physical dimensions of the reservoir. To obtain a compatible anomaly similar as the one observed, a density contrast of $-1,5 \text{ t/m}^3$ between the water storage reservoir and the surrounding host rock was defined.

Introducción.

Objetivos de trabajo.

Los objetivos del presente trabajo son los siguientes:

Localizar con la ayuda de la prospección gravimétrica el depósito municipal de agua de la ciudad de Québec que se encuentra enterrado bajo las planicies de Abraham.

2. Determinar la anomalía gravimétrica residual debida la déficit de masa del depósito de agua.

3. Calcular con la ayuda de un modelo físico geológico que corresponda al deposito de agua (dimensiones físicas, contraste de densidad) la anomalía residual y

4. Comparar esta anomalía residual calculada con la observada para determinar el contraste de densidad que da origen a la anomalía gravimétrica.

Descripción del sitio de estudio.

El depósito de agua municipal de la ciudad de Québec está situado bajo las planicies de Abraham . Este depósito tiene un largo de 237,7 m, un ancho de 94,5 m y una altura de 7,19 m con un espesor máximo de agua de 6,83 m y un volumen total de $1,32 \times 10^5 \text{ m}^3$. Mas de 900 columnas soportan la base del depósito. La altitud del fondo del depósito en relación al nivel medio del mar es de 91 m. El depósito está enterrado bajo una capa de tierra de aproximadamente 1 m . A no ser por la existencia de una instalación de gas que limita el depósito, nada hace suponer la existencia de este depósito enterrado. La roca de caja es un esquisto cuya densidad volumétrica se estima de $2,4 \text{ t/m}^3$.

El levantamiento gravimétrico se efectuó en un perfil situado sobre el eje central mayor del depósito y en una dirección con un azimut de $34,35^\circ \text{ N}$ (medido con una brújula). El perfil tiene una longitud de 500m con estaciones de medición cada 20 m, para un total de 26 . La estación de referencia está situada en el extremo suroeste del perfil.

Materiales y métodos.

Metodología empleada.



El levantamiento gravimétrico realizado en las planicies de Abraham se divide en dos partes diferentes. Una primera parte que comprende todo lo relacionado con la altimetría de las estaciones gravimétricas de medición, mientras que la segunda parte, se refiere a las mediciones gravimétricas, propiamente dichas.

La elevación de las estaciones con relación a la estación de referencia fue medida con la ayuda de un nivel electrónico (GDD inc.). Este instrumento opera bajo el principio de la medición de la presión debida a una columna de un líquido de masa volumétrica conocida que separa los dos puntos de medición. Conociendo la densidad del líquido, un aceite de silicona inerte, en este caso, es posible la determinar la altura que separa los dos puntos de medición a partir de la presión medida. En el nivel electrónico la columna del líquido está sustituida por un tubo relleno de aceite de silicona, cuyos dos extremos están provistos de sensores de presión. La diferencia de presión entre los dos sensores nos permite obtener la diferencia de altura entre los dos puntos. La respuesta de los sensores ha sido calibrada en función de la diferencia de presión y de la temperatura. Una de las extremidades del tubo está unida a un módulo de lectura. La lectura es obtenida directamente en metros en un display de cristal líquido. Una diferencia de elevación negativa significa que el sensor en el extremo libre del tubo es más alto que el módulo, mientras que una lectura positiva significa lo contrario. En cada estación, un cero siempre es medido de la misma forma, los dos extremos son posicionados de la misma manera para evaluar la deriva instrumental con relación al cero inicial. El cierre del levantamiento topográfico se realiza para evaluar la deriva instrumental y corregirla de manera lineal en función de la posición de las estaciones. La precisión del nivel electrónico es del orden de ± 10 cm para un levantamiento topográfico cuya longitud total sea de 1 km. Esta precisión es suficiente para el levantamiento gravimétrico realizado. Por el contrario, el nivel electrónico no permite obtener las estaciones con relación a un punto geodésico nacional.

La medición relativa del campo gravitacional en cada estación fue realizada con la ayuda del gravímetro astático Worden No.807. Este gravímetro funciona bajo el principio de la ley de Hooke; la fuerza gravitacional que se ejerce sobre una masa suspendida en el extremo de un resorte, controla la longitud de estiramiento del resorte. El gravímetro utilizado mide la fuerza necesaria para restablecer la longitud de estiramiento del resorte a un valor de referencia. Esta operación se realiza en el gravímetro girando un tornillo micrométrico hasta situar un rayo luminoso en el centro de una mira. La fuerza correctora se lee en el tornillo micrométrico. Este valor es posteriormente multiplicado por una constante de calibración del gravímetro que es función de la temperatura de operación del equipo, para obtener una lectura en mgal (10^{-5} m/s^2). El procedimiento en el terreno para la medición del campo gravitacional en una estación comprende las siguientes etapas:

la nivelación vertical del gravímetro situado sobre una plataforma cóncava en cada estación,

Toma de una primera lectura relativa del campo gravitacional,
una verificación de la nivelación y toma de una segunda lectura,
la repetición de las etapas 2 y 3 para obtener cuatro lecturas y,
el registro del tiempo de la lectura.

Las cuatro lecturas relativas del campo gravitacional permiten aumentar la precisión de la medición. El registro del tiempo de toma de la lectura es importante para la realización de la corrección de las variaciones temporales del campo gravitacional debidas a la deriva instrumental y a la atracción luni-solar. Para realizar esta corrección se hizo necesario retornar a la estación de referencia cada dos horas. En el intervalo entre un control y otro, las variaciones temporales varían de forma lineal con el tiempo. Para un intervalo mayor de tiempo entre los controles el error introducido por la interpolación lineal al corregir los puntos medidos en ese intervalo es demasiado grande. Por otra parte, tanto la elevación como la latitud de cada estación con relación a la estación de referencia permiten introducir diferentes correcciones (de latitud, de aire libre, de capa intermedia).

Tratamiento de los datos topográficos y gravimétricos.

La diferencia de elevación de una estación en relación a la precedente ha sido corregida con respecto al cero medido en la precedente. La elevación de cada estación con relación a la estación de referencia ha sido calculada adicionando las diferencias de elevación corregidas entre cada estación , de la estación de referencia a la estación considerada. Un valor positivo de elevación significa que la estación considerada está más elevada que la estación de referencia. En el cierre del levantamiento, fue encontrada una diferencia de elevación positiva de 20 cm en la estación de referencia. Esta diferencia es debida a la deriva instrumental . La misma ha sido distribuida de manera lineal en función de la posición de cada estación a lo largo del levantamiento para obtener finalmente la elevación corregida con relación a la estación de referencia . Suponiendo que la altitud de la estación 220 m es de 99 m con relación al nivel medio del mar, la altitud de todas las estaciones ha sido posteriormente calculada con relación a esta nueva referencia. Fue encontrada una diferencia de altitud de aproximadamente de 8 cm entre la ida y la vuelta. Esta diferencia es importante atendiendo a la precisión esperada del nivel electrónico. La causa exacta de esta diferencia es desconocida , aunque se puede suponer la existencia de un error experimental. Para los cálculos siguientes se utilizará la altitud de las estaciones obtenidas en la ida.

Perfil gravimétrico.

Fueron empleados más de 270 minutos en la realización del levantamiento, es decir 10 minutos por estación. En cada estación se calculó la media de las cuatro lecturas efectuadas. El valor medio relativo y la desviación típica del campo gravitacional en cada estación fue obtenido multiplicando la media de las cuatro lecturas por la constante de calibración del gravímetro de un valor de 0,40534

mgal/ div para una temperatura de operación constante de 25 ° C . La media de las desviaciones típicas observadas es de 0,12 lo que da una precisión de la medición del campo gravitacional del orden de $\pm 0,05$ mgal, teniendo en cuenta el valor de la constante de calibración. La variación temporal del campo gravitacional relativo es de 0,01 mgal en el primer control en la estación de referencia y de 0,17 entre el segundo y el primer control, para un total de 0,18 mgal. Estas variaciones temporales han sido interpoladas en el tiempo para cada estación, con el objetivo de corregir la deriva instrumental y las variaciones debidas a la atracción luni-solar.

Para tener en cuenta la influencia de la latitud y de la altitud en el campo gravitacional, fueron efectuadas las siguientes correcciones:

Corrección por latitud, que tiene en cuenta el desplazamiento hacia el norte de las estaciones.

$$dg_f [\text{mgal}] \gg -0,81399 \sin 2f \, ds [\text{km}] \cos q$$

dónde : f .- latitud del levantamiento gravimétrico (46° 48' N) ds .-distancia entre la estación considerada y la de referencia y, q .- azimuth del levantamiento gravimétrico.

El valor máximo de la corrección por latitud aplicado, -0,34 mgal, corresponde a la estación 500.

Corrección de aire libre, que tiene en cuenta las variaciones de la altura.

$$Dg_{\text{air}} [\text{mgal}] \gg 0,3086 \, h [\text{m}]$$

dónde: h .- altitud del gravímetro en relación al nivel medio del mar .

El valor máximo de la corrección de aire libre en la estación 280 m es de 30,59 mgal en comparación a 28,73 mgal para la estación de referencia

Corrección de capa intermedia que tiene en cuenta los cambios de altura y el efecto de una capa horizontal e infinita de densidad constante.

$$dg_{ci} [\text{mgal}] \gg -0,04193 \, s \, [t/m^3] \, h [\text{m}]$$

donde : s .- densidad de la roca del lugar (2,4 t/ m³).

El valor máximo de la corrección por capa intermedia en la estación 280 m es de – 9,97 mgal en comparación a –9,37 mgal para la estación de referencia.

Estas son las únicas correcciones aplicadas en el trabajo a los datos gravimétricos.

El campo gravitacional relativo de Bouguer se obtiene por:

$$g_{\text{Bouguer}} = g_{\text{obs}} + \text{variaciones temporales} + dg_f + dg_{\text{air}} + dg_{\text{ci}}$$

donde: g_{obs} .- campo gravitacional relativo observado.

La anomalía de Bouguer se calcula inmediatamente como: $Dg_{\text{Bouguer}} = g_{\text{Bouguer}} - g_{\text{Bouguer.ref}}$

donde: $g_{\text{Bouguer.ref}}$.- Campo gravitacional en la estación de referencia.

Interpretación.

Interpretación cualitativa.

En el levantamiento se aprecia que cuando existe un desplazamiento hacia el nordeste de 500 m en el campo de las anomalías de Bouguer se observa una tendencia de elevación del mismo en 0,3 mgal. Esta tendencia será considerada como la anomalía regional, ocasionada por contrastes de densidad que caracterizan a formaciones situadas a gran profundidad. Debido a que estas variaciones del campo no son el objetivo geológico de interés en nuestro levantamiento, la anomalía regional será sustraída de la anomalía de Bouguer para obtener la anomalía residual, que depende solamente de las variaciones de densidad a pequeñas profundidades. La amplitud de la anomalía residual directamente encima del depósito varía entre $-0,4$ y $-0,5$ mgal (10^{-5} m/s^2). Esta amplitud negativa corresponde a un déficit de masa debida a la presencia del depósito de agua. La anomalía está bien definida por los cambios abruptos al nivel de las paredes del depósito. El débil ensanchamiento de la anomalía es producto de la posición poco profunda del depósito de agua. El ancho total de la anomalía es de 260 m entre las estaciones (140 m y 400 m) lo que es ligeramente superior a la longitud del depósito. Las variaciones de la anomalía residual directamente encima el depósito están dentro de la precisión de la medición del campo gravitacional, excepto en las estaciones 220 y 360. Es posible que en estas estaciones se encuentren dentro de la zona de influencia de las columnas, lo que provocaría una anomalía más débil ya que las columnas son más densas que el agua. Por otra parte, los dos picos positivos de la anomalía residual de una y otra parte de la amplitud negativa pudieran estar asociadas a la influencia de las paredes más densas que la roca de caja. Estos picos pudieran ser debidos también al efecto topográfico que no fue corregido.

2) Interpretación cuantitativa.

El depósito de agua de la ciudad de Québec puede ser comparado con un prisma infinito. La ecuación del efecto gravitacional de un prisma infinito se obtiene a partir de la siguiente expresión (Telford et al., 1984):

$$Dg = 2\gamma \left[\tan^{-1} \left(1 - \frac{x}{z} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{x}{z} \right) \right] Ds$$

donde: x .- distancia horizontal con relación a uno de los lados del prisma.

e.- espesor del prisma (m).

l.-ancho horizontal del prisma (m).

z.-profundidad de yacencia del tope superior del prisma (m).

El modelo físico -geológico para modelar el efecto gravitacional del depósito a partir del prisma infinito se ajustó a los parámetros físicos impuestos al modelo (dimensiones del depósito y contraste de densidad). La anomalía residual para este modelo se muestra en la figura 1.

Por otra parte fue utilizado un programa para modelar el efecto gravitacional de cuerpos infinitos de forma poligonal (GM-SYS, Northwest Geophysical Associates, Inc. Basado en los modelos de Talwani, Lamar Worzel et Landisman, 1959; et de Won y Bevis, 1987). Pueden ser utilizados varios polígonos infinitos para modelar un cuerpo geológico más complejo que el que nos ocupa. El modelo aparece en la figura 2 y la anomalía residual debida a este modelo se da en la figura 1.

Resultados y Discusión.

