

Geociencias

Órgano de difusión científica de la Universidad Olmeca

año 1, v. 1, núm. 1, octubre 2017 – marzo 2018



Imagen de la portada / Cover image / Imagem da capa

El volcán "El Chichonal", también conocido como el "Chichón", se localiza en la región montañosa del noroeste de Chiapas en los 17° 21' 37.14" latitud norte y 93° 13' 45.77" longitud oeste, a una altitud de 1 205 MSNM, a unos 25 km de la ciudad de Pichucalco, Chiapas y a unos 75 km de la ciudad de Villahermosa, Tabasco; la última erupción de este volcán fue el 28 de marzo de 1982, aproximadamente a las 21 hrs.; devastó 14 poblados de los alrededores y dejó aproximadamente 2 mil personas muertas en los municipios de Francisco León y Chapultenango en Chiapas. Fotografía de: Eugene King Freeland.

The volcano "El Chichonal", also known as the "Chichon", is located in the mountainous region of northwest of Chiapas in the 17° 21' 37.14" north latitude and 93° 13' 45.77" west longitude, at an altitude of 1 205 MSNM, about 25 km from the Pichucalco, Chiapas and approximately 75 km from Villahermosa, Tabasco; the last eruption of this volcano was on March 28, 1982, at 21 hours; devastating 14 surrounding villages and left approximately 2 thousand people dead in the municipalities of Francisco León and Chapultenango in Chiapas. Photography by: Eugene King Freeland.

O vulcão "El Chichonal", também conhecido como "Chichón", está localizado na região montanhosa do noroeste de Chiapas a 17° 21' 37.14" de latitude norte e 93° 13' 45.77" de longitude oeste, a uma altitude de 1 205 metros acima do nível do mar, a cerca de 25 km da cidade de Pichucalco, Chiapas e cerca de 75 km da cidade de Villahermosa, Tabasco; A última erupção deste vulcão foi em 28 de março de 1982, aproximadamente às 21 horas; devastou 14 aldeias vizinhas e deixou aproximadamente 2 mil pessoas mortas nos municípios de Francisco León e Chapultenango, em Chiapas. Fotografia de: Eugene King Freeland.

Comisión Técnica

Editores

Julio César Javier Quero

Francisco José Rivero Cruz

Revisores

Héctor de Paz

Karla Edith Aguilar Cruz

Esta publicación es el órgano de divulgación científica de la Universidad Olmeca, en ella se editarán artículos originales relacionados con las Ciencias de la Tierra y sus disciplinas, que hagan énfasis en trabajos desarrollados en Iberoamérica. La revista *Geociencias* aceptará solamente aquellos artículos que se apeguen a las normas editoriales, publicadas en <http://www.olmeca.edu.mx/>.

Las contribuciones tienen que estar redactadas en español.

This publication is the organ of scientific disclosure of the Olmeca University, in it, original articles related to the Earth Sciences and disciplines that make emphasis on works developed in Latin America will be edited.

The magazine *Geociencias* will accept only those articles that are stick to the publishing standards, published in <http://www.olmeca.edu.mx/>.

The contributions must be written in Spanish.

Esta publicação é a publicação científica da Universidade Olmeca em seus trabalhos originais relacionados às Ciências da Terra e disciplinas será editada, que enfatizam o trabalho desenvolvido na América Latina. A revista *Geoscience* aceitará apenas os itens que são aderir às diretrizes editoriais, publicado em <http://www.olmeca.edu.mx/>.

As contribuições devem ser escritos em espanhol.

Geociencias. Órgano de difusión científica de la UO, Año 1, Volumen 1, Número 1, Publicación bianual, editada por la Universidad Olmeca, A. C., Carretera Villahermosa - Macuspana, km 14, Dos Montes, Centro, C. P. 86280, Villahermosa, Tabasco, México, a través del Dirección de Cultura y Recreación. Teléfono: + 52 (993) 187 9700. Ext. 101 y 240, correos electrónicos: revistageociencias@gmail.com y revista.uo@gmail.com

Reserva del Derecho al Uso Exclusivo, en trámite. ISSN: en trámite. Certificado de Licitud de Título, en trámite y Certificado de Licitud de Contenido, en trámite, ambos otorgados por la Comisión Calificadora de Publicaciones y Revistas Ilustradas de la Secretaría de Gobernación.

Impresa por MA impresores, S.A. de C. V., Av. Hierro Núm. 3, Cd. Industrial, C. P. 86010, Villahermosa, Tabasco, México.

Este número se terminó de imprimir el 30 de marzo de 2018, con un tiraje de 1 000 ejemplares.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura de la Universidad Olmeca.

D. R. © 2018. Universidad Olmeca, A. C., Carretera Villahermosa-Macuspana, km 14, Dos Montes, Centro, C. P. 86280, Villahermosa, Tabasco, México.

Queda estrictamente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la Universidad Olmeca, A.C.

Geociencias

Órgano de difusión científica de la Universidad Olmeca



UNIVERSIDAD OLMECA
Raíz de sabiduría

<http://www.olmeca.edu.mx/>

EDITORES EN JEFES

Francisco García Hernández
Doctor en Ciencias por la Colorado School of Mines

Heberto Ramos Rodríguez
Maestro en Ingeniería Petrolera por la UNAM
Maestro en Administración de Empresas por la UO

Tel +52 (993) 187 9700 ext. 101. Villahermosa, Tabasco, México
correo electrónico: revista.uo@gmail.com

CONSEJO EDITORIAL

Heberto Ramos Rodríguez
Miembro de la Academia de Ingeniería de México
Maestro en Ingenierías Petrolera por la UNAM
Maestro en Administración de Empresas por la UO
Rector Universidad Olmeca, A. C.

Beatriz Zumalacárregui de Cárdenas
Doctora en Química
Universidad Tecnológica de La Habana (CUJAE) de Cuba

Luzbel Napoleón Solórzano
Maestro en ingeniería petrolera por la UNAM
Investigador y experto en Petróleo

Marco Antonio Maldonado Sánchez
Maestro en Ingeniería Petrolera por la UNAM
Catedrático de la Universidad Olmeca

Nelson Esteban Salinas Rojas
Ingeniero Geólogo, con especialidad en petróleo, por la Universidad
de Oriente, en Venezuela

Oswaldo Federico Donoso
Ingeniero en Minas por la Universidad de Santiago de Chile
Investigador y experto en Petróleo

Evelio Linares Cala
Doctor en Ciencias Geológicas
Universidad Tecnológica de La Habana (CUJAE) de Cuba
Vicepresidente Primero de la Sociedad Cubana
de Geología periodo 2016-2020

Francisco García Hernández
Doctor en Ciencias por la Colorado School of Mines
Investigador y experto en Petróleo

Gabriel Enrique Baquedano Moreno
Maestro en Ciencias en Enseñanzas de las Ciencias por el Centro
Interdisciplinario de Investigación y Docencia en Educación
Catedrático de la Universidad Olmeca

Edgar Ángeles Cordero
Maestro en Enseñanza de las Matemáticas por el
Instituto Universitario Puebla, campus Villahermosa
Director Académico de Ciencias de la Tierra de la
Universidad Olmeca

Geociencias

Órgano de difusión científica de la Universidad Olmeca



UNIVERSIDAD OLMECA
Raíz de sabiduría

<http://www.olmeca.edu.mx/>

COMITÉ DE ARBITRAJE

Oswaldo Rodríguez Morán
Universidad Tecnológica de La Habana (CUJAE) de Cuba
Investigador del Centro de Investigaciones del Petróleo de Cuba
Presidente del Comité de Arbitraje

Manuel Enrique Pardo Echarte
Universidad Tecnológica de La Habana (CUJAE) de Cuba
Investigador del Centro de Investigaciones del Petróleo de Cuba

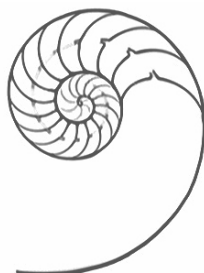
Manuel Mérida Llanes
Gubkin Universidad Estatal Rusa de Petróleo y Gas, Moscú, Rusia
Geólogo principal para la compañía consultora Syneria Energy, USA.

Claudio Bartolini
Ph.D. en Geología por la Universidad de Texas en El Paso, USA.
Miembro de la American Association of Petroleum Geologists

Mounir Mahmoudi
Dr. en Sedimentología por la
Universite Paris Sud, Francia
Global Consulting, Schlumberger

Sumario

Presentación	<i>Heberto Ramos Rodríguez</i>	4
Aplicación del <i>Complejo Redox</i> en el monitoreo de la contaminación de suelos con metales pesados	<i>Oswaldo Rodríguez Morán y Manuel Enrique Pardo Echarte</i>	5
Uso de atributos sísmicos y registros geofísicos de pozo para el análisis de fluidos en cortes carbonatados del cinturón plegado de la provincia norte cubana	<i>Dayana Pedro Pompa, Odalys Reyes Paredes, Carlos Veiga Bravo y Guillermo Miró Pagés</i>	16
Corrección por temperatura a la presión calculada en fluidos de emulsión inversa en los pozos de perforación	<i>Emilio de la Torre Ramos</i>	25
Resultados de algunos Métodos de Exploración no Sísmica en diferentes regiones gasopetrolíferas del occidente y centro de Cuba	<i>Manuel Enrique Pardo Echarte y Oswaldo Rodríguez Morán</i>	30
Resultados de los Métodos de Exploración no Sísmica en la región Habana-Matanzas, Cuba	<i>Manuel Enrique Pardo Echarte y Lourdes Jiménez de la Fuente</i>	46
Simulador de tareas docentes para la asignatura de Procesamiento de Datos en las Geociencias para la carrera de Geofísica	<i>Oswaldo Rodríguez Morán</i>	60



Presentación



En septiembre de 2015 nos planteamos por primera vez la creación de una revista que permitiera impulsar entre los catedráticos, investigadores y alumnos de la Universidad Olmeca, la creatividad, el estudio y la búsqueda de nuevas opiniones dentro del ámbito de las geociencias, y que a la vez sirviera para fomentar la reflexión y el debate en torno a las nuevas ideas que vayan surgiendo con relación al tema.

Dos años y medio después, luego de superar dificultades significativas, es para mí un honor presentarles la revista bianual *Geociencias. Órgano de difusión científica de la Universidad Olmeca*, la cual está y estará abierta a la colaboración de estudiosos de Iberoamérica, y cuya circulación será en universidades y centros de investigación de dicha región.

Actualmente trabajamos para lograr la indexación de la revista en el Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal (Latindex), la cual pretendemos alcanzar en el segundo semestre de 2020, ya que el Sistema solamente admite revistas con un año de antigüedad.

Hemos puesto especial interés en la conformación del Consejo Editorial y de la Comisión de Arbitraje, los cuales seguramente con el paso del tiempo se irán enriqueciendo, ya que a través de ellos estamos validando la calidad de los trabajos aceptados y la imparcialidad en su publicación.

Para concluir estas breves líneas quisiera patentizar mi agradecimiento a los autores que sin conocer físicamente la revista aceptaron participar y colaborar en ella. Por otra parte, agradezco también el apoyo recibido de los miembros del Consejo Editorial y de la Comisión de Arbitraje de la revista por ofrecer el apoyo institucional para que *Geociencias. Órgano de difusión científica de la Universidad Olmeca*, pudiera ver la luz pública y sea hoy día una realidad. Muchas felicidades.

Heberto Ramos Rodríguez
Rector

Aplicación del *Complejo Redox* en el monitoreo de la contaminación de suelos con metales pesados

Oswaldo Rodríguez Morán¹ y Manuel Enrique Pardo Echarte¹

¹ Centro de Investigaciones del Petróleo (CEINPET). Churruca, No.481, e/ Vía Blanca y Washington, El Cerro. C.P. 12000. La Habana, Cuba. E-mail: ormoran@ceinpet.cupet.cu y pardo@ceinpet.cupet.cu

RESUMEN

La fábrica de Baterías Secas en La Habana, Cuba, involucró en una etapa de su producción a un grupo de metales pesados –dañinos a la salud en general– como el Manganeseo, Plomo, Zinc, Mercurio y Cadmio. Se conocía, por datos experimentales, que el nivel de contaminación de Manganeseo en los suelos de la periferia de la fábrica, era superior a los 6 000 gramos por tonelada y que la extensión de la zona contaminada podía extenderse más allá de los 200 metros. A partir de esta problemática se propuso como objetivo, determinar la afectación de la contaminación metálica en los suelos del entorno de la fábrica. Se aplicó el método no convencional de exploración *Complejo Redox* de forma experimental para la solución del problema y la aplicación de algunas herramientas estadísticas para correlacionar los atributos. Se determinó la intensidad y extensión superficial de la contaminación en los alrededores de la fábrica. La correlación entre los atributos medidos indicó que los más importantes son: el Manganeseo, el Cadmio, la Susceptibilidad Magnética Normalizada y el Potencial Redox Reducido. Finalmente se hizo una propuesta para remediar este impacto ambiental y se propusieron dos variantes para la mitigación de estas afectaciones.

Palabras claves: contaminación, metales pesados, suelos, *Complejo Redox*, monitoreo de contaminación.

ABSTRACT

The Dry Batteries factory in Havana, Cuba, involved in one stage of its production a group of heavy metals –damages to health in general– such as Manganese, Lead, Zinc,

Mercury and Cadmium. It was known, by experimental data, that the level of Manganese contamination in the soils of the periphery of the factory was higher than 6 000 grams per ton and that the extent of the contaminated area could extend beyond 200 meters. From this problem it was proposed as an objective, to determine the affectation of the metallic contamination in the soils of the surroundings of the factory. The unconventional method of exploration *Redox Complex* was applied experimentally to solve the problem and the application of some statistical tools to correlate the attributes. The intensity and surface extension of the contamination in the vicinity of the factory was determined. The correlation between the measured attributes indicated that the most important are: Manganese, Cadmium, Normalized Magnetic Susceptibility and Reduced Redox Potential. Finally, a proposal was made to remedy this environmental impact and two variants were proposed to mitigate these effects.

Key word: pollution, heavy metals, soils, *Redox Complex*, pollution monitoring.

RESUMO

A fábrica de Baterias Secas em Havana, Cuba, envolveu em uma etapa de sua produção um grupo de metais pesados –danos à saúde em geral– como manganês, chumbo, zinco, mercúrio e cádmio. Sabe-se, por meio de dados experimentais, que o nível de contaminação de manganês nos solos da periferia da fábrica era superior a 6 000 gramas por tonelada e que a extensão da área contaminada poderia ultrapassar 200 metros. A partir desse problema, foi proposto como objetivo, determinar a afectação da

contaminação metálica nos solos dos arredores da fábrica. O método não convencional de exploração **Redox Complex** foi aplicado experimentalmente para resolver o problema e a aplicação de algumas ferramentas estatísticas para correlacionar os atributos. Foi determinada a intensidade e extensão da superfície da contaminação na proximidade da fábrica. A correlação entre os atributos medidos indicou que os mais importantes são: Manganês, Cádmiio, Susceptibilidade Magnética Normalizada e Potencial Redox Reduzido. Finalmente, foi proposta uma proposta para remediar este impacto ambiental e duas variantes foram propostas para mitigar esses efeitos.

Palavras-chave: poluição, metais pesados, solos, **Redox Complex**, monitoramento da poluição.

INTRODUCCIÓN

El estudio de suelos contaminados con metales pesados, de manera efectiva y a bajos costos, representa una tarea

de alta demanda en la actualidad. Con estos propósitos se identifican las técnicas geofísico-geoquímicas no convencionales como el **Complejo Redox** (Potencial Redox, Susceptibilidad Magnética, Reflectancia Espectral y Pedo-geoquímica), utilizadas para la cartografía, caracterización y evaluación de *zonas de actividad geoquímica incrementada* en los sectores afectados. La fábrica de Baterías Secas, en La Habana, Cuba (Figura 1), involucró en una etapa de su producción a un grupo de metales pesados como el Manganeseo (Mn), Plomo (Pb), Zinc (Zn), Mercurio (Hg) y Cadmio (Cd), siendo el componente y contaminante principal el Mn. Esta industria, que está enclavada en la Cuenca del Río Almendares, constituyó un foco de contaminación del suelo y las aguas, tal y como lo ponen de manifiesto los resultados de las investigaciones geoquímico-geofísicas desarrolladas por el Instituto de Geología y Paleontología (IGP) durante el Estudio Geólogo Ambiental Integral del Municipio Arroyo Naranjo (Correa, *et al.* 1998).

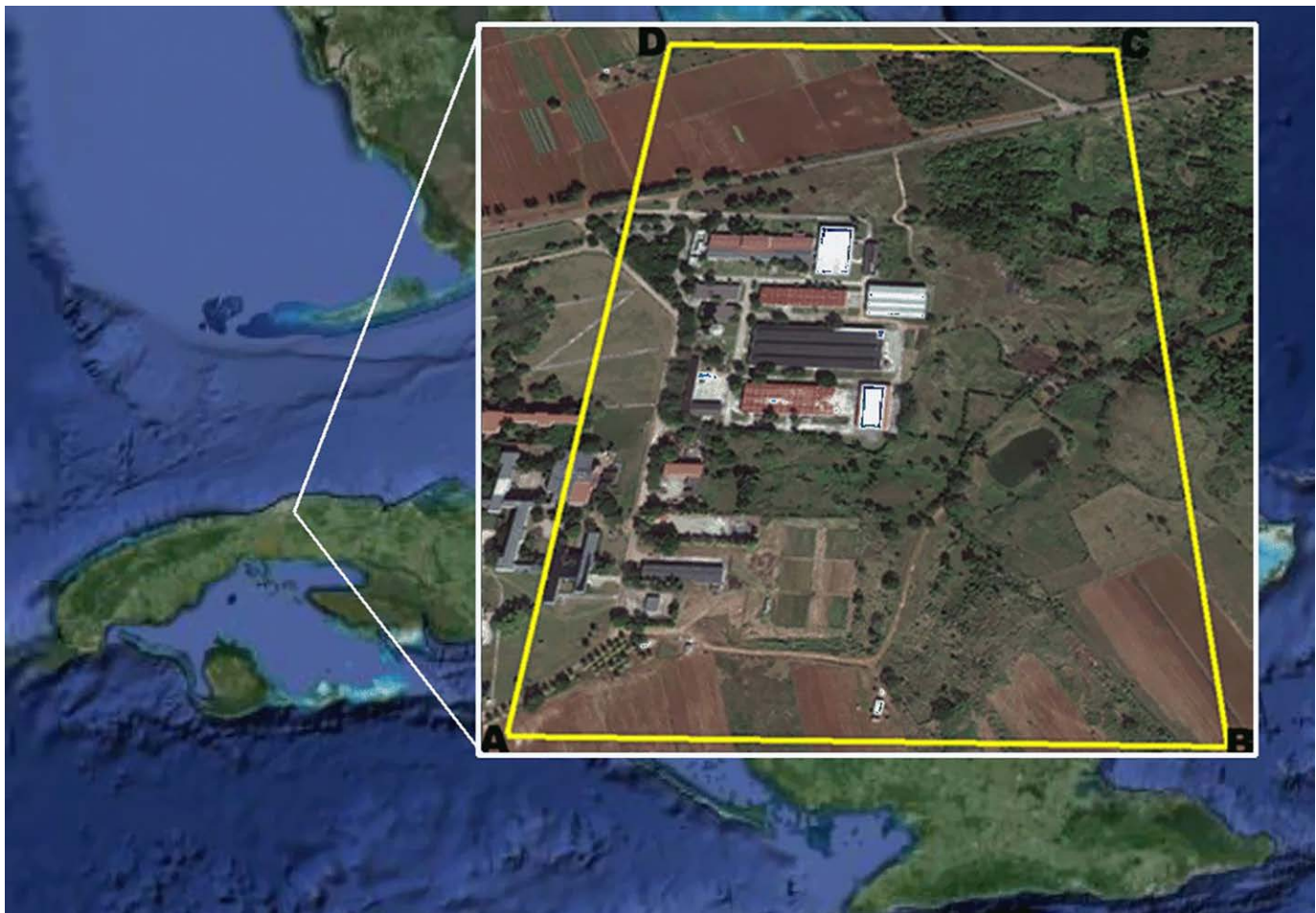


Figura 1. Imagen *satelital* del enclave de fábrica de Baterías Secas.

Según este estudio, la mayoría de los elementos químicos que intervienen en el proceso productivo, son considerados por la literatura, como elementos altamente tóxicos para los seres vivos, por lo que fue una tarea de este trabajo, conocer hasta donde los elementos químicos presentes en la fabricación de las pilas se encuentran concentrados en los suelos y aguas en los alrededores de la planta. Se obtuvieron altos valores de contenido de los elementos Mn, Hg, Zn y Ni, concluyéndose que no existe un sistema de tratamiento de suelos y residuales líquidos para la depuración de estos elementos. Estos trabajos incluyeron, también, las observaciones de la Susceptibilidad Magnética en suelos, la cual arrojó una correlación importante con relación a la concentración de los elementos químicos. Más tarde, en el mes de diciembre del 2001, a fin de caracterizar la contaminación de los suelos en el área perimetral de la industria, se desarrollaron, también por parte del IGP, trabajos experimentales con el **Complejo Redox** a lo largo de una línea de longitud de 200 m y paso de observación 20 m, perpendicular a los límites de la fábrica en uno de los sectores de mayor contaminación. Como resultado de estos trabajos, la Susceptibilidad Magnética (Kappa) exhibió un comportamiento análogo al del Contenido de Mn en el suelo, permitiendo establecer una dependencia lineal entre ambos atributos la cual posibilita la estimación aproximada del grado de contaminación de Mn a partir de los valores de Kappa. Los incrementos de este atributo, del orden de 6.0 a 7.0×10^{-5} SI, están asociados a contenidos anómalos de Mn de $6\ 000$ - $7\ 000$ g/t, hecho que pudiera deberse a la presencia de minerales de hierro magnéticos en las condiciones de un ambiente oxidante (Potencial Redox Reducido por el fondo local $=+20$ - 50 mV). Según estos resultados, la zona contaminada puede extenderse por más de 200 m, aspecto que pudiera tener su explicación en el escurrimiento superficial unido a la presencia de barreras geoquímicas, por ejemplo, suelos lateríticos. Como quiera que: los niveles de contaminación de Mn eran altos; la extensión de la zona contaminada quedó abierta, y; no se disponía de una cartografía, caracterización y evaluación areal de la contaminación; se propuso la ejecución de un estudio medio-ambiental con el **Complejo Redox** en los alrededores de la industria mediante una red de perfiles con distancia entre ellos de 50 m, longitud promedio 400 m y paso de observación 25 m.

Durante la ejecución, solo el 82 % de las muestras tomadas de los puntos de observación en los perfiles

anómalos, fueron sometidas al Análisis Químico de los elementos contaminantes, a fin de lograr la caracterización y evaluación esperada. Como resultado se ofrecen la cartografía, caracterización y evaluación areal de la contaminación, con la propuesta de las medidas para su mitigación.

MATERIALES Y MÉTODOS

El área de los trabajos fueron los alrededores (± 500 mts) de la fábrica de baterías, ubicada en el km 2.5 de la carretera Las Guásimas, en Calabazar, municipio de Arroyo Naranjo, provincia La Habana, Cuba. Los límites de coordenadas planas Lambert en el sistema Cuba Norte de esta área son: X (364420, 365000), Y (352700, 353620).

Los trabajos en el caso del presente Estudio Medioambiental consideran líneas de medición transversales a los límites perimetrales de la industria, las cuales se extienden hacia el exterior con distancia límite variable en dependencia de la accesibilidad de la zona, siendo el paso de observación de 25 m. Se realizaron los trabajos topográficos pertinentes con el objetivo de asegurar el trazado de línea para los trabajos geoquímico-geofísicos del **Complejo Redox**, en una red de 50×25 m (Figura 2).

Las técnicas geofísico-geoquímicas no convencionales como el **Complejo Redox** (Potencial Redox, Susceptibilidad Magnética, Reflectancia Espectral y Pedogeoquímica), se utilizan para la cartografía y caracterización rápida de las zonas de actividad geoquímica incrementada.

Específicamente, el complejo Pedogeoquímica + Kappametria + Potencial Redox ofrece una alternativa para la cartografía de la contaminación metálica superficial en el área perimetral de la industria en cuestión y para la estimación aproximada de su grado.

De acuerdo con Pardo, *et al.* (2003), para la medición *in situ* del Potencial Redox en suelos (Uredox) se utilizan dos electrodos conectados a un milivoltímetro digital de alta impedancia de entrada (sensibilidad 0.1mV): uno inerte de platino, y otro de referencia de cobre (electrodo no polarizable-comercial), ubicados inmediatamente próximos dentro de un hoyo de 10 - 30 cm de profundidad. La comunicación iónica que cierra el circuito se garantiza a través de la cerámica porosa del electrodo de referencia. Las mediciones con el dispositivo descrito tienen un comportamiento transiente, determinándose el potencial mediante un algoritmo a partir de varias lecturas

con una diferencia de tiempo constante entre ellas. La calidad de las observaciones de Potencial Redox se evalúa a partir del error absoluto en la determinación del potencial, considerando un 10 % de mediciones de repetición efectuadas en los mismos hoyos utilizados para las mediciones ordinarias. La precisión aceptada para las aplicaciones descritas no debe superar los 10 - 15 mV.

La medición de la Susceptibilidad Magnética (Kappa) se realiza con un kappámetro KT - 5 (sensibilidad 1×10^{-5} SI), efectuando varias lecturas en el piso y paredes del hoyo (o en muestras tomadas de él, con un peso aproximado de 500 g) las cuales se promedian. La calidad de las observaciones de campo se evalúa a partir del error relativo en la determinación del valor medio de Kappa, considerando un 10 % de mediciones de repetición en los mismos hoyos (o muestras). La precisión aceptada no debe superar el 10 - 15 %.

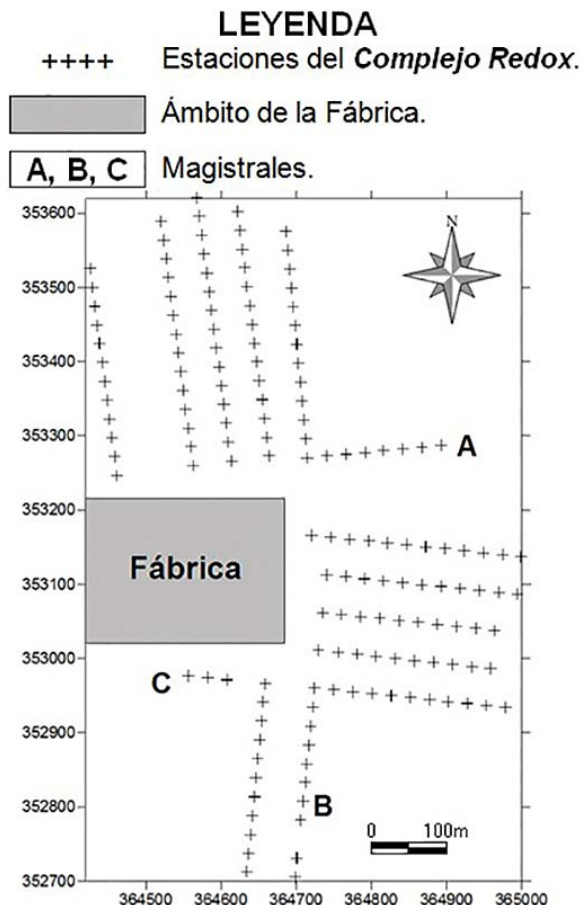


Figura 2. Distribución de los perfiles en el área de trabajo.

La medición de la Reflectancia Espectral se realiza con el Radiómetro Multiespectral *CROPSCAN* Modelo MSR5, de cinco bandas (485, 560, 660, 830 y 1 650) sobre muestras con un peso mínimo de 60 g, empleando

un diseño especialmente preparado para esos efectos (luz solar, muestra distribuida según un círculo entre 15 y 20 cm de diámetro sobre una superficie negra y sensor ubicado verticalmente entre 30 y 40 cm sobre la muestra). La calidad de las observaciones se evalúa a partir del error absoluto en la determinación de la Reflectancia Espectral en cada banda, considerando un 10 % de mediciones repetidas al término del trabajo en el día. La precisión aceptada no debe superar el 0.5 %. La medición de la Reflectancia Espectral no pudo ser realizada por dificultades técnicas con el equipo. La elaboración de las observaciones se llevó a cabo con el **Sistema Redox** (Pardo, *et al.* 2005 y Rodríguez, 2005), el cual fue concebido y diseñado expresamente para la elaboración primaria e interpretación de los datos del **Complejo Redox**.

El Límite Contaminante para un elemento químico en una región determinada, representa el valor mínimo del contenido de ese elemento químico, a partir del cual su concentración afectaría cualquier forma de vida en el ámbito de estudio. Para establecer el Límite Contaminante de un elemento químico se considera como norma internacional, tres veces el valor del contenido normal del elemento químico (Mattigod, *et al.* 1983 y Valera, *et al.*, 2002). En la Tabla 1 se muestran los valores calculados de los Límites Contaminantes para cada uno de los elementos químicos.

Elemento Químico	[ppm]	[%]
Mn	3000	0.3
Cd	3	0.0003
Pb	50	0.005
Zn	300	0.03
Hg	0.1	0.00001

Tabla 1. Valores de los Límites Contaminantes calculados para los elementos químicos.

Para determinar el área afectada por la contaminación de los elementos químicos: Manganeseo (Mn), Plomo (Pb), Zinc (Zn), Mercurio (Hg) y Cadmio (Cd), nos apoyaremos no solo en que los valores de concentración de estos elementos químicos medidos en el laboratorio a partir de las muestras tomadas en cada estación, sean mayores que los Límites Contaminantes respectivos

para cada uno de ellos, sino que los valores observados *in situ* de la Susceptibilidad Magnética Normalizada (Kn) y del Potencial Redox Reducido (Ur) tengan componentes anómalas. Esto último significa que $Kn \geq 1.5$ y que $|Ur| \geq 50$ mV. Definiremos entonces que un punto de observación es anómalo si son anómalos la mayoría de los atributos observados en él y dentro de este grupo estarían contemplados los atributos más importantes desde el punto de vista de la correlación entre ellos y de la explicación del fenómeno.

Construiremos un Parámetro Anómalo (PA), de manera que nos ayude a nuestra decisión de determinar el área contaminada.

Puesto que las observaciones de Pedogeología no se realizaron en todos los perfiles y además, los atributos del **Complejo Redox** (Kn y Ur) aportan una información de tipo complementaria e indirecta, es que este PA es utilizado para apoyar la interpretación. El propósito de la aplicación del **Complejo Redox** en este trabajo, es precisamente el de ofrecer una alternativa de avance rápido en las investigaciones y es mucho menos costoso en el proceso de la determinación del área contaminada.

En el caso particular de este trabajo, se realizó, necesariamente, un nivel alto de mediciones de Pedogeología, por tener el mismo un carácter Metodológico-Experimental. Este parámetro PA involucra de forma global, a todos los atributos importantes y que más aportan a la explicación del problema que nos convoca. Teóricamente, definiremos el PA como:

$$Pa(i, j) = \sum_{k=1}^n A(i, j, k)_{Norm} \quad (\text{Ecuación 1})$$

donde:

Pa(i,j)	Parámetro Anómalo en el punto de observación i, j.
A(i,j,k)_{Norm}	Atributo i-ésimo Normalizado entre [-1,1]
n	Cantidad de atributos

La normalización del atributo se llevará a cabo con la expresión:

$$A(i, j, k)_{Norm} = \frac{2A(i, j, k) - (\text{Max}(A_k) - \text{Min}(A_k))}{\text{Max}(A_k) - \text{Min}(A_k)} \quad (\text{Ecuación 2})$$

donde:

A(i, j, k)_{Norm}	Es el valor Normalizado del atributo k en el punto de observación i, j.
A(i, j, k)	Es el valor del atributo k en el punto de observación i, j.
Max(A_k)	Es el valor Máximo del atributo k en toda el área.
Min(A_k)	Es el valor Mínimo del atributo k en toda el área.

Esta normalización hará homogéneo los rangos de los atributos involucrados en el intervalo [-1,1].

RESULTADOS

Se realizaron las mediciones del **Complejo Redox** en el área y se procedió a la elaboración primaria de los atributos observados, esto es, la determinación del Nivel de Fondo (Pardo, *et al.* 2005 y Rodríguez, 2005), para cada uno de los atributos en los perfiles, y posteriormente el cálculo de la normalización o reducción de los atributos según sea. El Contenido de Elemento Químico de Mercurio (Hg) no fue informativo ya desde el mismo proceso medición de su contenido en las muestras de laboratorio.

En las figuras 3, 4, 5, 6, 7 y 8 se muestran los mapas respectivos de los atributos: Mn, Cd, Pb, Zn, Kn y Ur. Respecto a esto se tiene que la Kn y Ur poseen visualmente áreas anómalas muy comunes con los mapas de contenido de los elementos químicos del Mn, Cd y algo en el Pb, principalmente.

Para poder lograr una optimización en el análisis de la efectividad geológica de cada atributo, se estableció el grado de correlación entre todos los atributos observados *in situ* y medidos en el laboratorio. Estas correlaciones fueron establecidas para los valores observados en las estaciones que se encuentran dentro del área principal de contaminación (Magistral B) (Figura 2) y enmarcada aproximadamente en el rectángulo dado por las coordenadas: X(364329, 364925) y Y(353022, 353224).

En la Tabla 2 se muestran los valores de las estaciones y atributos para el área seleccionada para llevar a cabo las correlaciones entre los atributos. Se realizó la correlación cruzada entre todos los atributos calculando el Coeficiente de Correlación (Davis, J. C. 1986; Lehmann, C. H., 1974).

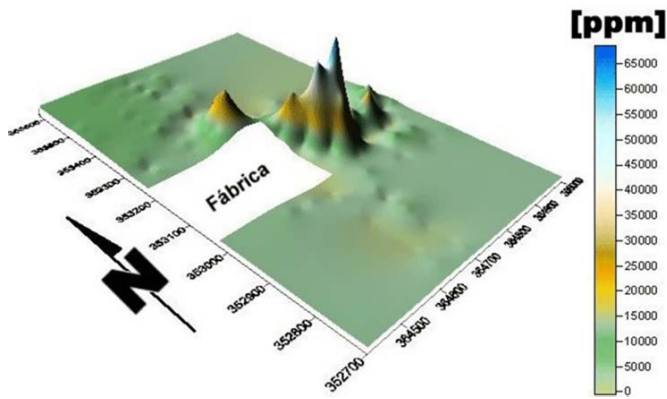


Figura 3. Distribución espacial de la contaminación por el elemento químico Manganeso en el área de los trabajos.

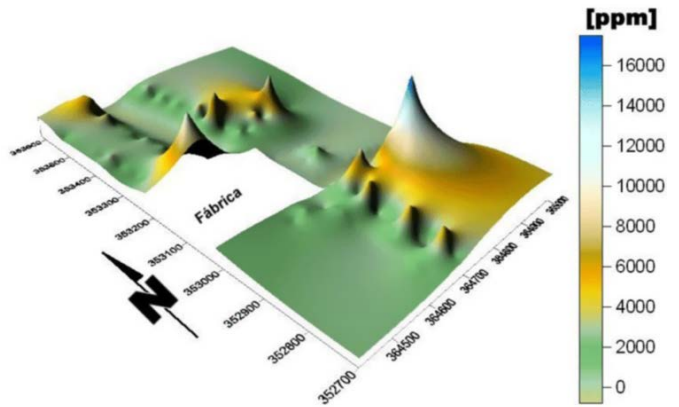


Figura 6. Distribución espacial de la contaminación por el elemento químico Zinc en el área de los trabajos.

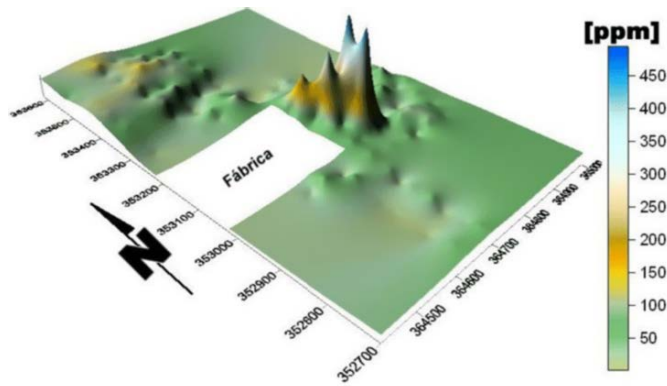


Figura 4. Distribución espacial de la contaminación por el elemento químico Cadmio en el área de los trabajos.

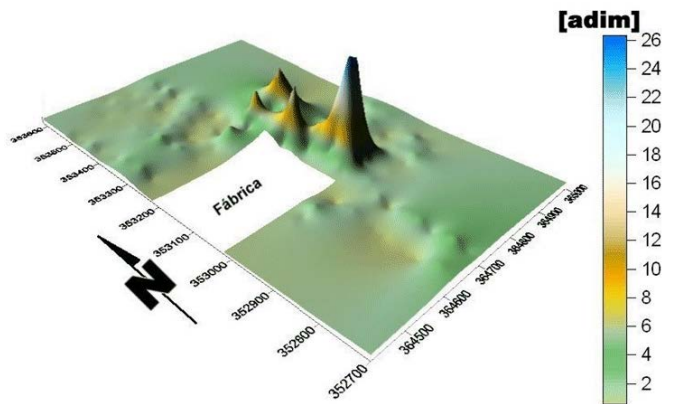


Figura 7. Distribución espacial de la Susceptibilidad Magnética Normalizada en el área de los trabajos.

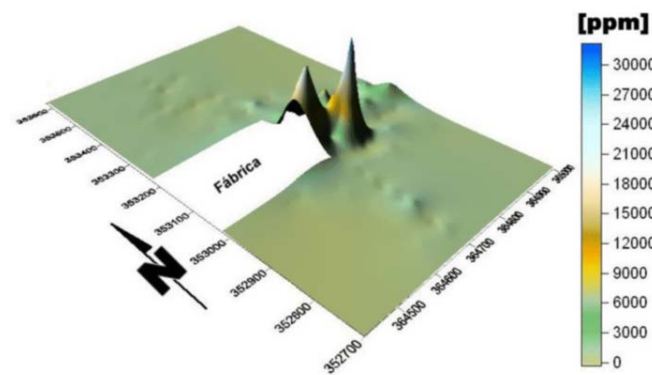


Figura 5. Distribución espacial de la contaminación por el elemento químico Plomo en el área de los trabajos.

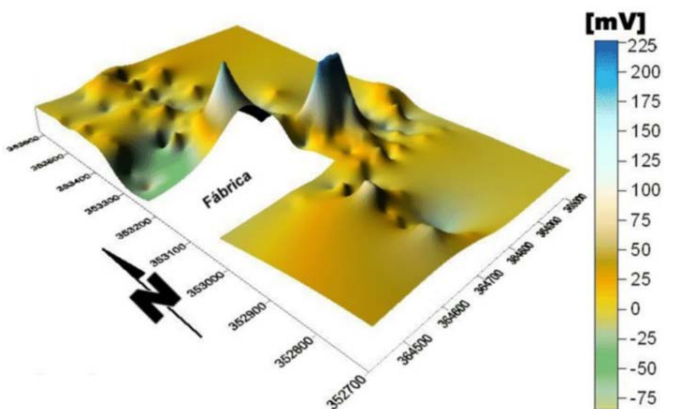


Figura 8. Distribución espacial del Potencial Redox Reducido en el área de los trabajos

En la Tabla 3 se muestra la matriz de correlación entre los atributos. Esta es una matriz simétrica pues hay por definición la misma correlación entre el atributo A con B que B con A, por este motivo se muestra solamente la mitad de este resultado. Aquí apreciamos que hay una serie de pares de atributos que poseen más correlación que otros. Si a partir de esto extraemos estas correlaciones

Estación	Kn	Ur	Mn	Cd	Pb	Zn
B100-25	2.07	52.5	7000	76	2156	3.1
B100-0	17.94	39.5	35200	242	9567	25.8
B100-25	2.27	35.5	22900	113	1831	11.4
B100-50	1.68	38.5	7900	72	1721	5
B100-75	1.46	31.5	5800	72	1335	3.7
B100-100	3.3	14.5	6600	132	8490	4.9
B100-125	0.56	-17.5	3100	36	1035	2.1
B100-150	0.14	-4.5	100	10	50	0.1
B100-175	1.04	-17.5	2500	21	661	0.1
B150-0	2.58	-25.5	5800	66	24872	2.2
B150-25	8.73	218.5	59400	385	13406	63.9
B150-50	4.64	228.5	49200	164	2620	2210
B150-75	14.99	227.5	72400	539	10679	86.9
B150-100	1.71	122.5	7900	55	1105	5.3
B150-125	2.2	42.5	15400	97	2362	7
B150-150	2.04	-6.5	8100	52	1876	2.1
B150-175	2.17	-19.5	23100	90	3072	8.4
B200-0	2.77	31	4900	82	6683	4.9
B200-25	5.39	29	8300	71	1762	5.3
B200-50	27.42	55	36500	204	6623	25.4
B200-75	25.84	119	128700	507	34745	3.2
B200-100	0.66	2	100	0	0.1	0.1
B200-125	0.65	-2	900	15	460	0.5
B200-150	0.96	-14	2200	31	506	0.9
B200-175	0.43	-29	300	10	118	0
B250-0	1.8	23	2900	66	773	3.9

Tabla 2. Valores de las estaciones y atributos para el área seleccionada para llevar a cabo las correlaciones.

las ordenamos en orden descendente del coeficiente de correlación de los pares de atributos, entonces tenemos lo que muestra la Tabla 4. Esta arroja que los atributos más significativos son en orden decreciente de importancia: Mn, Cd, Kn, Ur, Pb, Zn. Además, puede decirse que la correlación entre los atributos Mn, Cd, Kn y Ur está por encima de un 75 %.

A partir del resultado de la correlación, los atributos más significativos son el Mn, Cd, Kn, Ur, por estar por encima de un 75 %, debido a esto, es que aplicaremos el concepto del PA a estos atributos para determinar del área contaminante. Debido a que el grado de informatividad de cada uno de los atributos es diferente, es que

adaptaremos el PA con pesos que indiquen el grado de importancia de estos atributos. Nos apoyaremos en los valores de los Coeficientes de Correlación de la Tabla 4, para establecer la proporcionalidad de los pesos a cada uno de los atributos. Esta es la única referencia para tener una proporcionalidad de la influencia de cada uno de los atributos.

	Kn	Ur	Mn	Cd	Pb	Zn
Kn	1	0.434	0.783	0.772	0.624	0.007
Ur		1	0.693	0.750	0.303	0.523
Mn			1	0.926	0.737	0.227
Cd				1	0.689	0.097
Pb					1	-0.005
Zn						1

Tabla 3. Diferentes Coeficientes de Correlación entre las dependencias.

Elementos químicos	Coeficiente de Correlación
Mn vs Cd	0.926
Mn vs Kn	0.783
Cd vs Kn	0.772
Cd vs Ur	0.750
Pb vs Mn	0.737
Mn vs Ur	0.693
Pb vs Cd	0.689
Pb vs Kn	0.624
Zn vs Ur	0.523
Kn vs Ur	0.434
Pb vs Ur	0.303
Zn vs Mn	0.227
Zn vs Cd	0.097
Zn vs Kn	0.007
Zn vs Pb	-0.005

Tabla 4. Ordenamiento en orden decreciente del Coeficiente de Correlación de los pares de atributos

Los pesos propuestos serán los mostrados en la Tabla 5, de esta manera la expresión del PA vendrá afectada por los pesos de forma ponderada. En la expresión siguiente se muestra el algoritmo del PA a partir de la ponderación de los atributos:

$$A(i, j, k) = \frac{2A(i, j, k) - (\text{Max}(A_k) - \text{Min}(A_k))}{(\text{Max}(A_k) - \text{Min}(A_k))}$$

(Ecuación 3)

donde:

- Pa Parámetro Anómalo ponderado en una estación
- P1 Peso del elemento químico Manganeso.
- P2 Peso del elemento químico Cadmio.
- P3 Peso de la Susceptibilidad Magnética Normalizada.
- P4 Peso del Potencial Redox Reducido.

Atributo	Peso
Mn	100
Cd	90
Kn	78
Ur	75

Tabla 5. Pesos para cada uno de los atributos utilizados en la evaluación del Parámetro Anómalo.

A partir de los resultados anteriores, se establecerá cual será el área contaminada:

- El área enmarcada por la isolínea base del gradiente del mapa del PA.
- Por la escala de los trabajos, se desestimarán las áreas generadas por la interpolación que sean menores de 900 m².
- Generalizar en forma de un polígono envolvente el área resultante contaminada.

En la Figura 9, se muestra la distribución areal a partir de la isolínea base de -0.5, que representa la base del gradiente del PA obtenido según la expresión de la Ecuación 3.

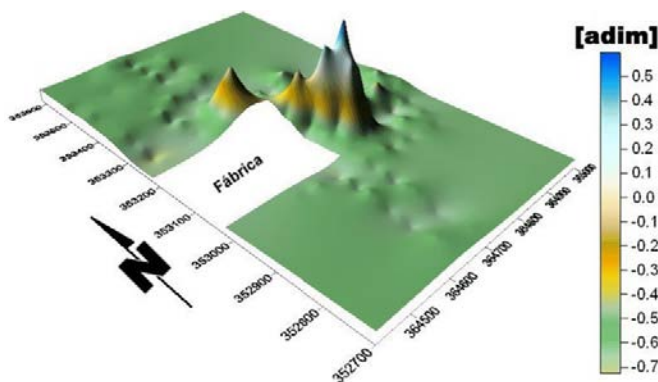


Figura 9. Distribución areal a partir de la isolínea base de -0.5 del Parámetro Anómalo.

En esta Figura 9 podemos apreciar otras áreas-islas, cuyas extensiones no sobrepasan en total los 900 m² considerados. Puede apreciarse también la alta coincidencia de esta área con la de alto gradiente de los atributos Mn, Cd, Kn y Ur independientemente, en las Figuras 3, 4, 7 y 8 respectivamente. En la Figura 10 se aprecia el área que representa la distribución espacial de la isolínea base del gradiente (-0.5), la cual posee un área de 31 467 m².

En la Figura 11 se muestra una generalización del área mostrada en la Figura 10. Esto se hace para facilitar el replanteo en el terreno de esta zona contaminada. El área de esta zona contaminada generalizada es de 41 114 m². En la Tabla 6, se muestran las coordenadas del perímetro que representa el área contaminada generalizada de la Figura 11 a los efectos de poder replantearla en el terreno y proceder a las medidas que disminuyan las afectaciones por la contaminación.

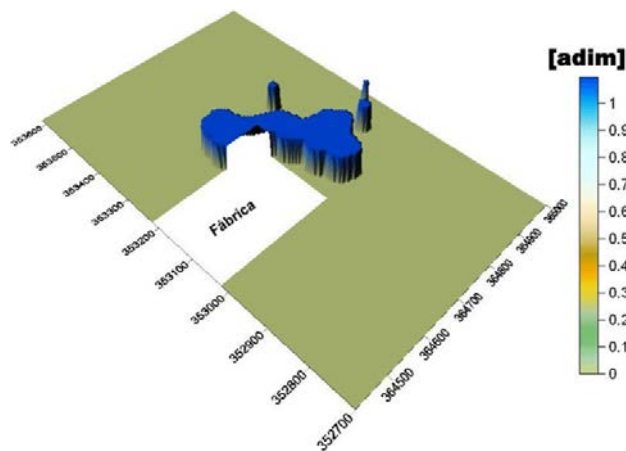


Figura 10. Área que representa la isolínea base del gradiente (-0.5).

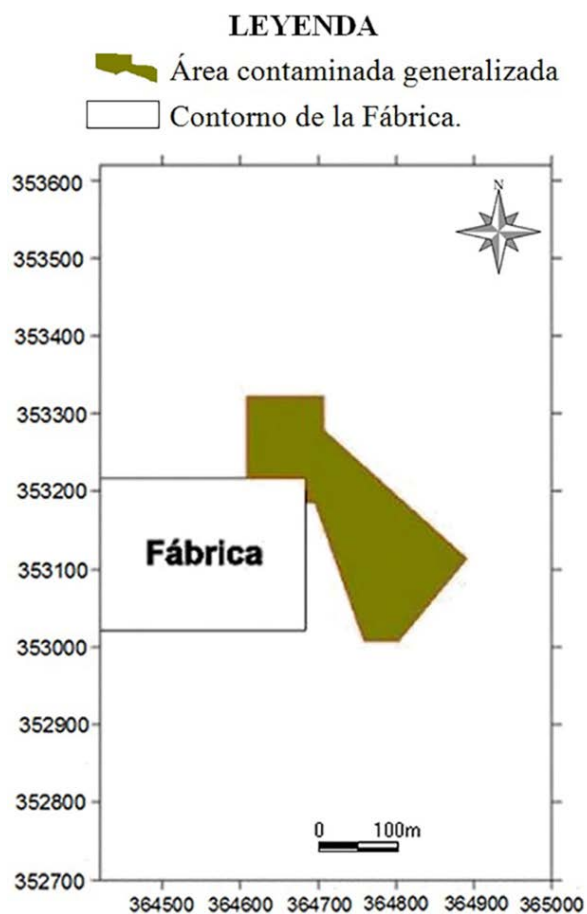


Figura 11. Área contaminada generalizada para facilitar su replanteo práctico en el terreno.

No	X	Y
1	364684	353216
2	364607	353216
3	364607	353321
4	364706	353321
5	364706	353279
6	364891	353112
7	364802	353007
8	364759	353007
9	364695	353185
10	364684	353185
11	364684	353185
12	364684	353216

Tabla 6. Coordenadas Lambert del perímetro del área que debe retirarse como medida de mitigación de la afectación.

DISCUSIÓN

Con relación a la magnitud y alcance de la contaminación en profundidad se tiene que, por falta de recursos y tiempo, no se pudo determinar el alcance y la magnitud de la contaminación de estos elementos pesados en profundidad. Además, en este informe se hace la proposición de hacer 10 calas de 1 metro de profundidad y determinar así, para cada una de ellas la variación de la contaminación en profundidad.

En la Figura 12 se muestra la ubicación de cada una de las 10 calas propuestas y sus coordenadas (Tabla 7) a partir de su distribución en las zonas de importantes gradientes del área contaminada.

Se constató en los huecos realizados (para las mediciones del *Complejo Redox*) en la magistral cada 25 metros, un cambio de coloración a partir de los 30 cm aproximadamente lo cual es una sugerencia *a priori* para tener una noción del alcance de la contaminación en profundidad. Por este motivo se proponen dos variantes para remediar la afectación de los suelos de la industria por la contaminación, estas son:



Variante I.

- Por motivo de tener los elementos pesados (Mn, Cd) poca movilidad en ambientes de pH bajo (Correa, *et al.* 1998), es que se puede limitar el acceso al área contaminada, la cual es representada por un perímetro de 975 metros.

Variante II:

- Suponer *a priori* (no es concluyente) una potencia de contaminación en profundidad de 0.3 metros, a partir de un cambio de coloración visible del suelo.
- Retirar con buldócer el área calculada de 41 114 m², que a una profundidad de 0.3 mts, lo que representará un volumen de tierra a remover de 12 334 m³.
- Depositar este volumen de tierra en un veredero previamente reconocido como tal y constatando a las autoridades pertinentes, las características contaminantes de los desechos que se verterán.
- Rellenar todo este volumen de tierra retirada con tierra sana.

LEYENDA

-  Área contaminada generalizada
-  Contorno de la Fábrica.

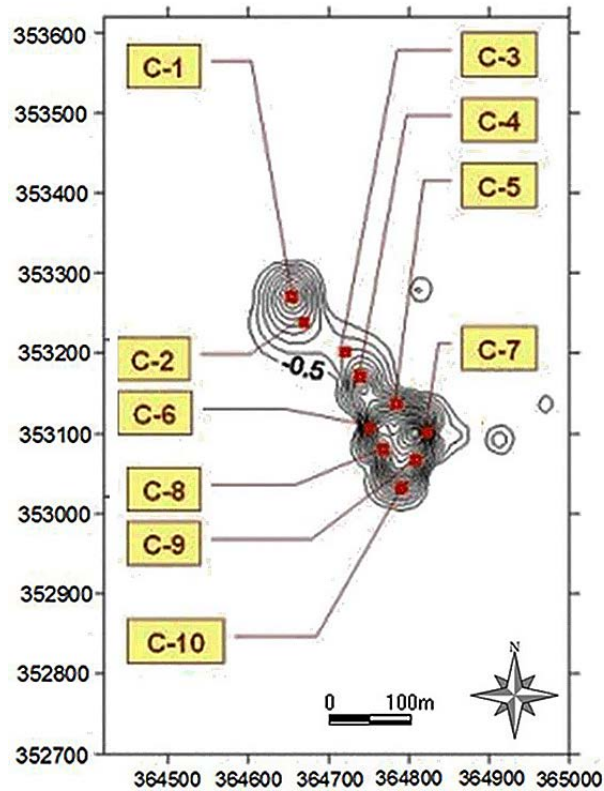


Figura 12. Distribución de las calas propuestas para el estudio vertical de la contaminación en el área.

No. Cala	X [m]	Y [m]
1	364660	353276
2	364674	353245
3	364724	353209
4	364742	353180
5	364786	353146
6	364754	353117
7	364824	353112
8	364771	353091
9	364810	353078
10	364793	353044

Tabla 7. Coordenadas Lambert de la ubicación de las calas propuestas para el estudio vertical de la contaminación en el área.

CONCLUSIONES

Se calcularon los Límites Contaminantes para los elementos químicos pesados y además.

- Se determinaron las magnitudes de la correlación de los atributos y se concluyó que los más importantes son los elementos químicos: Manganeso y Cadmio y los atributos medidos por el Complejo Redox la Susceptibilidad Magnética Normalizada y el Potencial Redox Reducido.
- Se presentó un mapa donde se muestra la distribución del área contaminada a partir del Parámetro Anómalo utilizado.
- Se generalizó espacialmente el área contaminada para facilitar su replanteo práctico en el terreno.
- Se propusieron dos variantes para mitigar el grado de la contaminación en el área de estudio. La primera variante incluía limitar el acceso al área contaminada, la cual poseía un perímetro de 975 metros. La segunda variante, con la suposición de una

potencia de contaminación en profundidad de 0.3 m, se propuso retirar con buldócer el área calculada de 41 114 m², lo cual representaba un volumen de tierra a remover de 12 334 m³, para ser depositada en un vertedero preparado al efecto y rellenar el espacio con tierra sana.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Correa, G. J., Comesañas, L.** 1998. Estudio Geológico Ambiental Integral del Municipio Arroyo Naranjo. Informe administrativo (inédito).
- Davis, J. C.** 1986. Statistics and data analysis in geology. John Willey and Sons. Inc. New York, 550 p.
- Lehmann, C. H.** 1974. Geometría Analítica. Editora Revolucionaria. Instituto Cubano del Libro. 494 p.
- Mattigod, S., Page, A.** 1983. Assessment of Metal Pollution in. Soils. Applied Environmental Geochemistry. Ed. I. Thorton. Academic Press. Sitio:tesis.ula.ve/pregrado/ tde_ busca/arquivo.php? codArquivo 153-1k. [Consultado] enero/2009.
- Pardo, M.**, 2003, Proyecto de Investigación–Desarrollo (244): Estimaciones cuantitativas por el Complejo Redox en su aplicación a la prospección geológica, los estudios medio–ambientales y arqueológicos (inédito). Archivo Instituto de Geología y Paleontología, La Habana.
- Pardo, M., Rodríguez, O.** 2005. Algoritmo para determinar el Nivel de Fondo de Atributos con Estructura de Datos Secuenciales Lineales en La Tecnología Redox. Boletín de la Sociedad Geológica del Perú. vol. 99.
- Rodríguez, O.** 2002. Manual de Usuario Sistema Redox. Derecho de Autor. Certificación de Depósito Legal Facultativo de Obras Protegidas. CENDA. Registro: 1589-2005, 2005.
- Valera, I.** y otros. 2002. Elementos geoquímicos y sus recursos minerales. GeoMin. Caracas.



Uso de atributos sísmicos y registros geofísicos de pozo para el análisis de fluidos en cortes carbonatados del cinturón plegado de la provincia norte cubana

Dayana Pedro Pompa¹, email: dayana@digi.cupet.cu, Odalys Reyes Paredes¹, Carlos Veiga Bravo¹ y Guillermo Miró Pagés².

¹ Centro de Investigaciones del Petróleo. DIGICUPET. 23 No. 105, e/ O y P, Plaza. C. P. 10400. La Habana, Cuba.

² Universidad Tecnológica de la Habana, CUJAE, Ave. 114, No. 11 901, entre Ciclovía y Rotonda, Marianao, C. P. 19390, La Habana, Cuba.

RESUMEN

Durante el desarrollo de los campos petrolíferos una práctica efectiva consiste en el monitoreo de los fluidos producidos en los campos petroleros para evaluar y predecir el comportamiento productivo de los mismos, y buscar zonas no drenadas aún. Para esto, convencionalmente es utilizada la sísmica 4D o sísmica de reservorio, la cual aún no se ha implementado en el país. Actualmente la aplicación de métodos tradicionales de procesamiento e interpretación sísmica no satisfacen los requerimientos para la delimitación de la posible existencia de fluidos en cortes carbonatados del yacimiento Varadero Oeste de la Franja Petrolera Norte Cubana. La presente investigación persigue indagar en la caracterización interna de las estructuras, enmarcándose en la detección de la posible presencia de fluidos con el empleo de datos sísmicos de reflexión, a partir de la integración de la información proveniente de pozos y la interpretación de varios atributos sísmicos. Se evaluaron parámetros como velocidad de las ondas compresionales y de cizalla, y el uso de volúmenes de atributos sísmicos de frecuencia y amplitud instantánea, polaridad aparente, sweetness, raíz media cuadrática de la amplitud, intensidad de reflexión e isofrecuencia, resultando este último el más significativo para detectar anomalías relacionadas a la probable presencia de fluidos, y así determinar una correspondencia entre las anomalías sísmicas observadas en éstos y la información proveniente de los registros geofísicos de pozos. Por último, se generaron volúmenes sísmicos de propiedades obtenidos a partir del uso de redes neuronales artificiales del tipo supervisado y no supervisado, que permitieron extrapolar

la información aportada por los registros en las zonas conocidas a aquellas zonas desconocidas.

Palabras claves: Atributos sísmicos, isofrecuencia, redes neuronales, relación de velocidades, fluidos y registros geofísicos de pozos.

ABSTRACT

An effective practice during the oil wells development consists in monitoring the fluids produced in oil fields to evaluate and predict their productive behavior, not drained areas can also be searched. For this, seismic 4D or reservoir seismic is conventionally used. Which has not been implemented yet in the country. Currently the implementation of traditional seismic processing and interpretation methods do not satisfy the requirements for the delimitation of possible existence of fluids in carbonates cuts in Western Varadero deposit of the northern Cuban oil thrust belt. The present research attempts to explore in areas such as the internal characterization of the structures, addressed to the detection of possible fluids presence in the seismic image since integration of wells and seismic attributes information. Parameters like compressional and shear velocity waves and the resulting seismic attributes volumes of, instantaneous frequency, RMS (root mean squares) amplitude, apparent polarity, among others which allow us to identify the isofrequency as the most significant to detect anomalies related to the fluid presence. The same way was possible to determine a correspondence between the seismic anomalies observed in those and the information of the geophysical recording of wells. Artificial neuronal

networks volumes generated in two modes the supervised and not supervised allowed the extrapolation of obtained information from the wells recordings in well-known areas to those with few information.

Keywords: seismic attribute, isofrequency, neuronal networks, relation of speeds, fluids and geophysics well logs.

RESUMO

Durante o desenvolvimento dos campos de óleo uma prática efetiva consiste na perseguição dos fluidos acontecidos nos campos de óleo para avaliar e predizer o comportamento produtivo do mesmo, e procurar áreas sem drenagem ainda. Convencionalmente para isto, é usado o método sísmico 4D ou sísmica de reservatório que não foi praticado no país. A aplicação de métodos tradicionais de prossecução e interpretação sísmica não satisfaz as exigências para delimitar a possível existência de fluidos em rochas carbonato no Campo Varadero Oeste da Franja Norte de Petróleo Pesado de Cuba. A presente pesquisa tem o intuito de indagar na caracterização interna das estruturas, enfatizando na detecção da possível presença de fluidos com a utilização de dados sísmicos, partindo da integração da informação proveniente de poços coma interpretação de vários atributos sísmicos. Foram avaliados parâmetros como velocidade das ondas longitudinais e de cisalhamento, e o uso de volumes de atributos sísmicos de frequência e amplitude instantânea, polaridade aparente, sweetness, amplitude RMS (raiz média quadrática), intensidade de reflexão e isofrequência, resultando neste último o mais significativo para detectar anomalias relacionadas à provável presença de fluidos, e assim de determinar uma correspondência entre as anomalias sísmicas observadas nelas e a informação proveniente dos registros geofísicos de poços. Por último foram gerados volumes obtidos mediante o uso de redes neuronais artificiais do tipo supervisionado e não supervisionado, que possibilitar a extrapolar a informação aportada pelos registros nas regiões conhecidas a aquelas regiões desconhecidas.

Palavras chaves: Atributos sísmicos, isofrequência, redes neuronais, relação de velocidade, fluidos e registros geofísicos de poços

INTRODUCCIÓN

Durante décadas, la aplicación de la sísmica de reflexión

para la búsqueda de hidrocarburos en yacimientos carbonatados ha sido una tarea difícil y de alto riesgo para los investigadores y productores de petróleo y gas, debido a la heterogeneidad que presentan estas rocas. Por otra parte como es conocido, el método sísmico ha sido aplicado tradicionalmente para resolver problemas de geología estructural en el marco de la exploración petrolera, siendo más limitada y reciente su aplicación a la búsqueda directa de hidrocarburos a escala internacional, sobre todo en ambientes de medios carbonatados emplazados en cinturones de cabalgamiento, como es el caso que ocupa al presente trabajo, lo que sin duda entraña una tarea investigativa de apreciable complejidad, sin precedentes en el ámbito nacional.

En Cuba cerca del 95 % de la producción de petróleo (Otero-Marrero, R., *et al.*, 2013), proviene de la Franja Petrolera Norte Cubana que abarca el extremo norte de las provincias La Habana, Mayabeque y Matanzas donde se inserta el yacimiento Varadero Oeste que es el área objeto de estudio del presente trabajo. Los reservorios principales son carbonatos fracturados, los mismos se caracterizan por ser heterogéneos desde el punto de vista de las propiedades de las fracturas y del medio poroso permeable, lo que conlleva a una difícil correlación de los intervalos productivos dentro de las electrofacies reservorios (Paredes, 2013).

A partir de investigaciones realizadas se plantea que desde la aparición de los atributos sísmicos en la década de los setenta, cientos de ellos han surgido a través de distintos métodos computacionales para la predicción de las propiedades litológicas y petrofísicas de los reservorios (Chopra, 2006; William, 2012).

En la investigación tradicional de los métodos de reflexión se asume la señal sísmica como una respuesta limitada en tiempo y frecuencia, donde los coeficientes de reflexión están en función del ángulo de incidencia y del contraste de impedancias acústicas. Esta señal varía sus características a medida que viaja debido a la propagación de la misma a través del terreno. Lo anterior, nos ayuda a encontrar indicadores directos de la presencia de hidrocarburos, producto de que cuando cambia el contenido de fluidos en los poros de las rocas también cambian las propiedades de las mismas. Esta circunstancia favorece la aparición de anomalías significativas al aplicar un conjunto de atributos sísmicos que pueden ser usados para proveer evidencia circunstancial de la presencia o no de hidrocarburos (Veiga, 2008).

Sin embargo, los datos sísmicos tradicionales no logran mostrar generalmente una imagen confiable del subsuelo en las zonas de cinturones de cabalgamientos constituidas por rocas carbonatadas sismo-geológicamente complejas, por lo que, la veracidad de la interpretación sísmica en estas zonas es baja debido a la pobre calidad de las imágenes sísmicas obtenidas.

Considerando lo anteriormente planteado, la investigación persigue definir intervalos del corte saturados de hidrocarburos. Para ello, se generaron y evaluaron diferentes volúmenes de atributos y de propiedades asistidas con los datos provenientes de los pozos (relación de velocidades, saturación de agua, volumen de arcilla).

MATERIALES Y MÉTODOS.

Para el desarrollo de este trabajo se utilizaron cuatro volúmenes sísmicos 3D, migrados en profundidad con diferentes alejamientos (*offset*) (lejano, medio, cercano), y el volumen completo para comparar los resultados y aplicar las mejores variantes de atributos sísmicos. Además, se manejaron los datos de 4 pozos del área de estudio (A, B, C, D).

Los métodos empleados para lograr los resultados de esta investigación fueron geofísicos (métodos sísmicos y de pozo) y estadísticos matemáticos, valiéndose de técnicas como: atributos sísmicos y redes neuronales artificiales.

Preparación de la información de geofísica de pozos.

En la investigación se pretende estimar la respuesta de los registros geofísicos de pozos que pudieran discernir sobre la presencia de fluidos en el corte, sin embargo, algunos de estos pozos no disponen de aquellos registros de mayor importancia para la detección de fluidos como: velocidad de las ondas, tiempo de tránsito de las ondas compresionales (DTCO) y de corte (DTSM) y coeficiente de Poisson.

A partir de información real, en el pozo D, se establecieron relaciones de regresión para generar por medio de ecuaciones empíricas pseudoregistros de las curvas de tiempo de tránsito de las ondas compresionales (DTCO) y de corte (DTSM), la velocidad de las ondas compresionales (V_p) y de cizalla (V_s), y el coeficiente de Poisson (σ) en aquellos pozos que carecían de dicha esta información. (Castagna, 2003; Curia, 2009),

Para comprender los resultados alcanzados hay que disponer del conocimiento de la teoría del comportamiento de las velocidades de las ondas frente a la existencia de fluido. Se plantea que la relación de velocidades (V_p/V_s) siempre va a ser mayor frente al petróleo y el agua que frente al gas (Bacon, 2003); es por ello que se seleccionó el registro de pozo de relación V_p/V_s como indicador de la probable presencia de hidrocarburos (Figura 1).

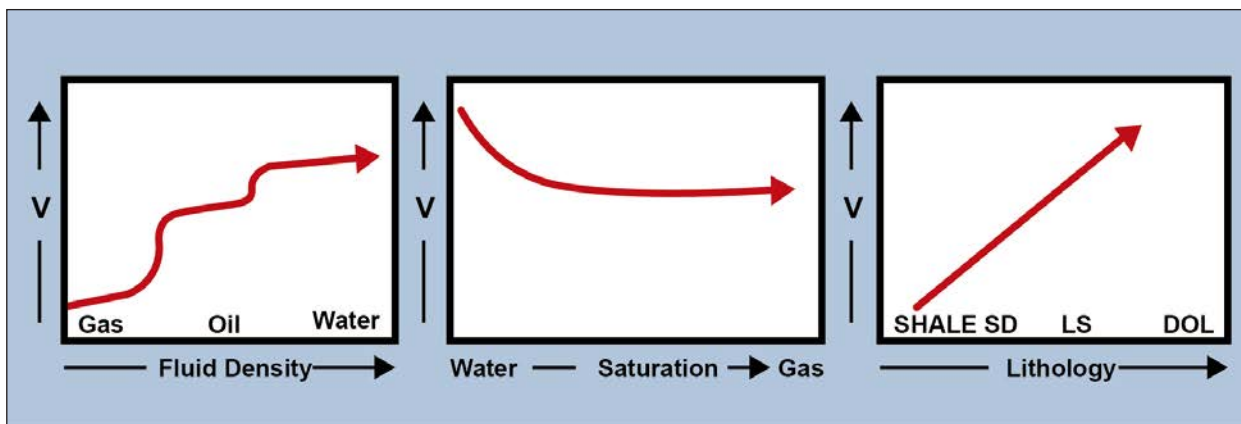


Figura 1. Factores que afectan la velocidad de las ondas compresionales.

Pruebas de atributos sísmicos físicos.

Dentro de la extensa gama de atributos sísmicos físicos existentes fueron calculados los atributos: amplitud instantánea, intensidad de reflexión, polaridad aparente, sweetness, frecuencia instantánea e isofrecuencias, que

han alcanzado cierto grado de éxito internacional en investigaciones similares a la presente, (Quilen, 2006; Miro *et al.*, 2014; Taner, 2001; Schlumberger, 2012),

Durante el procesamiento se trabajó con cuatro volúmenes sísmicos migrados en profundidad para com-

parar en cuál de ellos la respuesta era más confiable y ajustada a las condiciones del medio. De éstos, el volumen seleccionado para realizar todo el análisis y pruebas de atributos fue el volumen de offset lejano, debido a que resultó ser el más resolutivo en el caso de la búsqueda de anomalías que pudieran ser ocasionadas por la presencia de fluidos, a partir de la aplicación del atributo isofrecuencias. Este volumen mostró tener una composición frecuencial donde la frecuencia predominante pudiera ser efectivamente cercana a 10 Hz; estos espectros de bajas frecuencias han sido comprobados en investigaciones precedentes en el ámbito internacional y se asocian a la posible presencia de fluidos.

También se realizaron otras pruebas de atributos (polaridad aparente, *sweetness*, raíz media cuadrática (RMS) de la amplitud e intensidad de reflexión) sensibles ante la presencia de fluido en el subsuelo. Éstos validaron la información resultante de la aplicación de los atributos de isofrecuencias y amplitud instantánea, ya que mostraron un apreciable contraste de valores relacionados fundamentalmente con la heterogeneidad del medio.

Redes neuronales artificiales

Considerando lo anteriormente expuesto se aplicó el atributo integrador de redes neuronales artificiales (RNA) donde en la etapa de entrenamiento del algoritmo se estudia la relación de un conjunto de datos donde se conoce tanto la variable medida (datos sísmicos) como el objetivo (variable petrofísica) (Chelotti, 2014).

Fueron realizadas las dos variantes de redes neuronales: supervisadas y no supervisadas. Inicialmente se realizó una red neuronal no supervisada por el modelo de clasificación, donde el resultado ofrecido proporcionó un criterio de caracterización litológica.

Por otra parte, fue calculada la red neuronal supervisada, realizada a través del modelo de estimación y entrenada con el registro geofísico de pozo de relación (Vp/Vs). El análisis que resultó tener un mayor coeficiente de correlación fue el no lineal, por lo tanto, se escogió el mismo para realizar el procedimiento. Como resultado de la aplicación de las redes neuronales se observa una imagen más resolutiva para la red neuronal haciendo uso de componentes principales.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización e interpretación geólogo - geofísica.

En los cortes sísmicos obtenidos en trabajos precedentes

(González *et al.*, 2014) fueron correlacionados tres horizontes pertenecientes a la Unidad Tectónica Estratigráfica (UTE) Placetas relativos al Grupo Veloz, éstos fueron calibrados con los pozos A, B, C, y D y corresponden a:

- Horizonte Morena correspondiente con la Formación Morena de edad Cretácico Inferior Valanginiano–Barremiano, con manifestaciones de hidrocarburos constituidos por calizas.
- Horizonte Manto 1 correspondiente al tope del Jurásico Superior-base del Cretácico Inferior Neocomiense Valanginiano, representado por las Formaciones Ronda y Cifuentes (calizas y brechas), donde también ocurren manifestaciones de petróleo.
- Horizonte Manto 2 asociado al tope de Jurásico Superior Tithoniano, representado por la Formación Cifuentes (calizas y brechas) con manifestaciones de hidrocarburos.

En las secciones sísmicas (Figuras 2 a y b), existe un incremento de los valores positivos de los registros geofísicos de pozos relación Vp/Vs y saturación de agua (Sw) a partir del comienzo del Manto 1, los cuales pueden estar relacionados con cambios litológicos o aumento del contenido de fluidos en el corte. También se observa hacia el norte un incremento de los valores anómalos positivos, lo que pudiera estar relacionado con la presencia de otro horizonte.

Evaluación sobre la aplicabilidad y el aporte informativo de los atributos sísmicos

Los atributos sísmicos físicos más informativos para el análisis de la posible existencia de fluidos en el corte resultaron ser: frecuencia y amplitud instantánea, polaridad aparente, *sweetness*, raíz media cuadrática (RMS) de la amplitud, intensidad de reflexión e isofrecuencia, siendo este último el más significativo.

El atributo isofrecuencia ha sido muy utilizado como delimitador de fluidos, fundamentalmente para gas, sin embargo, en este trabajo se observa cómo responde anómalamente ante la presencia de otro fluido (probablemente petróleo). En la sección sísmica del atributo isofrecuencia (Figura 3) se observa que para un valor mayor de isofrecuencia, dígame frecuencia instantánea, ocurre una disminución de la relación Vp/Vs y donde decrecen

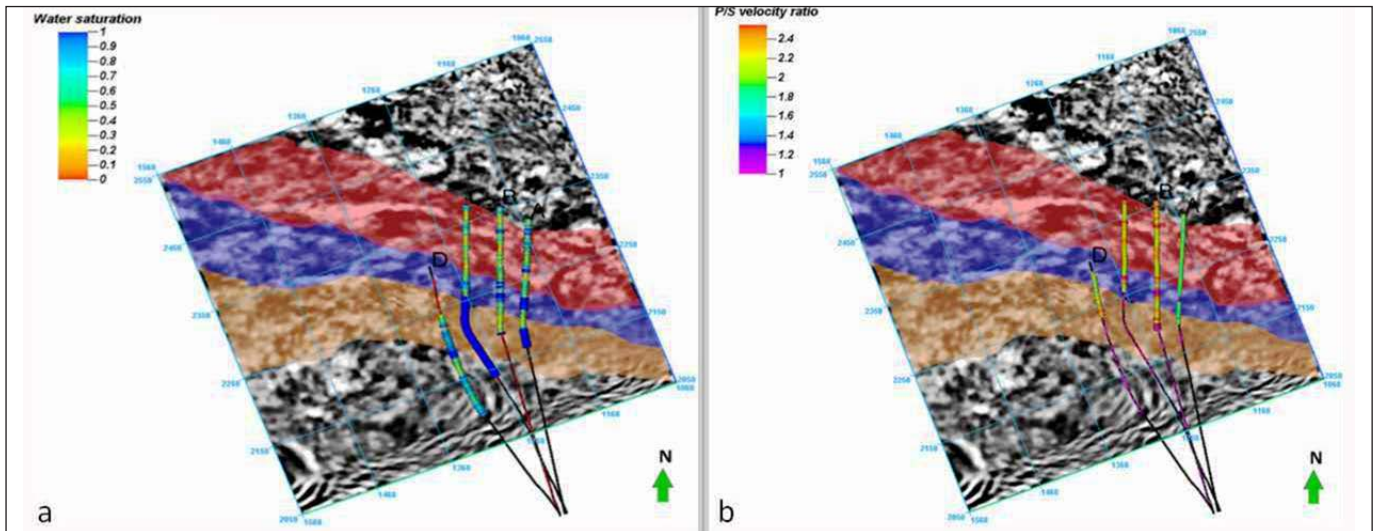


Figura 2. Sección sísmica en profundidad ($z=-1850$) de offset lejano con los cuatro pozos proyectados (A, B, C, D) y el registro Sw (a) y de relación Vp/Vs (b). Horizontes: Morena (color carmelita), Manto 1 (azul) y Manto 2 (rojo).

los valores la intensidad del atributo existe un ascenso de la relación Vp/Vs . En la figura se puede observar como aparecen desde el noroeste un conjunto de bajas frecuencias en la zona productora de petróleo (horizontes Morena y Manto 1).