Las anomalías residuales calculadas son comparables a la observada. Los parámetros físicos conocidos para producir los dos modelos físico geológicos permiten obtener una forma de anomalía residual calculada parecida a la observada. Según los datos obtenidos , el primer límite del depósito estaría situado a 145 m de la estación de referencia. El largo conocido del depósito de 237,7 m (el valor utilizado en los modelos) es suficiente para definir un ancho de la anomalía similar al de la observada. Para obtener una amplitud comparable a la anomalía observada fue necesario utilizar un contraste de densidad de $-1,5 \text{ t/m}^3$.Este valor es ligeramente inferior al esperado de $-1,4 \text{ t/m}^3$ (diferencia entre la densidad del agua de 1 t/m^3 y la de la roca de caja, $2,4 \text{ t/m}^3$). No se realizó ningún intento particular para modelar el efecto el efecto gravitacional de las columnas y de las paredes del depósito, ya que son objetivos geológicos mal definidos por la falta de información sobre los mismos.

Conclusiones

El levantamiento gravimétrico realizado ha permitido localizar con precisión el depósito de agua de la ciudad de Québec. Fue determinada la anomalía gravimétrica residual debida al déficit de masa del depósito en relación a la roca de caja.

La buena concordancia entre las anomalías residuales observada y calculada permite concluir que el levantamiento gravimétrico realizado fue ejecutado con unos instrumentos, una metodología y un tratamiento adecuado de los datos. Además los modelos utilizados en función de los parámetros físicos impuestos por las informaciones conocidas sobre el depósito de agua han permitido evaluar el contraste de densidad entre el depósito de agua y la roca encajante, parámetro físico que no era bien conocido de antemano.

Recomendaciones.

Con el fin de localizar exactamente el levantamiento gravimétrico e introducir una corrección por el efecto de la latitud de cada punto más precisa, se recomienda utilizar una estación geodésica nacional.

Los efectos gravitacionales de la capa de tierra que sobreyace el depósito y de la topografía no fueron evaluados ya que los parámetros necesarios para hacerlo no eran conocidos. Estos son aspectos que necesariamente habrá que considerar en un futuro para mejorar la definición de la anomalía residual observada.

Se hace necesario un estudio geológico de la roca de caja para conocer con exactitud la densidad media del esquisto. Este importante dato permitiría agregar un parámetro complementario, además de las dimensiones físicas conocidas del depósito sobre el modelo para calcular la anomalía residual producida por el depósito. Este nuevo parámetro complementario es el contraste de densidad entre el depósito y la roca de caja.

Siempre que un objetivo geológico de yacencia somera presente un contraste de densidad con la roca de caja, en principio, siempre será posible localizarlo con un levantamiento gravimétrico bien concebido para el objetivo a prospectar. Si se poseen informaciones sobre el objeto de interés (dimensiones aproximadas, contraste de densidad, etc) se puede proponer un modelo físico-geológico para calcular la anomalía gravimétrica producida por el mismo. A partir de esta anomalía calculada, puede ser proyectado un levantamiento (red de medición ,precisión de las mediciones) de manera de asegurar que le objetivo sea detectado y con el menor costo posible.

Referencias bibliográficas.

Talwani, M., J. Worzel, et M. Landisman, 1959. Journal of Geophysical Research .Vol. 64 No.1, pp 49-59.

Telford, W., L.Geldart, R. Sheriff. 1990. Applied Geophysics. University Press, Cambridge, Estados Unidos.

Won, I., et M. Bevis, 1987. Geophysics, Vol.52, p p 232-238.

Figura 1. Anomalías observada y calculadas según los modelos utilizados.

Figura 2. Modelo físico-geológico utilizado para calcular la anomalía gravimétrica residual producida por el depósito de agua enterrado bajo las planicies de Abraham.

CARTAS DE LA DECLINACIÓN MAGNÉTICA Y SU VARIACIÓN SECULAR PARA EL TERRITORIO DE CUBA.

Rosa Álvarez Hernández ⁽¹⁾, **Lázaro A. Díaz Larrinaga** ⁽¹⁾, **Eduardo Pérez Almaguer** ⁽¹⁾

(1) Departamento de Geofísica Regional y Riesgos, Instituto de Geofísica y Astronomía, Calle 212 No. 2906 e/ 29 y 31, La Coronela, La Lisa, CP 11 600, Ciudad de La Habana, CUBA. E-mail: riesgos@geoastro.inf.cu

RESUMEN

El proyecto del Levantamiento Magnético en la red de 30 puntos de estudio de la variación secular (PVS) del Campo Geomagnético del Territorio Nacional persiguió el objetivo principal de estudiar el comportamiento temporal y espacial del campo basándose en el resultado de mediciones repetitivas en los PVS de la región bajo estudio y a partir de este resultado y como segundo objetivo se precisó obtener el estimado del valor del ángulo de la Declinación del campo Geomagnético, así como de su cambio anual para el pronóstico y actualización de las cartas magnéticas y topográficas.

Para la determinación de los valores absolutos en los puntos fue necesario el cálculo y corrección de los datos de las mediciones en 18 de los puntos para la reducción a los valores medios diarios en los mismos. A continuación fueron determinadas las regresiones que se ajustaban a los valores históricos en los 30 PVS con el fin de interpolar y extrapolar los valores para las fechas utilizados en el tratamiento de los datos. Una vez obtenida toda la base de datos para las fechas de 1997.5, 2000.5 y 2002.5 se pasó a la construcción de un modelo que permitiera representar lo más aproximadamente posible el campo normal regional para el territorio. Para ello fue utilizado el modelo del campo internacional de referencia IGRF 2000, al que se le adicionó el ajuste por mínima curvatura logrado con los datos de los valores absolutos en los puntos. La posterior suma de los valores del campo anómalo suavizado obtenidos en el levantamiento vectorial 1985-1988 permitió obtener el Mapa de los Valores Totales del campo regional corregido para la fecha de 2000.5 y su Variación Secular para el período 1997,5-2002,5.

SUMMARY

The project of the Magnetic Survey in the net of 30 points of study of the secular variation (PVS) of the Campo Geomagnético on the National Territory was pursued the main objective of studying the temporary and space behavior of the field being based on the result of repetitive mensurations in the PVS of the region under study and starting from this result the second objective was necessary to obtain the value of the angle of the Decline of the field Geomagnético, as well as of their change yearly for the presage and bring up to date of the magnetic and topographical maps.

For the determination of the absolute values in the points was necessary the calculate and correction of the data of the mensurations in 18 of the points for the reduction to the values daily means in the same ones. Next they were determined the regressions that were adjusted to the historical values in the 30 PVS with the purpose of to interpolate and to extrapolate the values for the dates used in the treatment of the data. Once obtained the whole database for the dates of 1997.5, 2000.5 and 2002.5. you passes to the construction of a model that allowed to represent the approximately most possible thing the regional normal field for the territory. The later sum of the values of the softened anomalous field obtained in the vectorial rising 1985-1988 allowed to obtain the Map of the Total Values of the regional field corrected for the date of 2000.5 and its Secular Variation for the period 1997,5-2002,5.

INTRODUCCION

En el trabajo se plantean los resultados del Levantamiento Magnético en la red de 30 puntos de estudio de la variación secular del Campo Geomagnético del Territorio Nacional para satisfacer el objetivo de estudiar el comportamiento temporal y espacial del campo basándose en el resultado de mediciones repetitivas en puntos fijos o puntos de Variación Secular (PVS), establecidos en la región bajo estudio. En la Figura 1 se representan todos los puntos de la Red Nacional, así como los ejecutados durante las etapas de mediciones correspondientes al actual levantamiento desde Pinar del Río hasta Las Tunas.

A partir de la elaboración primaria de las mediciones se obtuvo como segundo objetivo el estimado del valor del ángulo de la Declinación del campo geomagnético, así como de su cambio anual para el pronóstico y actualización de las cartas magnéticas y de esta magnitud en las hojas topográficas a escalas 1:25 000 del todo el territorio.

La importancia de la actualización de estos datos por primera vez en un periodo de más de 10 años radica en la utilización de los mismos en las tareas de orientación terrestre, aérea y en la modelación matemática e interpretación geofísica.

El campo magnético se descompone vectorialmente en 5 componentes y dos ángulos, siendo la Declinación el ángulo entre la dirección de la componente magnética Horizontal (H) y la dirección del Norte Geográfico. Es posible obtener las 7 componentes a partir de la medición de solo 3 de ellas (Newitt L.R. et. al, 1996), como en el presente trabajo. A su vez el campo magnético observado en cada punto de la superficie terrestre Campo Total), se compone del Campo Anómalo, correspondiente al efecto que provocan los elementos geólogo-tectónicos y mineralógicos de la corteza terrestre, que se descompone en regional y local, del Campo Normal global y regional y que responde al efecto de las corrientes internas que producen los movimientos de las masas dentro del núcleo externo y el manto superior y los desplazamientos seculares de grandes placas que componen la litosfera, por lo que su variación en el tiempo se denomina Variación Secular del Campo Geomagnético (VS). Otra componente de menor amplitud presente son las variaciones diarias Sq (variaciones del sistema de corrientes ionosféricas en el período de calma solar y cuya variabilidad diaria esta condicionada en gran medida por la radiación ionizante solar, (Jacobs J. A., 1983

En el caso de la región del Caribe y especialmente el territorio de Cuba dentro de ella presenta la peculiaridad de poseer un campo magnético fuertemente anómalo además de algunas heterogeneidades dadas por la presencia en la región de una extensa anomalía de la variación secular geomagnética (Alvarez et al, 1996; 1998; 2000). Si unimos a estos factores el hecho de que ha sido poco estudiada por ausencia de observatorios magnéticos y de redes de puntos de VS en muchos países, podemos sustentar la necesidad de elaborar un modelo de VS característico de la región.

Para poder establecer la característica de cambio de la componente bajo estudio y determinar los modelos que describen de una forma más precisa el **campo regional** y su variación las observaciones deben ser realizadas como mínimo a intervalos de 2 a 5 años con una duración de 3 meses para todo el levantamiento. Con la extracción de las anomalías locales es posible determinar los valores normales regionales de cada componente y actualizarlos para el período bajo estudio según el modelo que mejor describa la distribución de este campo.

Los modelos regionales son usualmente basados en una información más densa sobre la región de estudio que los modelos globales y por tanto son más exactos. Además permiten representar longitudes de onda menores que los modelos mundiales y con ello se representan no sólo las componentes nucleares sino y algunas fuentes de la corteza terrestre (Nakagawa, I, 1985).

Ya que el desarrollo de los objetivos planteados solo se alcanzaría mediante la representación más próxima al campo real, sería necesario obtener un modelo del campo **normal regional** (Cn_r) que se corresponda de una forma más acertada a las peculiaridades de Cuba y que permita describir no sólo el comportamiento del campo magnético, sino asociar los diferentes períodos de la variación secular a cambios geólogo-tectónicos que se producen en la estructura de la corteza o del manto superior, desplazamiento de los macrobloques de la corteza, etc. (Torta et. al, 1992).

MATERIALES Y MÉTODOS

MATERIALES

Entre los materiales bases para la obtención de los datos finales se encuentran:

- Datos de los Levantamientos Vectoriales en los Puntos de Variación Secular, (PVS), para los años de referencia, Tabla 1 y Figura 1.
- Datos de los Valores Totales Anómalos de la Declinación Magnética en los puntos del levantamiento terrestre vectorial del Territorio de la República de Cuba a escala 1:1000 000, Tabla 2, (Alvarez R., 1998).
- Modelos Mundiales del Campo Internacional de Referencia (IGRF) para los años 1995 y 2000. (IAGA Division V Working group 8, 2000).
- Datos de las correcciones al sol de los Almanques Náuticos de los años 1998.1999 y 2000.

En cada serie de mediciones los equipos utilizados fueron:

- Magnetómetro de hilo de cuarzo (QHM) de fabricación rusa para la observación de H y D.
- Magnetómetro protónico (SCINTREX MP2) para la observación de la componente Total y del gradiente en los puntos.
- Teodolito Geodésico Teo-20 para las determinaciones astronómicas.
- D-I Magnetómetro fluxgate de variación del Observatorio Habana para la determinación de las variaciones diarias.

MÉTODOS

Métodos empleados durante el proceso de medición

La metodología empleada para la ejecución del levantamiento y de las mediciones esta basada en las normas internacionales para la realización de los levantamientos vectoriales y específicamente para las mediciones del ángulo de la Declinación Magnética (Newitt L.R. et. al, 1996) (Ministerstbo Geologii SSSR,1981).

Durante el proceso de medición se ejecutaron las observaciones directas de la componente Total T, de la Componente Horizontal H, y del ángulo de Declinación para lo que se requirieron las observaciones astronómicas del ángulo horario del sol y azimuth astronómico y magnético de la

mira. Durante la etapa de trabajo de campo se realizaron un total de dos series de mediciones diarias en cada sesión de trabajo, (mañana y tarde) en cada PVS y durante dos días como mínimo.

Tabla 1: Ejecución de los PVS para diferentes épocas.

PVS	Años	Latitud	Longitud	65	70	74	82	85	86	87	88	89	98	99	00
Faro Roncalli	21.860	-84.953													
La Bajada	21.917	-84.473													
Playa Bailen	22.117	-83.970													
Santa Lucia	22.653	-83.963													
Pinar del Rio	22.433	-83.783													
Playa Dayanigua	22.207	-83.428													
Soroa	22.817	-83.030													
Siguanea	21.633	-82.983													
La Fe	21.750	-82.750													
IGA	23.068	-82.460													
Jardin Botanico	22.988	-82.150													
Cardenas	23.117	-81.287													
Jovellanos	22.818	-81.197													
Playa Giron	22.063	-81.022													
Playa Ancon	21.800	-79.970													
Santa Clara	22.438	-79.883													
Placetas	22.317	-79.617													
Jucaro	21.650	-78.850													
Moron	22.078	-78.628													
Esmeralda	21.858	-78.117													
Santa Cruz	20.738	-78.000													
Camaguey	21.353	-77.873													
Nuevitas	21.548	-77.255													
Manzanillo	20.337	-77.143													
Holguin	20.890	-77.060													
Tunas	21.072	-76.937													
Bayamo	20.180	-76.350													
Santiago de Cuba	20.000	-75.970													
Mayari Arriba	20.425	-75.537													
Baracoa	20.350	-74.505													

Tabla 2: Descripción de los levantamientos Vectoriales 1985-1988.