Otro atributo que tuvo un importante aporte fue la amplitud instantánea (Figura 4) que puede ser un equi-

valente de los atributos amplitud RMS e intensidad de reflexión. Este reveló un aumento de su valor ante la caída de la relación Vp/Vs y una disminución ante la crecida de la relación Vp/Vs . Su comportamiento pudiera estar estrechamente relacionado con los contrastes de impedancia acústica en el medio, además estos valores altos coinciden con puntos donde existen altos valores de po-

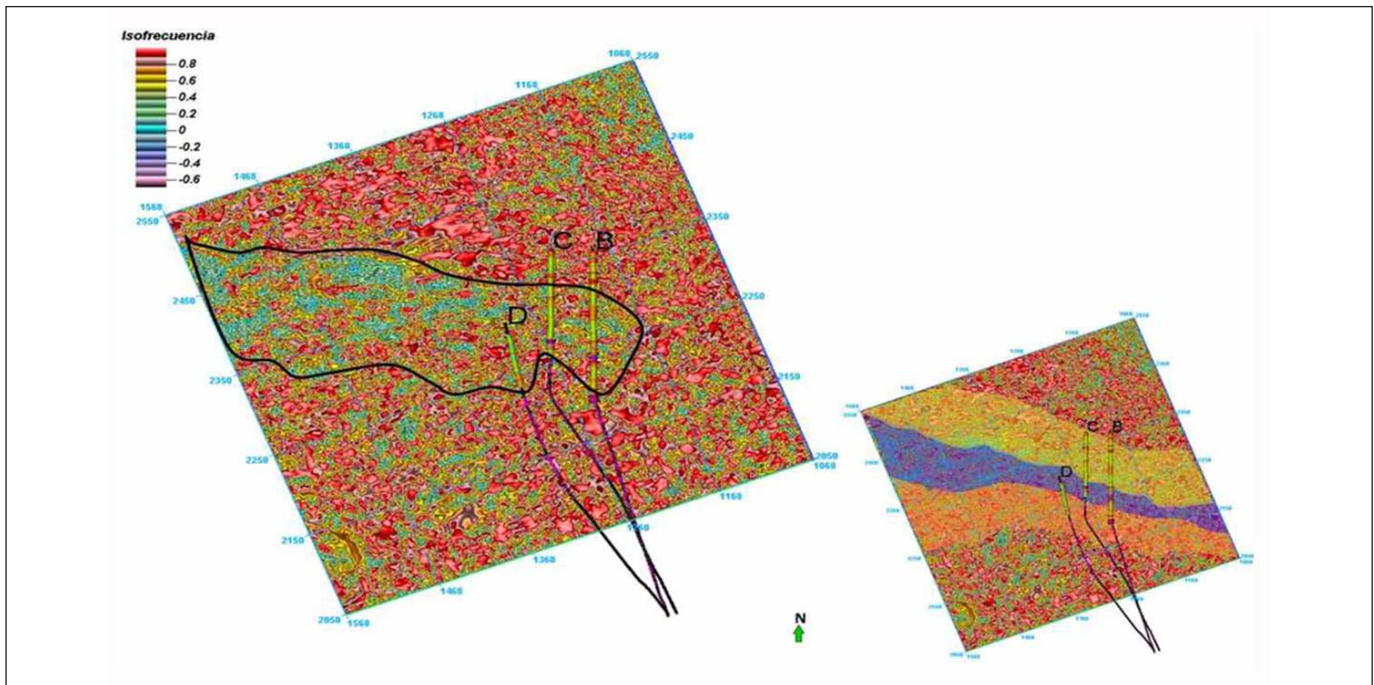


Figura 3. Sección sísmica en profundidad $z=-1750$ del atributo isofrecuencia para una frecuencia dominante de 10 Hz con el registro de geofísico pozo Vp/Vs para los pozos B, C y D. Señalado se encuentra el conjunto de bajas frecuencias provenientes del noroeste.

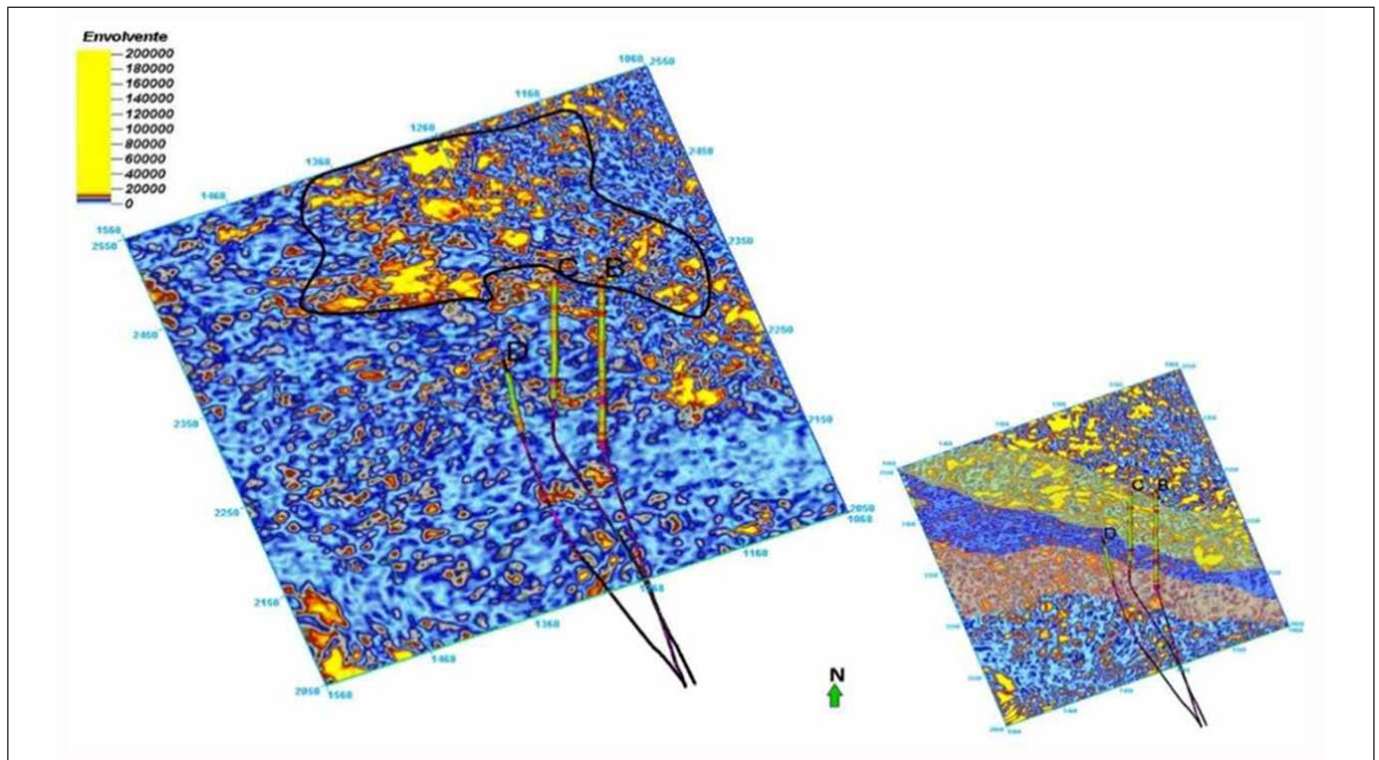


Figura 4. Sección sísmica en profundidad $z = -1750$ del atributo amplitud instantánea con el registro de geofísico pozo Vp/Vs para los pozos B, C y D. Se observan anomalías de amplitudes positivas correspondiente al Manto 2.

rosidad y contenido de arcilla. Con el estudio de este atributo se observó el aumento de anomalías de altas amplitudes positivas en el Manto 2, litológicamente compuesto por carbonatos y brechas de la Formación Cifuentes. Debido al contraste de amplitudes fue posible identificar cambios litológicos, que son difíciles de distinguir a sim-

ple vista en la sísmica. Al sur estas anomalías van en descenso debido a la presencia de carbonatos menos heterogéneos.

En la Tabla 1 se exponen los resultados del análisis realizado de los cortes de atributos sísmicos con el objetivo de delimitar la presencia de fluidos.

Atributo sísmico	Sellos	Reservorios
Envolvente	↑Env ↓Vp/Vs	↓ Env ↑Vp/Vs
Frecuencia Instantánea	↑ Freq ↓Vp/Vs	↓Freq ↑Vp/Vs
Isofrecuencia a 10 Hz	↑Isof ↓Vp/Vs	↓Isof ↑Vp/Vs
Polaridad Aparente	No hay cambio de polaridad	Hay cambio de polaridad
<i>Sweetness</i>	↑Sweet ↓Vp/Vs	↓Sweet ↑Vp/Vs
Amplitud RMS	↑RMS ↓Vp/Vs	↓RMS ↑Vp/Vs

Tabla 1. Resumen del comportamiento de los atributos sísmicos comparado con el registro Vp/Vs en los intervalos de sellos y reservorios.

Análisis de los resultados alcanzados a través de las RNA.

Para los diferentes volúmenes de propiedades generados se proyectaron secciones sísmicas arbitrarias sobre la trayectoria de los pozos, donde se observa, que frente a los valores bajos de la relación V_p/V_s se encuentran las zonas que responden al sello (o con alto contenido de arcilla) mientras que los valores altos de la relación V_p/V_s responden a intervalos reservorio con saturación de fluidos líquidos (agua-petróleo).

Las imágenes que se presentan a continuación son el resultado final del procesamiento de las redes neuronales artificiales las cuales respondieron adecuadamente, ante la presencia de fluidos, a pesar de la baja correlación existente entre los atributos sísmicos y los registros geofísicos de pozos. Se debe aclarar que los resultados no son absolutos para todo el corte, debido, primeramente, a que nada más se cuenta con información del reservorio y como segundo factor que la resolución vertical de la sísmica es menor que la resolución vertical de los registros geofísicos de pozos, por tanto, aquellos eventos menores a 40 m en pozos la sísmica no será capaz de detectarlos y es complicado obtener un resultado con más detalle. Se puede observar que los mayores valores de intensidad de la relación V_p/V_s (rojo o amarillo) re-

presentan la posible existencia de fluido (Figura 5).

Para validar el resultado alcanzado por el volumen de relación V_p/V_s , y con ayuda de una red neuronal supervisada a través del registro geofísico de Sw se obtiene el volumen de saturación de agua (S_w) (Figura 6). En el volumen de S_w se reflejan los intervalos con menores valores de intensidad de saturación de agua o estratos con mayores concentraciones de petróleo. Estas aparentes mayores saturaciones de petróleo abundaron a lo largo de todo el corte, pero principalmente en el horizonte Morena. Nótese que donde existe un aumento de la saturación de agua (color azul), es porque hay un aumento del contenido de arcilla en el corte. Es necesario aclarar que la S_w calculada es la saturación de agua total que depende de la porosidad total y no de la porosidad efectiva, y es por ello que la misma se ve afectada por el volumen de arcilla como se explicó anteriormente.

Otra vía de validación del volumen de relación V_p/V_s obtenido fue escoger el pozo que presentaba mayor producción diaria de petróleo en la zona de estudio y proyectarlo sobre el volumen generado de velocidades sin componentes principales. Esto reflejó como resultado, que efectivamente, el pozo E corta una gran anomalía positiva (Figura 7 a), ubicada en el horizonte Manto 2, relacionada

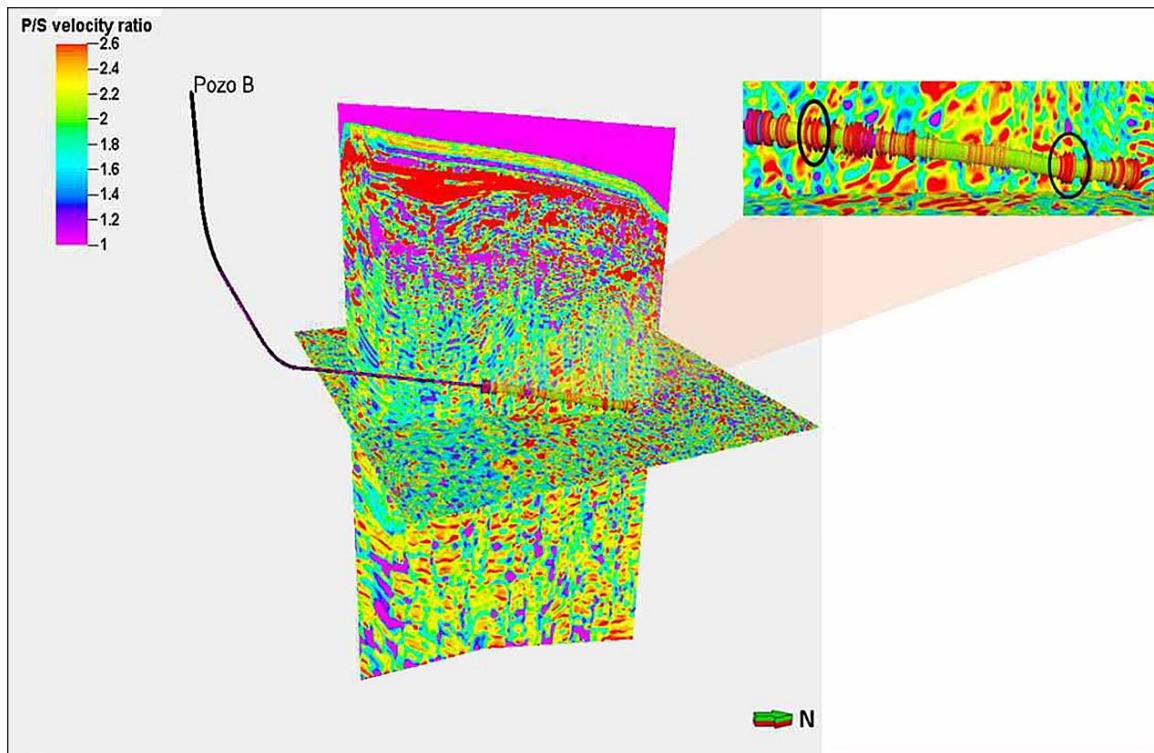


Figura 5. Línea arbitraria del volumen de relación V_p/V_s sobre el pozo B. Marcados en círculos se ubican intervalos donde pueden existir mayores concentraciones de fluido.

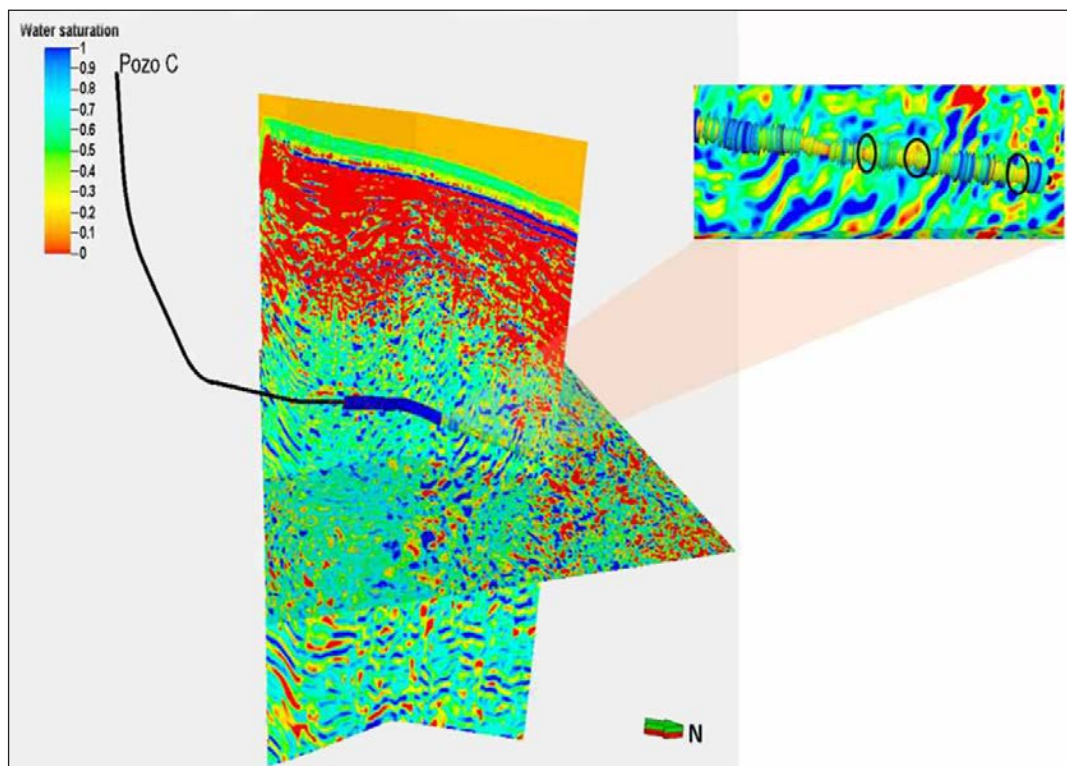


Figura 6. Línea arbitraria del volumen de Sw sobre el pozo C. Resaltados en círculos se ubican intervalos donde pueden existir mayores saturaciones de petróleo.

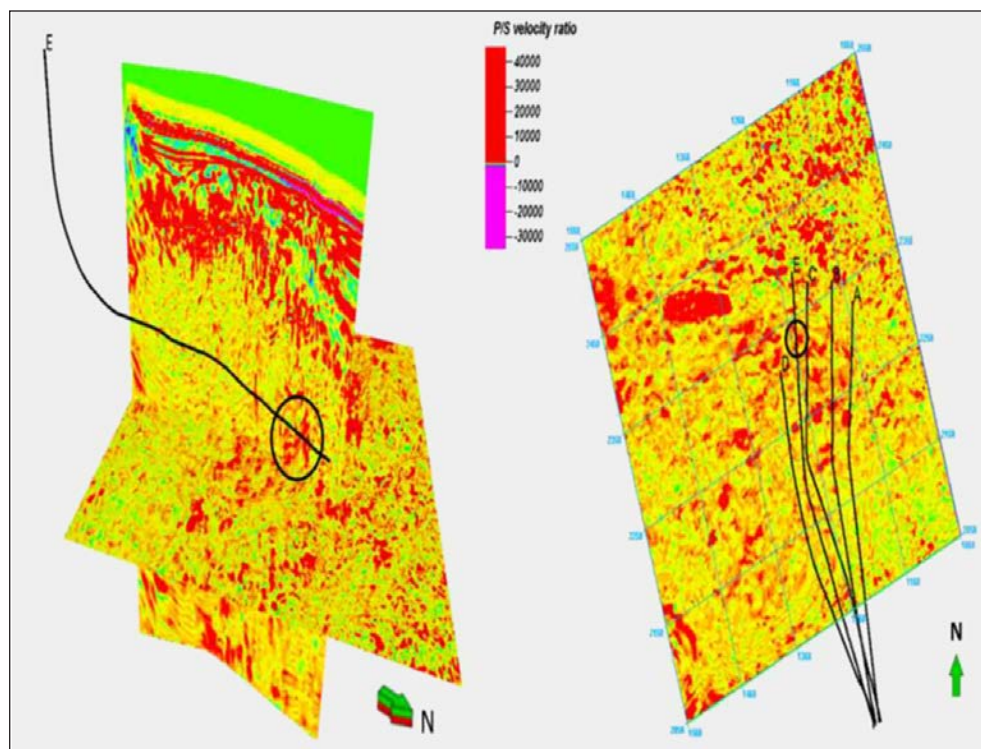


Figura 7 (a). Línea arbitraria del volumen de relación V_p/V_s sobre el pozo E, obsérvese como el pozo atraviesa la anomalía señalada que indica la posible existencia de fluido (b). Corte sísmico en profundidad $z = -1850$ del volumen de relación V_p/V_s , en ella se presentan todos los pozos y está señalada la anomalía interceptada por el pozo E.

probablemente con una gran concentración de fluido líquido; validando la selección del registro de la relación V_p/V_s como delimitador la posible presencia de fluido.

CONCLUSIONES.

Se evidencia el aporte del método sísmico de reflexión en la detección de fluidos existentes en cortes carbonatados en cinturones de cabalgamiento.

Los atributos sísmicos físicos más resolutivos para la posible identificación de fluidos resultaron ser: frecuencia instantánea, amplitud instantánea, isofrecuencia, amplitud RMS, intensidad de reflexión, polaridad aparente y sweetness, siendo el más significativo el atributo isofrecuencias.

Para todos los horizontes interpretados (Morena, Manto 1 y Manto 2) se identificó en las secciones de los respectivos atributos sísmicos la presencia de indicadores de fluidos en el corte a partir de los valores bajos de frecuencia y amplitud, los cambios de polaridad y bajos valores de intensidad de reflexión.

La aplicación de las redes neuronales supervisadas permitió estimar en todo el corte la presencia de probables de indicadores de fluidos.

AGRADECIMIENTOS

En particular quisiéramos agradecer a la UCTB de geofísica perteneciente al Centro de Investigación del Petróleo de CUPET por todo el apoyo brindado. Al Doctor Guillermo Miró Pagés, profesor de profesores, por su valioso apoyo en el desarrollo del mismo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bacon, M., R. Simm Y T. Redshaw**, 2003, 3-D Seismic Interpretation, University of Cambridge.
- Castagna, J.P., S.J. Sun**, 2003, Instantaneous spectral analysis: Detection of low-frequency shadows associated with hydrocarbons. *The Leading Edge*, 6.
- Chelotti, L**, 2014, Procesos sísmicos especiales.
- Chopra, S., K. Marfurt**, 2006, Seismic Attributes a promising aid for geologic prediction.
- Curia, D**, 2009. Estimación de sónicos con curvas de resistividad [en línea], 2009. Disponible en: davidcuria.blogspot.com/2009/09/avo-exploration.html, consulta enero 2015
- González Rodríguez, E.M., J. Sanchez Arango, et al.**, 2014, Informe parcial sobre la actualización del modelo geológico Varadero Oeste e interpretación del sector norte Bahía de Mantanzas. Centro de investigaciones del petróleo. CUPET. Cuba.
- Miro, G., E. Escartín, H. Amador**, 2014, Láminas de la asignatura de Métodos Sísmicos para la Prospección y Exploración de Hidrocarburos. Atributos sísmicos in: Pagés, G. M. (ed.). La Habana, Cuba: Departamento de Geociencias. Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría".
- Paredes, O.R.** "Metodología para la caracterización de unidades de flujo aplicada al prospecto Habana del Este de la FRANJA NORTE DE CRUDOS PESADOS DE CUBA". Tesis en opción al grado de Máster en Ciencias (inédita), Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, La Habana., 2013.
- Quilen, K.D.C**, 2006, Integración de atributos sísmicos con datos petrofísicos para determinar zonas prospectivas, Arena L2M, Área de Finca-Yopales, Edo. Anzoátegui. Tesis en opción al grado de Ingeniero Geofísico (inédita), Universidad Simón Bolívar, Sartenejas, Venezuela.
- SCHLUMBERGER**, 2012, Interpreter's Guide to Seismic Attributes. Taner, M.T, 2001. Seismic Attributes.
- Veiga Bravo, C.**, 2008 "Atributos sísmicos para la búsqueda y evaluación de las anomalías gasopetrolíferas". Cuba, Universidad de Pinar del Río "Hnos. Saíz Montes de Oca. Tesis en opción al grado de Master (inédita).
- William Marin, M.A., J. sierra**, 2012. Análisis multiatributos para la caracterización sísmica de prospectos para gas en la Cuenca del Valle Inferior del Magdalena, Colombia [en línea], Disponible en: <http://www.earthdoc.org/publication/>, consulta enero 2015.

Corrección por temperatura a la presión calculada en fluidos de emulsión inversa en los pozos de perforación

Emilio de la Torre Ramos¹.

¹ *Universidad Olmeca. Carretera Villahermosa-Macuspana, km 14, Dos Montes, Centro, C. P. 86280, Villahermosa, Tabasco, México, E-mail: seteingpet@hotmail.com*

RESUMEN

La presión calculada en sistemas que utilizan fluidos de emulsión inversa en pozos petroleros no siempre coincide con las presiones reales observadas en el equipo de perforación. El propósito de este artículo es determinar las causas de esa disparidad y corregir las mismas; para cumplir con este propósito se seleccionaron diez pozos que utilizaban fluidos de emulsión inversa y se compararon las presiones calculadas con las observadas (medidas) en los equipos de perforación. Se analizaron los pozos con mayores diferencias para determinar las causas y obtener una expresión para eliminar dichas diferencias entre presiones calculadas y observadas, encontrándose que las causas de dichas diferencias se debían a variaciones de temperatura del fluido en los pozos y se obtuvo un factor de corrección por temperatura aplicable a las presiones calculadas para hacerlas consistentes con las reales observadas en el equipo de perforación.

Palabra clave: Fluidos de emulsión inversa, caídas de presión por fricción, flujo laminar y turbulento, temperatura a la salida del pozo y corrección por temperatura.

ABSTRACT

The pressure calculated in systems that use reverse emulsion fluids in oil wells, it does not always match with the real pressure observed in the drill rig. The purpose of this article is to determine the causes of that disparity and correct them, to accomplish this objective ten wells were selected that used reverse emulsion fluids and were compared the pressures calculated with those observed (measured) in the drill rig. The wells with greater differences were analyzed to determine the causes and to be

able to obtain an expression to eliminate those differences between calculated and observed pressures finding that the causes of those differences were due to variations on fluid temperature in the wells and a correction factor for temperature applicable to the calculated pressures was obtained and make them consistent with the real ones observed in the drilling equipment.

Keywords: Invert emulsion fluid, friction pressure drop, laminar and turbulent fluid, outlet well temperature and correction by temperatura.

RESUMO

A pressão calculada em sistemas que utilizam fluidos de emulsão inversa em poços de petróleo nem sempre coincide com as pressões reais observadas na plataforma de perfuração. O objetivo deste artigo é determinar as causas dessa disparidade e corrigi-las, para cumprir este objetivo, foram selecionados dez poços que utilizaram fluidos de emulsão inversa e as pressões calculadas foram comparadas com as observadas (medidas) no equipamento de perfuração. Os poços foram analisados com maiores diferenças para determinar as causas e obter uma expressão para eliminar as referidas diferenças entre as pressões calculadas e observadas, descobrindo que as causas das referidas diferenças foram devidas a variações da temperatura do fluido nos poços e um fator de correção por temperatura aplicável às pressões calculadas e tornando-as consistentes com o real observado no equipamento de perfuração.

Palavras chaves: Fluidos de emulsão inversa, quedas de pressão devido ao atrito, fluxo laminar e turbulento, temperatura na saída do poço e correção de temperatura.

INTRODUCCIÓN

El cálculo de caídas de presión en los sistemas que utilizan lodos de emulsión inversa ha transitado por varios períodos en su historia, que van desde el correcto ajuste del modelo reológico idóneo para realizar cálculos precisos, hasta consideraciones de un estado estable para poder efectuar los cálculos de las caídas de presión que se ajusten al comportamiento real observado en los pozos petroleros. Actualmente es común que los cálculos hidráulicos de «algunos pozos» que utilizan lodos de emulsión inversa no se ajusten al comportamiento real observado en los mismos. El objetivo de este estudio es determinar las causas de esas diferencias entre lo calculado y lo observado y obtener una expresión que pueda aplicarse para corregir esas disparidades observadas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los fluidos o lodos de emulsión inversa se ajustan al comportamiento reológico del modelo ley de potencias, lo anterior fue demostrado por McMordie y otros (1974) y posteriormente comprobado por De la Torre (1987).

Por lo expuesto, las ecuaciones utilizadas para el cálculo de caídas de presión por fricción son las desarrolladas por Metzner y Reed (1955) para flujo laminar y las desarrolladas por Dodge y Metzner (1959) para flujo turbulento.

Metzner y Reed demostraron matemáticamente de manera rigurosa que para flujo laminar sus ecuaciones se ajustaban perfectamente a cualquier fluido que siguiera el comportamiento reológico del modelo ley de potencias y tal es el caso de los lodos de emulsión inversa. Por otro lado Dodge y Metzner demostraron que sus ecuaciones para flujo turbulento en el cálculo de caídas de presión por fricción para fluidos que siguen el comportamiento reológico del modelo ley de potencias se ajustaban con un rango de error de $\pm 2.5\%$ como máximo, en base a pruebas de laboratorio efectuadas.

Pruebas de campo efectuadas por De la Torre documentadas y mostradas en su tesis de maestría en Ingeniería Petrolera demostraron que bajo condiciones de flujo permanente y estado estable los lodos de emulsión inversa se ajustaban al modelo ley de potencias y sus caídas de presión podían ser calculadas con la exactitud descrita, con las ecuaciones propuestas por Metzner y Reed en flujo laminar y Dodge y Metzner en flujo turbulento.

Asimismo determinó el efecto de la temperatura en el comportamiento reológico en ese tipo de fluidos e

hizo la observación que para pozos a más de 3 000 metros de profundidad, las condiciones de estado estable y flujo permanente sufrían una distorsión por efecto de la temperatura, por lo que las caídas de presión calculadas en pozos con mayores profundidades a la mencionada mostraban diferencias considerables con respecto a las reales. También documentó el hecho de que estas diferencias se incrementaban conforme la profundidad del pozo aumentaba, por lo que era necesario efectuar una corrección a las caídas de presión calculadas en pozos con profundidades mayores a los 3 000 metros, haciéndose más necesaria dicha corrección debajo de los 4 000 metros debido a la creciente disparidad entre las presiones calculadas y las reales (medidas en el equipo de perforación) en pozos con profundidades mayores a esta última profundidad mencionada.

Por otro lado Raymond (1956), elaboró un trabajo donde analiza el comportamiento de la temperatura del lodo en un pozo, colocó sensores de temperatura en el interior de la sarta de perforación y en el espacio anular de un pozo y midió la temperatura del lodo mientras circulaba, tanto en el fondo del pozo como a la salida del mismo (en la línea de flote), así como a lo largo del interior de la sarta de perforación y a lo largo de todo el espacio anular, circulando con un rango de gastos de 250 a 350 gal/min en el pozo a 10 000 pies de profundidad (3 048 metros) y a 20 000 pies de profundidad (6 080 metros), el pozo se encontraba en un área con un gradiente geotérmico de $1.7\text{ }^{\circ}\text{F}/100$ pies.

En el pozo a 10 000 pies de profundidad la diferencia de temperaturas (Δt) entre la temperatura en el fondo del pozo y la temperatura a la salida fue de $8\text{ }^{\circ}\text{F}$ ($4.4\text{ }^{\circ}\text{C}$) circulando lodo con un gasto de 250 gal/min, y a la misma profundidad circulando con un gasto de 350 gal/min la diferencia de temperaturas fue de $3\text{ }^{\circ}\text{F}$ ($1.6\text{ }^{\circ}\text{C}$).

En el pozo a 20 000 pies de profundidad la diferencia de temperaturas del lodo entre el fondo y a la salida circulando con un gasto de 250 gal/min fue de $73\text{ }^{\circ}\text{F}$ ($40.5\text{ }^{\circ}\text{C}$) y circulando con un gasto de 350 gal/min fue de $48\text{ }^{\circ}\text{F}$ ($26.6\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Estos resultados explican las causas de la diferencia de presiones calculadas versus las reales en los pozos analizados por De la Torre, ocurridas en pozos a profundidades mayores a 4 000 metros, haciendo evidente que la causa de la diferencia entre presión calculada y real es la diferencia de temperaturas entre la temperatura de salida del pozo, que es la temperatura a la cual se toman las muestras de lodo y se efectúan los análisis viscométricos para de-

terminar los parámetros reológicos del fluido y la temperatura del lodo en el fondo del pozo.

En este estudio se propone un factor para corregir el efecto temperatura, que deberá aplicársele a las presiones calculadas en pozos que utilizan lodos de emulsión inversa.

Para determinar la magnitud de las diferencias entre las presiones reales y las presiones medidas en un pozo, se seleccionaron 10 (diez) pozos de la zona sureste de México que perforaban utilizando lodo de emulsión inversa. En dichos pozos se determinó su geometría y se midieron las propiedades reológicas del lodo a la temperatura de salida del pozo (muestras tomadas en la línea de flote), asimismo se verificó la precisión de los manómetros utilizados para medir la presión en el sistema y asegurar mediciones verídicas.

El gradiente geotérmico «promedio» de la zona sureste de México según el Instituto Mexicano del Petróleo y Petróleos Mexicanos (1987) es de 2.1 °C/100 m (1.15 °F/100 pies) con una desviación máxima de +0.12 °C/100 m y una desviación mínima de -0.14 °C/100 m.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los datos de las propiedades reológicas medidas a la temperatura de salida del pozo (línea de flote), así como de la caída de presión en la barrena de los diez pozos que fueron seleccionados se muestran en la tabla 1.

Las profundidades, tamaño de agujero, sus respectivos gastos y las presiones calculadas con los datos mostrados en la tabla 1, las presiones medidas en los pozos seleccionados, así como el porcentaje de error entre las presiones medidas y calculadas, se muestran en la tabla 2, en la cual los pozos con profundidades menores a 4 000 metros se marcan con negritas, ya que dichos pozos no se considerarán en el análisis para determinar un factor de corrección por temperatura.

En la tabla 2 es evidente cómo el porcentaje de error entre las presiones medidas y calculadas se incrementa conforme la profundidad del pozo aumenta. Asimismo se puede observar cómo los porcentajes de error mayores corresponden a pozos profundos, con gastos reducidos, comprobándose que tanto la profundidad como el gasto del pozo tienen una influencia considerable en el cálculo de las caídas de presión.

Esto es debido a que ambos parámetros (profundidad y gasto del pozo) afectan la diferencia entre la temperatura a la salida del pozo y en el fondo del mismo. Debido a lo anterior se propone una ecuación que considere tanto la profundidad como el gasto en el pozo para el cálculo del factor de corrección por temperatura, mismo que deberá aplicarse a las presiones calculadas con los parámetros reológicos del lodo medidos a la temperatura de salida del lodo en el pozo. La ecuación propuesta es del tipo:

POZO Nombre y No.	LODO	DENSID. (gr/c.c.)	VISC.	VISC.	PTO. CED. lb/100 pie ²	TOBERAS No. Y Dia.	PRESIÓN
	E.I. Marca		APARE. (Cp)	PLA. (Cp)			BNA. (PSI)
1.Ocuap.201	Perfoil	2.00	75	55	40	3-16	439
2.Palapa 1	Perfoil	2.02	105	88	34	3-16	665
3.Arrastr.3D	Perfoil	1.76	72	55	34	3-16	672
4.Luna 22	Drilex	1.92	61	57	8	3-16	815
5.Iride 151	Drilex	1.65	46	42	8	3-16	496
6.Tapan.201	Perfoil	2.00	110	100	20	3-16	703
7.Luna 23	Perfoil	1.62	57	42	27	3-16	91
8.Luna 4	Perfoil	1.83	68	52	32	3-30 (S/T)	8
9.Caletón 1	Perfoil	1.84	105	89	32	3-18	285
10.Luna 33	Drilex	1.67	80	62	36	2-14, 1-15	355

Tabla 1. Condiciones reológicas de los lodos en diez pozos seleccionados para el estudio de caídas de presión.

POZO Nombre y No.	LODO E.I. Marca	AGUJERO (Pulgadas)	GASTO (Gal/min)	PROF. (m)	PRESIÓN MEDIDA (PSI)	PRESIÓN CALCULADA (PSI)	ERROR (%)
1.Ocuap.201	Perfoil	8.375	316	5722	2485	2769	11.4
2.Palapa 1	Perfoil	12	387	4531	2556	2761	8.02
3.Arrastr.3D	Perfoil	9.5	417	3600	2270	2381	4.88
4.Luna 22	Drilex	12	440	3160	2414	2521	4.43
5.Iride 151	Drilex	12.25	370	2100	1420	1465	3.16
6.Tapan.201	Perfoil	12	400	5140	2840	3193	12.42
7.Luna 23	Perfoil	5.875	160	5612	2698	3285	21.75
8.Luna 4	Perfoil	5.875	155	5193	2584	3140	21.51
9.Caletón 1	Perfoil	9.5	336	6238	2414	2742	13.58
10.Luna 33	Drilex	8.375	250	5574	1562	1794	14.85

Tabla 2. Profundidades, gastos y presiones medidas y calculadas con su respectivo porcentaje de error.

$$F_{c_t} = \left(\frac{C}{Q}\right) * Prof. + 1 \quad (1)$$

Donde:

F_{c_t} = Factor de corrección por temperatura.

C = Constante a determinarse en base a las mediciones efectuadas.

Q = Gasto del pozo en galones/minuto.

Prof. = Profundidad del pozo en metros.

La ecuación anterior corresponde a una familia de rectas que intersecta el eje de las “Y” en el valor = 1, lo anterior hace que cuando la profundidad del pozo sea igual a 0, el factor de corrección por temperatura sea igual a 1 y la pendiente de la recta estará determinada por los valores que tengan la profundidad y el gasto del pozo.

Ajustando el valor de la constante “C” en la ecuación anterior para calcular el factor de corrección por temperatura, con los datos de las presiones calculadas y ajustándolos a los valores de presiones medidas de la tabla 2, se llega a un valor de $C = - 5.8 \times 10^{-3}$ o $C = - 0.0058$, por lo que el factor de corrección propuesto por temperatura será igual a:

$$F_{c_t} = \left[\left(\frac{-0.0058}{Q}\right) * Prof.\right] + 1 \quad (2)$$

Donde:

F_{c_t} = Factor de corrección por temperatura propuesto.

Q = Gasto en el pozo en galones/minuto.

Prof. = Profundidad del pozo en metros.

El factor de corrección propuesto, obtenido con los datos de gasto y profundidad del pozo deberá multiplicarse a la presión calculada con los parámetros reológicos medidos a la temperatura de salida del pozo y el resultado obtenido será un valor que tendrá errores marginales con respecto a los valores reales, lo anterior podrá determinarse analizando los valores de la tabla 3, donde se comparan los valores medidos con los valores calculados afectados con el factor de corrección por temperatura propuesto, asimismo se podrá observar la diferencia entre presiones medidas y calculadas sin el factor de corrección de temperatura, dichos valores aparecen en las tablas 2 y 3, pudiéndose ver las magnitudes considerables de los errores, especialmente en pozos profundos con bajos gastos.