Levantamiento	No. Puntos	Región	Época Media
1985	265	Oriental	Marzo/1985
1986	337	Centro-Oriental	Marzo/1986
1987	259	Centro-Occidental	Marzo/1987
1988	290	Occidental	Abril/1988

La mayoría de los PVS han sido localizados y marcados en anteriores etapas de levantamientos por pilares de cemento de 1.5 m de altura y 30 cm de diámetro, mientras que en otros no conservados se realizan las observaciones desde un trípode antimagnético. (Figuras 2 y 3).

La metodología de las observaciones constaba de dos partes ; **La observaciones astronómicas y las observaciones magnéticas** . En las primeras fueron determinados el Azimut del sol o azimut astronómico de la mira (Am). En las segundas fueron determinados los gradientes direccionales del campo, total, azimut magnético de las miras y la componente horizontal. Finalmente para cada punto fueron calculados una serie de valores de la Declinación magnética observada (D_o) en diferentes instantes de tiempo y variantes de observación. Estos valores fueron corregidos y extrapolados a la misma fecha según el valor de la variación magnética diaria (datos Sq del Observatorio Magnético), obteniéndose un valor promedio para la fecha media de ejecución en cada PVS.. elaboración primaria de las Observaciones Astronómicas

Corrección de las variaciones medias diarias

Para corregir los datos de cada punto para una fecha media se aplicó las expresiones utilizadas por (Newitt L.R. et. al, 1996 y Ministerstbo Geologii SSSR,1981), donde se corrige cada observación al valor medio mensual y anual del observatorio central, (Observatorio Habana).con el fin de llevarlos a una misma fecha

Debido a la gran diferencia en el tiempo total de ejecución del levantamiento (1.5 años) era imposible su total ya que traería como consecuencia un mayor error al asumir que la variación secular a lo largo del año es la misma entre el punto y el Observatorio, tomándose entonces como referencia para cada punto la unidad de un día con el fin de reducir los valores instantáneos de las variaciones de cada PVS al valor medio diario y que los mismos fueran tratados posteriormente de forma independiente para el cálculo de la variación secular,

Una vez obtenida la hoja de resultados final, fueron promediados los valores para un estimado de Campo Total Observado o valor absoluto en cada punto para una fecha media.

Metodología utilizada para el cálculo del modelo de campo magnético

Entre los métodos analíticos más usados para la descripción del campo geomagnético encontramos el análisis en armónicos esféricos (AAE), el cual es utilizado en la representación global del campo fundamentalmente, debido a que su resolución es limitada a las mayores longitudes de onda. Aún cuando se realizara un AAE regional, empleando los datos de la región, los resultados serían similares al de los modelos globales IGRF 1995-2000 (IAGA Division V Working group 8, 2000). La dificultad resolutive puede ser superada mediante la selección de áreas limitadas sobre la superficie terrestre, haciéndose un análisis por separado de cada una de ellas (Torta, 1992; Alldredge, 1982; De Santis, 1990). Estos modelos regionales son usualmente basados en una información más densa sobre la región de estudio que los modelos globales y por tanto son más exactos, además permiten representar longitudes de onda menores que los modelos mundiales representando así algunas fuentes de la corteza terrestre.

Puede destacarse como una de las ventajas el hecho de que la existencia de una red actualizada de estudio de la variación secular permite sucesivamente corregir la base de datos de un levantamiento con

un margen de error pequeño sin necesidad de que los mismos sean ejecutados nuevamente. Esta ventaja no se cumple en la generalidad de los territorios ya que no cuentan con este tipo de determinaciones por lo que el conocimiento del campo magnético en los mismos está limitado a la generalización que se obtiene con la aplicación de los modelos mundiales desarrollados sobre la base de mediciones de satélites y mediante la aplicación del AAE (Haines, G. V., 1990).

En el caso de Cuba las observaciones de actualización de la red fueron ejecutadas en forma periódica desde el año 1965 hasta 1991 donde debido a la falta de equipamiento y otras dificultades de índole logística no fueron realizadas más hasta la fecha.

Por otra parte la existencia en el territorio de un levantamiento absoluto vectorial terrestre a la escala de 1:1 000 000, (1985-1990) como base de datos permite la obtención de un mayor grado de precisión en la modelación y actualización de los valores del campo a partir de la variación secular. Ya que se conocen las características del campo anómalo de todas las componentes especialmente la Declinación.

En Cuba ya fueron estudiados con anterioridad Kolesova, 1994; Alvarez et al ,1996 ,1998 ,1999 los modelos regionales que mejor se ajustan para describir el campo en el territorio, entre los que se seleccionó el ajuste polinomial como el más adecuado para representar las componentes de origen más externo de la corteza. Según el grado de detalle requerido para la escala 1:25 000, se pretende lograr la aplicación al desarrollo del AAE, de un polinomio u otra función determinada sobre la base de las numerosas observaciones en los PVS para obtener un campo normal corregido, (componente global + componente regional). Al obtener dicha función se podría describir el carácter del Campo Total Real , mediante la adición de la componente anómala suavizada y lograr de esta forma un mayor acercamiento a los datos reales del territorio.

Métodos utilizados en la elaboración de los mapas

Dependiendo del tipo de dato y del tipo de distribución de la información primaria fueron utilizados diferentes métodos de interpolación tales como: Inverso de la Distancia (diferentes potencias), Kriging Ordinario Puntual, Mínima Curvatura y Triangulación. Con el objetivo de evaluar la calidad del interpolador usado, fue utilizado el estadígrafo Error Cuadrático Medio (ECM) como una medida de las diferencias entre los valores reales y los interpolados, obteniéndose luego del análisis estadístico de la diferencia entre los datos reales y los calculados por cada método que la mejor variante para la interpolación de los datos era el Kriging ordinario puntual con un radio de búsqueda de 15 km,

Procesamiento de los Datos Originales

Determinación de los valores absolutos de la Declinación y de la Variación Secular en los PVS

En el procesamiento actual fueron incluidos los datos de 18 PVS en la región comprendida entre Pinar del Río y Las Tunas.. En un primer paso se realizó un análisis visual y estadístico de las observaciones con el fin de poder desechar aquellas que podrían ser fuente de error.

Para la elaboración primaria de las observaciones se conformó una hoja de calculo de medición , que forma parte de un libro Excel para cada PVS. Fueron determinados los valores de la Declinación para cada una de las 8 u 12 observaciones en el punto y cada una de las marcas o miras, a las que se le determino el valor de la variación instantánea, Sq, según los registros de datos del observatorio Nacional. El siguiente paso en el procesamiento consistió en el estudio de la distribución **temporal** del campo en todos los puntos de la red nacional (30 puntos). Como se observa en la Figura 1, sólo 18 de 22 planificados fueron ejecutados en la región Centro-Occidental y se encuentran pendientes de realizar las regiones de Oriente, (6 PVS) e Isla de la Juventud, (2 PVS). Las causas que impidieron la ejecución de 4 puntos se debieron en la mayoría de los casos a la inaccesibilidad a los mismos o por perder los requerimientos básicos para la medición, (desechos magnéticos alrededor del punto).

No obstante era necesario elaborar un modelo para todo el territorio con el fin de disminuir los errores de interpolación que se producen en los límites del área requerida (Pinar del Río - Camagüey).

Se construyeron los gráficos de los valores reales históricos a partir del año 1965 en todos los puntos de la Red Nacional, determinándose las regresiones con polinomios de orden 3 que mejor se ajustaban al cambio temporal en cada uno de los PVS, y de un menor grado en los casos en que se contaba con pocos datos históricos. Las Figuras 4 muestran uno de los resultados de dicha correlación. A su vez en la Tabla 3 correspondientes a ese PVS se pueden observar los valores reales utilizados en la regresión en cada uno de los casos así como los valores estimados según el polinomio para los años 1997.5, 2000.5 y 2002.5.

Las regresiones en cada PVS permitieron obtener el valor absoluto extrapolado y o interpolado del Angulo de la Declinación Magnética para los años 1997.5, 2000.5 y 2002.5 sin tener que reducir al valor medio anual , ya que esto introduciría un error debido al hecho de considerar las variaciones del observatorio de la Habana similares a las de todos los puntos.

De esta forma se soluciona el problema de llevar toda las mediciones a una fecha única, para su ulterior tratamiento en la elaboración de los Modelos y la confección final de los mapas.

Además el estudio del comportamiento temporal en cada punto corrobora el hecho de que el territorio se encuentra próximo a un centro de anomalías de la variación secular, (Kolesova V.I, et al 1994 y Alvarez et al ,1996,1998) y que sería imposible utilizar metodologías similares a territorios tranquilos donde los valores del campo son fácilmente predecibles.

Tabla 3: Valores utilizados para el ajuste de un polinomio de 3 orden a los valores reales (Reales) para distintas épocas y valores estimados según el polinomio (Estimados) para el PVS de Playa Bailen.

	Latitud	Longitud	D (grados)	PVS	Año	Diff (años)
Reales	22.133	83.967	3.33300	Playa Bailen	1965.0	0.0
	22.117	83.967	2.50000	Playa Bailen	1970.0	5.0
	22.125	83.972	2.04200	Playa Bailen	1974.0	9.0
	22.125	83.972	0.91700	Playa Bailen	1982.8	17.8
	22.117	83.967	0.19000	Playa Bailen	1988.3	23.3
	22.117	83.967	-3.02899	Playa Bailen	1999.7	34.7
Estimados	22.117	83.967	-2.58765	Playa Bailen	1997.5	32.5
	22.117	83.967	-3.8481	Playa Bailen	2000.5	35.5
	22.117	83.967	-4.8304	Playa Bailen	2002.5	37.5

Elaboración de los mapas de campo total y de variación secular de la declinación del campo magnético

Una vez obtenidos los datos absolutos o totales, como se hace mención anteriormente, era necesario poder obtener un modelo de campo normal que agrupara las características del campo global y el regional. Para representar el Cg se utilizaron los coeficientes armónicos esféricos del Campo Internacional de Referencia 1995 y 2000 (IAGA DIVISION V, Working Group 8, 1996 and 2000) seleccionándose este último como el de un mejor ajuste.

Para poder modelar solamente la parte temporalmente variable de la Declinación o Campo Normal en los puntos, (Cnp), fueron extraídos los valores conocidos del campo anómalo en cada uno de las coordenadas de los PVS, según los datos del Levantamiento Vectorial del Territorio Nacional 1985-1989 (Mapa de la Declinación magnética anómala del territorio Nacional (Álvarez R., 1998).

Se correlacionaron los datos del modelo IGRF mundial con los resultados para las fechas de 1997.5, 2000.5 y 2002.5, determinándose las correspondientes regresiones a emplear para el modelo de Cn corregido, Fig 5. Debido a que en trabajos precedentes el ajuste de un polinomio de grado 3, ofrecía buenos resultados sobre nuestro territorio, el mismo fue utilizado para la representación de la corrección dada por las diferencias entre ambos. En la Tabla 4 se muestran los estadígrafos del ajuste polinomial del modelo IGRF a los valores normales de los PVS.

Tabla 4: Resultados estadísticos del modelo IGRF corregido según el ajuste polinomial.

	1997.5		2000.5		2002.5	
Estadígrafos	IGRF	IGRF correg.	IGRF	IGRF correg	IGRF	IGRF correg
Media (grados)	-0.1839	-0.0007	-0.7679	0.0069	-1.0690	0.0101
Desviación estándar	0.5310	0.4273	0.6538	0.4627	0.7930	0.4973
Error Cuad. Medio	-	0.4175	-	0.4521	-	0.4848
Mínimo (grados)	-1.1698	-0.9267	-1.8364	-0.8302	-2.5945	-0.6786
Máximo (grados)	0.7589	0.7077	0.5477	0.8995	0.5299	1.4693
Individuos	22	22	22	22	20	20

Atendiendo al resultado del análisis estadístico y a que el error medio cuadrático superaba el error permisible de las cartas, se decidió realizar el ajuste por otros métodos matemáticos, como fueron el Inverso de la Distancia y el de Mínima Curvatura que fue seleccionado finalmente debido a los bajos errores medios cuadráticos que se obtuvieron en el mismo (3') Tabla 5. Este método está basado en la generación de superficies por interpolaciones sucesivas de los datos, a través de una ecuación diferencial biarmónica modificada que se aplica repetidamente hasta que se cumpla la condición impuesta sobre la magnitud máxima de los residuales esperados (existe convergencia).

Tabla 5: Resultados estadísticos del modelo IGRF corregido utilizando el método de Mínima Curvatura, (MC)

	1997.5	2000.5	2002.5
Estadígrafos	IGRF correg. MC.	IGRF correg. MC	IGRF correg. MC
Media (grados)	0.0002	0.0062	0.0102
Desviación estándar	0.0683	0.0589	0.0604
Error Cuad. Medio	0.0668	0.0579	0.0597
Mínimo (grados)	-0.1464	-0.1156	-0.1156
Máximo (grados)	0.1561	0.1401	0.1401
Individuos	22	22	20

Mediante la aplicación de los modelos construidos se elaboró un mapa de campo normal corregido para el año 1997,5 y otro para el año 2002.5 para la red a la escala 1:25 000, La diferencia entre ambos valores permitió determinar los valores del cambio anual o variación secular para la red deseada, con lo que fueron interpolados los datos y construido el mapa de la Variación Secular para el período 1997.5-2002.5 (Figura 6).

El mapa de la Componente Normal Corregida se muestra en la Figura 7 para idéntica red. Se debe destacar que en el cálculo de esta carta no fueron utilizados los datos anómalos, ya que solo se quería reflejar en el mismo la parte variable y de origen profundo de la Declinación magnética. No obstante se puede apreciar en la misma la parte central de una extensa anomalía del campo normal. Este mapa

debe ser utilizado para una visión más general de la Declinación Magnética en el territorio. Transformaciones de altura donde no se precise del Campo Regional Anómalo.

Ya finalmente siguiendo la metodología planteada se obtuvo con la suma del Mapa Normal corregido y del Mapa anómalo el Mapa de Campo Total de la Declinación Magnética para todo el territorio representado en la Figura 8, en el cual como se puede apreciar se obtiene una caracterización más detallada de estos valores y en el que están presentes las anomalías de longitudes de onda λ mayores a los 30 Km y que deben estar caracterizadas en la suma del Campo Total para ser utilizado con fines de orientación terrestre. Como se observa en este esquema el campo anómalo de la componente D rebasa los 4 grados en una extensa anomalía de la parte occidental del territorio y que posiblemente este relacionada con límites paleogeográficos que demuestren la traslación de esta región desde paleolatitudes más bajas (Alvarez R., 1998).

Cálculo de errores

Para la determinación del error final de los resultados, es necesario tomar en cuenta, todos los factores que intervienen desde el proceso inicial, durante la observación directa de los datos hasta la obtención final de los datos de las cartas.

Errores durante la medición, procesamiento inicial y obtención de las cartas (Eoc

Al realizar una estimación del error por la determinación de los valores absolutos de la Declinación para todo el levantamiento se obtuvo que $E_{va} = 0.05 + 0.0012 = 0.0512$ en décimas de grado.

En el cálculo de los valores de la variación secular y elaboración de los modelos que representan los valores del campo en cada punto de la red 1:25 000, para la fecha deseada y confección de los mapas $E_{oc} = 0.1691$,

A partir de los valores obtenidos en ambos estudios se puede definir el error suma total, E_t de los valores que se representan en las cartas como:

$$E_t = E_{va} + E_{oc} = 0.2203 \text{ en décimas de grado}$$

lo que representa un error de 13.22' lo que cumple las exigencias planteadas de ser menor que 15'.

RESULTADOS Y RECOMENDACIONES

Se obtuvieron los siguientes **RESULTADOS**.

- Se estableció una metodología para la elaboración de los datos sobre la base de hojas de cálculo en Excel que permite de una forma rápida y precisa realizar todos los cálculos y correcciones para obtener los datos iniciales.
- Se determinó metodológicamente el procedimiento para el ajuste y corrección de los datos de los PVS a fin de poder determinar un modelo corregido que describa el campo Normal ajustado a territorios limitados donde las anomalías regionales no puedan ser descritas por los modelos globales.

Se obtuvieron los siguientes **Mapas**:

- Mapa de la Variación secular de la Declinación Magnética d territorio a escala 1:25 000 para el período 1997.5-2002.5
- Mapa de Declinación Magnética Normal para el año 2000.5 a escala 1:25 000.
- Mapa de la Componente Total de la Declinación Magnética para el año 2000.5 a escala 1:25 000.

Finalmente se concluyo con la base de datos en formato digital de 1280 puntos referenciados a los centros de las hojas topográficas 1:25 000 del sector mencionado.

Estos mapas permitirán actualizar para el periodo de estimación los valores de la Declinación magnética en cualquier punto del territorio nacional para ser utilizados en tareas de orientación así como en la modelación en tareas de interpretación geofísica

RECOMENDACIONES

- ❑ Se recomienda utilizar esta metodología en posteriores tratamientos de bases de datos similares donde las fechas de ejecución sobrepasen el año.
- ❑ Se debe continuar con el análisis de los puntos de variación secular para determinar una función tridimensional que describa estos cambios temporales en el espacio x y.
- ❑ Se recomienda tratar de utilizar en posteriores campañas una estación de variaciones cercana al punto para obtener una mayor precisión o un magnetómetro de registro continuo al menos evitándose con esto los problemas de posibles perdidas de información de la corrección instantánea cuando el Observatorio deja de funcionar.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allredge, L. R., 1982: *Geomagnetic local and regional harmonic analysis*, J. Geophys. Res., 87.
- Álvarez R., Pérez E, García L., 1996; *Construcción e interpretación de los mapas normales y anómalos del campo geomagnético en el territorio de la República de Cuba. (Inédito) Informe Científico Técnico, Inst. Geof. y Astron., ACC, La Habana septiembre 1996.*
- Álvarez R., Pérez E. y García L., 1998: *Mapa vectoriales del campo magnético anómalo y su interpretación preliminar, MemoriasI, III Congreso de Geol y Min., La Habana, SOFCAL: pp 27-30, 1998.*
- Álvarez R., Kolesova, V. I., 1991; *Modelo Analítico del campo geomagnético normal y su variación secular para el territorio de la República de Cuba, Rev. Geofísica No. 34, E-Junio 1991.*
- Alvarez R, L. García, 1999; *Polynomial model of the Normal Magnetic Field with Vectorial Measurements in the Territory of the Republic of Cuba. Revista Geofísica. Instituto Panamericano de Geografía e Historia. No.48, en-jun., 1998.pg.161-169.*
- Álvarez R., J.L. Cuevas, L. Díaz ,E. Pérez, B. Polo, 2000; *Interpretación integrada de los Campos Geomagnéticos y de Anomalías de Bouguer Total en el Caribe Centro -Occidental, Memorias de GeolInfo 2000. Ier congreso Cubano de Geofísica. ISSN:1028-8961.*

Haines, G. V., 1990: *Regional magnetic field modelling: A review*, *J. Geomag. Geoelectr.*, 42.

IAGA division V Working group 8, 2000: Modelos IGRF 1995-2000

Jacobs J.A., 1983; Geomagnétism V3. Uk.

Kolesova V. I., R. Álvarez, J. Pérez. Mapas del Campo Normal y la Variación Secular en la región del Caribe para las componentes magnéticas T, H, Z,D, 1994: Nuevo Atlas Nacional De Cuba. Sección Geofísica. Instituto Geográfico de España.

Ministerstvo Geologii SSSR, 1981: Instrukcia po Magnitorazbedke, Leningrad, Nedra. 1981. 263pg.

Nakagawa, I., 1985: Rectangular harmonic analysis of geomagnetics anomalies derived from MAGSAT data over the Japanese islands, J. Geomag. Geoelectr., 37.

Newitt, L. R., C. E. Barton, J. Bitterly, 1996: *Guide for Magnetic Repeat Station Surveys International Association of Geomagnetism and Aeronomy*, ISBN: 0-9650686-1-7

Smith, W. H. F., and Wessel, P. (1990), "Gridding with Continuous Curvature Splines in Tension," *Geophysics*, v. 55, n. 3, p. 293-305.

Torta, J. M., 1992: Análisis armónico de un casquete esférico aplicado al campo geomagnético español de referencia para 1990, Rev. Geofísica, 48.

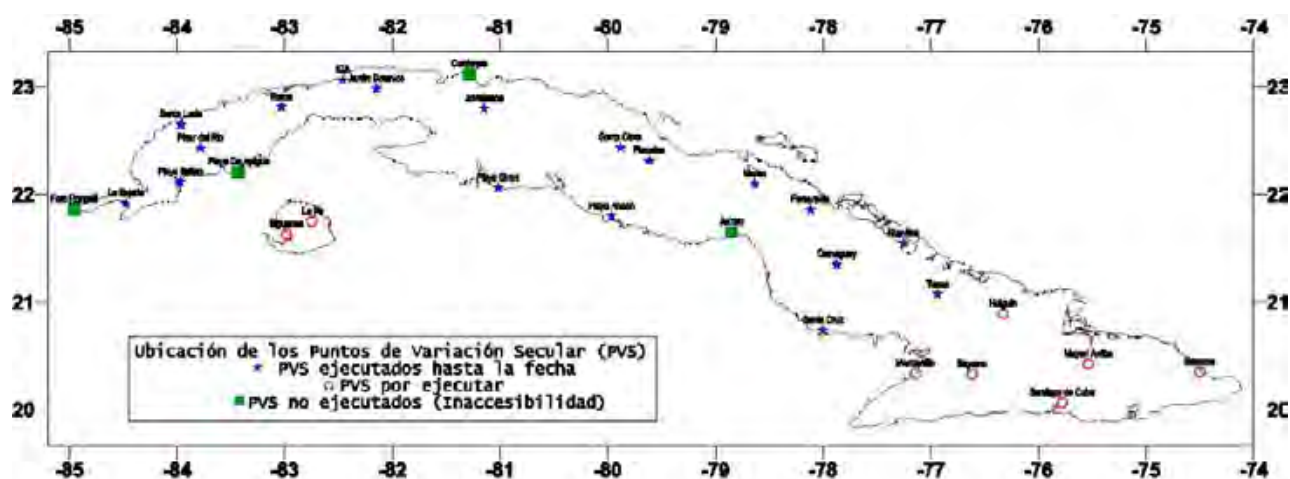


Figura 1: Mapa de ubicación de los Puntos de Variación Secular (PVS).



Figura 2: PVS de Jovellanos. Pilar de cemento de 1.5 m de altura y 30 cm de diámetro.



Figura 3: PVS de Santa Lucía. Plataforma de cemento donde la medición fue realizada en tripodes antimagnéticos.

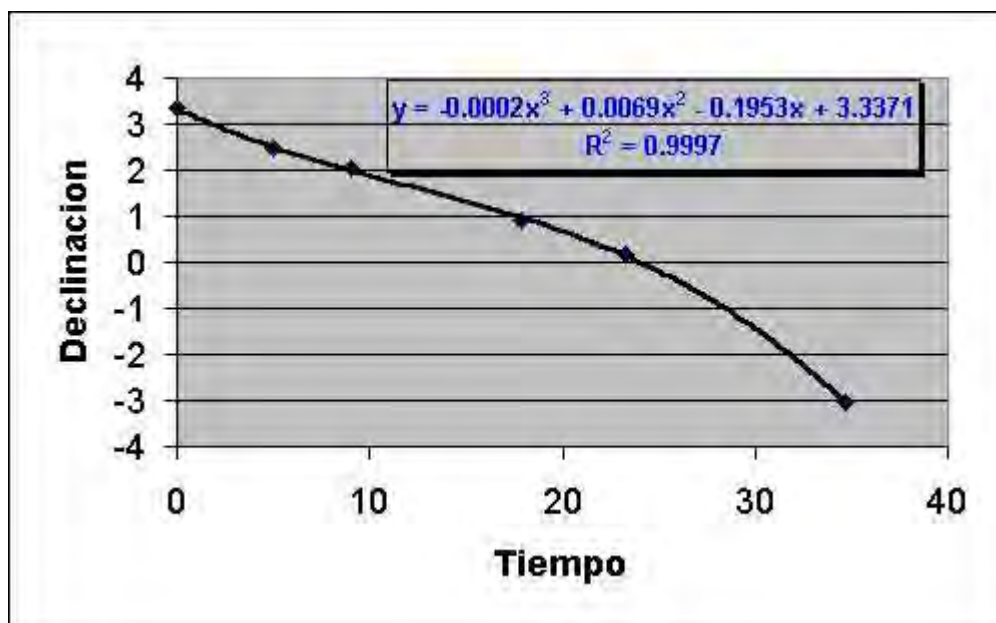


Figura 4: Ajuste de las observaciones históricas en el Punto de Variación Secular “Playa Bailen” en la provincia Pinar del Río.

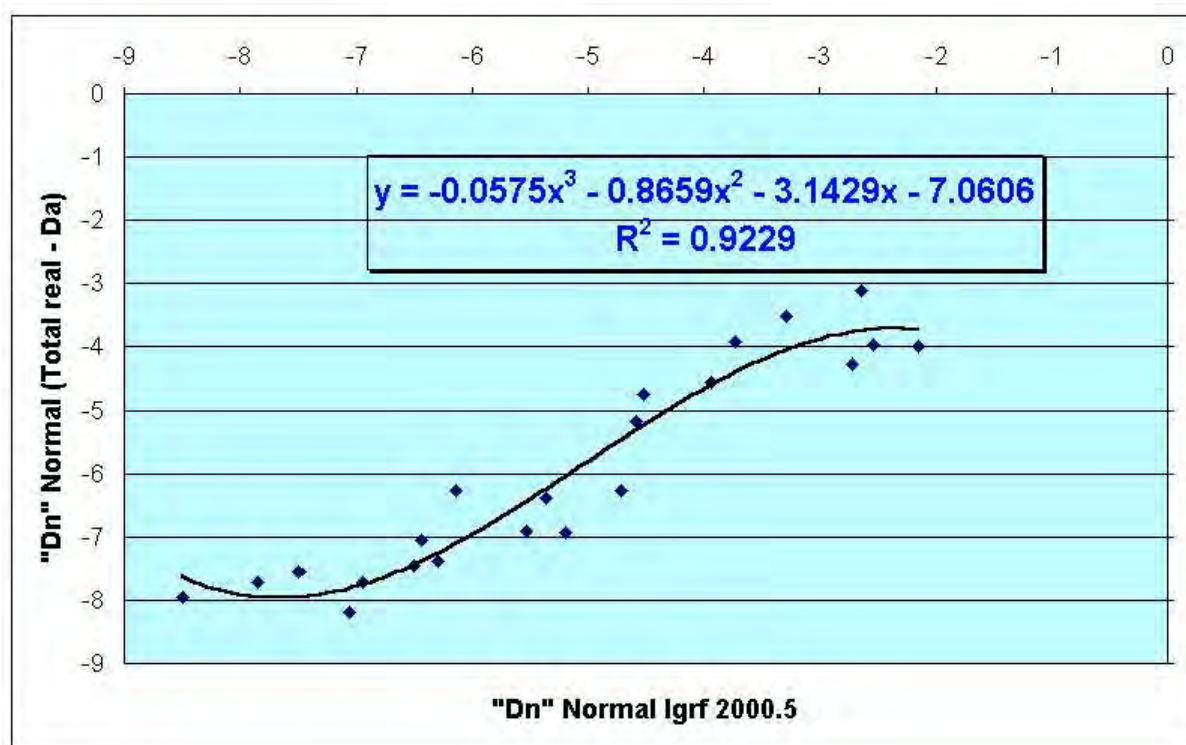


Figura 5: Regresión para el ajuste de los datos del modelo IGRF y el modelo de campo normal (Valor Total Observado – Valor Anómalo) de la declinación magnética para la época 2000.5.