La media o promedio del error entre las presiones medidas y las calculadas aplicando el factor de corrección por temperatura propuesto en los diez pozos analizados es de $\bar{E} = -1.36$ psi y la media o promedio del porcentaje del error es de $\% \bar{E} = -0.012$ %, como se indica en la tabla 3, asimismo la desviación estándar (S) del error y porcentaje de error respectivamente fueron las siguientes: $S = 49.22$ psi y $S = 1.78$ %.

El cálculo de presiones en el sistema hidráulico del pozo con un margen de error promedio de 1.36 psi y 0.012 % pueden considerarse como marginales, que no afectarán en nada el desarrollo del programa hidráulico del pozo y los máximos errores probabilísticos que se podrán alcanzarse utilizando este factor de corrección por temperatura serán los correspondientes a la

desviación estándar del error, que son 49.2 psi y 1.78 %, lo cual confirma que los errores que se tendrán en el cálculo de caídas de presión en el sistema con lodos de emulsión inversa, utilizando el factor de corrección por temperatura propuesto, serán errores marginales que no afectarán el desarrollo del programa hidráulico del pozo.

POZO Nombre y No.	GASTO (Gal/min)	PROF. (m)	PRESIÓN MEDIDA (psi)	PRESIÓN CALCULADA sin Fc (psi)	PRESIÓN CALCULADA con Fc (psi)	ERROR c/Fc (psi)	%ERROR c/Fc (%)
1.Ocuap.201	316	5722	2485	2769	2478.18	6.8	-0.275
2.Palapa 1	387	4531	2556	2761	2573.51	-17.5	0.680
3.Arrastr.3D	417	3600	2270	2381	2261.77	8.2	-0.363
4.Luna 22	440	3160	2414	2521	2415.98	-1.9	0.081
5.Iride 151	370	2100	1420	1465	1416.77	3.2	-0.227
6.Tapan.201	400	5140	2840	3193	2955.02	-115	3.892
7.Luna 23	160	5612	2698	3285	2616.71	81.2	-3.106
8.Luna 4	155	5193	2584	3140	2529.83	54.1	-2.141
9.Caletón 1	336	6238	2414	2742	2446.74	-32.7	1.338
10.Luna 33	250	5574	1562	1794	1562	0	0.000
Ē (PROM) =						-1.36	-0.012

Tabla 3. Presiones medidas y calculadas utilizando el factor de corrección por temperatura propuesto (“F_c”) con su respectivo error calculado en psi y en porcentaje.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El factor de corrección por temperatura propuesto con la ecuación número 2, podrá utilizarse en todos los pozos petroleros en la cuenca del Golfo de México y a menos que el gradiente geotérmico en el área específica de la perforación sea radicalmente diferente al promedio mencionado de la zona sureste de México, los cálculos de caídas de presión utilizando este factor de corrección en pozos con lodos de emulsión inversa, tendrán errores marginales o despreciables entre las presiones calculadas y las reales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- McMordie, W.C. y otros.** (1974). The Effect of Temperature and Pressure on the Viscosity of Oil Base Muds. Paper No. SPE-4947, Dallas, Texas. U. S. A.
- De la Torre Ramos, E.** (1987). Hidráulica de fluidos de emulsión inversa en perforación rotatoria. Tesis de maestría en Ingeniería Petrolera.

División de Estudios de Postgrado. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México.

- Metzner, A.B. and Reed, J.C.** (1955). Flow of Non-Newtonian Fluids-Correlation of the Laminar, Transition and Turbulent- Flow Regions. A. I. Ch. E. Journal.
- Dodge, D.W. and Metzner, A.B.** (1959). Turbulent Flow of Non-Newtonian Systems. A. I. Ch. E. Journal.
- Raymond, L.R.** (1969). Temperature Distribution in a Circulating Drilling Fluid. Paper No. SPE-2320, Austin, Texas.
- Instituto Mexicano del Petróleo y Petróleos Mexicanos,** (1978). Estudio y medición del gradiente geotérmico en diez diferentes campos de la zona sureste de México en el intervalo de 1 000 a 5 000 metros de profundidad. Villahermosa, Tabasco. México.

Resultados de algunos Métodos de Exploración no Sísmica en diferentes regiones gasopetrolíferas del occidente y centro de Cuba

Manuel Enrique Pardo Echarte¹ y Osvaldo Rodríguez Morán¹

¹ Centro de Investigaciones del Petróleo (CEINPET). Churrucá, No.481, e/ Vía Blanca y Washington, El Cerro. C. P. 12000. La Habana, Cuba. E-mail: pardo@ceinpet.cupet.cu.

RESUMEN

Está bien documentado el hecho de que la generalidad de las acumulaciones de hidrocarburos tienen escapes o microfiltraciones los cuales son predominantemente verticales, así como que los mismos pueden ser detectados y cartografiados utilizando diversos métodos no convencionales de exploración y no sísmicos. La expresión superficial de la microfiltración de hidrocarburos puede tomar variadas formas, las cuales determinan el desarrollo de diversos métodos de detección, tanto directos (geoquímica de gases hidrocarburos) como indirectos (**Complejo Redox**), así como de los métodos geofísicos no sísmicos (magnético, eléctrico y aerogammaespectrométrico), morfométricos y de teledetección. Los beneficios en el uso de los métodos no sísmicos y no convencionales de exploración, integrados con los datos geológicos y de los métodos convencionales, se traducen, en una mejor evaluación de los prospectos y del riesgo de exploración. Los materiales fuentes lo constituyen: los mapas gravimétrico (reducción Bouguer 2.3 t/m³) y aeromagnético (reducido al polo) a escala 1:50 000; los mapas aerogammaespectrométricos (canales K, Th y U (Ra)) a escala 1:100 000; los Modelos de Elevación Digital (90 x 90 m y 30 x 30 m) y; los mapas digitales de las manifestaciones de hidrocarburos y de los pozos petroleros de la República de Cuba a escala 1:250 000. En algunos casos, se dispone de la información de los métodos geofísico-geoquímicos no convencionales de exploración (**Complejo Redox**) realizados con el propósito del reconocimiento y validación de determinados complejos anómalos de interés, la cual

se ofrece también. El procesamiento consistió en la separación regional-residual de los campos gravimétrico y morfométrico, en el cálculo de la derivada vertical y de la relación de los canales espectrométricos K/Th. Se ofrece una versión de la cartografía de sectores de interés gasopetrolífero en el occidente y centro de Cuba, vinculados al petróleo convencional de la Unidad Tectono-Estratigráfica Placetás y al del nivel Jurásico, a partir de la presencia de un complejo de anomalías indicadoras que considera los siguientes atributos: sutiles máximos gravimétricos locales (en la proximidad o dentro de los mínimos regionales); máximos magnéticos locales de muy baja amplitud; mínimos de la relación K/Th y máximos locales de U (Ra) en su periferia, y; máximos del relieve residual. Los resultados de los métodos geofísico-geoquímicos no convencionales de exploración (**Complejo Redox**) dados, fundamentalmente, por los incrementos locales de los contenidos de V, Pb y Zn, validan positivamente los resultados anómalos anteriores.

Palabras claves: Métodos no convencionales de exploración de hidrocarburos, gravimetría, aeromagnetometría, aerogammaespectrometría, métodos morfométricos, **Complejo Redox**.

ABSTRACT

It is well documented that most hydrocarbon accumulations have escapes or microseepage that are predominantly vertical, as well as that they can be detected and mapped using various non-conventional and non-seismic

exploration methods. The surface expression of hydrocarbon microseepage can take a variety of forms, which determine the development of several detection methods, both direct (hydrocarbon gas geochemistry) and indirect (**Redox Complex**), as well as non-seismic geophysical methods (magnetic, electrical and airborne gamma spectrometry), morphometric and remote sensing. Benefits in the use of non-seismic and non-conventional exploration methods, integrated with geological data and conventional methods, result in a better evaluation of prospects and exploration risk. The source materials are: the gravimetric (Bouguer reduction 2.3 t/m^3) and aeromagnetic (reduced to the pole) maps at a scale of 1:50 000; airborne gamma spectrometry maps (channels K, Th and U(Ra)) at scale 1:100 000; the Digital Elevation Models (90 x 90 m and 30 x 30 m); digital maps of hydrocarbon shows and oil wells of the Republic of Cuba at a scale of 1:250 000. In some cases, information is available on non-conventional geophysical-geochemical exploration methods (**Redox Complex**) performed for the purpose of recognizing and validating certain anomalous complexes of interest, which is also offered). The processing consisted in the regional-residual separation of the gravimetric and morphometric fields, the calculation of the vertical derivative and of the K/Th ratio. A mapping of sectors of oil-gas interest in Western and Central Cuba, related to the conventional oil of the Placetas Tectonic- Stratigraphic Unit and the Jurassic level, is based on the presence of a complex of indicator anomalies. It considers the following attributes: subtle local gravimetric maxima (in or near regional minima); very low amplitude local magnetic maxima; minimum of the K/Th ratio and local maxima of U (Ra) at its periphery, and; maxima of residual relief. The results of the non-conventional geophysical-geochemical exploration methods (**Redox Complex**), mainly given by the local increases in the contents of V, Pb and Zn, positively validate the previous anomalous results.

Keywords: Non-conventional methods of hydrocarbon exploration, gravimetry, aeromagnetism, airborne gamma spectrometry, morphometric methods, **Redox Complex**.

RESUMO

Está bem documentado que a maioria das acumulações de hidrocarbonetos tem fugas ou microfiltrações que são predominantemente verticais, bem como que podem ser de-

tectadas e mapeadas usando vários métodos não convencionais de exploração e não sísmicos. A expressão superficial da microfiltração de hidrocarbonetos pode assumir uma variedade de formas, que determinam o desenvolvimento de diversos métodos de detecção, direto (geoquímica de gás de hidrocarbonetos) e indireto (**Redox Complex**), bem como métodos geofísicos não sísmicos (magnético, elétrico e aerogammaspectrométrico), morfométrico e sensoriamento remoto. Os benefícios no uso de métodos de exploração não sísmicos e não convencionais, integrados com dados geológicos e métodos convencionais, resultam em uma melhor avaliação das perspectivas e do risco de exploração. Os materiais de origem são: os mapas gravimétrico (redução de Bouguer $2,3 \text{ t/m}^3$) e aeromagnético (reduzido ao pólo) na escala 1:50 000; mapas aerogammaspectrométricos (canais K, Th e U(Ra)) na escala 1:100 000; Modelos Digital de Elevação (90 x 90 m e 30 x 30 m) e; mapas digitais de demonstrações de hidrocarbonetos e poços de petróleo da República de Cuba a uma escala de 1:250 000. Em alguns casos, a informação está disponível em métodos de exploração geofísica-geoquímica não convencionais (**Redox Complex**) realizados com o objetivo de reconhecer e validar certos complexos anômalos de interesse, o que também é oferecido. O processamento consistiu na separação regional-residual dos campos gravimétrico e morfométrico, no cálculo da derivada vertical e da relação dos canais espectrométricos K/Th. É oferecida uma versão da cartografia de setores de interesse gasopetrófilo na Cuba Ocidental e Central, ligada ao óleo convencional da Unidade Tectono-Estratigráfica Placetas e ao nível Jurássico, com base na presença de um complexo de anomalias de indicadores que considera os seguintes atributos: máximos gravimétricos locais sutis (na vizinhança ou dentro dos mínimos regionais); máxima magnética local de muito baixa amplitude; mínimo da relação K/Th e máximos U(Ra) locais na sua periferia, e; alívio local residual. Os resultados dos métodos geoquímico-geoquímicos de exploração não-convencional (**Redox Complex**), principalmente dados pelos aumentos locais nos conteúdos de V, Pb e Zn, validam positivamente os resultados anômalos anteriores.

Palavras-chave: Métodos não convencionais de exploração de hidrocarbonetos, gravimetria, aeromagnetometria, aerogammaspectrometria, métodos morfométricos, **Redox Complex**.

1.0 INTRODUCCIÓN

La exploración sísmica es insuperable para proporcionar información estructural y estratigráfica, así como para la cartografía y la obtención de imágenes de trampas y reservorios. Sin embargo, en diversas situaciones geológicas, los datos sísmicos aportan poca o ninguna información acerca de si una trampa está cargada de hidrocarburos o no. En otros casos, cuando la adquisición es difícil y extremadamente costosa o, la calidad de la información es pobre debido a la geología o a las condiciones superficiales poco favorables, son los métodos de exploración no sísmicos, en particular los métodos no convencionales de exploración, los únicos que pueden aportar información sobre sutiles trampas estratigráficas. Algunos de los métodos geofísicos tradicionales de exploración en tierra no sísmica para petróleo y gas consideran los campos potenciales (gravimetría y aero-magnetometría) y, de forma más limitada, la aerogammaespectrometría (AGE). Según Dobrin y Savit (1988); Garland (1989) y Gubins (1997), la gravimetría permite la cartografía geólogo-estructural de grandes unidades, la búsqueda de estructuras locales en la cubierta sedimentaria y, también, el detallamiento de los principales rasgos tectónicos y otros alineamientos con los cuales se vinculan los recursos energéticos. Según los mismos autores, en la aeromagnetometría, la capacidad de cartografiar rasgos geólogo-estructurales se refuerza por la posibilidad de detectar y cartografiar anomalías de poca amplitud con las cuales se vinculan los procesos más superficiales de mineralización magnética secundaria sobre las ocurrencias de petróleo y gas. También sobre ellas, la descomposición de las arcillas en los suelos producto del mismo factor, la microfiltración de los hidrocarburos ligeros, provoca los mínimos de radiación y de la relación K/Th observados, con incrementos locales de U(Ra) en su periferia, para cuya cartografía resulta de utilidad la AGE (Pardo y Rodríguez, 2016).

El uso de otros métodos no convencionales de exploración como el morfométrico y las técnicas geofísico-geoquímicas no convencionales (**Complejo Redox**) se fundamentan en la asociación de anomalías geomórficas residuales positivas y de un complejo anómalo de atributos físico-químicos, respectivamente, sobre las ocurrencias de petróleo y gas.

El territorio de Cuba es privilegiado por su contrastante geología alpina, su clima tropical, que condiciona la presencia de suelos residuales o cortezas de meteoriza-

ción *in situ* y la presencia de un relieve eminentemente llano. Cuba cuenta con un levantamiento aeromagnético y aerogamma-espectrométrico a escala 1:50 000 de todo el territorio nacional y un levantamiento gravimétrico, a la misma escala, en un 80 % del mismo, así como de los Modelos de Elevación Digital (MEDS) 90 x 90 m y 30 x 30 m, por lo que se dispone de una cobertura informativa adecuada para el estudio de las regiones a investigar. La tarea geológica planteada al procesamiento e interpretación geólogo-geofísica consiste en la cartografía de posibles nuevos objetivos gasopetrolíferos para la fundamentación de la exploración petrolera en distintas regiones y bloques terrestres (la Ciénaga de Majaguillar, Este de Motembo [Bloque 9], alrededores del yacimiento Jarahueca [Bloque 13] y la región Pina-Ceballos [Noreste de Cuenca Central]) del occidente y centro de Cuba. La cartografía de los posibles nuevos objetivos gaso-petrolíferos se realiza a partir de la presencia de un complejo de anomalías indicadoras fundamentalmente, gravimétricas, aerogammaespectrométricas y morfométricas. A tales fines, se procesa el campo gravimétrico y aeromagnético a escala 1:50 000, la aerogammaespectrometría a escala 1:100 000 de los diferentes territorios y los Modelos de Elevación Digital (MEDS) 90 x 90 m o 30 x 30 m. En algunos casos, se dispone de la información de los métodos geofísico-geoquímicos no convencionales de exploración (**Complejo Redox**) realizados con el propósito del reconocimiento y validación de determinados complejos anómalos de interés, la cual se ofrece también.

Por razones de confidencialidad, se nos obliga a presentar los mapas e imágenes Google sin coordenadas.

1.1 Premisas geológicas que fundamentan la aplicación de los métodos geofísico-geoquímico-morfométricos no convencionales de exploración

Desde el punto de vista de la Geoquímica Superficial, según Price (1985), Schumacher (1996) Saunders *et. al.*, (1999) y Pardo y Rodríguez (2016), las Premisas Geológicas que fundamentan la aplicación de los métodos geofísico-geoquímico-morfométricos no convencionales de exploración son las siguientes:

- Las “Chimeneas Reductoras” son columnas de rocas mineralizadas por encima de los depósitos de hidrocarburos las cuales fueron modificadas por la migración vertical de estos y/o por alguna otra asociación de especies reducidas (iones metálicos) los

cuales "se oxidan", por acción microbiana, para crear un ambiente reductor.

- Los principales productos de la oxidación microbiana de los hidrocarburos (CO_2) y de la reducción microbiana del azufre (H_2S), cambian drásticamente el pH/Eh del sistema.

Los cambios en pH/eH resultan en cambios de la estabilidad mineral:

- Precipitación de diversos carbonatos.
- Descomposición de las arcillas (como consecuencia, aumentan las concentraciones de sílice y alúmina).
- Precipitación de la magnetita/maghemita, de los sulfuros de hierro (como la pirrotina y la griegita) o la coprecipitación del hierro y/o el manganeso con calcita en los cementos carbonatados sobre los depósitos de hidrocarburos.

La respuesta morfométrica, geofísica y geoquímica a los cambios de la estabilidad mineral anteriores es la siguiente:

- La mineralización secundaria de carbonato de calcio y la silicificación, resultan en materiales superficiales más densos y resistentes a la erosión (formación de anomalías geomórficas residuales positivas y máximos de resistividad).
- La descomposición de la arcilla es la responsable de los mínimos de radiación reportados sobre los yacimientos de petróleo: el potasio es lixiviado del sistema hacia los bordes de la proyección vertical del depósito de hidrocarburos, donde precipita resultando en un "halo" de valores altos. El thorio permanece relativamente fijo en su distribución original dentro de los minerales pesados insolubles; de ahí que sean observados mínimos de la relación K/Th rodeados de máximos sobre los depósitos gasopetrolíferos. En la periferia de las ocurrencias se observan máximos de U(Ra).
- La conversión de los minerales de hierro no magnéticos (óxidos y sulfuros) en variedades magnéticas más estables resulta en un aumento de la Susceptibilidad Magnética,

correlacionable con el mínimo del Potencial Redox lo cual justifica la integración de ambas técnicas. También se observan anomalías de Polarización Inducida.

- El arribo a la superficie de los Iones Metálicos contenidos en los hidrocarburos (V, Ni, Fe, Pb, y Zn, entre otros) condicionan la presencia de una sutil anomalía de estos elementos en el suelo y de un ligero cambio en la coloración del mismo el cual es reflejado por anomalías de la Reflectancia Espectral, hechos que justifican la integración de estas técnicas.

2.0 MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Información y sus fuentes

Los materiales utilizados y sus fuentes son las siguientes:

- Mallas del campo gravimétrico y aeromagnético a escala 1:50 000 y, aerogammaespectrométrico (canales: It, U, Th y K) a escala 1:100 000 de la República de Cuba (Mondelo *et al.*, 2011).
- Modelos de Elevación Digital (MEDS) (90 x 90 m) y (30 x 30 m) de la República de Cuba (Sánchez *et al.*, 2015) y (<https://lpdaac.usgs.gov/>), respectivamente.
- Mapas Digitales de las Manifestaciones de Hidrocarburos y de los Pozos Petroleros de la República de Cuba a escala 1:250 000 (Colectivo de Autores, 2008 y 2009, respectivamente).

2.2 Procesamiento e interpretación de la información

El procesamiento de la información geofísico-morfométrica se llevó a cabo utilizando el *software Oasis Montaj* versión 7.01.

El campo gravimétrico (Reducción Bouguer, 2.3 t/m^3) se sometió a la separación regional-residual a partir de la Continuación Analítica Ascendente (CAA) para las alturas de 500 y 2 000 m (dadas por el orden de profundidad de los posibles objetivos gasopetrolíferos) y a la derivada vertical (DV). Los citados objetivos se caracterizan por sutiles máximos locales dentro o en la periferia de los mínimos regionales que corresponden al Cinturón de Cabalgamientos Norte Cubano o a la Cuenca Central.

El campo aeromagnético se sometió a la Reducción al Polo y a la DV, buscando cartografiar distintos ali-

neamientos tectónicos y sutiles máximos locales relacionados con la mineralización magnética secundaria subsuperficial sobre las ocurrencias de petróleo y gas.

Para la AGE se determinó la relación K/Th , señalando los mínimos presumiblemente vinculados con zonas activas de microfiltración de hidrocarburos ligeros, y, señalando los máximos locales de $U(Ra)$ en su periferia.

Los Modelos de Elevación Digital (MDT) (90 x 90 m o 30 x 30 m) se sometieron a la separación regional-residual a partir de la CAA a 500 m (según la experiencia del autor principal en este tipo de trabajo) para

contornear las zonas de máximos residuales, vinculadas con los procesos de ligera carbonatización y silicificación subsuperficiales que tienen lugar como resultado de la microfiltración activa de hidrocarburos ligeros sobre las ocurrencias de petróleo y gas.

3.0 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Región de la Ciénaga de Majaguillar

Una imagen de la ubicación geográfica de la región de estudio se presenta en la Figura 1.

Según Valdivia *et al.*, 2015 el modelo geológico



Figura 1. Imagen satelital con la ubicación geográfica de la región de la Ciénaga de Majaguillar.

para el área de estudio se concibe como el levantamiento local de escamas de la Unidad Tectono-Estratigráfica (UTE) Placetas, representadas por el Gpo. Veloz + Formación Carmita (presumibles reservorios, productivos en niveles de 1 000 - 1 500 m, fuentes del petróleo no convencional presente en la Fm. Peñón del postorogénico). Estas unidades están recubiertas discordantemente por Vía Blanca + Fm. Peñalver del sinorogénico. Discordantemente están sobre ellas, la Fm. Perla y la Fm. Peñón (formación productiva del petróleo no convencional) del postorogénico, encontrándose el tope de esta última en un intervalo de

profundidad de 500 - 1 000 m. Las ofiolitas, a juzgar por los datos aeromagnéticos, no parecen estar presentes en estas escamas (estando retiradas más al Sur) por lo que la sección en esta área es totalmente sedimentaria.

El establecimiento de sectores de interés gasopetrolífero, vinculados al petróleo convencional de la UTE Placetas, a partir de la presencia de un complejo de anomalías indicadoras considera los siguientes atributos: sutiles máximos gravimétricos locales (trazo verde) (en la proximidad de los mínimos regionales), debido al levantamiento de los carbonatos, más densos; máximos mag-

néticos locales de muy baja amplitud (trazo marrón); mínimos de la relación K/Th (trazo rojo) y máximos locales de U(Ra) (trazo rosado) en su periferia y; máximos del relieve residual (MED 30 x 30 m) (trazo negro). Como información geológica complementaria se consideró la presencia de pozos petroleros (puntos negros) en la región. Todos estos atributos se han representado en los resultados de la Interpretación Compleja de métodos geofísico-morfométricos (no sísmicos) de la Figura 2. Según esta figura, el sector de mayor interés para el petróleo convencional de la UTE Placetas, corresponde a un área A (6 - 7 km²), al noroeste de la región de Ciénaga de Majaguillar, contorneada por un mínimo regional de la relación K/Th y un máximo regional de U(Ra), (sector con presumible mayor número de microfiltraciones activas de hidrocarburos ligeros). En la misma se encierran las mayores y concurrentes anomalías por los distintos atributos considerados. Además, se observa otra área B (4 - 5 km²), al noreste de la región, contorneada por un máximo regional de U(Ra) y en la cual se encierran menores y menos concurrentes anomalías por los distintos atributos considera-

dos (sector con presumible menor número de microfiltraciones activas de hidrocarburos ligeros). La misma se considera con una perspectividad menor para el petróleo convencional de la UTE Placetas y mayor para el petróleo no convencional de la Fm. Peñón. Como otros sectores (de menor área) de posible interés gasopetrolífero para el petróleo no convencional de la Fm. Peñón se consideran los de concurrencia de al menos dos tipos de atributos, tomando los sutiles máximos gravimétricos locales como el principal de ellos.

Una comparación de los resultados de la Interpretación Compleja con el Esquema Estructural por el tope de la Fm. Peñón, según la sísmica y la perforación en el territorio (Valdivia *et al.*, 2015) (Figura 3), arroja una correspondencia aceptable entre los máximos gravimétricos locales y los elevados sísmicos locales. Como resultado contrastante, lo constituye la correspondencia del área perspectiva A y del sector occidental del área perspectiva B, de interés para el petróleo convencional de la UTE Placetas, con sectores deprimidos del tope de la Fm. Peñón.

Los sectores perspectivas para el petróleo conven-

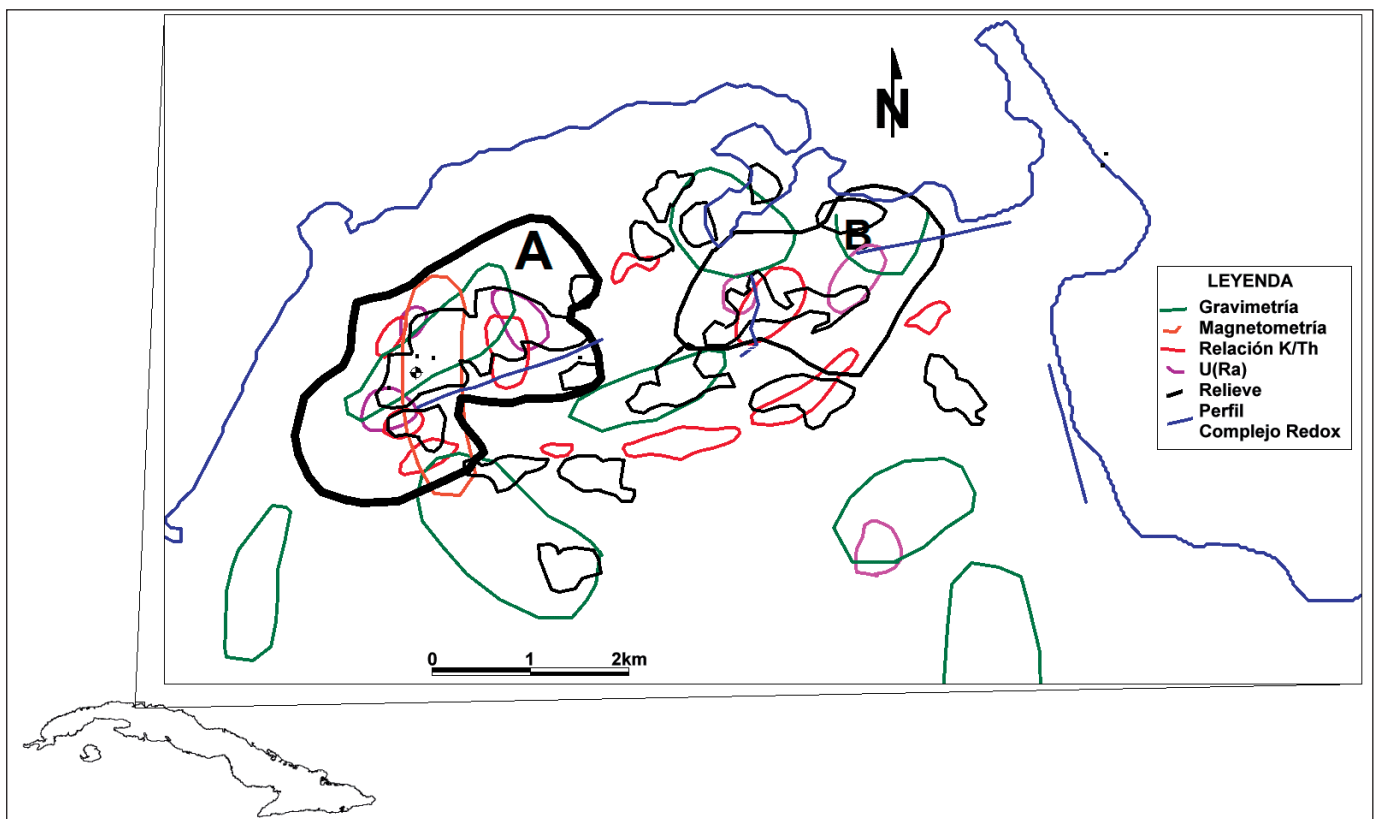


Figura 2. Resultados de la Interpretación Compleja de métodos geofísico-morfométricos (no sísmicos) en la región de la Ciénaga de Majaguillar.

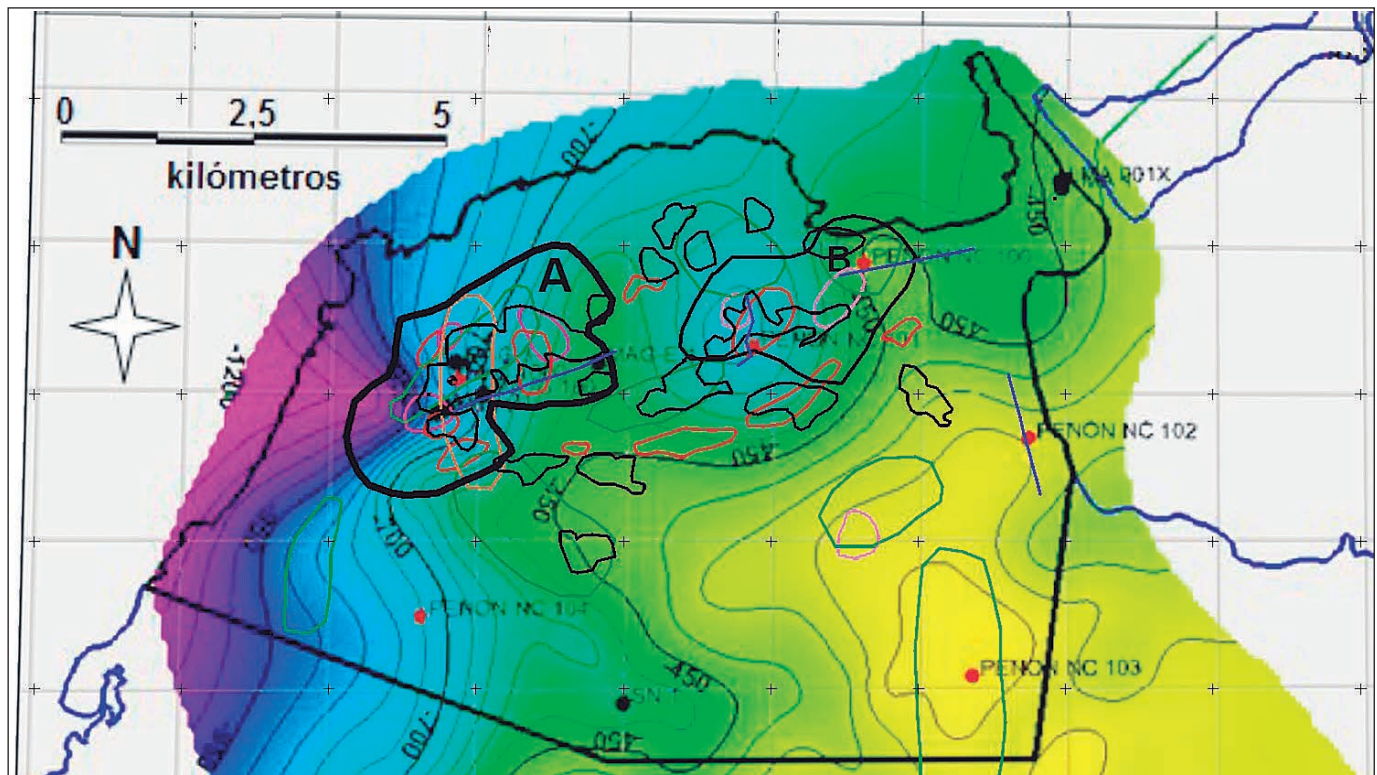


Figura 3. Comparación de los resultados de la Interpretación Compleja con el Esquema Estructural por el tope de la Fm. Peñón, según la sísmica y perforación en el territorio (Tomado de Valdivia et al., 2015; modificado por Pardo, M.).

cional de la UTE Placetas, A y B, han sido reconocidos en tierra por tres perfiles del **Complejo Redox** (uno en el sector A y dos en el B; líneas azules, en las Figuras 2 y 3). También se ha realizado un cuarto perfil, fuera del área anómala, paralelo a la costa oriental de la región, sobre un levantamiento del tope de la Fm. Peñón, por datos sísmicos (perspectivo para el petróleo no convencional de la Fm. Peñón) en la localidad del pozo propuesto Peñón NC 102.

Los resultados del **Complejo Redox**, dados fundamentalmente por los incrementos locales de los contenidos de V, Pb y Zn, validan, positivamente, tanto los resultados anómalos (petróleo convencional de la UTE Placetas) de la Interpretación Compleja (Figura 2), como también los resultados no anómalos (petróleo no convencional de la Fm. Peñón) sobre el referido levantamiento del tope de la Fm. Peñón:

En el área A, (perfil Mj-1 de la Figura 4) el perfil es anómalo (incrementos de los contenidos de V, Pb, Zn) en toda su extensión (>2 000 m), con algunas interrupciones internas típicas de los procesos de microfiltración de hidrocarburos ligeros para este tipo de objetivo de petróleo convencional.

En el área B, el perfil occidental (perfil MajagUILlar-ME de la Figura 5) presenta una anomalía central (300-400 m de extensión) de V, Pb, y Zn, correlacionada con incrementos de la Susceptibilidad Magnética y el Potencial Redox (posible escape gaseoso), confirmando la perspectiva para el petróleo convencional de la UTE Placetas de esa parte del área. El segundo perfil, más al Este, sobre una elevación del tope de la Fm. Peñón (por datos sísmicos) (perfil NC 100 de la Figura 6), presenta una anomalía central (700 - 800 m de extensión) de V, Pb, y Zn, correlacionada con incrementos de la Susceptibilidad Magnética y el Potencial Redox (posible escape gaseoso) en su extremo oriental, confirmando, también, la perspectiva para el petróleo convencional de la UTE Placetas y/o del petróleo no convencional de la Fm. Peñón de esa parte del área B.

En el perfil paralelo a la costa oriental de la región, sobre el referido levantamiento del tope de la Fm. Peñón, por datos sísmicos (perfil NC 102 de la Figura 7), perspectivo para el petróleo no convencional de la Fm. Peñón, se observa también una anomalía central (900 - 1 100 m de extensión) de V, Pb, y Zn, la más intensa de toda la región, correlacionada con incrementos de la Susceptibilidad Magnética y el Potencial Redox

(posible escape gaseoso), confirmando la perspectiva para el petróleo no convencional de la Fm. Peñón de esa parte del área, no anómala por parte del complejo de métodos utilizados en este estudio.

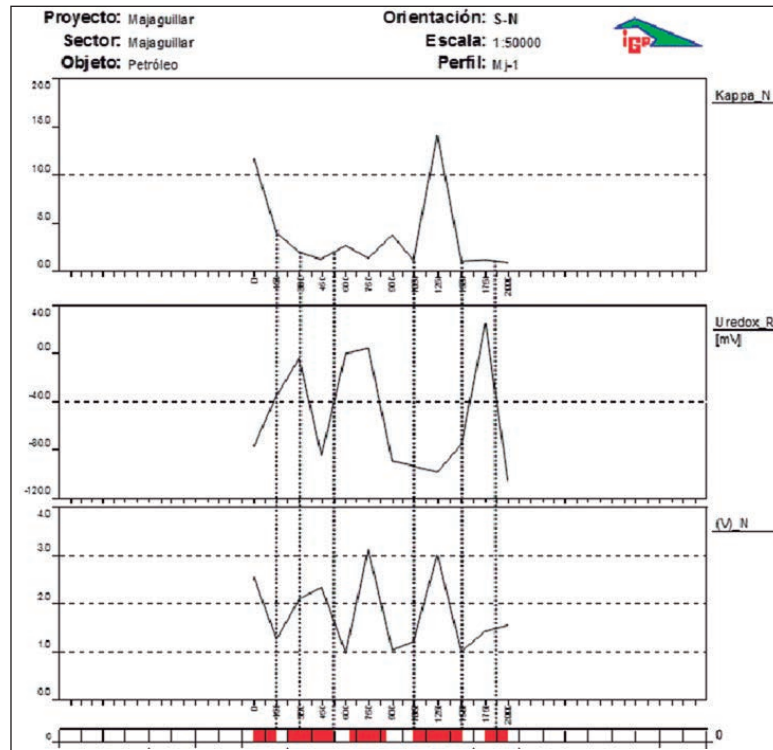


Figura 4. Perfil del *Complejo Redox* sobre el área perspectiva A para el petróleo convencional de la UTE Placetas.

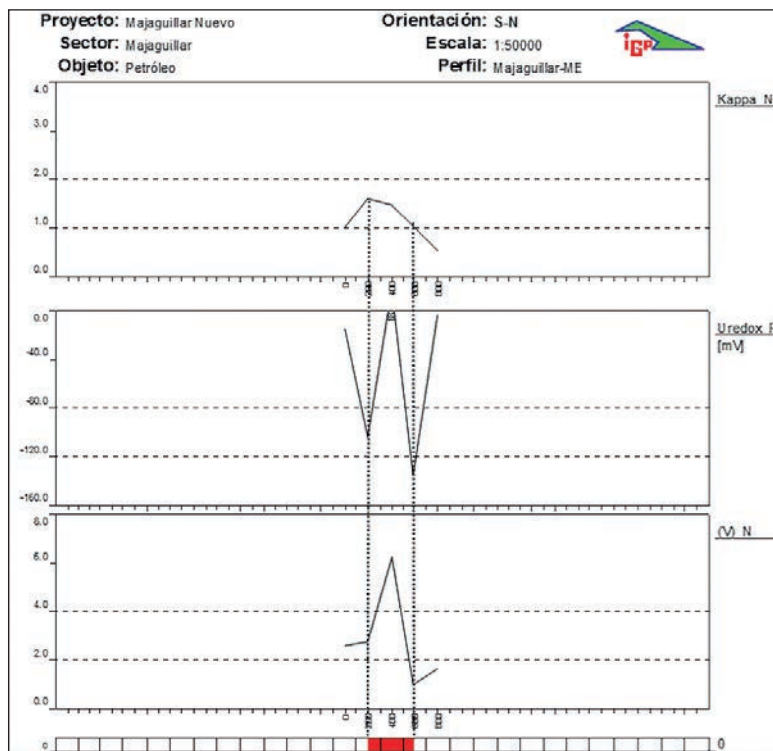


Figura 5. Perfil occidental del *Complejo Redox* sobre el área perspectiva B para el petróleo convencional de la UTE Placetas.

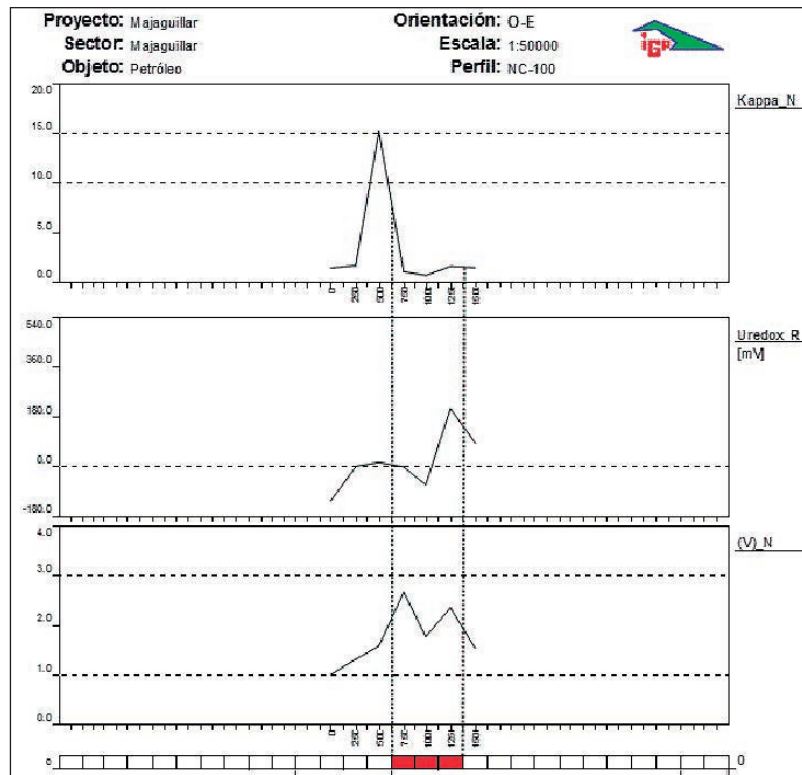


Figura 6. Perfil oriental del Complejo Redox en el área perspectiva B para el petróleo convencional de la UTE Placetas y/o del petróleo no convencional de la Fm. Peñón, sobre un levantamiento del tope de la Fm. Peñón, por datos sísmicos.

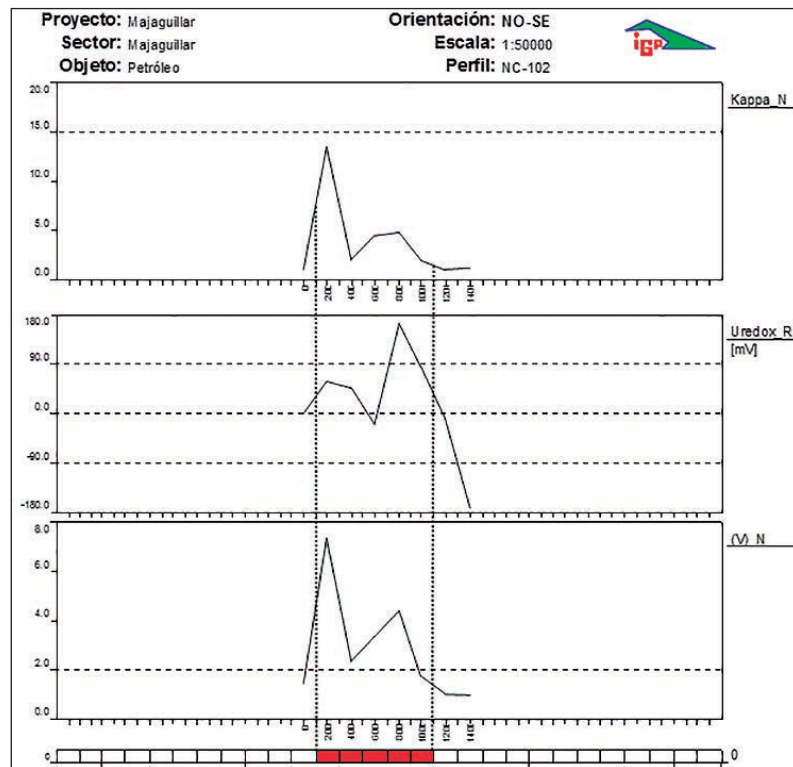


Figura 7. Perfil del **Complejo Redox** paralelo a la costa oriental, sobre en un levantamiento del tope de la Fm. Peñón, por datos sísmicos, perspectivo para el petróleo no convencional de la Fm. Peñón.

3.2 Región E de Motembo (Motembo-Carbonatos, Bloque 9)

Una imagen de la ubicación geográfica de la región de estudio se presenta en la Fig. 8.

El modelo geológico para el área de estudio se concibe como el levantamiento local de una escama de la UTE Placetas, representadas por el Gpo. Veloz aflorando en la localidad, lo cual restringe la perspectividad gasopetrolífera del sector al petróleo del nivel Jurásico con un sello anhidrítico (también Jurásico).

El establecimiento del interés gasopetrolífero de este sector está dado a partir de la presencia de un complejo de anomalías indicadoras que considera los siguientes atributos:

- Un sutil máximo gravimétrico local (trazo azul grueso) (en la proximidad de un mínimo regional), el cual debe estar reflejando una estructura local positiva (debido al levantamiento de los carbonatos, más densos);

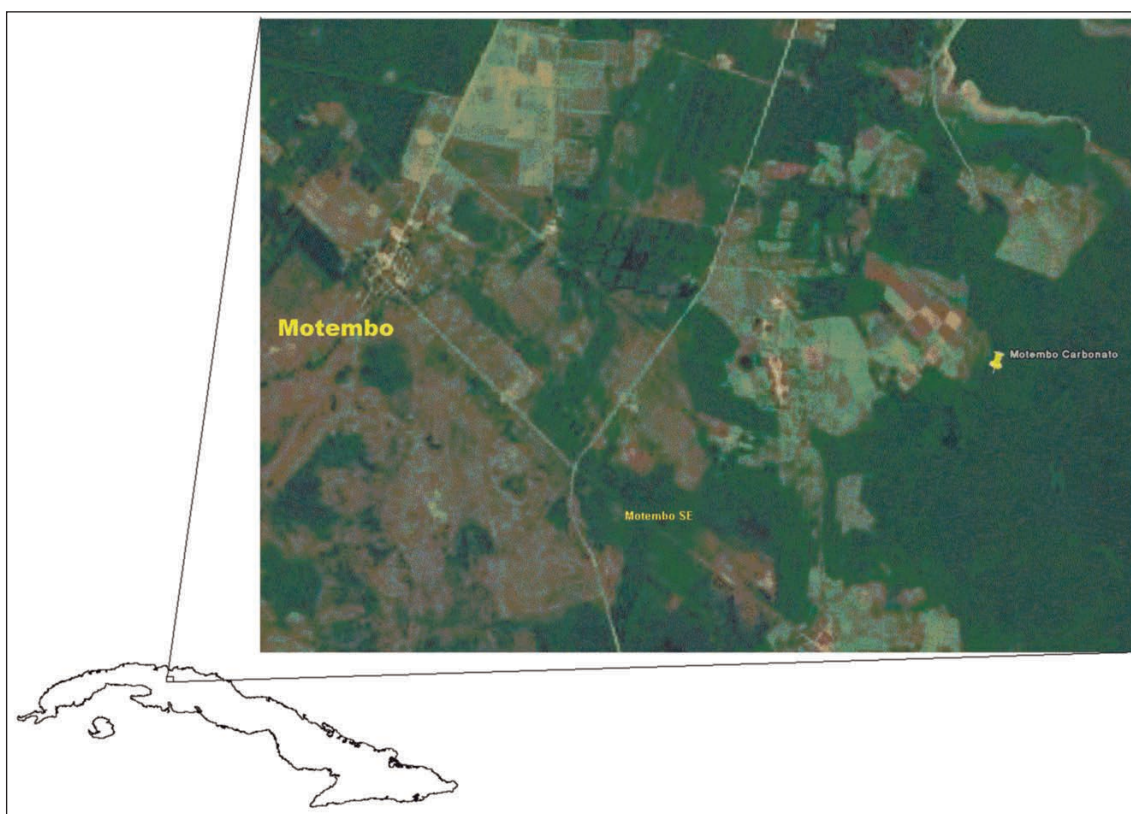


Figura 8. Imagen satelital mostrando la ubicación espacial de la región Este de Motembo (Objetivo Motembo Carbonatos-Bloque 9).

- Un mínimo de Potasio y de la relación K/Th (trazo rojo) con un máximo local de U(Ra) (trazo rosado) en su periferia y;
- Máximos del relieve residual-anomalía geomórfica positiva (trazo negro).

Como información geológica complementaria se consideró la presencia de pozos petroleros (puntos negros) en la región (Colectivo de Autores, 2009). Todos estos atributos se han representado en los resultados la Interpretación Compleja de métodos geofísico-morfométricos (no

sísmicos) de la Figura 9 y los mismos revelan un sector de interés gasopetrolífero el cual se recomienda sea validado mediante un perfil de reconocimiento del Complejo Redox. En la misma figura, al SO de esta localidad, se ha cartografiado, dentro del macizo ultrabásico Motembo, otro sector de interés (Motembo SE) el cual ha sido validado, positivamente, por un perfil del **Complejo Redox** (línea azul con dirección NO-SE) para nafta somera en serpentinitas, tipo Motembo. Las investigaciones realizadas en este objetivo se describen, detalladamente, en otra publicación (Pardo Echarte y Cobiella Reguera, 2017).

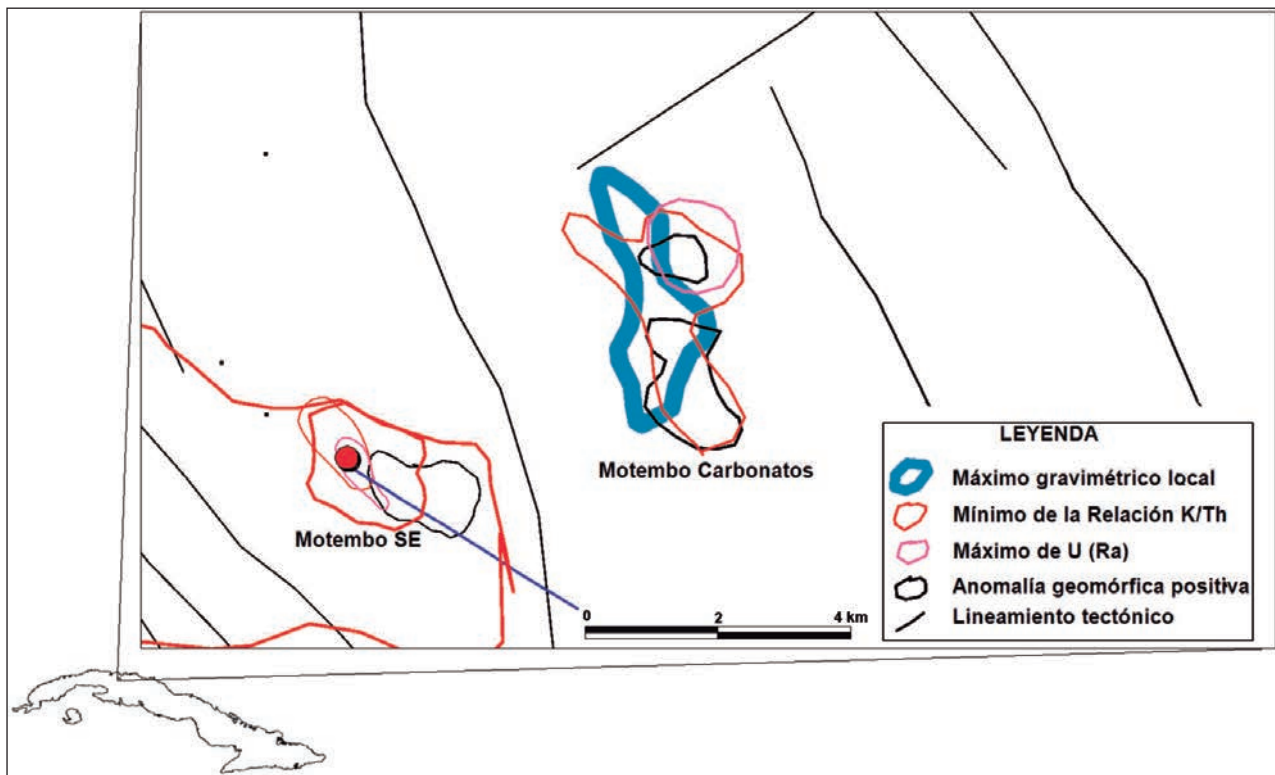


Figura 9. Resultados de la Interpretación Compleja de métodos geofísico-morfométricos (no sísmicos) en la región al Este de Motembo (Objetivo Motembo Carbonatos-Bloque 9).

3.3 Región de los alrededores del yacimiento Jarahuca (Bloque 13)

Una imagen de la ubicación geográfica de la región de estudio se presenta en la Figura 10.

El modelo geológico para el área de estudio, según Pérez Martínez *et al.*, (2013), concibe las trampas generadas durante los cabalgamientos y con el rediseño transpresivo, considerando las perspectivas para el petróleo convencional de la UTE Placetas. Como sello principal se considera las secuencias arcillosas orogénicas, y subordinadamente, con menor relevancia, las serpentinitas que pudieran constituir sellos locales.

Para el establecimiento de sectores de interés gasopetrolífero en esta región, se ha considerado imprescindible caracterizar el complejo anómalo del yacimiento Jarahuca (A), a partir de la presencia de un conjunto de anomalías indicadoras que consideran los siguientes atributos:

- Un máximo gravimétrico local (trazo negro grueso), el cual debe estar reflejando una estructura local dentro de la ventana tectónica Jarahuca (levantamiento de las ofiolitas, más densas), coincidente con una

anomalía magnética la cual caracteriza a las ofiolitas aflorantes en esa localidad;

- Mínimos de la relación K/Th (trazo azul grueso) con máximos locales de U(Ra) (trazo rojo) en su periferia y;
- Un máximo del relieve residual-anomalía geomórfica positiva (trazo negro).

Como información geológica complementaria se consideró la presencia de manifestaciones de hidrocarburos (pentágonos negros) en la región (Colectivo de Autores, 2008). Todos estos atributos se han representado en los resultados la Interpretación Compleja de métodos geofísico-morfométricos (no sísmicos) de la Figura 11. Aunque el complejo anómalo descrito (A) resulta muy específico y, al parecer, irreplicable en la región, encuentra parcial analogía en el complejo anómalo B (con la misma posición estructural). Los complejos C y D, diferentes en cuanto a su posición estructural, se caracterizan por importantes anomalías de la relación K/Th. Los últimos tres complejos anómalos mencionados (B, C y D) revelan, junto con A, una zona extendida de posible interés gasopetrolífero, la cual se recomienda sea validada mediante



Figura 10. Imagen satelital mostrando la ubicación espacial de la región en los alrededores del yacimiento Jarahuca (Bloque 13).

perfiles de reconocimiento del **Complejo Redox**, para cada complejo anómalo.

3.4 Región Pina-Ceballos (Noreste de Cuenca Central)

Una imagen de la ubicación geográfica de la región de estudio se presenta en la Figura 12.

Según Martínez Rojas *et al.*, (2007), las primeras investigaciones para hidrocarburos en la Cuenca Central datan de los años 50' cuando compañías norteamericanas descubrieron los yacimientos Jatibonico (1954), Cristales (1955) y Catalina (1956). El yacimiento Jatibonico se descubrió a partir de datos gravimétricos, al igual que la ubicación de la falla Cristales, sin embargo, la estructura Catalina se reveló a partir de las primeras investigaciones sísmicas realizadas en la región (1955-1956). En la década de los 60' la Cuenca Central fue la mayor región productora de petróleo del país, lo que trajo aparejado un desarrollo acelerado de los trabajos de exploración los cuales se han extendido por más de 50 años de investigación y desarrollo.

El modelo geológico para el área de estudio, según los mismos autores, considera reservorios del tipo tobas, areniscas y conglomerados tobáceos, asociados al

Arco Volcánico Cretácico, y su sello en secuencias arcillosas de la cobertura sinorogénica cretácica y postorogénica (Maastrichtiano–Eoceno Inferior).

Para el establecimiento de sectores de interés gasopetrolífero en esta región, se ha considerado imprescindible caracterizar el complejo anómalo del yacimiento Pina, a partir de la presencia de un conjunto de anomalías indicadoras que consideran los siguientes atributos:

- Sutiles máximos gravimétricos locales (a partir de la residual a 500 m y la derivada vertical) (trazo azul), los cuales reflejan estructuras positivas (por el levantamiento de los volcánicos, más densos), dentro de los límites de las isolíneas del campo aeromagnético reducido al polo, en el intervalo entre -240 nT y -50 nT, el cual define, al parecer, una zona con características geológico-estructurales similares desde el punto de vista regional.
- Mínimos de la relación K/Th (trazo rojo), con máximos locales de U(Ra) (trazo rosado) en su periferia y;
- Ausencia de anomalías geomórficas.

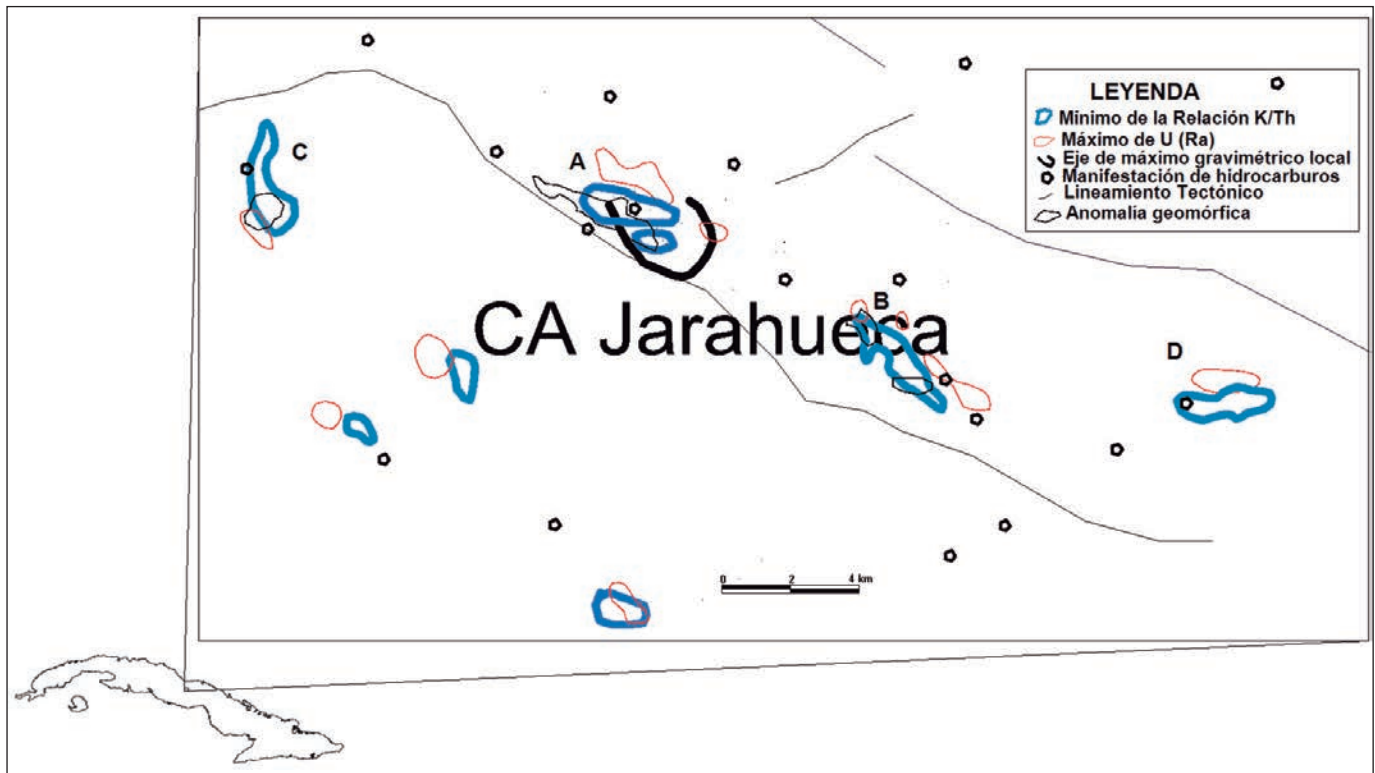


Figura 11. Resultados de la Interpretación Compleja de métodos geofísico-morfométricos (no sísmicos) en la región de los alrededores del yacimiento Jarahueca (Bloque 13).



Figura 12. Imagen satelital mostrando la ubicación espacial de la región Pina-Ceballos, Noreste de Cuenca Central.

Como información geológica complementaria se consideró la presencia de pozos de petróleo (puntos negros) en la región (Colectivo de Autores, 2009). Todos estos atributos se han representado en los resultados la Interpretación Compleja de métodos geofísico-morfométricos (no sísmicos) de la Figura 13.

El complejo anómalo del yacimiento Pina ha sido reconocido en otras cuatro nuevas localidades (una de ellas es el sector Paraíso) para las cuales se ha recomendado la realización de perfiles de reconocimiento por el **Complejo Redox** (líneas azules cortas) para su validación. Otros prospectos como Brujo, Ceballos y Pina Sur presentan complejos anómalos semejantes al del yacimiento Pina pero incompletos en alguno de sus atributos. Otro perfil de reconocimiento del **Complejo Redox** (línea azul larga), al SO de Pina Sur pasando cerca de Ceballos, ha sido propuesto por el equipo de especialistas de la Empresa de Perforación y Extracción de Petróleo (EPEP) Majagua.

El yacimiento Pina, ha sido reconocido en tierra por dos perfiles del **Complejo Redox**, uno de los cuales se presenta en la Figura 14. El mismo es un ejemplo de la respuesta en los elementos químicos V, Pb y Zn que valida la presencia de hidrocarburos en la profundidad

(800 - 1 000 m), en este caso, sobre dos cúpulas cercanas. En la figura se observa también la correlación de los incrementos del Pb normalizado con los incrementos de la Susceptibilidad Magnética normalizada (diseminación magnética) y los decrementos del Potencial Redox reducido (ambiente reductor).

4.0 CONCLUSIONES

Se ofrece una versión de la cartografía de sectores de interés gasopetrolífero en el occidente y centro de Cuba, vinculados al petróleo convencional de la Unidad Tectono-Estratigráfica Placetas y al del nivel Jurásico, a partir de la presencia de un complejo de anomalías indicadoras que considera los siguientes atributos: sutiles máximos gravimétricos locales (en la proximidad o dentro de los mínimos regionales); máximos magnéticos locales de muy baja amplitud; mínimos de la relación K/Th y máximos locales de U(Ra) en su periferia, y; máximos del relieve residual. Los resultados de los métodos geofísico-geoquímicos no convencionales de exploración (**Complejo Redox**) dados, fundamentalmente, por los incrementos locales de los contenidos de V, Pb y Zn, validan positivamente los resultados anómalos anteriores.

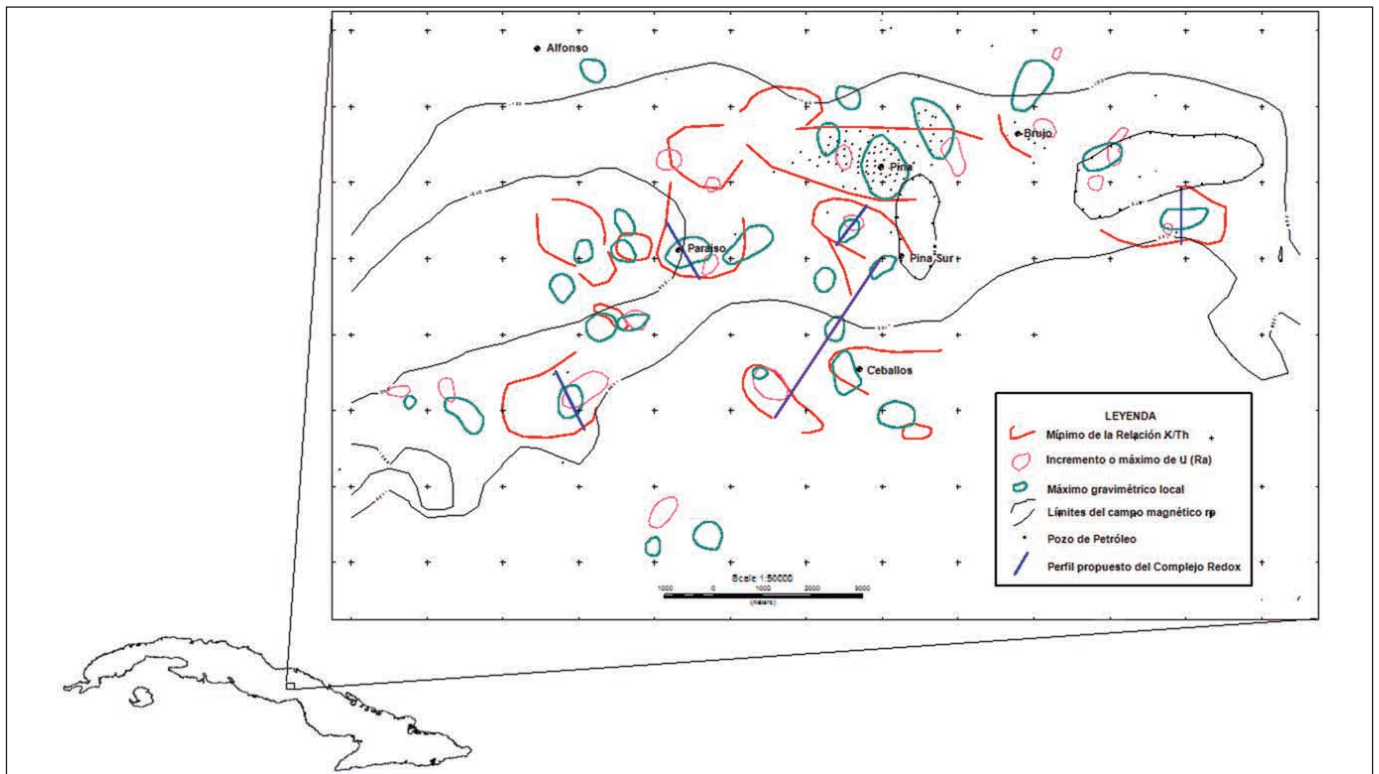


Figura 13. Resultados de la Interpretación Compleja de métodos geofísico-morfométricos (no sísmicos) en la región de Pina-Ceballos (Noreste de Cuenca Central).

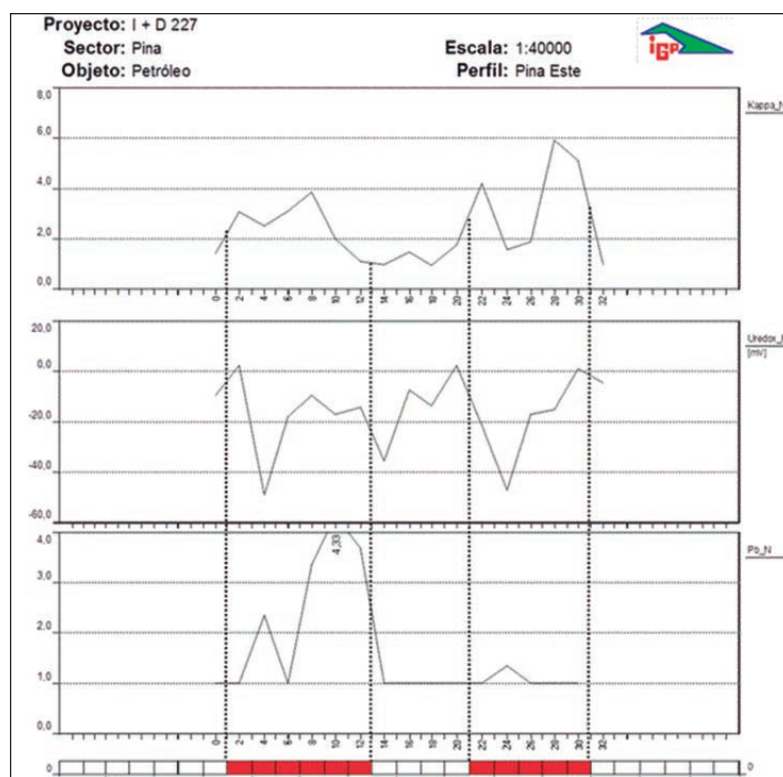
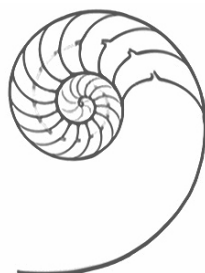


Figura 14. Perfil del *Complejo Redox* sobre el yacimiento Pina.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Colectivo de Autores**, 2008, Mapa Digital de las Manifestaciones de Hidrocarburos de la República de Cuba a escala 1:250 000. Inédito. Centro de Investigaciones del Petróleo, La Habana.
- Colectivo de Autores**, 2009, Mapa Digital de los Pozos Petroleros de la República de Cuba a escala 1:250000. Inédito. Centro de Investigaciones del Petróleo, La Habana.
- Dobrin, M. B. and Savit O. H.**, 1988, Introduction to Geophysical Prospecting. McGraw Hill International Editions. Fourth Edition, 867 pp.
- Garland, G. D.**, 1989, Proceedings of Exploration 87. Third Decennial International Conference on Geophysical and Geochemical Exploration for Minerals and Groundwater. Special Volume 3. Ontario Geological Survey, 914 pp.
- Gubins, A.G.**, 1997, Proceedings of Exploration 97. Fourth Decennial International Conference on Mineral Exploration. Prospectors and Developers Association of Canada, 1065 pp.
- Martínez Rojas, E., Iparraguirre J. L. y otros**, 2007, Configuración tectono-estructural de la región noreste de Cuenca Central: una visión preliminar. Memorias del I Congreso de Petróleo y Gas (PETROGAS' 2007), 6pp.
- MED 30x30 m de la República de Cuba** (<https://lpdaac.usgs.gov>) USGS, NASA.
- Mondelo, F., Sánchez Cruz R., y otros**, 2011, Mapas geofísicos regionales de gravimetría, magnetometría, intensidad y espectrometría gamma de la República de Cuba, escalas 1: 2 000 000 hasta 1:50 000. Inédito. IGP, La Habana, 278p.
- Pardo Echarte, M. E., Cobiella Reguera, J. L.**, 2017, Oil and Gas Exploration in Cuba: Geological-Structural Cartography using Potential Fields and Airborne Gamma Spectrometry. Springer Briefs in Earth System Sciences, DOI 10.1007/978-3-319-56744-0.
- Pardo Echarte, M. E., Rodríguez Morán, O.**, 2016, Unconventional Methods for Oil & Gas Exploration in Cuba. Springer Briefs in Earth System Sciences, DOI 10.1007/978-3-319-28017-2.

- Pérez Martínez, Y., Valdivia, C. M. y otros**, 2013, Proyecto I+D 7054, Etapa 1.4 “Informe final sobre fundamentación de pozo en el Bloque 13”. Inédito Centro de Investigaciones del Petróleo, La Habana, 75 p.
- Price, L. C.**, 1985, A critical overview of and proposed working model for hydrocarbon microseepage. US Department of the Interior Geological Survey. Open-File Report 85-271.
- Sánchez Cruz, R., Mondelo F. y otros**, 2015, Mapas Morfométricos de la República de Cuba para las Escalas 1:1 000 000–1:50 000 como apoyo a la Interpretación Geofísica. Memorias VI Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, VIII Congreso Cubano de Geofísica. <http://www.cgiar-csi.org/data/srtm-90m-digital-elevation>.
- Saunders, D. F., Burson, K. R., Thompson, C. K.**, 1999, Model for Hydrocarbon Microseepage and Related Near-Surface Alterations: AAPG Bulletin, V. 83 (1999), No. 1 (January 1999), p. 170-185.
- Schumacher, D.**, 1996, Hydrocarbon-induced alteration of soils and sediments; in D. Schumacher and M. A. Abrams, eds., Hydrocarbon migration and its near-surface expression: AAPG Memoir 66, p. 71-89.
- Valdivia, C. M. y otros**, 2015, Esquema estructural por el tope de la Fm. Peñón en base a datos sísmicos y de perforación; en Proyecto I+D 7093 “Evaluación del Potencial de Petróleo no Convencional en Cuba”. Inédito. Centro de Investigaciones del Petróleo, La Habana, p. 47.



Resultados de los Métodos de Exploración no Sísmica en la región Habana-Matanzas, Cuba

Manuel Enrique Pardo Echarte¹ y Lourdes Jiménez de la Fuente¹

¹ Centro de Investigaciones del Petróleo (CEINPET). Churrucá, No.481, e/ Vía Blanca y Washington, El Cerro. C. P. 12000. La Habana, Cuba. E-mail: pardo@ceinpet.cupet.cu.

RESUMEN

Se ofrece una versión de la cartografía geólogo-estructural de la región de estudio en base a los datos gravi-magnéticos y, de la cartografía de sectores de interés gasopetrolífero vinculados al petróleo convencional de la Unidad Tectono-Estratigráfica Placetas a partir de la presencia de un complejo de anomalías indicadoras. Los materiales fuentes lo constituyen: los mapas gravimétrico (reducción Bouguer 2.3 t/m³) y aeromagnético (reducido al polo) a escala 1:50 000; los mapas aerogammaespectrométricos (canales K, Th y U(Ra)) a escala 1:100 000; el Modelo de Elevación Digital (90 x 90 m) y; un mapa de resultados de la teledetección para la búsqueda de sectores gasopetrolíferos prospectivos en la región de Guanabo-Seboruco. El procesamiento consistió en la separación regional-residual de los campos gravimétrico y morfométrico, en el cálculo de la derivada de la inclinación del campo magnético y de la relación de los canales espectrométricos K/Th. El complejo anómalo indicador considera los siguientes atributos: máximos gravimétricos locales de baja amplitud; mínimos de la relación K/Th y máximos locales de U (Ra) en su periferia; máximos locales del relieve residual y anomalías de teledetección. Este resultado constituye un complemento de información no sísmica imprescindible para la necesaria integración geólogo-geofísica-geoquímica-morfométrica del territorio. Como resultado de la cartografía geólogo-estructural a partir de los datos gravi-magnéticos se puede observar una amplia distribución del Terreno Zaza (volcánico+ofiolitas) en la región de estudio. Las principales depresiones estructurales se concentran a lo largo de una franja de dirección latitudinal que abarca las localidades

siguientes (de Este a Oeste): Suroeste de Bahía de Matanzas, Ceiba Mocha, Aguacate, Bainoa, Tapaste, Cuatro Caminos, Managua y Santiago de las Vegas. Sobre la base de las estimaciones a partir del campo magnético reducido al polo, la profundidad al tope de un objetivo localizado al Oeste de Bainoa, dentro de esta franja, es de 1 350 - 1 450 m, lo que da una idea de la potencia sedimentaria en la misma. Existe otra depresión importante, de rumbo transversal (N-S) a la franja anterior, que pasa por la localidad de San José de las Lajas. Otra depresión estructural tiene una clara expresión en el mínimo gravi-magnético de Punta Rubalcava al NNE de Matanzas. Los resultados de la cartografía prospectiva integrada consideran, en un primer nivel de prospectividad, las localidades (Boca de Jaruco, Jibacoa del Norte y Este de Aguacate) donde aparecen todas las anomalías (atributos) estudiadas con excepción de las morfométricas. En un segundo nivel de prospectividad se consideran las localidades que corresponden a la combinación de dos tipos de anomalías diferentes (11 localidades).

Palabras claves: Gravimetría; aeromagnetometría; aerogammaespectrometría; morfometría; teledetección; cartografía geólogo-estructural; cartografía prospectiva integrada; exploración no sísmica; métodos no convencionales de exploración de hidrocarburos.

ABSTRACT

A version of the geo-structural mapping of the study region, based on the gravitational-magnetic data and the mapping of sectors of gasopetroliferous interest, linked to the conventional oil of the Placetas Tectonic-Strati-

graphic Unit, is offered, based on the presence of a complex of indicator anomalies. The source materials are: the gravimetric (Bouguer reduction 2.3 t / m^3) and aeromagnetic (reduced to the pole) maps at a scale of 1:50 000; airborne gamma spectrometry maps (channels K, Th and U(Ra)) at scale 1:100 000; the Digital Elevation Model (90 x 90 m) and; a results map of remote sensing for the search of perspective gasopetroliferous sectors in the region of Guanabo-Seboruco. The processing consisted in the regional-residual separation of the gravimetric and morphometric fields, the calculation of the derivative of the inclination of the magnetic field and of the ratio of the K/Th spectrometry channels. The anomalous indicator complex considers the following attributes: low-amplitude local gravimetric maxima; minimum K/Th ratio and local maximums of U(Ra) at its periphery; local maximums of residual relief and remote sensing anomalies. This result is a complement of non-seismic information essential for the necessary geological-geo-physical-geochemical-morphometric integration of the territory. As a result of the geo-structural mapping from the gravimagnetic data, a wide distribution of the Zaza Terrain (volcanic + ophiolites) can be observed in the study region. The main structural depressions are concentrated along a latitudinal strip that covers the following locations (from East to West): Southwest of Matanzas Bay, Ceiba Mocha, Aguacate, Bainoa, Tapaste, Cuatro Caminos, Managua and Santiago de las Vegas. Based on estimates of the reduced at the pole magnetic field, the depth at the top of a target located to the west of Bainoa, within this strip, is 1 350 - 1 450 m, which gives an idea of its sedimentary thickness. There is another major depression, from transversal (N-S) to the previous strip, passing through the town of San José de las Lajas. Another structural depression has a clear expression in the gravi-magnetic minimum of Punta Rubalcava to the NNE of Matanzas. The results of the integrated prospective cartography consider, in a first level of perspective, the localities (Boca de Jaruco, Jibacoa del Norte and Este de Aguacate) where all the studied anomalies (attributes) with the exception of the morphometric ones appear. In a second level of perspective the localities that correspond to the combination of two types of different anomalies (11 localities) are considered.