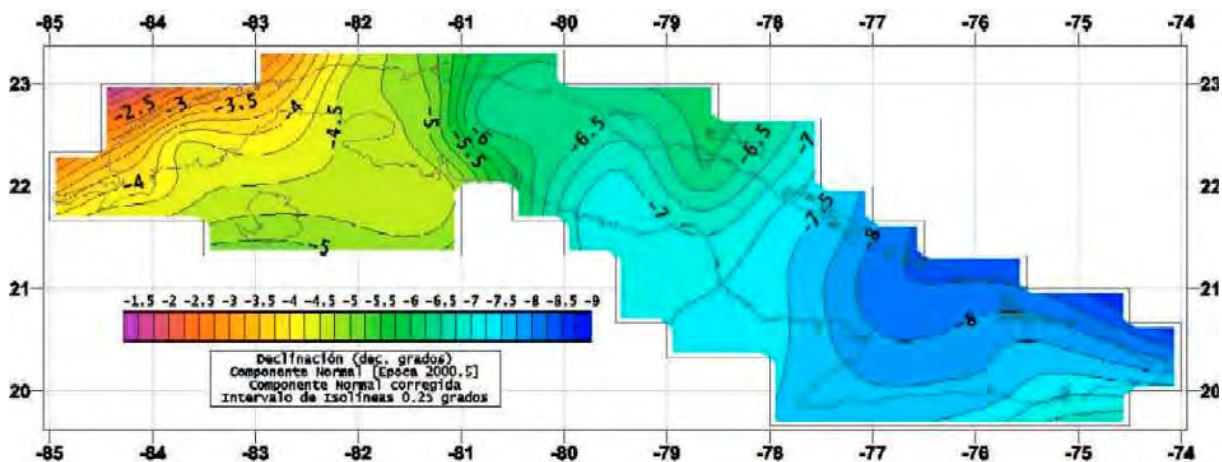


Figura 9 : Mapa de la Componente Normal de La Declinación Magnética "D" para el territorio de Cuba [Epoca 2000.5]. El área se corresponde con el límite de las hojas del mapa topográfico de Cuba a escala 1:25000.

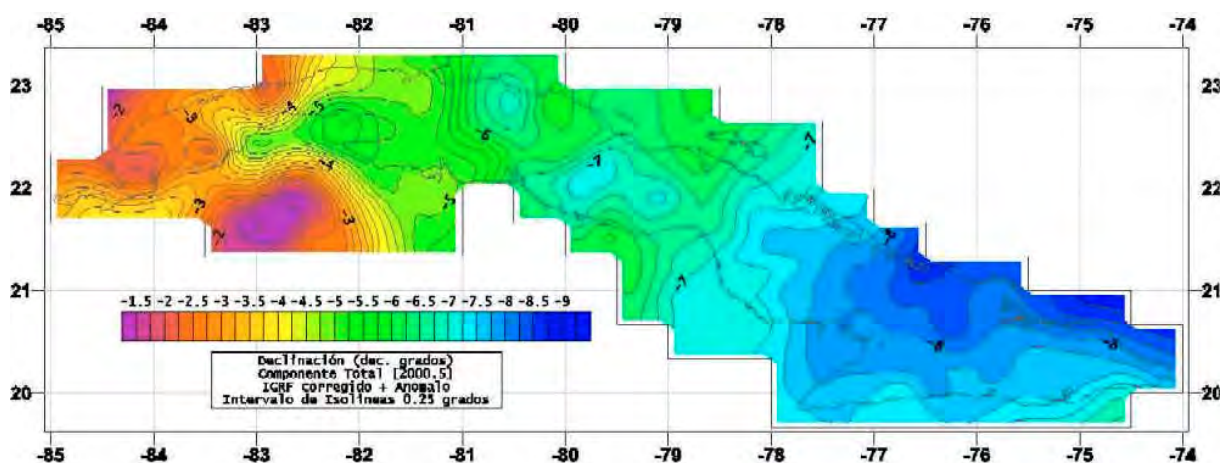


Figura 11: Mapa de la Componente Total de La Declinación Magnética "D" para el territorio de Cuba [Epoca 2000.5]. El área se corresponde con el límite de las hojas del mapa topográfico de Cuba a escala 1:25000.

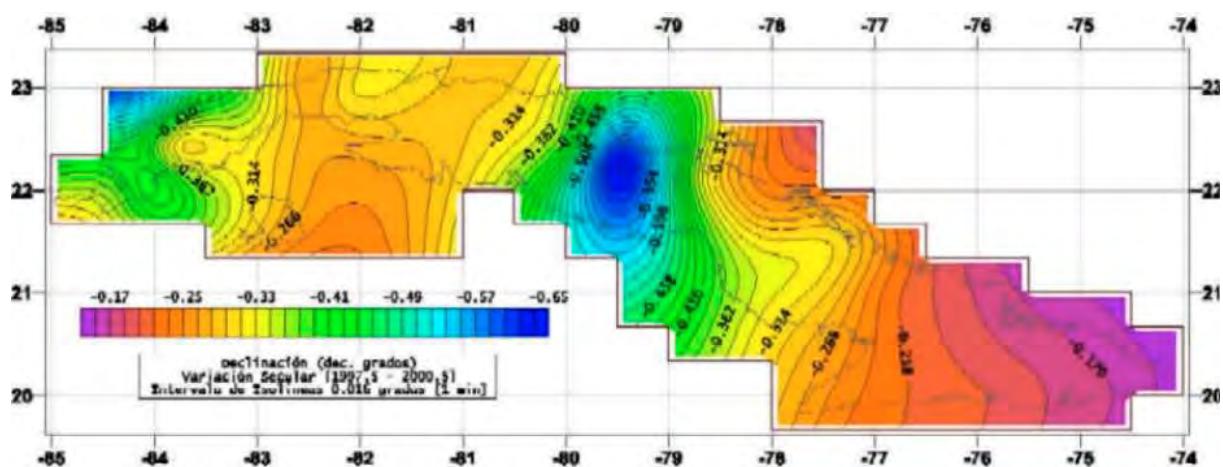


Figura 8 : Mapa de la Variación Secular de La Declinación Magnética "D" para el territorio de Cuba para el período 1997.7 - 2002.5. El área se corresponde con el límite de las hojas del mapa topográfico de Cuba a escala 1:25000.

INTERPRETACION AEROGEOFISICA EN EL SECTOR HABANA-MATANZAS, COMO APOYO A LA CARTOGRAFIA GEOLOGICA A ESCALA 1:100 000.

Ingrid Padilla Rodríguez⁽¹⁾, Dora García

⁽¹⁾ Instituto de Geología y Paleontología. Vía Blanca y Carretera Central, San Miguel del Padrón. Ciudad de la Habana, CP 11000 Cuba, C. elect: igpcnig@ceniai.inf.cu

RESUMEN

La interpretación en el sector Habana - Matanzas abarcó básicamente el estudio de los campos físicos potenciales (campos gravimétrico y magnético) y la Aerogammaespectrometría. Fueron analizadas y generalizadas también las propiedades físicas de las rocas densidad [σ] y susceptibilidad magnética [κ]

Utilizando los materiales gravimétricos a la escala 1:100 000 y los materiales aerogeofísicos a escala 1:50 000, se realizó la interpretación estructuro - tectónica cualitativa del área, reflejando los contornos de las unidades gravimétricas y magnéticas, y los contornos de las isolíneas que regionalizan los valores de concentración registrados por los canales espectrométricos (U, TH, K), así como, los valores de sus correspondientes relaciones. Esto permitió, evaluar el comportamiento radiogeoquímico de las formaciones geológicas de mayor distribución espacial en el área, y agrupar, de acuerdo a su composición, las diferentes secuencias geológicas cartografiables. También fue posible, trazar y categorizar mediante los campos físicos observados y transformados los diferentes alineamientos tectónicos y contribuir en la estimación de la profundidad de las fuentes magnéticas en el sector.

ABSTRACT

The interpretation in the Havana – Matanzas sector covered basically the study of the potential physical fields (gravity and magnetid) and the Gamma-ray Spectrometry. The physical properties of rocks along with density and magnetic susceptibility were analyzed and generalized too.

Using the gravity and aerogeophysical materials at reigional scales, the qualitative structure-tectonics interpretation of the area was carried out, showing the contour of the gravity and magnetic units as well as the contours of the isolines that regionalize registered concentration values by the spectrometric channels (U. TH. K) and also their corresponding relationship values. This allowed to evaluate the radiochemical behaviour of geological formations of greater spatial distribution in the area, and group them, according to their composition, the different geoloical sequences being cartographed. It was also possible to draw and categorize by mens of observed an transformed physical fields, the different tectonic lineaments and contribute to the estimation of the magnetic sources depth in the area.

INTRODUCCION

El análisis del sector abarcó fundamentalmente, el estudio de los campos físicos potenciales (campos gravimétrico y magnético) y la Aerogammaespectrometría. Fueron analizadas también, las propiedades físicas de las rocas disponibles densidad [σ] y susceptibilidad magnética [κ], utilizando los informes precedentes [3, 7, 8, 10, 19]. A partir de estos informes, sólo fue posible establecer valores medio para los diferentes complejos geológicos generalizados en el área de estudios.

Utilizando los materiales gravimétricos a la escala 1:100 000 y los materiales aerogeofísicos a escala 1:50 000, se realizó la interpretación estructuro - tectónica cualitativa del área, reflejando los contornos de las unidades gravimétricas y magnéticas partiendo de las isolíneas de valores máximos y mínimos residuales de $\pm 100\text{nT}$ para el campo magnético y de las isolíneas de valores máximos y mínimos residuales de $\pm 3\text{mGal}$ para el campo gravimétrico. Para la gammaespectrometría, se generalizaron de manera análoga los contornos de isolíneas de los diferentes canales (U, TH, K), siendo posible definir para cada uno de ellos tres niveles de concentraciones denominados (I, II, III). Estos niveles de concentración y los mapas de isolíneas de las relaciones entre los elementos (**Th/K, U/K y U/Th**), permitieron evaluar el comportamiento radiogeoquímico de las formaciones geológicas de mayor distribución espacial en el área y agrupar, de acuerdo a su composición, las diferentes secuencias geológicas cartografiadas, partiendo de los rasgos radiactivos más singulares que las caracterizan. Es de destacar, que pese al carácter somero de estudio de la espectrometría, de forma ocasional, algunos de los canales reflejan elementos o rasgos del corte geológico cubierto o parcialmente cubierto.

Petrofísica de los complejos litológicos en Habana – Matanzas

La información petrofísica disponible no permite el análisis de todas las formaciones de manera individual, por ello éstas se agruparon según los 6 complejos litológicos fundamentales definidos en el área (ver Tablas I-VI). En las citadas tablas, se muestran los valores medios generalizados para la $[\sigma]$ y $[\kappa]$ de aquellas formaciones cuya información se pudo compilar [3,4,5,7,8,11,19].

Dentro de las formaciones del **Complejo de Margen Continental**, según el valor de la densidad en orden decreciente se encuentran, Santa Teresa, Quiñones(?), Artemisa y las del Gr. Martín Mesa; de ellas la más magnética es la formación tuffítico - basáltica Quiñones. Para las formaciones de este complejo se observa, un monótono crecimiento de la densidad, acompañado de un decrecimiento de la susceptibilidad magnética.

Del **Complejo de Cuencas Superpuestas** por su densidad mayor se destacan las formaciones Universidad y Vía Blanca, seguidas por las formaciones Capdevila y Nazareno. Capdevila presenta los más altos valores de susceptibilidad promedio por su composición volcanomítica; constituye por tanto, la más importante fuente de anomalías magnéticas dentro del complejo. Según el campo gravimétrico, las rocas de este complejo, presentan un contraste de densidad del orden de 0.30 mGal respecto a las rocas que lo subyacen. **Ver Tabla IV**

El **Complejo Ofiolítico** presenta alta densidad y susceptibilidad magnética. En correspondencia con la serpentinización y/o conservación de las rocas, éstas ofrecen notables variaciones en sus propiedades

petrofísicas. En algunos casos, las rocas del complejo, pueden ser cartografiadas por valores mínimos relativos de dichos campos.

La distribución de los radioelementos en la zona de estudios, permite establecer un orden decreciente en el comportamiento radiogeoquímico de las formaciones geológicas. De acuerdo a los niveles de radiactividad, pueden ser identificadas entre sí y del resto(al menos por dos de los canales espectrométricos U, Th y K), las siguientes formaciones geológicas:

<u>Complejo Geológico</u> <u>Formación</u>	<u>Concentraciones de los Radioelementos</u> <u>Niveles de Radiactividad según Anexos</u>		
<u>Neoplatafórmico de Cobertura</u>	<u>U(ppm)</u>	<u>Th(ppm)</u>	<u>K(%)</u>
1-Güines-Cojimar-Arabos	$\frac{2 - 16}{\text{II-III}}$	$\frac{2 - 12}{\text{I-II-III}}$	$\frac{\leq 0.5}{\text{I}}$
2-Paso Real	$\frac{2 - 3}{\text{II}}$	$\frac{6}{\text{I}}$	$\frac{1}{\text{II}}$
3-Villa Roja-Guevara	$\frac{1 - 4}{\text{I-II}}$	$\frac{1 - <10}{\text{I-II}}$	$\frac{0.5 - 1}{\text{II}}$
4-Tinguaro	$\frac{\leq 0.5 - 2}{\text{I}}$	$\frac{1 - (2-4)}{\text{I}}$	$\frac{\leq 0.5}{\text{I}}$
<u>Margen Continental(Placetas)</u>			
5-Veloz-Santa Teresa	$\frac{1-2}{\text{I}}$	$\frac{1-2}{\text{I}}$	$\frac{\geq 0.5}{\text{II}}$

No pueden ser diferenciadas entre sí, por sus similitudes radiogeoquímicas, al ser menos radiactivas que las anteriores, las siguientes formaciones geológicas:

6-Amaro; Peñalver; Mata-Paraiso-Margarita y Carmita.

7- Las ultrabasitas del **Complejo Ofiolítico**, pueden ser efectivamente cartografiadas, al presentar los menores niveles de radiactividad del sector.

Regularidades observadas en el campo gravimétrico y magnético.

La generalización estructuro - tectónica obtenida de la interpretación del campo gravimétrico y de sus transformaciones (mapas residuales para H= 1Km) se puede inferir que:

- Los máximos gravimétricos regionales con intensidades y dimensiones variables, que se extienden desde el occidente al oriente del área de estudios, pueden ser explicados en sentido general, por los grandes espesores del **Complejo Efusivo de Arco Volcánico** denominado como (Zona III), para el cual, es característico el desarrollo de potentes secuencias de basaltos, andesito-basaltos y andesitas [12,15]

- Los máximos gravitatorios, extendidos en dirección sublatitudinal (SO-NE), que alcanzan valores superiores a los +70 mGal (p.e. el que se extiende desde el Oeste fuera del área de estudios perteneciente al bloque Bahía Honda, y que llegan hasta el SO de Cabañas), y los máximos que alcanzan valores superiores a los +44mGal(p.e el que se extiende desde el Sur de Quiebra Hacha hasta el Norte del poblado de Bauta) en la región de Martín Mesa, así como otros dispuestos en forma de franjas extendidas también sublatitudinales más al sur y los que se encuentran en las zonas levantadas de la parte centro- noreste de la provincia de la Habana y Matanzas, suponemos, están principalmente asociados a la presencia parcialmente aflorada del **Complejo Ofiolítico** (Zona V) junto a las secuencias del *Complejo de Arco Volcánico* (Zona III) y las del *Complejo de Margen Continental* (Zona I).
- Los cuerpos de ofiolitas del norte de la Habana, son en general más pequeños que los del occidente del sector de estudios. Se cartografían en los campos físicos observados, por valores de gravedad comprendidos desde >12 hasta >30mGal, y por anomalías residuales de gravedad entre 2-7.5mGal. Con niveles gravimétricos análogos a los del occidente del sector, se destaca en la provincia de Matanzas el máximo gravimétrico Bolondrón, el cual se cartografía como un cuerpo casi isométrico de +86mGal junto a pequeños máximos y mínimos magnéticos residuales de $\pm 100\text{nT}$.
- El campo magnético generalmente cartografía a las ofiolitas, mediante máximos magnéticos de diferente magnitud dispuestos generalmente en igual dirección que las anomalías gravimétricas. Sobre este particular, recordemos lo referido anteriormente sobre el comportamiento petrofísico de las ofiolitas.

Tomando en consideración la acotación precedente, se observa con relativa regularidad en los campos potenciales, que sobre los cuerpos (escamas) de rocas ofiolíticas, se establecen generalmente “pares anómalos” gravimétrico - magnéticos. A modo de ejemplo, podemos citar los “pares anómalos” que se establecen en las regiones: Madruga(máximos magnéticos y mínimos gravimétricos residuales del orden de las +100nT e inferiores a los -6mGal respectivamente). Al sur de Madruga (completamente cubierto) se observa, pegado a la costa, un máximo gravimétrico de grandes dimensiones (superior a los +74mGal) y máximos residuales magnéticos (de +100nT). Situaciones análogas se observan en la localidad de Arcos de Canasí, la estructura Cantel - Camarioca, región Máximo Gómez, región O-NO y E-NE del bloque San Miguel de los Baños. Todas éstas regiones presentan similitudes por sus parámetros físicos regionales.

En sentido general, las ofiolitas no afloran completamente, pero los campos magnético y gravimétrico están indicando la existencia de cuerpos (y/o escamas) de diferentes dimensiones, subyaciendo a las secuencias efusivo vulcanógeno- sedimentarias del arco. Desde el occidente del sector de estudios hasta

Matanzas, éstos relictos del *complejo ofiolítico*, “entrampados” generalmente en los planos de fallas, no sólo están presentes en toda la porción septentrional dónde parcialmente afloran, sino que suponemos, también se revelan mediante anomalías de aún mayores dimensiones, en la porción sur terrestre y marina de ambas provincias, ya que el referido cuadro regional de (“pares de anomalías” gravimétrico-magnéticas), también está presente por debajo de los potentes espesores de sedimentos de los **Complejos Neoplatafórmico y de Cuencas Superpuestas**. Si analizamos la cadena de pares anómalos destacados, en los mapas de los campos potenciales transformados, observamos que éstas anomalías por debajo de los depósitos de las cuencas y hacia la región de la plataforma marina, reflejan un probable vínculo con cuerpos profundos de ofiolitas? Por lo que la zona de sutura ofiolítica se debe esperar dentro de la zona marina de nuestra plataforma, expresada por intensos gradientes regionales de los campos potenciales, no cartografiada aún por las investigaciones realizadas.

- Utilizando el mapa de GRIDEPTH (confeccionado mediante el programa de igual nombre para toda Cuba)[14] podemos inferir, que los topes superiores de las fuentes anómalas que provocan las anomalías geofísicas, y que representan desde del punto de vista geológico a las ofiolitas de las regiones Martín Mesa, las del noreste de la Habana y las del norte de Matanzas, incluyendo las de la estructura Cantel y las no afloradas de su entorno, se encuentran a profundidades entre 0-3000m.
- Para las fuentes anómalas magnéticas, que provocan las anomalías geofísicas asociadas a las ofiolitas parcialmente afloradas dentro de los planos de la Falla Pinar (desde Guanajay hasta el oeste del Poblado de Tapaste), para las parcialmente afloradas en la provincia de la Habana y para las localizadas desde el noreste del Cotorro hasta el noroeste de San Antonio de los Baños, son comunes rangos de profundidades para sus topes magnéticos entre **0-1000m**, aunque también se observan con relativo predominio, los que se encuentran a profundidades superiores a los **10 000m**.
- Similares rangos de profundidad, son característicos para las fuentes anómalas magnéticas parcialmente afloradas al este de Perico, en los límites fallados que delimitan a la parte más elevada del anticlinal Colón(extremo occidental de la cuenca de Santo Domingo). Estas anomalías indican sobre la existencia de rocas ofiolíticas en los bordes fallados de dicha cuenca. Los topes magnéticos de estas rocas se ubican desde profundidades medianamente someras **0-1000m**, hasta rebasar los **10 000m** de profundidad por debajo de las formaciones Tinguaro y Colón. Características similares presentan las fuentes anómalas magnéticas ubicadas por debajo de los sedimentos palustres en la península de Zapata [14].
- Los alineamientos tectónicos que predominan en todo el occidente de Cuba se cartografían con relativa facilidad, tanto por los mapas de los campos físicos potenciales estudiados, como por sus transformaciones analíticas para H=1, 3 y 7Km. De aquí que se pueda inferir, que la mayor parte de los alineamientos tectónicos cartografiados, caracterizan a fallas profundas.

- Generalmente todas las unidades gravimétricas y magnéticas que se revelan sobre las diferentes zonas estructuro - faciales cartografiables, agrupadas dentro de cada uno de los 6 complejos geológicos generalizados en el sector, están delimitadas por alineamientos tectónicos que se reflejan por intensos gradientes de éstos campos físicos, por la interrupción de cadenas de anomalías, cambios bruscos en la dirección de las isolíneas o por inflexiones de éstas.
- Todos los alineamientos trazados por criterios geofísicos en el sector de estudios, se pueden seguir a lo largo de las siguientes direcciones preferenciales: SO-NE; SE-NO; SO-NE; bruscamente pasan a dirección S-N en la amplia zona de la conocida falla de Cochinos, y cambian de nuevo a la dirección SE-NE en Matanzas.
- Generalmente no ha sido reflejada en los anexos gráficos confeccionados, la tectónica más joven. Esta sólo se encontrará presente cuando revela el rejuvenecimiento que la neotectónica efectuó sobre alineamientos profundos más viejos.

Regularidades observadas en la Gammaespectrometría.

- La mayoría de las unidades gamaespectrométricas cartografiables, caracterizan formaciones sedimentarias del **Complejo Neoplatafórmico**; y en menor grado, a las formaciones carbonatado - silíceas del **Complejo de Margen Continental** y a las formaciones vulcanógeno-sedimentarias del **Arco Volcánico Cretácico**.
- Resultan similares desde el punto de vista radiogeoquímico, y no pueden ser diferenciadas entre sí efectivamente, las formaciones carbonatado - silíceas: Amaro (Z.Placetas), Mata - Paraíso - Margarita - Carmita (Z.Camajuaní) y la formación fragmentaria - carbonatada Peñalver del **Complejo de Cuencas Superpuestas**.
- Las formaciones sedimentarias cartografiables del **Complejo Neoplatafórmico** se diferencian claramente en los niveles de **U y Th** del resto. Los altos valores de U están dados por la abundancia en su composición de biodetritos y fósiles, mientras que la variabilidad en los niveles de concentración del canal de Th, están estrechamente condicionados a la mayor o menor concentración que posean de minerales residuales, en particular las arcillas, las que al formar parte de la fracción más fina del suelo que las recubre, por procesos de adsorción y transportación concentran tanto U como Th.
- En la parte occidental del sector de estudios, en la porción centro - noreste de la Habana y en algunas localidades de Matanzas, los mapas de las relaciones **U/K y Th/K**, delimitan con valores

>8ppm/% y valores **> 15ppm/%** respectivamente, el predominio de las concentraciones de U y de Th sobre las concentraciones de K, en las secuencias sedimentarias (margosas, terrígeno - carbonatadas y carbonatadas) del **Complejo Neoplatafórmico (Zona VI)**, permitiéndoles separar de forma clara las áreas donde predominan las formaciones ígneas de composición medio - ácida del **Complejo de Arco Volcánico (Zona III)**, junto a otros complejos rocosos.

- Las relación U/K y Th/K cartografían con valores **< 3ppm/% y <5ppm/%** respectivamente, las partes más levantadas de las rocas de composición medio - ácida del **Complejo de Arco Volcánico (Zona III)**, separándolas de las formaciones de los complejos de rocas sedimentarias. Los bajos valores de ambas relaciones corroboran el carácter **medio - ácido** de las formaciones, y nos permiten decir también, que a pesar de que las regiones levantadas del arco, constituyen bloques basculados posiblemente por la neotectónica, los sedimentos producto del intemperismo que los sobreyacen, no han sufrido mucho transporte, dado que los suelos también reflejan las concentraciones de la roca subyacente.
- Las formaciones cartografiadas en la parte más occidental de la cuenca de Santo Domingo, región conocida como anticlinal de Colón, se destaca de su entorno, por presentar muy bajas concentraciones de los tres radioelementos. Dado que la magnetometría cartografía la presencia de rocas ofiolíticas no sólo en los bordes fallados de la cuenca, sino también en su piso, nos inclinamos a pensar, que la respuesta que brinda la espectrometría está relacionada de algún modo, con el acercamiento a la superficie de éstas rocas ultrabásicas en esta zona levantada de la cuenca. Ello confirma una vez más, que pese al carácter somero de investigación de la espectrometría; de forma ocasional refleja elementos o rasgos del corte geológico cubierto.