Keywords: Gravimetry; airborne magnetics; airborne gamma spectrometry; morphometry; remote sensing; ge-

ological-structural mapping; integrated prospective mapping; non-seismic exploration; unconventional methods of hydrocarbon exploration.

RESUMO

Uma versão do mapeamento geoestrutural da região de estudo, com base nos dados gravitacionais-magnéticos e no mapeamento de setores de interesse gasopetroliferous, ligada ao óleo convencional da Unidade Tectono-Estratigráfica Placetas é oferecida, com base na presença de um complexo de anomalias de indicadores. Os materiais de origem são: os mapa gravimétrico (redução de Bouguer $2,3 \text{ t / m}^3$) e aeromagnético (reduzido ao pólo) na escala 1:50 000; mapas aerogammaspectrométricos (canais K, Th e U(Ra)) na escala 1:100 000; Modelo Digital de Elevação (90 x 90 m) e; um mapa de resultados de sensoriamento remoto para a busca de sectores de perspectiva gaso-petroléira na região de Guanabo-Seboruco. O processamento consistiu na separação regional-residual dos campos gravimétrico e morfométrico, no cálculo da derivada da inclinação do campo magnético e da relação dos canais espectrométricos K/Th. O complexo indicador anômalo considera os seguintes atributos: máximos gravimétricos locais de baixa amplitude; mínimo da relação K/Th e máximos U(Ra) locais na sua periferia; alívio local residual e anomalias de sensoriamento remoto. Este resultado é um complemento de informação não sísmica essencial para a necessária integração geológico-geofísica-geoquímico-morfométrica do território. Como resultado do mapeamento geoestrutural dos dados gravimagnéticos, podemos observar uma ampla distribuição do Zaza Terrain (volcanic + ophiolites) na região de estudo. As principais depressões estruturais são concentradas ao longo de uma franja de direção latitudinal que cobre os seguintes locais (do leste ao oeste): Sudoeste da Baía de Matanzas, Ceiba Mocha, Aguacate, Bainoa, Tapaste, Cuatro Caminos, Manágua e Santiago das Vegas. Com base nas estimativas do campo magnético reduzido no pólo, a profundidade no topo de um alvo localizado a oeste de Bainoa, dentro desse faixa, é de 1 350 - 1 450 m, o que dá uma idéia do poder sedimentar em a mesma. Há outra grande depressão, desde um curso transversal (N-S) até a faixa anterior, que passa pela cidade de San José de las Lajas. Outra depressão estrutural tem uma clara expressão no mínimo gravimétrico de Punta Rubalcava para o NNE de Matanzas. Os resultados da cartografia prospectiva integrada consideram, em um primeiro nível de

perspectiva, as localidades (Boca de Jaruco, Jibacoa del Norte e Aguacate Este), onde aparecem todas as anomalias (atributos), com exceção das imagens morfométricas. Em um segundo nível de perspectiva, são consideradas as localidades que correspondem à combinação de dois tipos de diferentes anomalias (11 localidades).

Palavras-chave: Gravimetria; aeromagnetometria; aerogammaspectrometria; morfometria; sensoriamento remoto; mapeamento geológico-estrutural; mapeamento prospectivo integrado; exploração não sísmica; métodos não convencionais de exploração de hidrocarbonetos.

1.0 INTRODUCCIÓN

1.1 Ubicación geográfica y características geológicas

El área de estudio pertenece a la región de Habana-Matanzas, comprendida entre Morro-Cabañas y la Bahía de Matanzas, dentro de los límites aproximados de las coordenadas Lambert Cuba Norte X: 361 000-451 000; Y: 339 000-375 000.

La región de Habana-Matanzas, comprendida entre Morro-Cabañas y Varadero-Cárdenas, es conocida también con el nombre de Franja Norte Petrolera Cubana (FNPC). Según el Colectivo de Autores (2009), la FNPC abarca la faja costera de las provincias de La Habana y Matanzas, incluyendo el acuatorio adyacente, con unos 5 km de ancho y 150 km de largo, donde se han descubierto la mayoría y los más grandes yacimientos del país, aunque es posible que se extienda aún más hacia el Oeste y el Este.

En esta franja se descubrieron, a fines de la década de los 60', los dos yacimientos más grandes de Cuba (Varadero y Boca de Jaruco), aunque su extensión actual quedó establecida a partir de la década de los 90', en que con la participación de compañías extranjeras se realizaron diversas campañas de sísmica 2D y 3D. Estas revelaron un tren de estructuras a lo largo de la costa cuya perforación exploratoria confirmó los yacimientos Puerto Escondido-Canasí, Yumurí-Seboruco y la extensión al Oeste del yacimiento Varadero (Varadero Oeste).

Posteriormente se han descubierto otros yacimientos, por mencionar algunos: Santa Cruz, Tarará, Bacuranao, Jibacoa, Habana del Este y Morro-Cabañas. La densidad de los petróleos encontrados fluctúa entre 11° y 14° API, lográndose, a partir de la perforación dirigida con grandes ángulos (horizontal), pozos con entradas estables del orden de hasta 4 000 barriles/día.

La geología del subsuelo de estos sectores es una de las mejor conocidas del país. Según la fuente antes citada, se caracteriza por varios niveles de pliegues de rampa contra falla inversa de rocas del Margen Continental Norteamericano y su cobertura. Estos pliegues han sido probablemente complicados adicionalmente por accidentes de cizalla. Las rocas deformadas abarcan un intervalo de edad que va desde el Jurásico hasta el Eoceno. Los reservorios están representados por calizas intensamente fracturadas y lixiviadas cubiertas por un sello de arcillas del Paleoceno al Eoceno; ellas tienen sus análogos en los afloramientos de rocas del Margen Continental Norteamericano en Cuba Central (Unidad Tectono-Estratigráfica (UTE) Placetas). Los apilamientos de varios pliegues anticlinales de rampa es uno de los principales objetivos exploratorios. Estos conforman antiformalas que son cartografiables con mucha dificultad por la sísmica. La pobre imagen es el principal obstáculo para el desarrollo de los trabajos exploratorios; solo se observa como horizonte con alta definición dinámica el relacionado directamente con la envolvente de los pliegues escamas. De ahí, que el problema científico planteado a la investigación sea la necesidad de integración de la información geólogo-geofísica-geoquímica-morfométrica del territorio para elevar la efectividad geológica de la exploración y reducir sus riesgos.

1.2 Tarea Geológica

La tarea geológica planteada al procesamiento e interpretación geofísica-morfométrica de la región de estudio y objetivo general de la investigación, consiste en el establecimiento de sectores de interés gasopetrolífero vinculados al petróleo y el gas convencional de la UTE Placetas, a partir de la presencia de un complejo de anomalías geofísico-morfométricas indicadoras. Como otro objetivo se plantea realizar la cartografía geólogo-estructural del territorio. A tales fines, se procesa el campo gravimétrico y aeromagnético a escala 1:50 000, la aerogammaespectrometría (AGE) a escala 1:100 000 y el Modelo de Elevación Digital (MED) 90 x 90 m. Para la integración final se utiliza, como información complementaria, los resultados de la Teledetección (TDT) en el área de Guanabo-Seboruco (Jiménez, 2017).

2.0 MARCO TEÓRICO

2.1 Premisas Geológicas

Desde el punto de vista petrofísico, la tabla a continua-

ción (Tabla 1) muestra los resultados de la Generalización Petrofísica de la Provincia de Matanzas, la cual es muy parecida a la de La Habana. Según la misma, por la alta densidad de los carbonatos K-J, las elevaciones del tope de los mismos pueden causar máximos gravimétricos lo-

cales de baja amplitud. Por la Susceptibilidad Magnética no existen contrastes de importancia en la referida sección (con excepción de los efusivos y las ultrabasitas) por lo que solo se esperan anomalías vinculadas con estos objetivos.

Fm. Geol. o Unid. Geol.	Edad	Litología	Cantd. Muest.	Densidad (t/m ³)			Suscept. Magnét. (10 ⁻³ SI)			
				Min	Max	Prom	Cantd. Muest.	Min	Max	Prom
Jaimanitas	Pleistoc.	Calizas coralinas	48	1.70	2.44	2.12	-	-	-	-
Güines	N ₁ ¹⁻²	Calizas	1094	1.96	2.98	2.45	178	0	0.04	0.02
		Dolomitas	632	2.71	2.85	2.80	-	-	-	-
		Brechas calcáreas	13	2.50	3.17	2.81	13	0.1	2.39	0.34
Peñón	P ₂ ²	Biocalca-renitas y margas	13	2.03	2.70	2.45	53	0	0.54	-
Perla	P ₂ ¹	Margas	68	1.48	2.84	2.11	97	0	0.54	0.05
Vía Blanca	K ₂ ^{cp-m}	Flysch terrígeno	499	1.96	2.92	2.38	15	0	0.56	-
Carmita	K ₂ ^{cm-st}	Calizas y silicitas	-	-	-	2.65	-	-	-	0.05
Amaro	K ₂	Brechas conglomerado calcáreo	32	2.44	2.70	2.58	32	0	0.34	0.16
		Silicitas y arcillas	17	1.85	2.63	2.32	5	0	5.29	-
Chirino	K ₁₋₂	Efusivos	-	-	-	2.57	-	-	-	8.71
		Tobas	-	2.45	2.60	-	-	0.16	18.30	5.43
Grupo Veloz	J ₃ ¹ - K ₁ ^v	Calizas	152 / 62	1.92	2.70	2.28 / 2.57	214	0	0.16	0.03 / 2
		Areniscas	13	2.30	2.40	2.36	-	-	-	-
Constancia	J ₁₋₂ - J ₃	Calizas y areniscas	-	-	-	2.65	-	-	-	-
Complejo Ofiolítico	Tr- J	Serpentinitas	7/2	2.20	2.70	2.37 / 2.63	11/-	0.05	24.67	8.69 / -
		Ultrabasitas	-	-	-	-	-	23.87	39.79	-

Tabla 1. Generalización Petrofísica de la Provincia de Matanzas (Pardo, 2016).

Desde el punto de vista de la Geoquímica Superficial, según Price (1985), Schumacher (1996), Saunders *et. al.*, (1999) y Pardo y Morán (2016), las Premisas Geológicas que fundamentan la aplicación de las técnicas geofísico-geoquímicas-morfométricas no convencionales de exploración son las siguientes:

- Las “Chimeneas Reductoras” son columnas de rocas mineralizadas por encima de los depósitos de hidrocarburos las cuales fue-

ron modificadas por la migración vertical de estos y/o por alguna otra asociación de especies reducidas (iones metálicos) los cuales "se oxidan", por acción microbiana, para crear un ambiente reductor.

- Los principales productos de la oxidación microbiana de los hidrocarburos (CO₂) y de la reducción microbiana del azufre (H₂S), cambian drásticamente el pH/eH del sistema.

Los cambios en pH/Eh resultan en cambios de la estabilidad mineral:

- Precipitación de diversos carbonatos.
- Descomposición de las arcillas (como consecuencia, aumentan las concentraciones de sílice y alúmina).
- Precipitación de la magnetita / maghemita, de los sulfuros de hierro (como la pirrotina y la griegita) o la coprecipitación del hierro y / o el manganeso con calcita en los cementos carbonatados sobre los depósitos de hidrocarburos.

La respuesta morfométrica, geofísica y geoquímica a los cambios de la estabilidad mineral anteriores es la siguiente:

- La mineralización secundaria de carbonato de calcio y la silicificación, resultan en materiales superficiales más densos y resistentes a la erosión (formación de anomalías geomórficas y máximos de resistividad).
- La descomposición de la arcilla es la responsable de los mínimos de radiación reportados sobre los yacimientos de petróleo: el potasio es lixiviado del sistema hacia los bordes de la proyección vertical del depósito de hidrocarburos, donde precipita resultando en un "halo" de valores altos. El thorio permanece relativamente fijo en su distribución original dentro de los minerales pesados insolubles; de ahí que sean observados mínimos de la relación K/Th rodeados de máximos sobre los depósitos gasopetrolíferos. En la periferia se observan máximos (incrementos) de U(Ra).
- La conversión de los minerales de hierro no magnéticos (óxidos y sulfuros) en variedades magnéticas más estables resulta en un aumento de la Susceptibilidad Magnética, correlacionable con el mínimo del Potencial Redox lo cual justifica la integración de ambas técnicas. También se observan anomalías de Polarización Inducida.
- El arribo a la superficie de los Iones Metálicos contenidos en los hidrocarburos (V,

Ni, Fe, Pb, y Zn, entre otros) condicionan la presencia de una sutil anomalía de estos elementos en el suelo. Estas anomalías son el principal indicador de la presencia de hidrocarburos en la profundidad.

3.0 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Información y sus Fuentes

Los materiales utilizados y sus fuentes son las siguientes:

- Mallas del campo gravimétrico y aeromagnetico a escala 1:50 000 y, aerogammaespectrométrico (canales: It, U, Th y K) a escala 1:100 000 de la República de Cuba (Mondelo *et al.*, 2011).
- El MED (90 x 90 m) empleado en este trabajo fue tomado de Sánchez Cruz *et al.*, (2015), con fuente en: <http://www.cgiar-csi.org/data/srtm-90m-digital-elevation>.
- Resultados de la Teledetección (TDT) para la búsqueda de sectores gasopetrolíferos prospectivos en la región de Guanabo-Seboruco (Jiménez, 2017).
- Mapa Geológico Digital de la República de Cuba a escala 1:100 000. Colectivo de Autores (2010).

El procesamiento de la información geofísica-morfométrica se llevó a cabo utilizando el *software Oasis Montaj* versión 7.01.

4.0 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Procesamiento e interpretación de la información

El campo gravimétrico (Reducción Bouguer, 2.3 t/m³) se sometió a la separación regional-residual (a partir de la Continuación Analítica Ascendente (CAA)) para las alturas de 500, 2 000 y 6 000 m, dadas por el orden de profundidad de los posibles objetivos gasopetrolíferos y del estudio sísmico, aunque para el establecimiento de las anomalías locales positivas de baja amplitud, con un orden de profundidad de 500 - 1000 m, se utilizó la derivada vertical (DV) (Figura 1). En el campo local de esta figura, los máximos están asociados a la presencia del Terreno Zaza (volcánicos y ofiolitas) y, los mínimos, a depresiones estructurales. Los resultados de la cartografía gravimétrica (lineamientos y máximos locales) se presentan en la Figura 2.

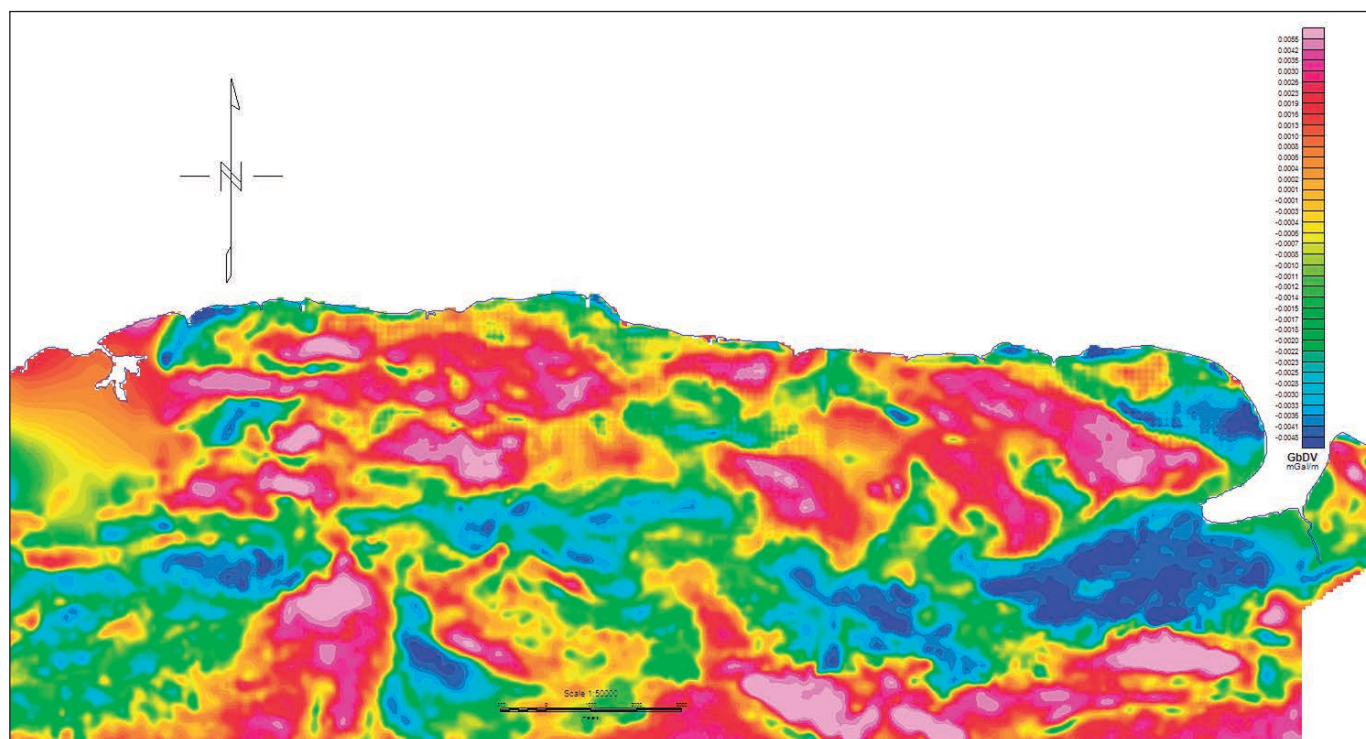


Figura 1. Campo gravimétrico local de la región de estudio a partir de la DV.

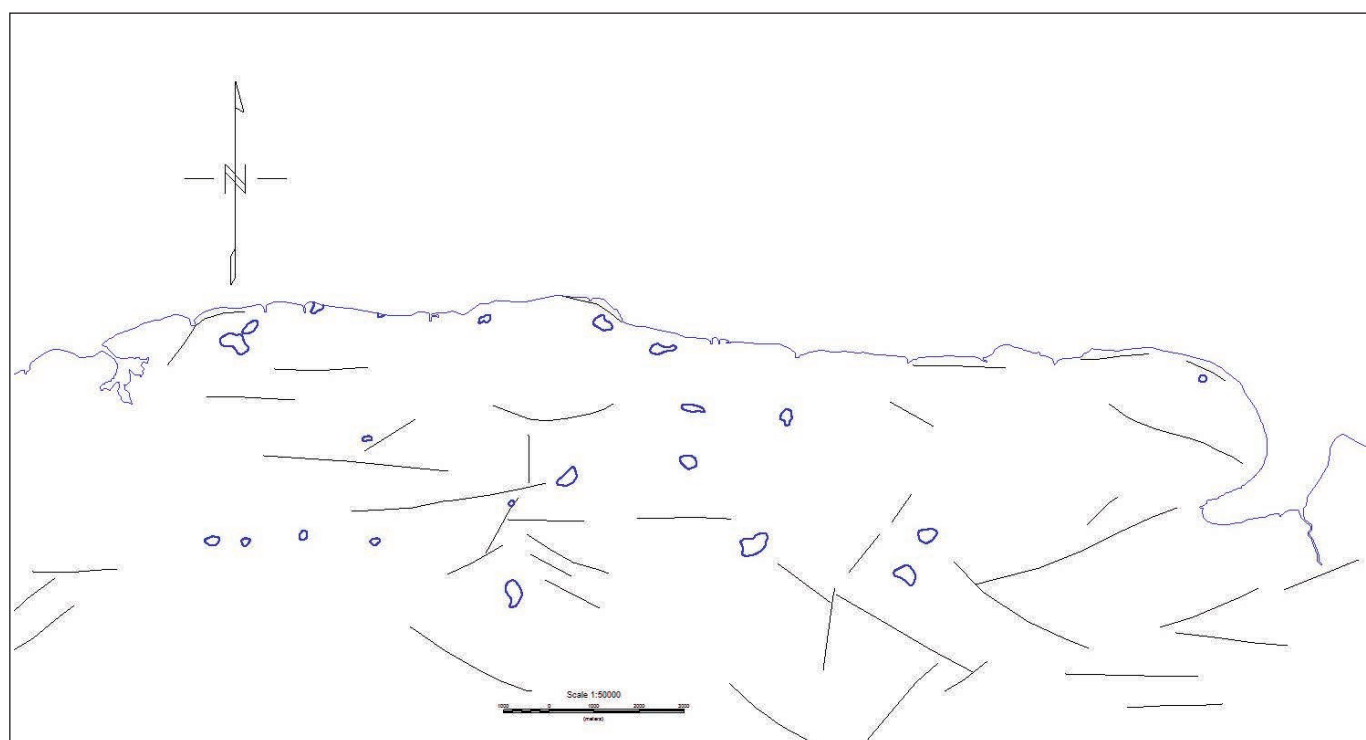


Figura 2. Resultados de la cartografía gravimétrica (lineamientos y máximos locales).

En la aeromagnetometría, la capacidad de cartografiar rasgos geólogo-estructurales se refuerza por la posibilidad de cartografiar anomalías de poca amplitud. Los

cuerpos intrusivos (granitoides) y protusivos (ofiolitas) a menudo se pueden distinguir directamente sobre la base de las observaciones magnéticas. Según Fairhead, *et al.*,

(2009), la derivada de la inclinación del campo magnético total y su derivada horizontal total son útiles para la cartografía estructural y la exploración. La derivada de la inclinación del campo se define como:

$$TDR = \arctan\left(\frac{VDR}{THDR}\right) \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde, VDR y THDR son la primera derivada vertical y la derivada horizontal total, respectivamente, de la intensidad total magnética T, reducida al polo.

$$VDR = \frac{dT}{dzR} \quad (\text{Ecuación 2})$$

$$THDR = \sqrt{\left(\frac{dT}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dT}{dy}\right)^2} \quad (\text{Ecuación 3})$$

La derivada horizontal total de la derivada de la inclinación se define como:

$$HD_TDR = \sqrt{\left(\frac{dTDR}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dTDR}{dy}\right)^2} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Siendo coincidente el eje de las cadenas de máximos de este atributo con límites estructurales o lineamientos tectónicos.

La derivada de la inclinación del campo magnético reducido al polo permite la estimación de la profundidad hasta el tope de objetivos magnéticos, en nuestro caso, presumibles cuerpos ofiolíticos.

El campo aeromagnético se sometió a la Reducción al Polo (Figura 3). En el campo de la figura, los máximos están asociados a la presencia del Terreno Zaza (volcánicos y ofiolitas) y, los mínimos, a depresiones estructurales. Los resultados de la cartografía magnética (lineamientos) se presentan en la Figura 4.

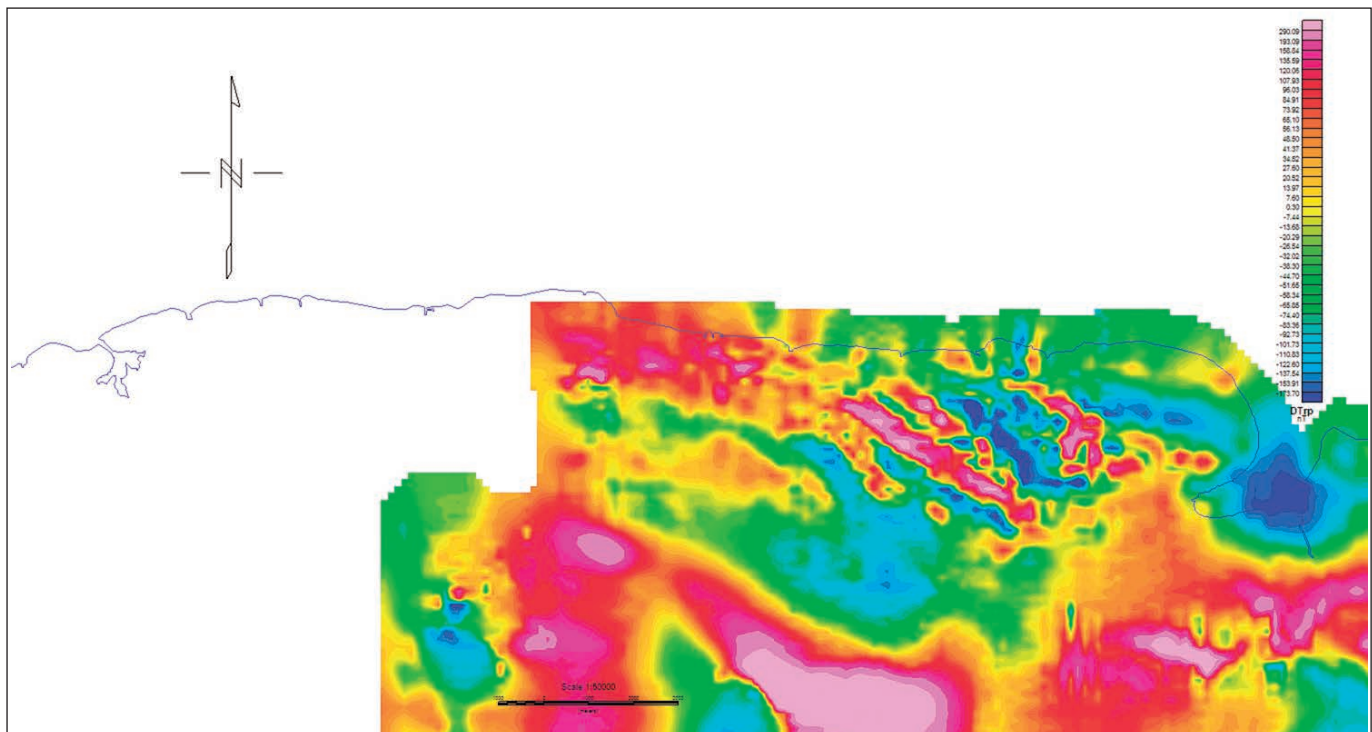


Figura 3. Campo aeromagnético Reducido al Polo de la región de estudio.

Para la aerogammaespectrometría (AGE) se determinó la relación K/Th, con el propósito de señalar los mínimos, presumiblemente vinculados con zonas activas de microfiltración de hidrocarburos ligeros, (Figura 5).

Los resultados de la cartografía AGE (mínimos de la relación K/Th y máximos locales de U(Ra) en su periferia) se presentan en la Figura 6.

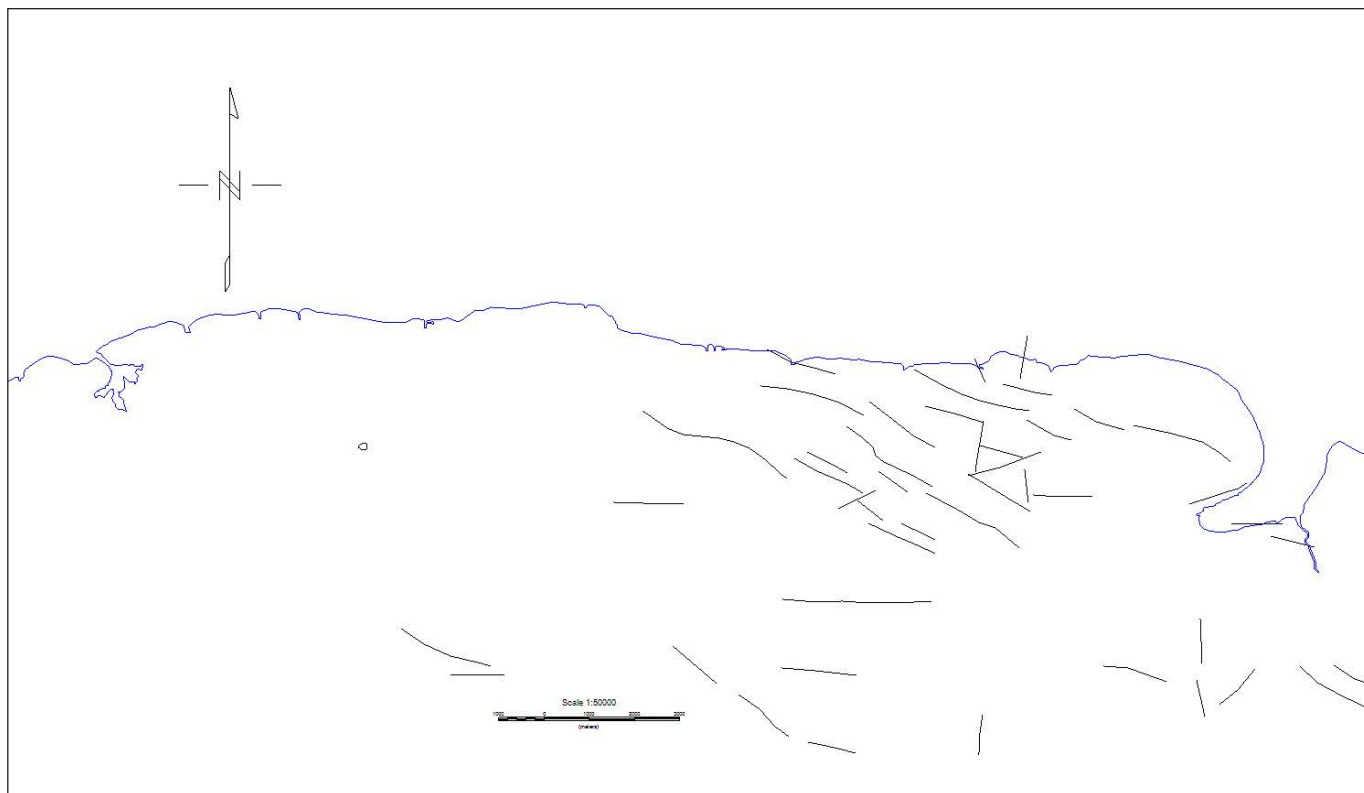


Figura 4. Resultados de la cartografía magnética (lineamientos).

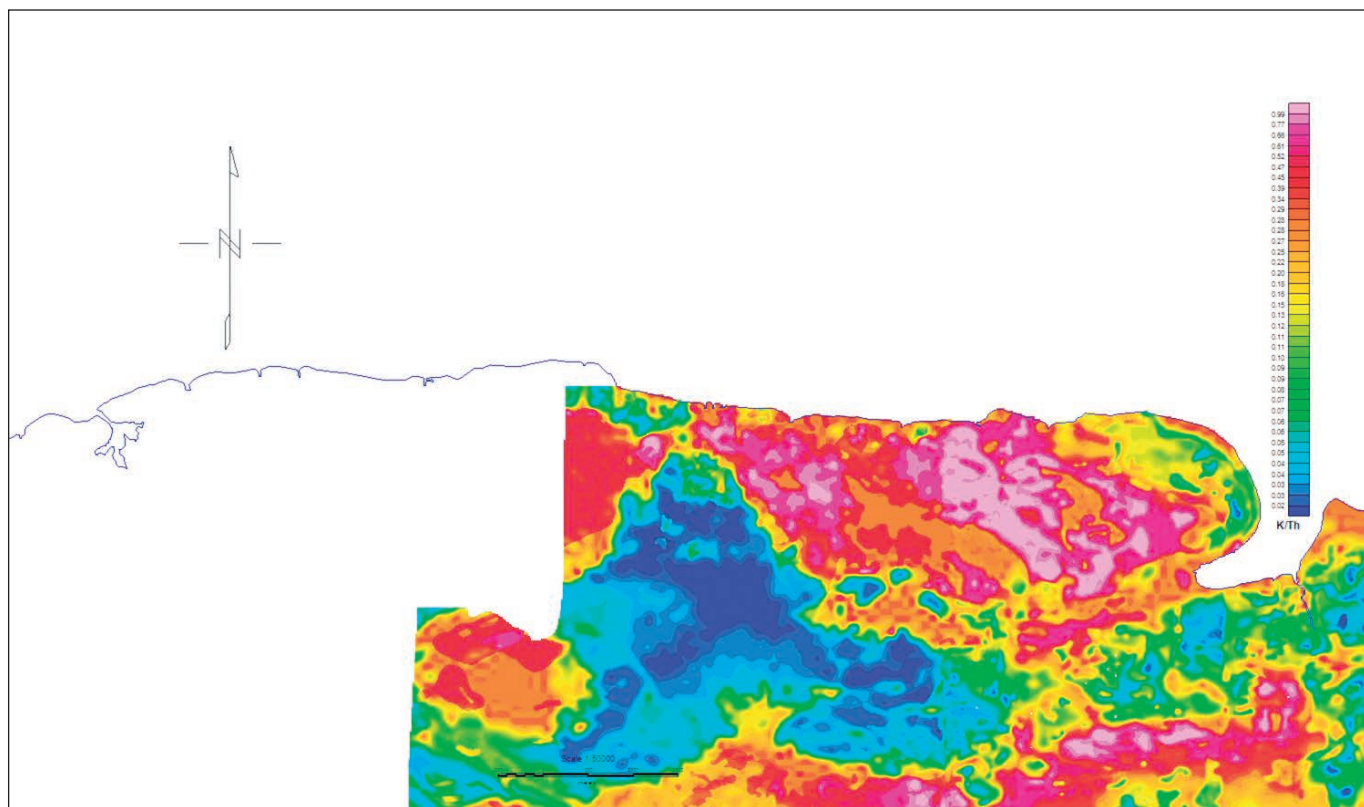


Figura 5. Relación K/Th de la región de estudio.

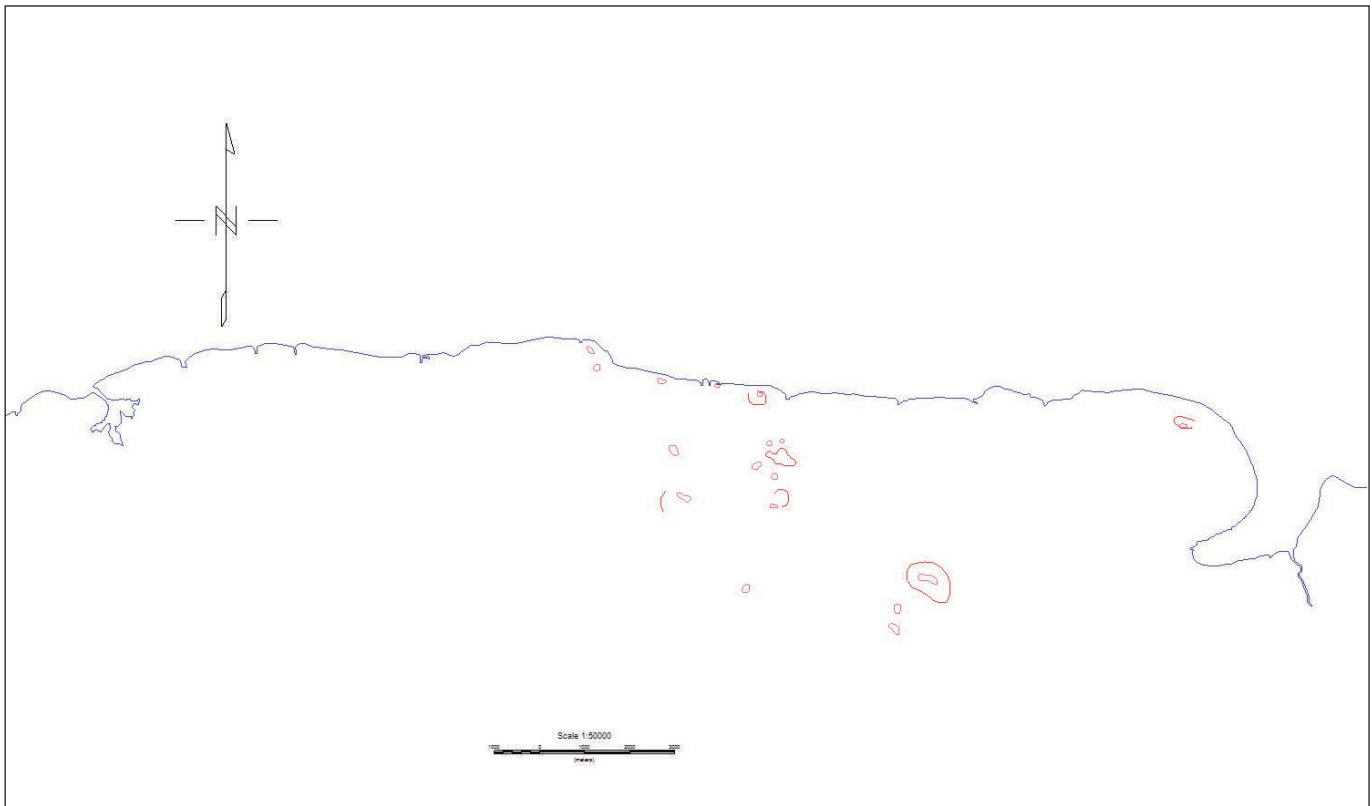


Figura 6. Resultados de la cartografía AGE (mínimos de la relación K/Th, en rojo, y máximos locales de U (Ra), en rosado).

El MED (90 x 90 m) se sometió a la separación regional-residual a partir de la CAA a 500 m, según la experiencia del autor, para señalar los máximos locales, vinculados con los procesos de ligera carbonatización y silicificación subsuperficiales que tienen lugar sobre la microfiltración activa de hidrocarburos ligeros (Figura 7). Los resultados de la cartografía morfométrica (lineamientos y máximos geomórficos locales) se presentan en la Figura 8.