COMPLEJO DE MARGEN CONTINENTAL

Tabla No. I

REGION	SECUENCIA	FORMACIONES/ (Nº. MUESTRAS)	DENSIDAD MEDIA(σ) (t/m ³)	SUSCEPTIBILIDAD MAGNETICA MEDIA (κ) x10 ⁻⁶ usgsm
E. de Rosario Martín Mesa	Carbonatada Carbonatado- Terrigeno-Silíceo (Placetos)	Artemisa(at)/(258muest)	2.67	64.7
		Martín Mesa(mm)	2.67	1.89
		Constancia(cnt)	-	-
		Veloz(vz)	-	-
		SantaTeresa(st)/(49 muest)	2.75	52.3
		Carmita (cr)/(19 muest)	-	-
		Amaro(am)	-	-
Bahía Honda - Habana	Vulcano-Tufítica- Basáltica	Quiñones??(qn)/(67 muest)	2.72	128.4
E. Matanzas	Carbonatada- Silíceo(Camajuaní)	Trocha(tr)	-	-
		Margarita(mra)	-	-
		Paraíso(pr)	-	-
		Mata(mt)	-	-

COMPLEJO DE ARCO CRETACICO VOLCANICO

Tabla No. II

REGION	SECUENCIA	FORMACIONES/ (Nº. MUESTRAS)	DENSIDAD MEDIA(σ) (t/m ³)	SUSCEPTIBILIDAD MAGNETICA MEDIA (κ) x10 ⁻⁶ usgsm
Habana- Matanzas	Vulcanógeno- Sedimentario	Chirino(ch)	-	-
		La trampa(lt)	-	-
	Efusivo- Vulcanógeno- sedimentario	Matagua(mt)	2.62	1279

COMPLEJO DE CUENCAS DE ANTEPAIS(Sobre Margen Continental)

Tabla No. III

REGION	SECUENCIA	FORMACIONES/ (Nº. MUESTRAS)	DENSIDAD MEDIA(σ) (t/m ³)	SUSCEPTIBILIDAD MAGNETICA MEDIA (κ) x10 ⁻⁶ usgsm
Guaniguanico y Martín Mesa	Olistostrómico	Manacas(mc)/(265muest)	2.69	85
E. de Matanzas	Brechoso- Carbonatada (Camajuaní)	Vega(vg)	2.45	30

COMPLEJO NEOPLATAFORMICO

Tabla No. V

REGION	SECUENCIA	FORMACIONES/ (Nº. MUESTRAS)	DENSIDAD MEDIA(σ) (t/m ³)	SUSCEPTIBILIDAD MAGNETICA MEDIA (κ) x10 ⁻⁶ usgsm
Habana-Matanzas	Margosa	Tinguaro(tgr)	-	-
	Terrígeno-Carbonatada	Guanajay(gy)/(29 muest)	2.19	3.17
	Carbonatada	Colón(cln)/(12 muest)	2.3	0
		Paso Real(psr)	-	-
		Jaruco(jc)	-	-
		Sta Maria del Rosario(smr)	-	-
		Arabos(arb)	1.89	0.4
		Cojimar(cj)/(86 muest)	2.07	0.17
		Caobas(cbs)	-	-
		Güines(gn)	2.41	5.0
		Loma triana(lmt)	-	-
		El Abra(eb)	-	-
		Canimar(cnm)	-	-
		Versalles(vs)	-	-

COMPLEJO DE CUENCAS SUPERPUESTAS. PIGGY BACK

TABLA No. IV

REGION	SECUENCIA	FORMACIONES/ (Nº. MUESTRAS)	DENSIDAD MEDIA(σ) (t/m ³)	SUSCEPTIBILIDAD MAGNETICA MEDIA (κ) x10 ⁻⁶ usgsm
I ETAPA				
Norte Habana-Matanzas	Terrígena	Vía Blanca(vb)/(41 muest)	2.38	155.6
	Fragmentario-Carbonatda	Peñalver(pñ)	-	-
II ETAPA				
Norte Habana-Matanzas	Terrígena-Carbonatada (orogénica)	Gr.Mariel	-	-
		Mercedes(mcd)	-	-
		Apolo(ap)	-	-
		Madrugá(md)	-	-
		Capdevila(cp)	2.28	1238-1519
	Carbonatado-Silíceo	Universidad(un)	2.38	241
		Jabaco(jb)	-	-
		Punta Brava(ptb)	-	-
		Encanto(ec)	-	-
Bejucal-Madruga-Limonar	Carbonatado-Terrigena(orogénica)	Hatillo(ho)	-	-
		Perla(prl)	-	-
		Nazareno(nz)	1.55-2.13	1.13
		Jicotea(jt)	-	-
		Peñón(pñn)	-	-

COMPLEJO OFIOLITICO

Tabla No. VI

REGION	SECUENCIA	FORMACIONES/ (Nº. MUESTRAS)	DENSIDAD MEDIA(σ) (t/m ³)	SUSCEPTIBILIDAD MAGNETICA MEDIA (κ) x10 ⁻⁶ usgsm
Habana-- Matanzas	Ultrabasitas	Ofiolitas, gabro-diabasas, ultrabasitas brechosas, Margot	2.6	1145

BIBLIOGRAFÍA.

1. Albear, J. F y otros, 1983: Contribución a la geología de las provincias de La Habana y Ciudad de La Habana. ONRM, La Habana.
2. Furrázola-Bermúdez, G y otros, 1978: Nuevo esquema de correlación estratigráfica de las principales formaciones geológicas de Cuba. La Minería en Cuba, Vol. 4 No.3 pp36-52, La Habana.
3. Ipatenko, S. P, Y. Ovchinikov y G. Lado, 1971: Propiedades físicas de las rocas de Cuba. Serie Geofísica No. 8, Dpto. Geofísica ACC, La Habana, 13 pp
4. Liubi, L. I y otros, 1979: Informe del Levantamiento aerogeofísico complejo en el sector Güines, provincia de La Habana a escala 1: 50 000 (inédito). ONRM, La Habana
5. Liubi, L. I y otros, 1979: Informe del Levantamiento aerogeofísico complejo en la provincia de Pinar del Río a escala 1: 50 000 (inédito). ONRM, La Habana.
6. Lufriú, L. Padilla, I. y otros 1996: Nota Explicativa al Mapa del Campo Aeromagnético y a los mapas de Radiación Gamma y Concentraciones de U(Ra), Th y K e la República de Cuba escala 1: 250 000. ONRM, La Habana.
7. Lufriú, L. Padilla, I. y otros, 1986: Informe del Levantamiento aerogeofísico complejo en las provincias Habana - Matanzas a escala 1: 50 000 (inédito). ONRM, La Habana
8. Lufriú, L. Padilla, I. y otros, 1987: Informe del Levantamiento aerogeofísico complejo en la provincia de la Habana a escala 1: 50 000 (inédito). ONRM, La Habana
9. Luvennikoba, T. y otros, 1987: Informe del Levantamiento aerogeofísico complejo en la provincia de Pinar del Río sur y este a escala 1: 50 000 (inédito). ONRM, La Habana.
10. Martínez, D, y otros, 1991: Informe sobre los resultados del Levantamiento geológico y prospección a escala 1: 50 000 Pinar - Habana. (inédito). ONRM, La Habana.
11. Martínez, D, y otros, 1994: Informe sobre la Generalización del Mapa Geológico del Occidente de Cuba a escala 1:100 000. Empresa Geólogo Minera Pinar del Río.
12. Pacheco, Puchades M. y otros, 1997: Trabajo Temático Productivo para la generalización geólogo geofísica de los campos físicos potenciales (gravimetría y magnetometría) en el occidente de Cuba (Pinar del Río, La Habana e Isla de la Juventud) a escala 1: 100 000. (inédito). ONRM, La Habana

13. Padilla, Rodríguez I. y otros 1998: Esquema de Alineamientos Tectónicos de Cuba Occidental, según los Campos Físicos Potenciales (Gravimetría y Magnetometría) escala 1: 100 000. Congreso de Geología y Minería 1998. La Habana. Cuba.
14. Padilla, Rodríguez, I. y otros 1996: Distribución y Posición Relativa de las Fuentes Profundas del Campo Aeromagnético de la República de Cuba escala 1: 000 000. Congreso de Geofísica. La Habana. Cuba.
15. Pardo, Echarte M. y otros, 1998: Trabajos Geofísicos para la Generalización Geológica a escala 1: 100 000 en Cuba Central.
16. Pérez, P. H. y otros 1996: Trabajo Temático Productivo para la generalización de los datos gravimétricos del occidente del país, provincias Pinar del Río, La Habana, Matanzas e Isla de la Juventud a escala 1: 100 000. ONRM, La Habana
17. Piotrowska, K y otros, 198: Texto explicativo para el Mapa Geológico en la escala 1: 250 000 de la provincia de Matanzas ONRM, La Habana.
18. Rodríguez Basante, B. 1999: Interpretation of Geophysical Datasets for Geological and Structural Mapping in Western Cuba. Tesis de Grado para Master en Ciencias en Exploración Geofísica. Departamento de Levantamientos de los Recursos de la Tierra. Delft, Netherlands.
19. Shaposhnikova, C. 1969: Propiedades físicas de las rocas de Cuba. INRH, Dirección Técnica, Public. Espec. No. 7: 57-80.

EL METODO DE POTENCIAL REDOX EN LA PROSPECCION DE MINERALES; DOS EJEMPLOS: EL YACIMIENTO MELLA Y EL STOCKWORK LA UNION

Manuel Pardo⁽¹⁾, Rubén Stout⁽¹⁾, Roberto Aragón⁽¹⁾, Emilio Alvarez⁽²⁾ y René Lugo⁽³⁾

(4) Instituto de Geología y Paleontología, Vía Blanca y Línea del Ferrocarril s/n, San Miguel del Padrón, C. P. 11000, Ciudad de la Habana, Cuba, C. Elect.: igpcnig@ceniai.inf.cu.

(5) Empresa Geominera Pinar del Río, Santa Lucía, Pinar del Río, Cuba, C. Elec.: geominoccc@pri.minbas.cu.

(6) Empresa Geominera Camagüey, Carretera Central Este, Km 5^{1/2}, Camagüey, Cuba, C. Elect.: trangs@cigb.cigbcam.edu.cu.

RESUMEN

La reducción del financiamiento a la prospección hace cada vez más imperativa la necesidad de elevar la efectividad geológica de los programas mínimos por métodos convencionales. Una vía para lograrlo es su complementación con técnicas geofísico-geoquímicas no convencionales como el Potencial Redox y la Susceptibilidad Magnética del suelo, las cuales se aplican, a un bajo costo, con fines de la reducción de áreas y/o de la selección de los objetivos más favorables para la comprobación geológica.

Estas técnicas fueron aplicadas en el sector del yacimiento de sulfuros masivos Mella, provincia de Pinar del Río, y en el sector del stockwork de cuarzo con contenidos de oro La Unión, provincia de Camagüey. En el sector Mella, la anomalía de Potencial Redox con amplitud mayor de 60 mV, define el contorno de la mineralización sulfurosa endógena en cuyos límites se desarrolla la mineralización exógena de oro. Los datos de Potencial Redox exhiben una buena correspondencia con el contenido de cobre en los suelos. En el sector La Unión, los resultados de los trabajos modifican el cuadro geológico previo, al revelar una aureola magnética con estructura anular y centro en un mínimo isométrico de Potencial Redox (amplitud mayor de 60 mV) asociado al stockwork. De igual manera, los datos de Potencial Redox muestran una estrecha correspondencia con el contenido de cobre en los suelos. El estudio petrográfico ulterior de una sección delgada del stockwork permitió establecer que la ocurrencia corresponde, muy probablemente, a un depósito porfírico de Cu-Fe ± Au.

ABSTRACT

The reduction of prospecting financing makes every time more imperative the necessity to raise the geological effectiveness of minimum programs by conventional methods. A way to accomplish this is their complementation with non conventional geophysics- geochemical techniques, like the soil Redox Potential and Magnetic Susceptibility which are applied, at a low cost, aimed to arial reduction and/or target selection for geological verification.

These techniques were applied at the Mella massive sulphide deposit sector, Pinar del Rio province, and at the Union quartz stockwork with gold contents sector, Camaguey province. At the Mella sector the Redox Potential anomaly with an amplitud greater than 60 mV, outline the endogenous sulphide mineralization , where within its limits the exogenous gold mineralization is developed. The Redox Potential data exhibit a good correspondence with copper contents in soils. At the Union sector the work results modify the previous geological frame, revealing a magnetic aureole with an annular structure and centre in an isometric Redox Potential minimum (amplitude greater than 60 mV) associated to the stockwork. In the same way, the Redox Potential data show a close relation with copper contents in soils.

A farther petrographic study of a stockwork probe allows establishing that the occurrence probably belongs to a Cu-Fe ± Au porphyry deposit.

INTRODUCCION

La aplicación de la medición in situ del Potencial Redox en suelos y su uso combinado con la kappametria en la prospección de minerales tiene sus antecedentes en las mediciones experimentales efectuadas sobre objetivos de sulfuros masivos en la provincia de Pinar del Río, Cuba [10]. Estas mediciones permitieron detectar la mineralización masiva de cobre, la cual no había sido revelada por el Potencial Espontaneo. El resultado estimuló la realización de nuevas aplicaciones en objetivos de interés para la prospección [9].

El presente trabajo se propone ofrecer una breve panorámica del método en su uso combinado con la kappametria para la prospección de minerales, ilustrándolo con dos nuevos casos de estudio: el sector Mella (depósito de sulfuros masivos con mineralización exógena de oro), provincia de Pinar del Río y el sector La Unión (stockwork de cuarzo con oro), provincia de Camagüey [9].

PREMISAS GEOLOGICAS DE APLICACION

Diferentes autores [1, 2, 7] reconocen el proceso de migración vertical de un geogas y de iones metálicos (técnicas CHIM, MPF y MMI) desde una ocurrencia en la profundidad hasta la superficie, condicionando la formación de una columna de ambiente reductor sobre ésta [5]. El transporte metálico se supone vinculado a mecanismos de difusión o de transporte hidromórfico a partir de eventos de intemperismo, proceso que afecta también, al parecer, a coberturas recién transportadas [5, 7]. Este ambiente reductor favorece la conversión de los minerales de hierro no magnéticos ((hematita, pirita) en variedades magnéticas diagenéticas más estables (magnetita, pirrotita y griegita).

METODOLOGIA DE LOS TRABAJOS

De acuerdo con [8], para la medición in situ del Potencial Redox en suelos (Ur) se utilizan dos electrodos conectados a un milivoltímetro digital de alta impedancia de entrada (comercial; sensibilidad 0.1 mV): uno inerte de platino, y otro de referencia de cobre (electrodo no polarizable- comercial), ubicados inmediatamente próximos dentro de un hoyo de 15- 30 cm de profundidad, al nivel del horizonte B, más representativo y húmedo. La comunicación iónica que cierra el circuito se garantiza a través de la cerámica porosa del electrodo de referencia. Las observaciones se realizan, como regla, con paso 20- 25 m para los trabajos de reconocimiento y prospección.

Las mediciones con el dispositivo descrito tienen un comportamiento transiente, determinándose el potencial mediante un algoritmo diseñado al efecto a partir de cinco lecturas con una diferencia de tiempo entre ellas de un minuto.

La medición de la Susceptibilidad Magnética (K_a) se realiza con un kappámetro KT-5 (sensibilidad $1 \cdot 10^{-5}$ SI), efectuando siete lecturas distribuidas en el piso y dos paredes ortogonales del hoyo, las cuales se promedian.

En los sectores de trabajo se elige un perfil de estudio (escogido por presentar las anomalías de mayor amplitud) donde se realiza el muestreo metalométrico y se mide el Potencial Espontáneo. El propósito de estos métodos complementarios es el de establecer la naturaleza geoquímica de las anomalías y, de ser posible, la profundidad y yacencia aproximada de las fuentes.

Los estimados de tiempo y costo para las aplicaciones en minerales, derivados de la experiencia acumulada son los siguientes:

Potencial Redox + Susceptibilidad Magnética; líneas con paso 25 m	Categoría de Dificultad	PF/CD	PRECIO/Km lin
	I	47	130.00
	II	39	158.00
	II	32	193.00
	IV	25	250.00

EJEMPLOS DE APLICACIÓN

Sector Mella

El yacimiento piritó- polimetálico Mella se encuentra en la región noroccidental de la provincia de Pinar del Río, a 0.5 Km al Este del yacimiento Matahambre. Estos dos depósitos conjuntamente con el yacimiento Nieves, conforman un importante campo mineral.

De acuerdo con [3, 4], la mineralización está representada por dos o tres lentes de pirita masiva, bandeada o de vetillas- diseminada que contiene también esfalerita, pirrotina, calcopirita, galenita, cuarzo y siderita. El espesor de los lentes minerales es de 15- 30 m, con una longitud por el rumbo de 100- 120 m y una extensión en profundidad de 200 m. La mineralización principal de tipo piritó- polimetálica estratiforme está controlada por los esquistos arcillo- carbonosos de la base del Miembro Castellanos (J_3 ct) (lado colgante) o en el contacto entre el Miembro mencionado y el Miembro no diferenciado de la Fm. San Cayetano (J_{1-2} sc), constituido principalmente por areniscas cuarzo- feldespáticas (lado yacente). En

este lado se desarrolló una gran zona de vetillas y diseminaciones esencialmente de menas piríticas, la cual corresponde con el área del piso del depósito masivo.

El objetivo de la prospección lo constituye la mineralización exógena de oro en las zonas de oxidación, la cual guarda una estrecha relación con la mineralización sulfurosa endógena que le dio origen. Los elementos indicadores de la presencia de Au en estas zonas son: Cu, Pb, Zn, Ag, As y Sb. El afloramiento de estas zonas de oxidación se manifiesta por sombreros de hierro vinculados con las cotas más altas del relieve, o como fragmentos eluvio- deluviales de éstos en las laderas y partes bajas de las elevaciones asociadas con estos cuerpos.

Los resultados de los trabajos de Potencial Redox se presenta, en la Fig. 1. Las anomalías de interés del Potencial Redox, en base a la experiencia anterior [10], se establecen a partir de una amplitud igual o superior a 60 mV. De acuerdo con esto, se localizan entre los perfiles 8 y 12 (principalmente, Perfil 10), dos anomalías de interés vinculadas al depósito conocido (menas masiva y vetítico-diseminada). Sus epicentros están en las estaciones 32 (mineralización de stockwork), 44 - 50 (mineralización de stockwork) y 56 (mineralización masiva), sin que sea posible establecer una diferenciación entre ellos. También resulta interesante destacar la expresión en el Potencial Redox de la escombrera del yacimiento, manifestada por valores positivos típicos de una zona de oxidación (perfiles 12 y 10, estaciones 64 - 78 - perfil 10). En general, los mínimos de Potencial Redox se corresponden con incrementos de la Susceptibilidad Magnética. La anomalía de Susceptibilidad Magnética asociada al depósito (nivel 1×10^{-3} SI) se extiende entre los perfiles 6 y 10, estaciones 52 - 58, y está vinculada a las partes magnéticas del sombrero de hierro.

Los resultados del Potencial Espontáneo realizado sobre un perfil de estudio (Perfil 10) ponen de manifiesto una estrecha (160 m) e intensa (200 mV) anomalía con epicentro en la estación 56 (mineralización masiva) y una débil inflexión en la estación 50 (mineralización de stockwork). La escombrera se manifiesta por valores disminuidos de baja amplitud (30 mV). La mineralización vetítico - diseminada de la estación 32 no se revela por este método. Una interpretación semicuantitativa de la referida anomalía arroja una profundidad de la fuente (mena masiva) de unos 25 m y una yacencia subvertical; información que concuerda, bastante bien, con los datos reales. De estos resultados se evidencia el carácter más selectivo del método de Potencial Espontáneo, su limitación para detectar la mineralización de stockwork, y la inconveniente respuesta anómala sobre la escombrera.

Los resultados de los trabajos geoquímicos (metalometría; contenidos de As, Cu y Au) sobre el perfil de estudio muestran que los contenidos anómalos de As y Au, genéticamente vinculados, se asocian a la anomalía de Potencial Espontáneo y al epicentro de la anomalía del Potencial Redox en la estación 56 (mena masiva). La distribución de los contenidos anómalos de Cu, por otra parte, se asemeja a la

anomalía de Potencial Redox. La mineralización de stockwork de la estación 32, con expresión anómala en el Potencial Redox, no se manifiesta en los resultados geoquímicos.

Como conclusión, se puede plantear que el complejo de métodos utilizado (Potencial Redox, Susceptibilidad Magnética, Potencial Espontáneo y Metalometría) permite localizar la mineralización exógena de oro, limitándola a la zona de oxidación del cuerpo de mena masiva detectado en la estación 56 - perfil 10.

Sector La Unión

El sector de los trabajos ocupa un área devuelta por la A. E. I. Minería Siboney & Geominera S. A. donde se definió un sector de prospección más amplio (7.5 Km²) denominado La Unión. Su perspectiva se fundamenta en la ubicación dentro del cinturón magmato- metalogénico Vertientes- Jobabo, de dirección cubana [11], para el cual resulta característico la existencia de una gran cantidad de ocurrencias minerales, especialmente auríferas, y zonas de alteración hidrotermal- metasomática (no evaluadas) tanto en las rocas intrusivas como en las volcánico- sedimentarias. Los trabajos de jagua realizados por la referida asociación económica revelaron una interesante anomalía de oro que quedó abierta hacia el Sur [6].

En el terreno suavemente ondulado se describen las rocas intrusivas de un macizo de medianas proporciones, de composición diorito - granodiorítica, de grano medio hasta fino, colores grises claro a medio, masivas, pertenecientes al Complejo Granodiorítico. Estas rocas intruyen a las rocas volcánoclasticas de la Formación Guáimaro, Miembro Najasa, representadas por tobas cineríticas, cristalolitoclasticas lapillicas, y mayormente por tobas aglomeráticas, de composición media hasta media básica, en cuyas zonas de contacto se desarrollan las rocas de alteración oxidadas (sombrero de hierro y rocas con distintos grados de cuarficación, cloritización, epidotización y carbonatización).

Desde el punto de vista estructural, el sector de los trabajos está situado en la parte norte-noreste de la estructura circular Barrueto [11], donde, según los trabajos realizados anteriormente por la mencionada asociación económica, se obtuvo una amplia anomalía metalométrica de oro, parcialmente delimitada por el margen de los intrusivos granitoides oxidados y propilitizados. Las trincheras realizadas con bulldozer sobre una pequeña elevación del terreno descubrieron un stockwork de cuarzo excepcionalmente bien desarrollado dentro de las tobas cineríticas a lapillicas. El muestreo permitió obtener intersecciones minerales de interés económico: 0.55g/T Au x 23.0 m; 0.52g/T Au x 18,0 m y 0.44 g/T Au x 25,7 m, con ley entre 0,2-1,2 g/T Au.

Los resultados del trabajo de Potencial Redox y Susceptibilidad Magnética realizados se presentan en las Figs. 2 y 3. En el mapa de isóneas de Potencial Redox (Fig. 2) se destaca una amplia anomalía

isométrica entre los perfiles 100 W y 100 E, con epicentro en el Perfil 0, estaciones 125S- 75 N, de amplitud superior a 100 mV. La misma se asocia espacialmente al cuerpo de stockwork ya referido. También se identifica una zona anómala con configuración anular, concéntrica al stockwork, la cual se extiende a lo largo de un arroyo prácticamente seco con zonas cenagosas intermitentes (Perfil 200 E, estaca 225; Perfil 0, estaca 275 N y Perfil 200 W, estaca 25 N). El ambiente reductor de estas zonas cenagosas pudiera ser una de las causas de la zona anómala; la otra, una falla anular mineralizada. El mapa de isolíneas de la Susceptibilidad Magnética (Fig. 3) revela una zona anular de valores máximos con amplitud superior a 7×10^{-3} SI. En el centro, sobre el stockwork, se observan valores disminuidos ($< 2 \times 10^{-3}$ SI) asociados al área cuarcificada. Esta aureola magnética define una estructura de “cuello”, no identificada por el reconocimiento geológico. Esta estructura se observa también en el mapa magnetométrico y radiométrico del sector donde se revela una zona anular de máximos magnéticos alrededor de un mínimo radiométrico central sobre el stockwork.

Los resultados del trabajo de Potencial Espontáneo realizado en el Perfil 0 ponen de manifiesto una estrecha anomalía (75 m) con amplitud de 70 mV asociada al centro del stockwork. Esta anomalía fue interpretada semicuantitativamente estimándose una profundidad para la fuente de 16 m, con una yacencia subvertical; información que es coherente con los datos reales. La segunda anomalía de Potencial Redox con configuración anular no tiene expresión en el Potencial Espontáneo.

Los resultados de los trabajos geoquímicos realizados en el Perfil 0 revelan que de los elementos analizados (As, Cu, Ag y Sb) sólo el Cu (Fig. 8) tiene un comportamiento anómalo regular vinculado al stockwork, lo cual hace pensar en la existencia de una asociación Cu- Au. La forma y posición de la anomalía coincide con la del Potencial Redox y el Potencial Espontáneo.

Con el propósito de obtener mayor claridad sobre la naturaleza geológica del stockwork se tomó una muestra para el estudio de una sección delgada y pulida. Como resultado de los referidos estudios se pudo establecer que el stockwork corresponde a una roca granítica de textura porfiroidea cuya masa principal esta integrada por albita, feldespato potásico, cuarzo, hornblenda e hidrobiotita + magnetita como mineral metálico. De ahí se deriva que la mineralización en el referido stockwork pueda estar relacionada con una asociación porfírica de Cu - Fe \pm Au, genéticamente vinculada con el cuerpo intrusivo en su zona de alteración potásica. El posible depósito se debió formar en la zona plutónica de más alta temperatura, a partir de soluciones magmáticas en equilibrio con la magnetita y en condiciones de pH ligeramente alcalino, como lo indica la presencia de albita y feldespato potásico. Según este análisis se puede concluir que el nivel del corte de erosión en el sector es profundo.

CONCLUSIONES

Los resultados de la aplicación del Potencial Redox en los ejemplos presentados avala su utilidad para seleccionar los objetivos mas favorables con vistas a la comprobación geológica, así como para optimizar las investigaciones geoquímicas convencionales. Las anomalías de Potencial Redox se vinculan tanto con la mineralización masiva como con la vetítico- diseminada y reproducen, con buena aproximación, el comportamiento anómalo de los elementos químicos presentes en el suelo. No obstante, en ocasiones se presentan anomalías sin evidencias de este vínculo geoquímico lo cual pudiera estar indicando otra naturaleza reductora. En todos los casos resulta conveniente complementar los estudios con un perfil de Potencial Espontaneo el cual es más selectivo y permite obtener información sobre la profundidad y yacencia de los cuerpos. La sencillez, bajo costo y resolución del Potencial Redox en su uso combinado con la Susceptibilidad Magnética hacen de esta técnica una buena opción para la prospección mineral sobre todo en condiciones de reducción del financiamiento.

BIBLIOGRAFIA

1. Birell, R., 1996: MMI geochemistry: mapping the depths. Mining Magazine.
2. Cameron, E. M., 1999: Camiro deep penetrating geochemistry, Phase II. Explore No. 105.
3. Colectivo de autores AC URSS y ACC, 1985: Yacimientos Minerales Metálicos de Cuba. Editorial Nauka, 326 pp.
4. Cuní, J., E. Alvarez, C. Padrón y otros , 1998: Informe sobre el Reconocimiento Geológico para Au y Ag en las zonas de oxidacion del Campo Mineral Matahambre-Mella-Nieves. ONRM, La Habana.
5. Hamilton, S, 1998: New Electrochemical Studies by Ontario Geological Survey. Explore No. 101.
6. Lugo, R., A. Barroso y otros, 1999: Proyecto Reconocimiento geológico para oro y otros metales en el sector Colombia – Barrueto, Provincia de Camagüey y Las Tunas. ONRM, La Habana.
7. Mann, A.W., 1997: The use of MMI in Mineral Exploration. 10th International Gold Symposium. Río de Janeiro, Brasil.
8. Pardo, M y R. Stout, 1999: El método de Potencial Redox en suelos y su aplicación combinada con la kappametria a los fines de la prospección geológica. Memorias 1er Congreso Cubano de Geofísica, La Habana.
9. Pardo, M., R. Stout y otros, 2000: Informe del TTP Aplicación de la medición in situ del Potencial Redox en suelos sobre objetivos de prospección de minerales metálicos e hidrocarburos. ONRM, La Habana.
10. Pardo, M. y O. Carballo, 1996: Mediciones Experimentales in situ del Potencial Redox en suelos sobre objetivos meníferos en los sectores de Loma de Hierro y Loma Roja, Provincia de Pinar del Río. IGP, La Habana.
11. Perez, E., H. Pimentel y otros, 1998: Informe de interpretación tectónico – estructural de los datos geofísicos en la región Ciego – Camagüey – Las Tunas. ONRM, La Habana.