En la TDT, según Jiménez (2017), se realizó la búsqueda y el procesamiento de las imágenes correspondientes a la región Guanabo-Seboruco comprendida entre las coordenadas X: 382000-446300 y Y: 338000-372000. Se trabajó con las escenas AST_L1B_00303132005161351_20081014083203_32336 y AST_L1B_00303012003160859_20081014120752_2085 del sensor Áster la cual se re proyectó al sistema de Cuba Norte según los parámetros establecidos. El procesamiento, consistió en la construcción de cocientes de bandas que respondieran a cambios litológicos y mineralógicos producidos por posibles acumulaciones de hidrocarburos en profundidad. Se construyeron los cocientes de bandas 2/1 y 4/9 que permitieron cartografiar zonas

con posibles alteraciones por óxidos férricos y por carbonatos, respectivamente. El área se dividió en dos zonas, Norte y Sur, en donde fueron cartografiadas anomalías que correspondieran con los criterios siguientes:

- Zona Norte (relacionada con los principales yacimientos gasopetrolíferos; anomalías de menores dimensiones): Valores máximos de cocientes de carbonatos y altos valores del cociente de hierro no relacionados con elementos antrópicos.
- Zona Sur (anomalías de mayores dimensiones): Valores medios-bajos de cociente de carbonatos y con altos valores del cociente de hierro no relacionados con elementos antrópicos.

Los resultados de la cartografía TDT (anomalías TDT) se presentan en la Figura 9.

Los lineamientos geofísicos y morfométricos (fundamentalmente, dislocaciones tectónicas de carácter regional) fueron trazados, fundamentalmente, a partir del mapa de la DV del campo aeromagnético y gravimétrico

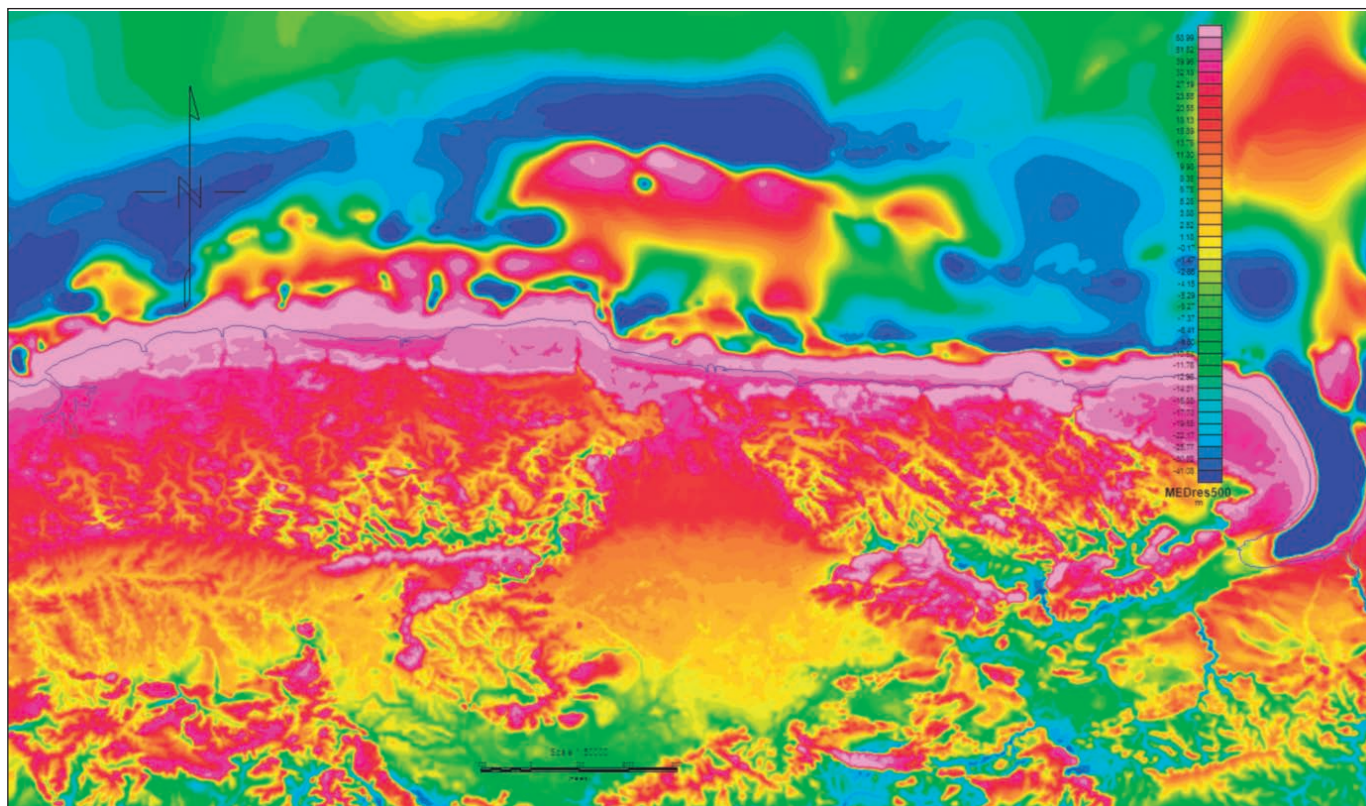


Figura 7. MED (90 x 90 m) residual a 500 m de la región de estudio.

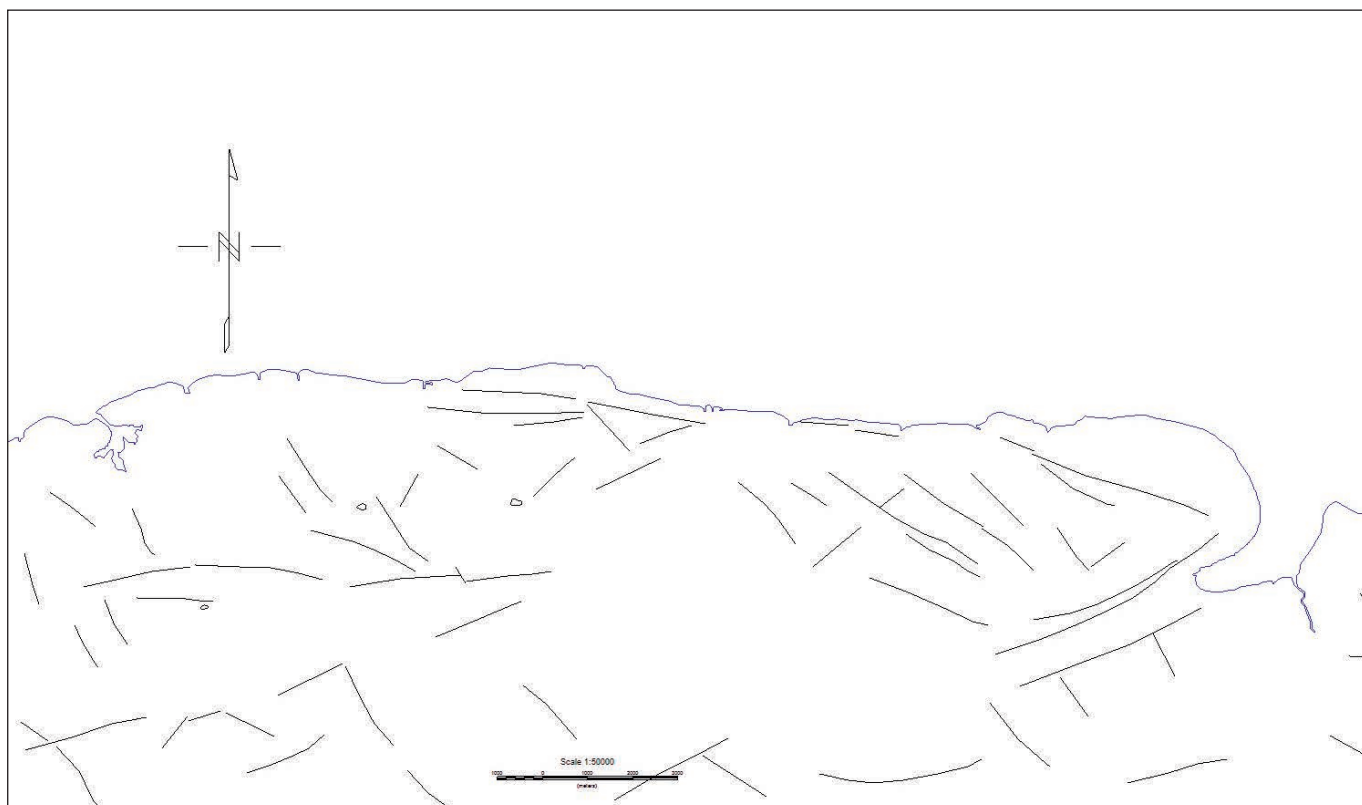


Figura 8. Resultados de la cartografía morfométrica (lineamientos y máximos geomórficos locales).

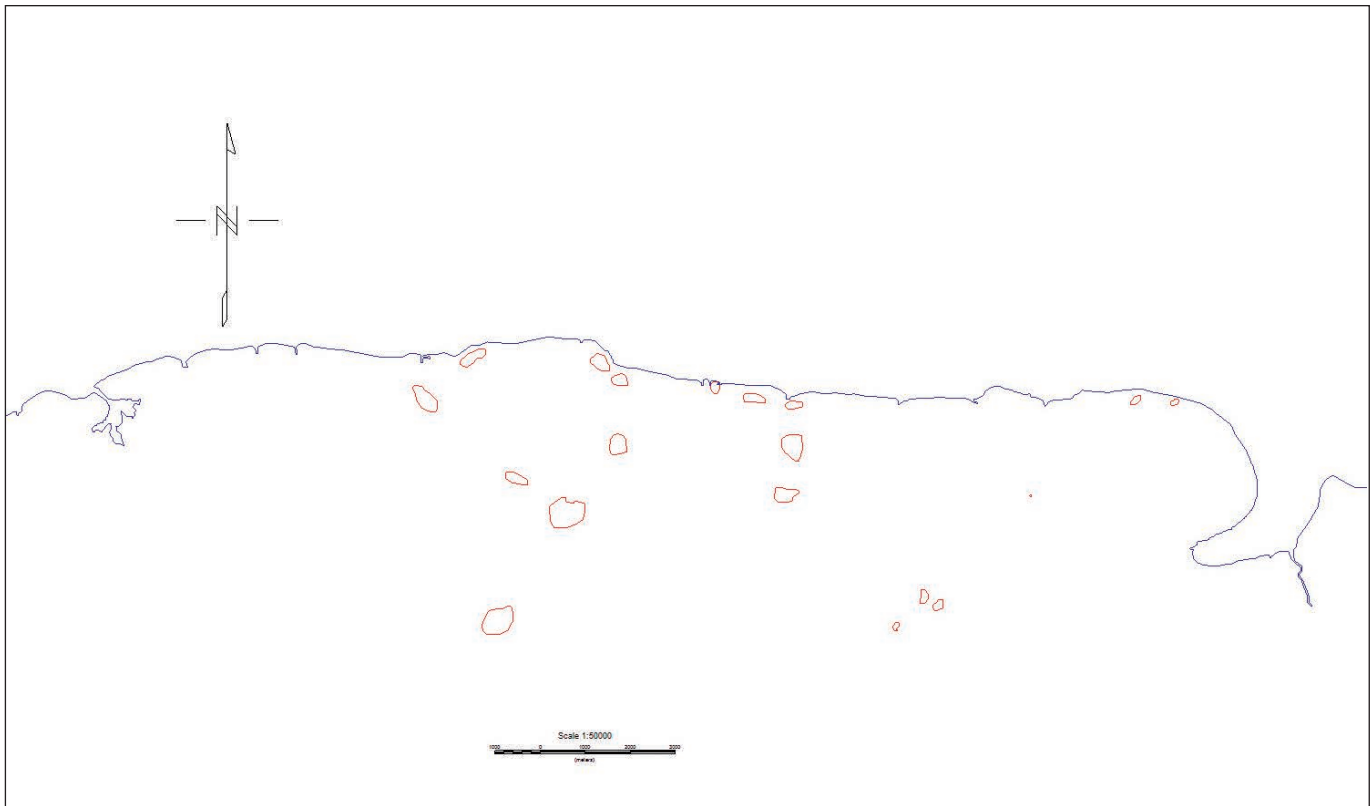


Figura 9. Resultados de la cartografía TDT (anomalías).

y del MED residual a 500 m, considerando, fundamentalmente las cadenas de mínimos y, algunas de máximos, la linealidad, flexiones e interrupción de las isolíneas, así como las zonas de elevado gradiente de las mismas.

De igual manera, se reconocieron las principales depresiones estructurales, considerando un cambio en las características del campo de la DV magnética (suavización o aplanamiento), coincidente con mínimos gravitatorios.

El procesamiento geofísico se realizó con dos propósitos principales: la regionalización o cartografía geólogo-estructural (a partir de los campos potenciales y la morfometría; Figuras 10 y 11) y, la cartografía prospectiva integrada (a partir de todos los campos geofísicos y la morfometría; Figura 12). La primera de ellas tiene como objetivo revelar los principales elementos del cuadro geólogo-estructural a partir de los datos gravi-magnéticos (Figura 10) (cartografía del terreno volcánico+ofiolitas y las depresiones estructurales). La segunda (Figura 12), tiene como propósito el establecimiento de localidades con perspectivas para depósitos gasopetrolíferos, a partir de considerar la presencia de un complejo de anomalías indicadoras: máximos gravimétricos locales de baja amplitud, coincidentes con mínimos de la relación

K/Th, máximos locales de U(Ra) en la periferia y máximos morfométricos locales. Como información complementaria, muy sensible, se considera la presencia de anomalías TDT.

A los fines de la interpretación geológica se contó, además, con el Mapa Geológico de Cuba a escala 1:100 00 del IGP (Colectivo de Autores, 2010).

Como resultado de la cartografía geólogo-estructural a partir de los datos gravi-magnéticos (Figura 10) se puede observar una amplia distribución del Terreno Zaza (volcánico+ofiolitas) en la región de estudio. Las principales depresiones estructurales se concentran a lo largo de una franja de dirección latitudinal que abarca las localidades siguientes (de Este a Oeste): Suroeste de Bahía de Matanzas, Ceiba Mocha, Aguacate, Bainoa, Tapaste, Cuatro Caminos, Managua y Santiago de las Vegas. Sobre la base de las estimaciones a partir del campo magnético reducido al polo, la profundidad al tope de un objetivo localizado al Oeste de Bainoa, dentro de esta franja, es de 1 350 - 1 450 m, lo que da una idea de la potencia sedimentaria en la misma. Existe otra depresión importante, de rumbo transversal (N-S) a la franja anterior, que pasa por la localidad de San José de las Lajas. Otra depresión estructural tiene

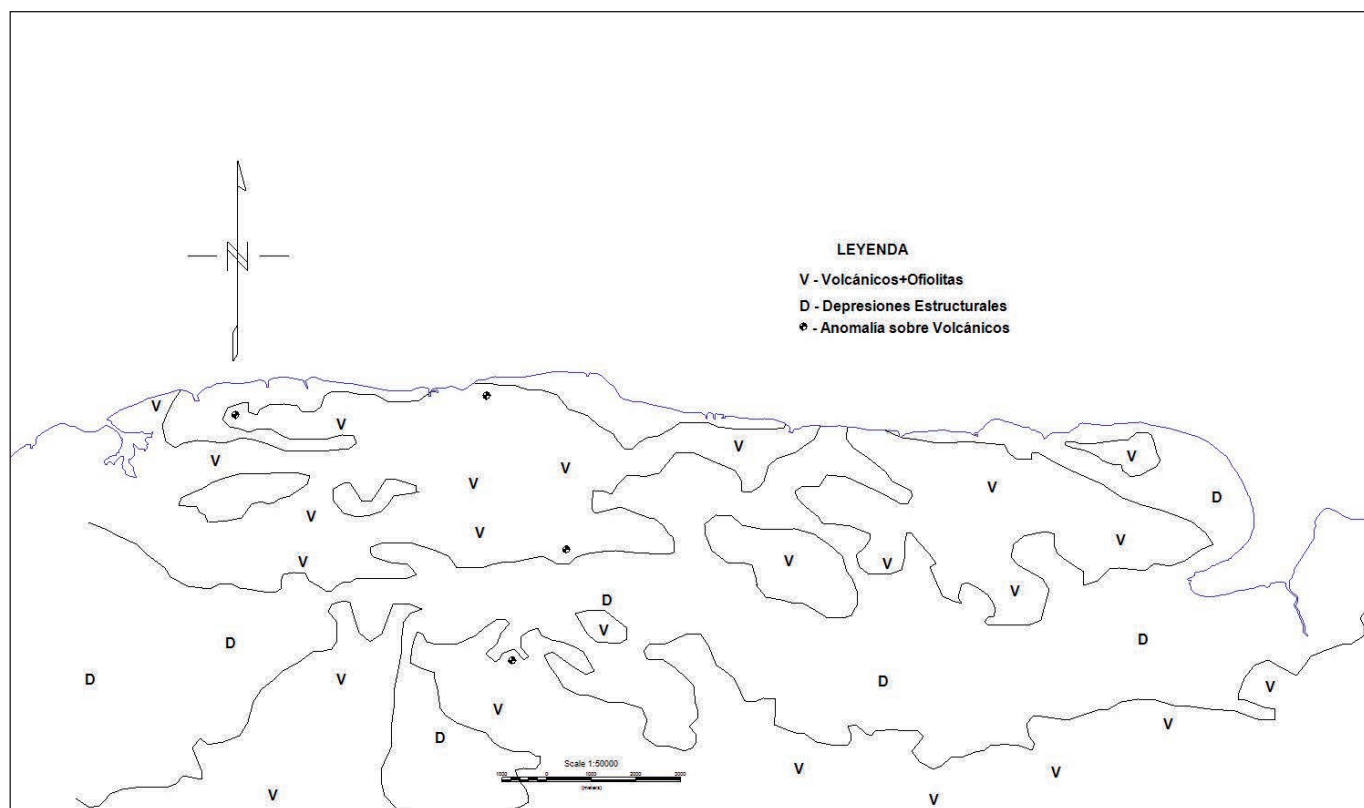


Figura 10. Cartografía geólogo-estructural en base a datos gravi-magnéticos.

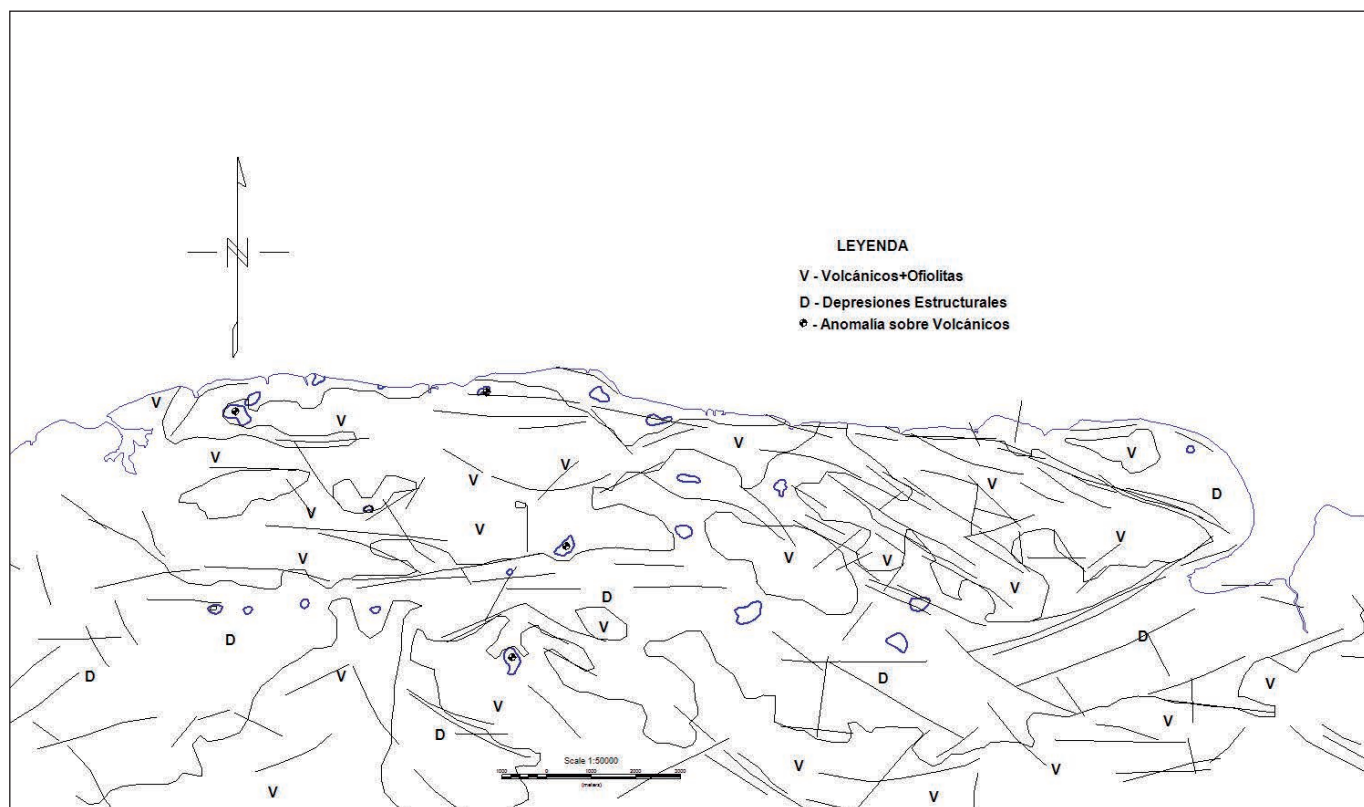


Figura 11. Cartografía geólogo-estructural (con lineamientos) en base a los campos potenciales y la morfometría.

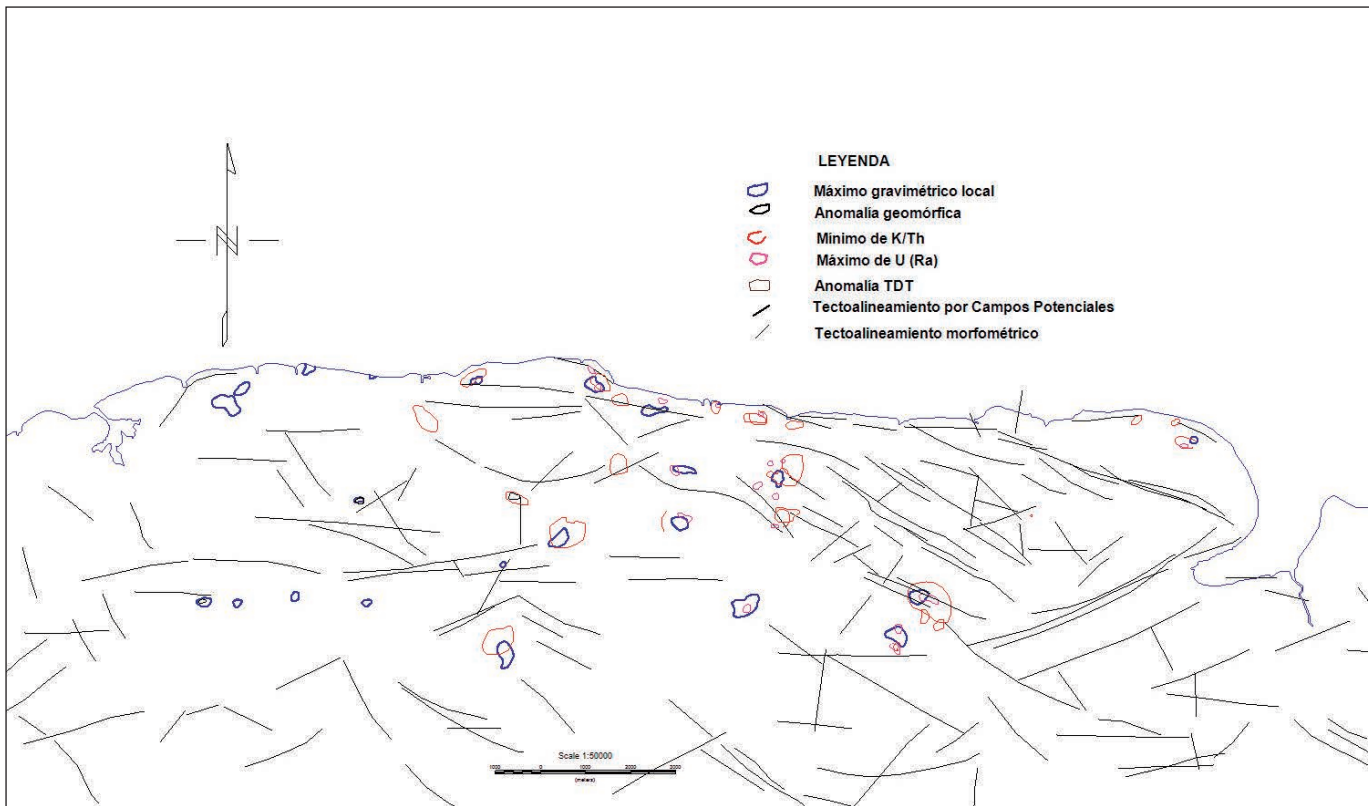


Figura 12. Resultados de la cartografía prospectiva integrada.

una clara expresión en el mínimo gravi-magnético de Punta Rubalcava al NNE de Matanzas.

Los máximos gravimétricos locales que se localizan sobre el Terreno Zaza, teniendo, por ende, una perspectiva gasopetrolífera menor, se localizan al SE de Alamar, SE de Brisas del Mar, SO de San Antonio de Río Blanco y al SE de El Perú.

Los resultados de la cartografía prospectiva integrada (Figura 12) consideran, en un primer nivel de prospectividad, las localidades (3) donde aparecen todas las anomalías estudiadas con excepción de las morfométricas (máximos gravimétricos locales + mínimos de la relación K/Th + máximos de U (Ra) en la periferia + anomalías de TDT). En un segundo nivel de prospectividad se consideran las localidades (11) que corresponden a la combinación de dos tipos de anomalías diferentes. Las localidades anómalas para los dos niveles señalados se presentan en la Tabla 2.

5.0 CONCLUSIONES

Se ofrece una versión de la cartografía geólogo-estructural de la región de estudio, en base a los datos gravi-magnéticos y de la cartografía de sectores de interés gasopetrolífero, vinculados al petróleo convencional de la UTE

Placetas, a partir de la presencia de un complejo de anomalías indicadoras. Este complejo considera los siguientes atributos: máximos gravimétricos locales de baja amplitud; mínimos de la relación K/Th y máximos locales de U (Ra) en su periferia; máximos locales del relieve residual y anomalías TDT. Este resultado constituye un complemento de información no sísmica imprescindible para la necesaria integración geólogo-geofísica-geoquímica-morfométrica del territorio.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a nuestra institución, el Centro de Investigaciones del Petróleo, por permitirnos publicar información parcial sobre diversos proyectos de investigación.

También queremos agradecer por la revisión del manuscrito y, por las observaciones hechas al mismo, al Dr. Osvaldo Rodríguez Morán.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Colectivo de Autores, 2009, Expediente Único del Proyecto 6004, "Exploración en la Franja Norte Petrolera Cubana". Inédito. Archivo, Centro de Investigaciones del Petróleo (CEINPET), La Habana, Cuba.

1er Nivel			2do Nivel		
Gb+AGE+TDT	Gb+AGE	Gb+TDT	AGE+TDT	Morf. +TDT	Gb+Morf.
Boca de Jaruco	SO de Punta Rubalcava	SO de San Antonio de Río Blanco	E de El Fraile	San Miguel de Casanovias	E de Peñalver
Jibacoa del Norte Este de Aguacate	Loma El Palenque El Conde	SE de El Perú SE de Brisas de Mar	El Rubro		S de Cotorro

Tabla 2. Localidades anómalas separadas por nivel de perspectiva.

- Colectivo de Autores**, 2010, Mapa Geológico Digital de la República de Cuba a escala 1:100 000. Inédito. Instituto de Geología y Paleontología, Servicio Geológico de Cuba, La Habana.
- Fairhead, J. D., Ahmed S. and Williams, S. E.**, 2009, Tilt-Depth: A Simple Depth-Estimation Method Using First Order Magnetic Derivatives. Search and Discovery Article #40390 (Adapted from poster presentation at AAPG International Conference and Exhibition, Cape Town, South Africa, October 26-29, 2008).
- Jiménez de la Fuente, L.**, 2017, Resultados de la Teledetección (TDT) para la búsqueda de sectores gasopetrolíferos perspectivas en la región de Guanabo-Seboruco. Apuntes metodológicos. Inédito. Ceinpet, La Habana, 13 p.
- Mondelo, F., Sánchez Cruz, R. y otros**, 2011, Mapas geofísicos regionales de gravimetría, magnetometría, intensidad y espectrometría gamma de la República de Cuba, escalas 1: 2 000 000 hasta 1: 50 000. Inédito. IGP, La Habana, 278 p.
- Pardo Echarte, M. E. y Rodríguez Morán, O.**, 2016, Unconventional Methods for Oil & Gas Exploration in Cuba. Springer Briefs in Earth System Sciences, DOI 10.1007/978-3-319-28017-2.
- Pardo, M.**, 2016, Generalización Petrofísica de la Provincia Matanzas. Inédito. Centro de Investigaciones del Petróleo, La Habana, 5 p.
- Price, L. C.**, 1985, A critical overview of and proposed working model for hydrocarbon microseepage. US Department of the Interior Geological Survey. Open-File Report 85-271.
- Sánchez Cruz, R., Mondelo, F. y otros**, 2015, Mapas Morfométricos de la República de Cuba para las escalas 1: 1 000 000 – 1: 50 000 como apoyo a la Interpretación Geofísica. Memorias VI Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, VIII Congreso Cubano de Geofísica. Fuente: <http://www.cgiar-csi.org/data/srtm-90m-digital-elevation>.
- Saunders, D. F., Burson, K. R. and Thompson, C. K.**, 1999, Model for Hydrocarbon Microseepage and Related Near-Surface Alterations: AAPG Bulletin, V. 83 (1999), No. 1 (January 1999), p. 170-185.
- Schumacher, D.**, 1996, Hydrocarbon-induced alteration of soils and sediments; in D. Schumacher and M. A. Abrams, eds., Hydrocarbon migration and its near-surface expression: AAPG Memoir 66, p. 71-89.

Simulador de tareas docentes para la asignatura de Procesamiento de Datos en las Geociencias para la carrera de Geofísica

Oswaldo Rodríguez Morán¹

¹ Centro de Investigaciones del Petróleo, Churrucá No. 481 entre Washington y Vía Blanca, Cerro, C. P. 12000, La Habana, Cuba, Email: ormoran@ceinpet.cupet.cu.

RESUMEN

Los ejemplos de aplicaciones geológicas-geofísicas que se utilizan para el aprendizaje de los estudiantes de la carrera de Ingeniería Geofísica de la Facultad de Civil de la Universidad Tecnológica de La Habana (CUJAE), en particular para los que cursan la asignatura de Procesamiento de Datos en las Geociencias, no abundan. En la actualidad parecen haberse agotado las posibles variantes de tareas geólogo-geofísicas de corte docente para los estudiantes. El problema es entonces, que los estudiantes coleccionan el historial de las tareas docentes de los años anteriores, incluso sus soluciones, quedando sin efecto el esperado impacto, de estas tareas en el proceso docente-educativo. Por esta razón, el objetivo general que se propone es el de simular diferentes tareas geólogo-geofísicas con objetivos docentes para la asignatura Procesamiento de Datos en las Geociencias de la carrera de Ingeniería Geofísica. Se utilizaron los documentos referidos a los objetivos instructivos de la asignatura, además del plan de secuencia de clases con los objetivos de cada tema de la asignatura y se instrumentaron los métodos estadísticos clásicos univariados y multivariados. Para cada tema de la asignatura se generaron, de modo conceptual, variantes de tareas geólogo-geofísicas, las cuales podrán incrementarse en otras versiones futuras. Como resultado, se hizo un análisis de los fundamentos y exigencias de cada una de las tareas geólogo-geofísicas de la asignatura con objetivos docentes y, el diseño y puesta a punto de un algoritmo para generar las tareas geológicas-geofísicas propuestas. Así, en cada curso, cada estudiante podrá tener una variante única de tarea para solucionar, lo cual contribuye al proceso docente-educativo.

Palabras claves: Simulación, Procesamiento de datos, Geociencias, Proceso docente-educativo.

ABSTRACT

Examples of geological-geophysical applications that are used for the learning of students of the Geophysical Engineering career of the Faculty of Civil of the Technological University of Havana (CUJAE), in particular for those who study the subject of Processing of Data in the Geosciences, they do not abound. At present, it seems to have been exhausted the possible variants of geological-geophysical tasks of teaching for students. So we are faced with the problem of students collecting the history of the tasks of previous years, including their solutions, leaving out the expected impact of these tasks on the teaching-learning process. For this reason, the general objective we propose is to simulate different geological-geophysical tasks with teaching objectives for the subject Data Processing in the Geosciences of the Geophysical Engineering career. Were used the documents relating to the instructional objectives for the subject, in addition to the sequence of classes with the objectives of each topic of the course and were used too, the classical statistical methods univariate and multivariate analyzes. For each theme of the subject, variants of geological-geophysical tasks were conceptually generated, which could be increased in other future versions. As a result, an analysis was made of the fundamentals and demands of each of the geological and geophysical tasks of the subject with teaching objectives and, the design and development of an algorithm to generate the geological-geophysical tasks proposals. Thus, in each course, each student can have a

unique variant of task to solve, which contributes to the teaching-learning process.

Keywords: Simulation, Data processing, Geosciences, Teaching-learning process, Simulator teaching tasks.

RESUMO

Os exemplos de aplicações geológico-geofísicas que são utilizadas para a aprendizagem dos alunos da carreira de Engenharia Geofísica da Faculdade de Ciências da Universidade Tecnológica de Havana (CUJAE), em particular para aqueles que estudam o assunto do Processamento de Dados Em Geociências, eles não abundam. No presente, parece ter esgotado as possíveis variantes de tarefas geológico-geofísicas de ensino para estudantes. Então, somos confrontados com o problema dos alunos que coletam a história das tarefas de ensino de anos anteriores, incluindo suas soluções, deixando o impacto esperado dessas tarefas no processo de ensino educacional sem efeito. Por esta razão, o objetivo geral que propomos é simular diferentes tarefas geológico-geofísicas com objetivos de ensino para o assunto Processamento de Dados nas Geociências da carreira de Engenharia Geofísica. Utilizamos os documentos relativos aos objetivos de instrução para o sujeito, para além da seqüência de aulas com os objetivos de cada tópico do curso e foram os métodos estatísticos clássicos análises univariada e multivariada. Para cada tópico do assunto, as variantes de tarefas geológico-geofísicas foram geradas conceitualmente, o que poderia ser aumentado em outras versões futuras. Como resultado, foi feita uma análise dos fundamentos e requisitos de cada uma das tarefas geológicas e geofísicas do sujeito com objetivos de ensino e o projeto e desenvolvimento de um algoritmo para gerar as tarefas propostas geológico-geofísicas. Assim, em cada curso, cada aluno pode ter uma variante única de tarefa a resolver, o que contribui para o processo de ensino educacional.

Palavras-chave: Simulação, Processamento de Dados, Geociências, Processo de ensino educacional, Tarefas de ensino simulador.

INTRODUCCIÓN

Entre los objetivos fundamentales de la asignatura de Procesamiento de Datos en la Geociencias, impartida en el tercer año de la carrera de Ingeniería Geofísica, está el de crear las habilidades necesarias para el manejo y el pro-

cesamiento de los datos geólogo-geofísicos, en la solución de las tareas geológicas propuestas. Sin embargo, la cantidad de ejemplos prácticos de procesamiento de datos, derivados en lo fundamental de casos reales, son relativamente escasos para los requerimientos de los estudiantes en cada curso. Esto hace que, en general, en los últimos cursos, se hayan repetido, de modo inevitable, los casos de ejemplo de procesamiento de tareas docentes, enfrentándonos a la realidad, de que todos los estudiantes, al comienzo de los cursos, copian todas las tareas de la asignatura y, por supuesto, tareas docentes ya resueltas. Esta problemática crea un incumplimiento sistemático en los objetivos de la asignatura. Sobre la base de esta problemática, se hará la pregunta científica siguiente: ¿Cómo poder generar tareas geólogo-geofísicas docentes que sean únicas para cada estudiante y que cumplan con los objetivos de la asignatura de Procesamiento de Datos en la Geociencias? Teniendo identificado el objeto de estudio como las tareas geólogo-geofísicas, se establecerá el objetivo general de este trabajo como el de simular tareas geólogo-geofísicas con objetivos docentes para la asignatura Procesamiento de Datos en la Geociencias, de la carrera de Ingeniería Geofísica.

Los objetivos específicos, los cuales tributarán al general serán: (1) Analizar los fundamentos y exigencias de cada una de las tareas geólogo-geofísicas con objetivos docentes y (2) Diseñar algoritmos generadores sobre la plataforma de *Microsoft Excel* para la creación de las tareas docentes propuestas.

A partir de este problema se llevó a cabo el diseño de una serie de algoritmos para generar de modo automático las tareas docentes y laboratorios de la asignatura, incluso, una para cada estudiante y no descansar su solución en el trabajo por equipos, como de forma tradicional se ha hecho. A estos algoritmos se les debe exigir las siguientes características:

- Que los datos “observados”, generados de modo automático, respondan a una supuesta realidad geológica-geofísica determinada.
- Que estos datos representen una data única, lo que implica una solución siempre única en general.
- Que el algoritmo generador de tareas docentes para los estudiantes, pueda también ofrecer las soluciones correspondientes de cada tarea. De esta forma se le facilitará, al

profesor el chequeo de las mismas, las cuales tendrán características individuales.

En estas actividades docentes de tareas y laboratorios, se entregará una guía de acorde al procedimiento de cada una de ellas. Se deberá tener un extraordinario cuidado al elaborar la guía con la que el estudiante debe trabajar de manera independiente para llevar a cabo la preparación individual y la solución de las tareas. Las preguntas o aspectos del contenido seguirá un orden lógico que ayude al estudiante a realizar su trabajo y debe irse concretando en la medida que el curso académico avance. Las prácticas se organizarán y planificarán de manera sistemática de manera que el estudiante pueda vencer de forma progresiva los problemas más complejos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los elementos de los cuales partimos para establecer los fundamentos de este trabajo son los objetivos instructivos de la asignatura Procesamiento de Datos en la Geociencias, de la carrera de Ingeniería Geofísica de la Facultad de Civil de la Universidad Tecnológica de la Habana, sobre los cuales se sustenta el proceso docente-educativo de esta asignatura (Objetivos y Secuencia de Actividades de la asignatura Procesamiento de Datos en la Geociencias, 2015), ellos son los siguientes:

- 1) Conocer el papel de los métodos estadísticos en las Geociencias y su importancia durante el procesamiento y análisis de información geólogo-geofísica.
- 2) Conocer los fundamentos teóricos del análisis estadístico multivariado y el análisis exploratorio de una matriz de datos.
- 3) Conocer las diferentes técnicas estadísticas multivariadas que pueden ser empleadas durante el procesamiento y análisis de información geólogo-geofísica.
- 4) Dominar las diferencias entre señal útil y ruido, así como la importancia de estos conceptos en la actividad de la Geofísica Aplicada.
- 5) Conocer técnicas para la detección de señales útiles débiles tanto unidimensionales como bidimensionales.
- 6) Describir las técnicas geo estadísticas para el estudio de las variables regionalizadas.
- 7) Conocer las posibilidades de las técnicas

estadísticas de reconocimiento de patrones durante el procesamiento y análisis de información geólogo-geofísica.

- 8) Describir las técnicas de reconocimiento de patrones utilizadas durante la solución de tareas en las investigaciones geólogo-geofísicas.
- 9) Describir técnicas estadísticas avanzadas utilizadas en evaluación de la efectividad geológica de los atributos existentes en una matriz digital de datos geólogo-geofísicos.

No puede perderse de vista que el producto final de este trabajo, es decir, las tareas geólogo-geofísicas diseñadas para ser resueltas por los estudiantes, deberá cumplir las exigencias de estos objetivos instructivos.

Los métodos utilizados para lograr el objetivo propuesto fueron: los métodos estadísticos (Krumbein, W., F. Graybill, 1961; Dixon W. and Massey F., 1966; Cramer, H., 1968; Davis, J.C., 1986; Spiegel. M. R., 1971; Freud, J. E., 1977; Ostle, B., 1977) y de simulación, la programación de celdas dinámicas en Hojas *Excel* y la programación de macros en lenguaje de programación en *Visual Basic* en la plataforma *Microsoft Excel* para la automatización de este proceso de creación de tareas geológicas-geofísicas docentes (Alfonso, 1979-82; Alfonso, 1989).

Entre los documentos utilizados para la formulación de las bases de este trabajo, fueron:

- Plan de secuencia de clases con los objetivos de cada tema de la asignatura. A partir de este plan se identificaron los siguientes de procesamiento que se imparten en la asignatura, estos son: (1) Análisis Exploratorio de Datos; (2) Regionalización de variables por el método del Inverso de la Distancia; (3) Análisis estructural; (4) Regionalización de variables por el método *Kriging*; (5) Análisis de Componentes Principales y Análisis de Factores; (6) Análisis de Clasificación Supervisada; y (7) Análisis de Clasificación no Supervisada (Objetivos y Secuencia de Actividades de la asignatura Procesamiento de Datos en la Geociencias, 2015).
- Recopilación de los diferentes rangos y valores medios de las propiedades petrofísicas de las rocas. Se confeccionó una tabla, la cual posee 56 variantes de: Tipo de roca,

Nombre de roca, Propiedad, Valor mínimo, Valor Medio y Valor Máximo (REFERENCIA). Esta tabla muestra los valores más probables y los rangos de las propiedades físicas de densidad [g/cm^3] y la porosidad [%] para las rocas ígnea, metamórfica, para minerales, minerales no metálicos y depósitos no consolidados.

- Propuesta de los rangos de valores de campos potenciales para una región simulada. A partir de los objetivos de la asignatura y del plan de secuencia de clases, se identifican los siguientes procesamientos de datos, que podrán ser aplicados a diferentes tareas geólogo- geofísica: (1) Análisis Exploratorio de Datos, (2) Métodos de Interpolación, (3) Análisis Estructural, (4) Regionalización de variables por el método *Kriging*, (5) Análisis de Componentes Principales y Análisis de Factores, (6) Análisis de Clasificación Supervisada y (7) Análisis de Clasificación no Supervisada.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El contenido de las preguntas para cada tarea, fue concebido a partir de la definición de cinco sectores textuales. El primero es un sector textual variable, significa que para cada tarea docente generada, variará este sector textual y se denominará con las siglas: STV1 (Sector Textual Variable 1) y se identificará en los ejemplos mostrados con fuente de color rojo y en negritas. El segundo es otro sector textual variable, en el que se propone el tipo de atributo a procesar y se denominará con las siglas: STV2 (Sector Textual Variable 2) y que se identificará en los ejemplos mostrados con fuente de color azul y en negritas. El tercer sector es numérico variable y define la variabilidad de los datos simulados para esta tarea y sus siglas son: SNV (Sector Numérico Variable), se identificará en los ejemplos mostrados con fuente de color verde y en negritas. El cuarto es el sector textual invariante, en el que se expresan las diferentes preguntas y aspectos solicitados para que sean respondidos por los estudiantes y que no poseen cambio textual entre las tareas docentes y sus siglas son: STI (Sector Textual Invariante) y el color de la fuente para su identificación será de color negro. El quinto, representa la Tabla de Objeto-Propiedades asociada al problema, la cual es generada de forma aleatoria,

en general con datos normalizados o tipificados. La identificación de la tabla se mostrará en color negro y en negritas.

A continuación se expone un ejemplo de la nomenclatura anterior:

En un levantamiento geológico se tomaron 15 muestras georreferenciadas y se determinó en el laboratorio el valor de la densidad de cada una de ellas. En la **Tabla 2-1** se ofrecen las coordenadas Lambert y el valor del atributo correspondiente (densidad [g/cm^3]). (a) *Determine el valor del atributo* (densidad [g/cm^3]) en la ubicación espacial: (350412.9, 334891.3), por el método de Interpolación del Inverso de la Distancia. (b) *Haga un mapa en el que se muestre la ubicación, tanto los valores de base del cálculo, como el punto donde se necesita estimar el valor del atributo.* (c) *Expresé los cálculos en una tabla apropiada, donde se muestre el procedimiento de la estimación.*

A continuación se expondrá el contenido estructural y el alcance de cada una de las 7 tareas geólogo-geofísicas simuladas:

1) Análisis Exploratorio de Datos. Constará de cuatro subpreguntas:

- 1) Pregunta 1.1- Tratará sobre una serie de datos de una propiedad física (densidad, porosidad, etc.) entregados al estudiante y tiene como objetivos: (1) Calcular los cuatro momentos estadísticos de los datos; (2) Hacer un análisis exploratorio de los datos de la Tabla 1.1, (3) Hacer una propuesta analítica de los posibles tipos de rocas (ígnea, metamórfica o sedimentaria), mineral o mineral no metálico recolectados; y (4) Construir el histograma y el gráfico de frecuencia acumulativa de los datos.

Como es necesario garantizar la máxima variedad de los datos entregados a cada estudiante, es que se seleccionará de forma aleatoria el tipo de roca (ígnea, metamórfica o sedimentaria), mineral o mineral no metálico de una tabla creada (REFERENCIA), después tomar el rango correspondiente al objeto seleccionado y generar los datos entregados al estudiante a partir de una función acumulativa de frecuencia modelo (Figura 1). En este caso, puede apreciarse en la Figura 1 cómo si se generan números aleatorios correspondientes a la ordenada de

la función acumulativa de frecuencia modelo, pueden obtenerse valores aleatorios dentro del rango propuesto por la selección del objeto de la tarea. Estos valores de la propiedad física resultante será el conjunto de datos simulados para esta tarea. Como ejemplo final, una de las variantes para esta Tarea 1.1, es:

A una cantidad de 211 muestras listadas en la Tabla 1.1 (Columna A), se le han determinado en el laboratorio su densidad

[g/cm³]. (1) Calcule los cuatro momentos estadísticos de los datos; (2) Haga un Análisis Exploratorio de los datos de la Tabla I. (3) Haga una propuesta analítica de los posibles tipos de rocas (ígneas, metamórficas o sedimentaria), mineral o mineral no metálico recolectados, a partir de las referencias entregadas. (4) Construya el histograma y el gráfico de frecuencia acumulativa de los datos de la Tabla 1.1.

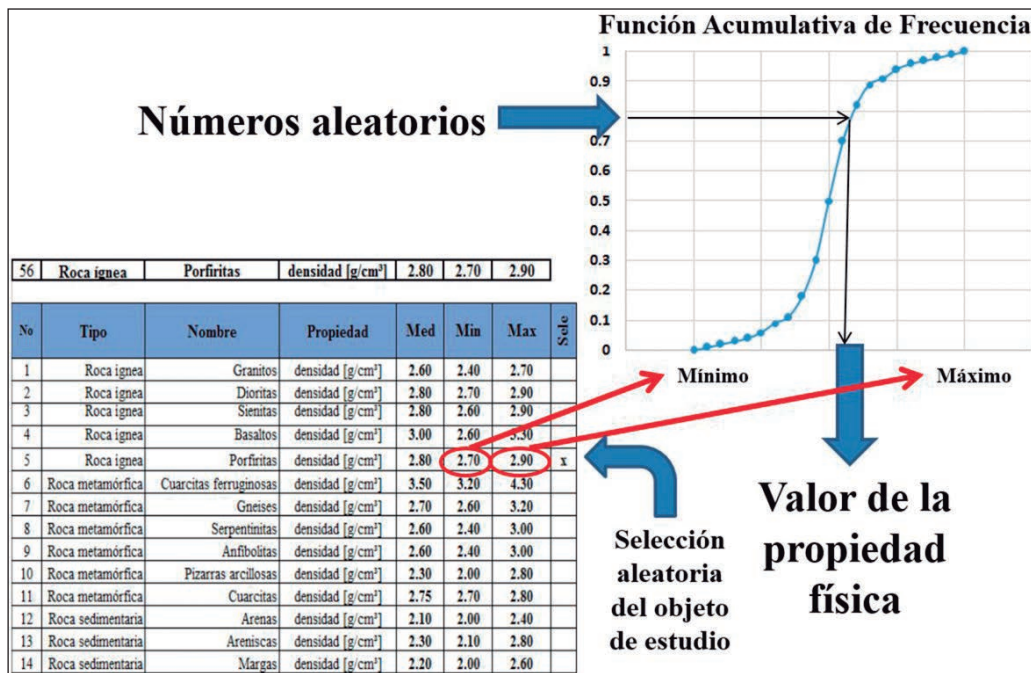


Figura 1. Proceso de selección del objeto de la tarea docente, generación de números aleatorios y de los datos simulados para la tarea.

2) Pregunta 1.2.- Se refiere a una serie de datos graficados en un histograma, a los cuales se le pide al estudiante que realice un Análisis Exploratorio de Datos a partir de datos agrupados. Los datos son tomados de la tabla de 56 variantes de: Tipo de roca, Nombre de roca, Propiedad, Valor mínimo, Valor Medio y Valor Máximo, con todos los presupuestos de aleatoriedad en la selección. En este problema se creará por simulación dos distribuciones con cierto grado de mezcla, donde el estudiante tendrá la oportunidad de apreciar si existen dos poblaciones, decir cuál sería la distribución principal y cuál la "contaminación", además decir cuál de ella en apariencia podría tener distribución normal o no (siempre adicionando la necesidad de hacer

pruebas de normalidad para esa distribución de datos), si las distribuciones son asimétricas, decir si es hacia la derecha o la izquierda y de modo conclusivo, si existen fluctuaciones estadísticas o *outlier*. En la Figura 2 puede apreciarse, cómo al seleccionar de modo aleatorio las condiciones deseadas, por ejemplo, si la distribución principal tiene distribución normal, o asimétrica a la derecha o asimétrica a la izquierda. Además si la contaminación está situada en valores menores (izquierda) o sobre valores mayores (derecha) y si la fluctuación estadística está en el extremo derecho o izquierdo. Una realización de las posibles variantes de esta tarea es:

En la Tabla 1.2 se muestra los datos de las

frecuencias absolutas de datos agrupados, los cuales se presentan graficados en el Histograma de abajo. Estos datos son los valores de densidad [g/cm³] de 285 muestras de Epidota (Mineral no metálico). Haga un Análisis Exploratorio valorativo de estos

datos verificando: (1) La existencia de la distribución principal respecto al tipo de roca del problema. (2) La existencia de una contaminación en los datos y sus características. (3) La posible existencia de alguna fluctuación y sus características.

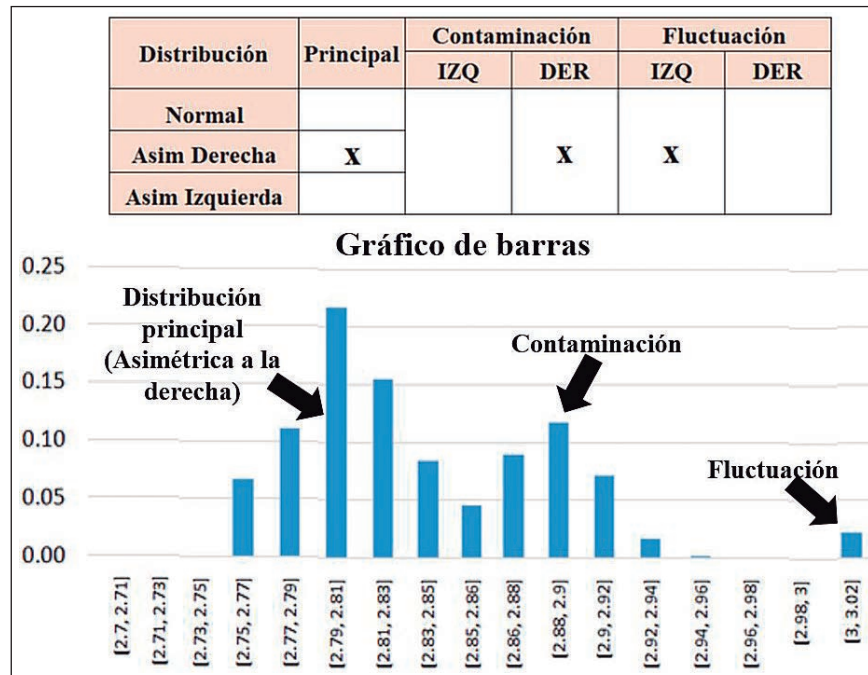


Figura 2. Proceso de creación de los datos para el segundo inciso de la tarea 1, basada en el Análisis Exploratorio de Datos agrupados.

3) Pregunta 1.3- Se le entrega al estudiante un gráfico 2D establecido entre las variables expresadas como V1 (variable independiente) y V2 (variable dependiente), las cuales han sido normalizadas en un rango de 0 a 1 y se pide hacer el gráfico 2D de dependencia y un Análisis Exploratorio de Datos de este gráfico. En este análisis el estudiante será capaz de decir cuántos grupos se aprecian en el gráfico, la característica de distribución de cada grupo y por último, si existen fluctuaciones e identificarlas en el gráfico. En la Figura 3 se aprecia una de las variantes. A continuación una ejemplificación de la tarea:

En la Tabla 1.3, se encuentran relacionados dos atributos (V1 y V2) de 38 muestras de un levantamiento geológico. Estos atributos se han normalizados en un rango de 0 a 1. Haga un Análisis Exploratorio de Datos precisando lo siguiente: (1) ¿Cuántos grupos se

pueden apreciar en el gráfico?; (2) ¿Qué característica posee cada grupo identificado?, entre ellos: el tipo de dependencia, valor aproximado de la pendiente, el centro aproximado del grupo; (3) A su consideración, identifique las fluctuaciones que puedan existir; (4) Construya el gráfico correspondiente entre V1 y V2.

4) Pregunta 1.4- Se le presenta al estudiante de una matriz de correlación de 6 muestras geológicas a partir de sus atributos y se le pide que diga cuáles parejas de objetos están correlacionados por encima (o por debajo) de un valor de similitud determinado. Un ejemplo de la tarea es el siguiente: Se dispone de una matriz de correlación de 6 muestras geológicas a partir de sus atributos (Tabla 1.4). ¿Cuáles parejas de muestras se correlacionan por encima de un valor de correlación de 0.5?

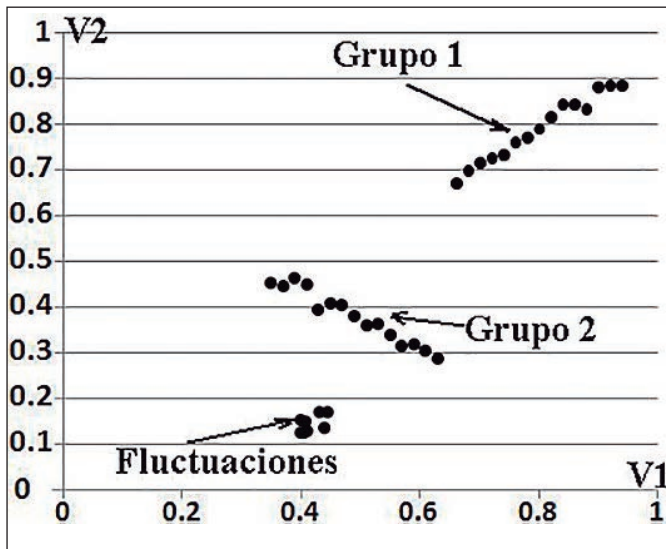


Figura 3. Ejemplo de datos 2D donde el estudiante deberá hacer un Análisis Exploratorio de Datos.

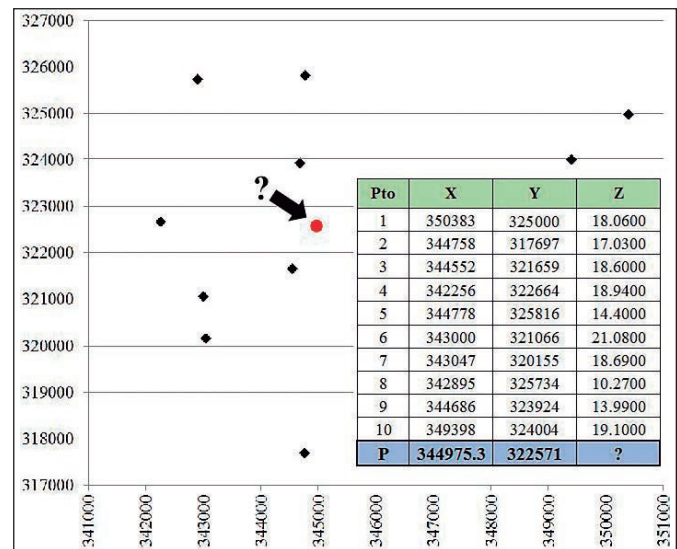


Figura 4. Ejemplo de simulación en el que se propone estimar el valor del atributo en una ubicación espacial donde se desconoce este.

2) Regionalización de variables por el método del Inverso de la Distancia.

Esta segunda tarea, propone aplicar el método de interpolación por el método Inverso de la Distancia, para determinar el valor de un atributo en una ubicación espacial donde se desconoce. Se ofrece al estudiante una cantidad de tríadas de valores en el ámbito de 10 km² (coordenadas variables) y un atributo para cada tríada (profundidad [m], densidad [g/cm³], altura [m] o Bouguer [mGal]). Por último se pide estimar el valor del atributo del problema en una ubicación [x₀, y₀] dada.

En la Figura 4 se muestra un ejemplo de simulación en que propone estimar el valor del atributo en una ubicación espacial donde se desconoce, además, esta tarea se expresará de la siguiente forma:

Se ha realizado un levantamiento topográfico en un área determinada, con el fin de elaborar un Modelo Digital de Elevación. En la Tabla 2 se ofrecen las coordenadas Lamberts (x,y) y el valor del atributo correspondiente (Altura del relieve [metros]) de 10 tríadas de valores. (a) Determine el valor del atributo en la ubicación espacial: (350336.5, 335473.4), por el método de Interpolación del Inverso de la Distancia. (b) Haga un mapa en el que se muestre la ubicación, tanto los valores de base del cálculo, como el punto donde se necesita estimar el valor del atributo. (c) Exprese los cálculos en una tabla apropiada, donde se muestre el procedimiento de la estimación.

3) Análisis estructural.

En esta tarea, al estudiante se le provee de una distribución espacial discreta en 2D del atributo de profundidad y se le solicita hacer el análisis estructural de la distribución espacial del atributo dado. Para ello tendrá que: (1) Calcular y graficar el semivariograma isotrópico de los datos de referencia y representar en el mismo gráfico su propuesta del semivariograma Teórico (Modelo esférico) informando el valor del Efecto *Nugget*, el Alcance y la Meseta, (2) Calcular y graficar el semivariograma anisotrópico de los datos de referencia en la dirección Norte-Sur y representar en el mismo gráfico su propuesta del semivariograma Teórico (Modelo esférico) informando el valor del Efecto *Nugget*, El alcance y la Meseta; (3) Calcular y graficar el semivariograma anisotrópico de los datos de referencia en la dirección Este-Oeste y representar en el mismo gráfico su propuesta del semivariograma Teórico (Modelo esférico) informando el valor del Efecto *Nugget*, El alcance y la Meseta; (4) Al final se realizará un análisis de los resultados en los incisos (1), (2) y (3) y proponer una clasificación del tipo de anisotropía del atributo estudiado, si es que existe. En la Figura 5 se muestra un ejemplo del resultado de la simulación para la tarea del Análisis Estructural. En esta figura puede apreciarse los variogramas experimentales isotrópicos y los anisotrópicos N-S y E-O con sus respectivas propuestas de variogramas teóricos. La pregunta es enfocada de la siguiente forma:

Se dispone de un conjunto de tríadas de valores en la Tabla 3 mostrada. Estos valores representan la distribución espacial discreta en 2D del atributo de profundidad [metros]. Se desea hacer el análisis estructural de la distribución espacial del atributo. (1) Calcule y grafique el semivariograma isotrópico de los datos de referencia. Represente en el mismo gráfico su propuesta del semivariograma Teórico (Modelo esférico) informando el valor del Efecto *Nugget*, el Alcance y la Meseta. (2) Calcule y grafique el semivariograma anisotrópico de los datos de referencia en la dirección Norte-Sur.

Represente en el mismo gráfico su propuesta del semivariograma Teórico (Modelo Esférico) informando el valor del Efecto *Nugget*, El alcance y la Meseta. (3) Calcule y grafique el semivariograma anisotrópico de los datos de referencia en la dirección Este-Oeste. Represente en el mismo gráfico su propuesta del semivariograma Teórico (Modelo Esférico) informando el valor del Efecto *Nugget*, El alcance y la Meseta. (4) Realice un análisis de los resultados en los incisos (1), (2) y (3) y proponga una clasificación del tipo de anisotropía del atributo estudiado, si es que existe.

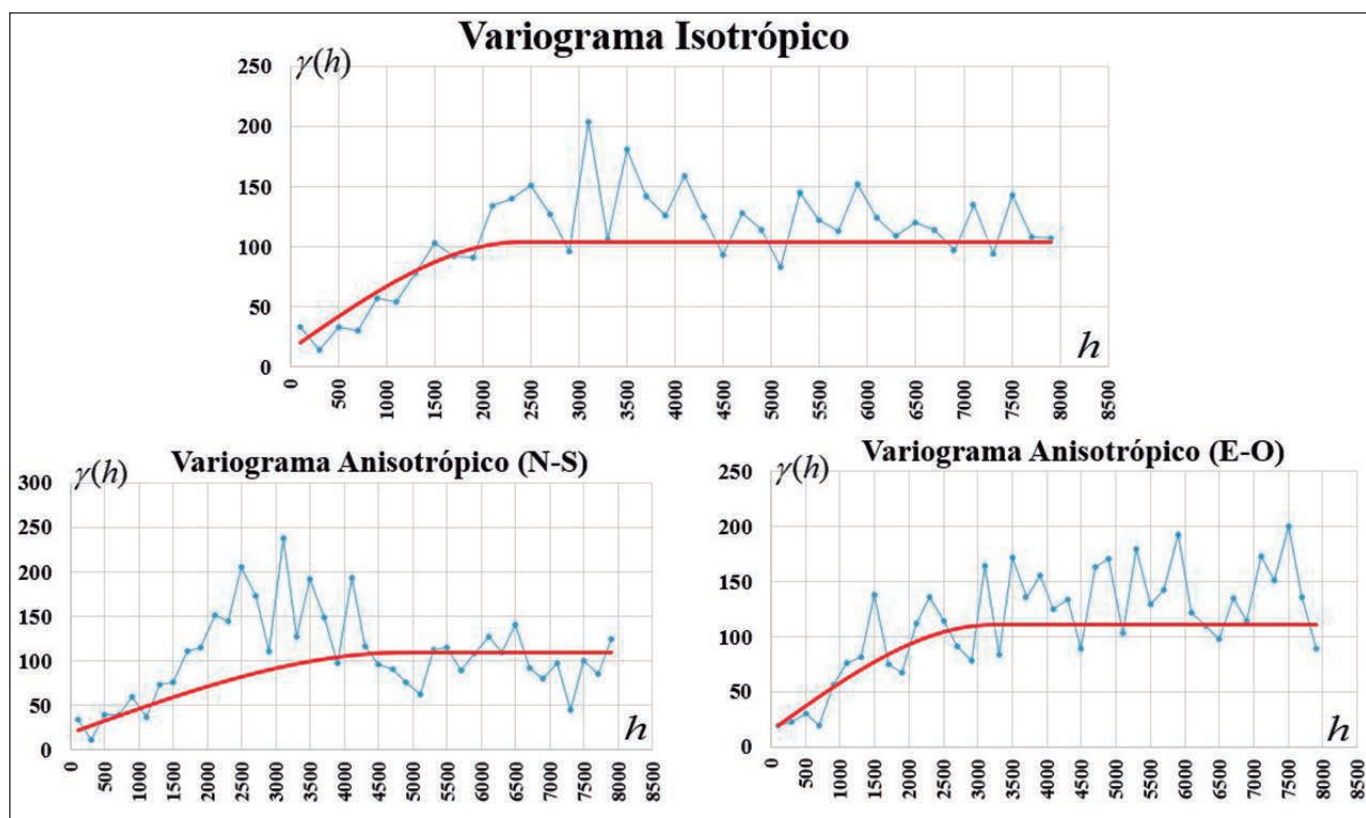


Figura 5. Ejemplo del resultado de la simulación para la tarea del Análisis Estructural.

4) Regionalización de variables por el método Kriging.

Se generará de forma automática una tabla de 100 tríadas de valores con datos de altura del relieve [m] en un área de ubicación variable. Se pedirá al estudiante que: (1) Regionalice y haga el mapa de la variable por el método del Inverso de la Distancia en una red de 50 x 50 m. (2) Regionalice y haga el mapa de la variable por el método Kriging en una red de 50 x 50 m. (3) Haga una discusión

sobre los resultados de cada una de las regionalizaciones (Figura 6). La pregunta pertinente quedaría estructurada de la siguiente forma:

En una zona de área cuadrada, limitada por las coordenadas Lambert del punto inferior izquierdo: (367000, 356000) y el punto superior derecho: (378000, 367000) se ha realizado un levantamiento geoquímico (Contenido de Oro [Au]). La cantidad de puntos en el área son de

100 tríadas de valores (x, y, z). (1) En el ámbito del área señalado haga una regionalización del atributo por el método Inverso de la Distancia. (2) Realice un comentario sobre la característica de la distribución areal del atributo. (3) Haga una regionalización del atributo

por el método *Kriging* y realice un comentario sobre el resultado de las regionalizaciones efectuadas por ambos métodos. Nota: Utilice todos los puntos de la Tabla para la regionalización y en todos los casos, realice la interpolación con una red de 50 x 50 puntos.

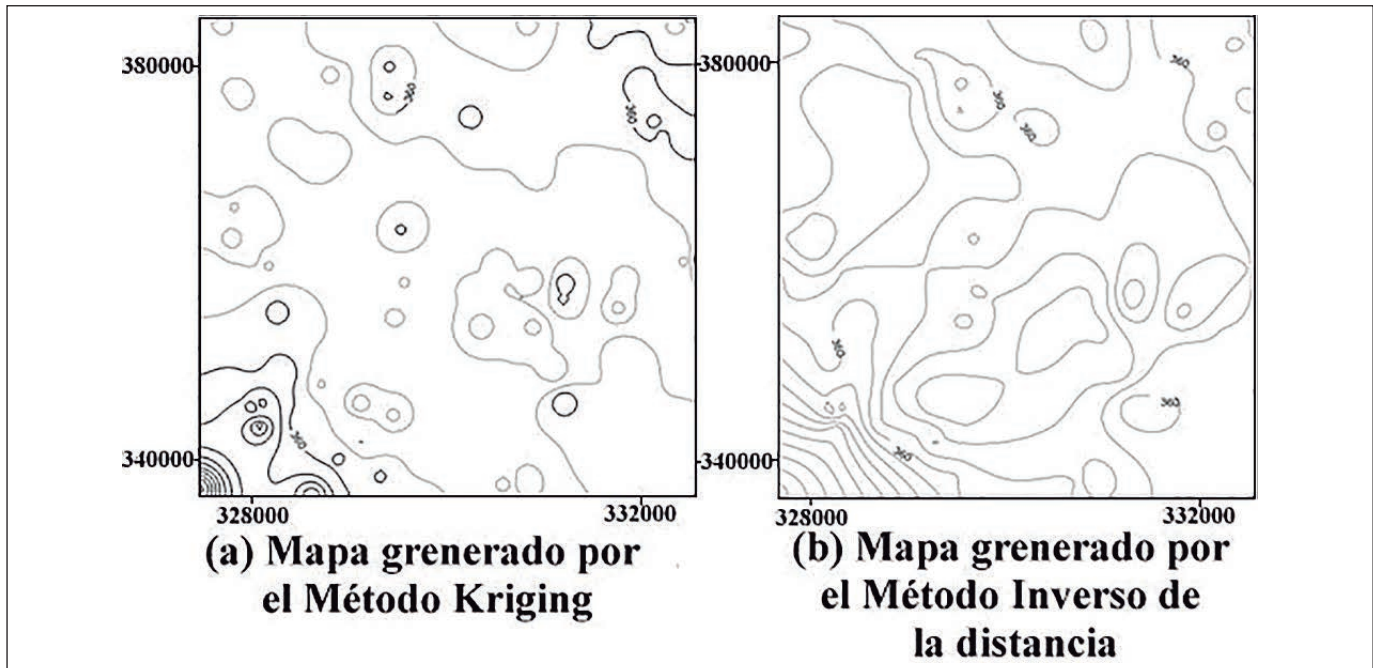


Figura 6. Mapas generados por la Tabla 4 con el objetivo de comparar dos métodos de regionalización de variables.

5) Análisis de Componentes Principales y Análisis de Factores.

Se generará de modo automático una Tabla de Objetos-Propiedades (TOP) con datos normalizados, en los que aparecen una serie de casos y entre 7 y 12 atributos. De forma Aleatoria se seleccionan dos parejas de atributos, los cuáles se generarán de forma dependiente cada pareja, para estructurar el problema. El estudiante debe ser capaz en esta tarea, aplicando el Análisis de las Componentes Principales y el de Análisis de Factores, de: (1) Mostrar en tablas convenientes el resultado de calcular los valores y vectores propios del sistema; (2) de construir el gráfico de composición de cada uno de los valores propios del sistema; (3) saber decir el por ciento de explicación que el sistema aportaría, si se toman los tres primeros valores propios; (4) Hacer una propuesta de la posible reducción dimensional del sistema y explicar por qué; (5) Construir el gráfico de los dos primeros factores (F1 vs F2) y hacer una discusión del grado de dependencia entre los atributos para esos factores. En la Figura 7

se aprecia una variante simulada, en la que se permite ver la tabla de Objeto-Propiedades de 30 casos y 8 atributos, además, las variables escogidas de modo aleatorio para representar el caso de variables dependientes (la variable 3 dependiente de la 4 y la variable 5 dependiente de la 6), y al final, la tabla de los autovalores, el gráfico correspondiente y el gráfico 2D de los Factores F1 y F2. La pregunta de esta tarea sería:

En el estudio ingeniero geológico para la construcción de un edificio, se tomaron 30 muestras de rocas, a las cuáles se les fueron determinadas las propiedades físico-mecánicas en el laboratorio de mecánica de suelos, en total 8 atributos (V1, V2, V3, V4, V5, V6, V7, V8). En la Tabla 5 de Objeto-Propiedades entregada para este problema se muestran, para cada objeto, los atributos que han sido normalizados entre valores de 0 y 1. Aplique el método de las Componentes Principales para: (1) Mostrar en tablas convenientes el re-

sultado de calcular los valores y vectores propios del sistema. (2) Construir el gráfico de composición de cada uno de los valores propios del sistema. (3) Responder: ¿Qué por ciento de explicación del sistema aportaría tomar los tres primeros valores propios? (4)

Hacer una propuesta de la posible reducción dimensional del sistema y explique por qué. (5) Construir el gráfico de los dos primeros factores (F1 vs F2) y hacer una discusión del grado de dependencia entre los atributos para esos factores.

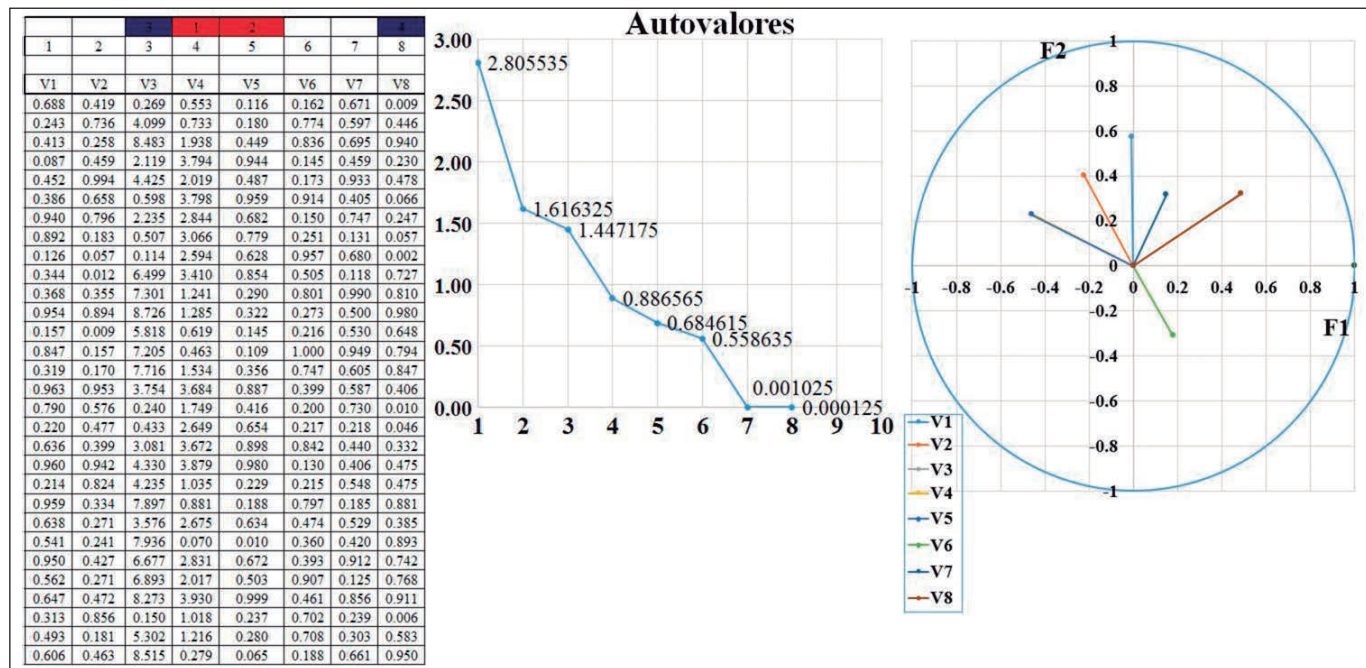


Figura 7. Variante simulada para la tarea de Análisis de Componentes Principales y Análisis de Factores.

6) Análisis de Clasificación Supervisada.

Para esta tarea se genera una Tabla de Objeto-Propiedades de datos tipificados de 3 a 8 atributos y se enuncia el problema de una tarea geólogo-geofísico determinada, la cual podrá poseer entre 5 y 8 grupos posibles de trabajo, con una cantidad entre 50 y 180 de objetos o casos. Se pedirá al estudiante hacer una clasificación a partir de los patrones mostrados utilizando la herramienta gráfica del dendograma, por lo que hay que exponer de forma explícita los casos y la clasificación correspondiente. En la Figura 8 se muestra un ejemplo de gráfico de dendograma, de una TOP propuesta para una clasificación supervisada. Los estudiantes podrán –de modo visual– realizar la clasificación de los elementos por clasificar de la TOP entregada. Un ejemplo de todas las posibles variantes sería:

Se quiere hacer una clasificación supervisada a partir de 123 objetos y 3 atributos mostrados en la TOP de la Tabla 6, cuyos datos están tipificados. Estos objetos representan los posibles tipos de relieve que se desean clasificar. Se han defi-

nido en esta TOP, 8 patrones, los cuales son: LLANO, SEMI LLANO, ONDULADO, COLINOSO, LOMAS BAJAS, LOMAS MEDIAS, LOMAS ALTAS, y MONTAÑOSO. Realice la clasificación solicitada a partir de los patrones mostrados utilizando la herramienta gráfica del dendograma.

7) Análisis de Clasificación no Supervisada.

Situándose en una región dividida en celdas cuadradas de 500 x 500 metros, limitada por las coordenadas del punto inferior izquierdo $[X_i, Y_i]$ y por las coordenadas del punto superior derecho $[X_f, Y_f]$ de coordenadas Lambert, donde a cada celda se le asocia k atributos geólogo-geofísicos los cuales han sido tipificados, los estudiantes tendrán que: (1) Hacer una clasificación no supervisada de las celdas del área a partir de sus atributos; (2) Construir el mapa de la región y hacer la zonación correspondiente al resultado de la clasificación; (3) Al final se hará una interpretación de los resultados desde el punto de vista

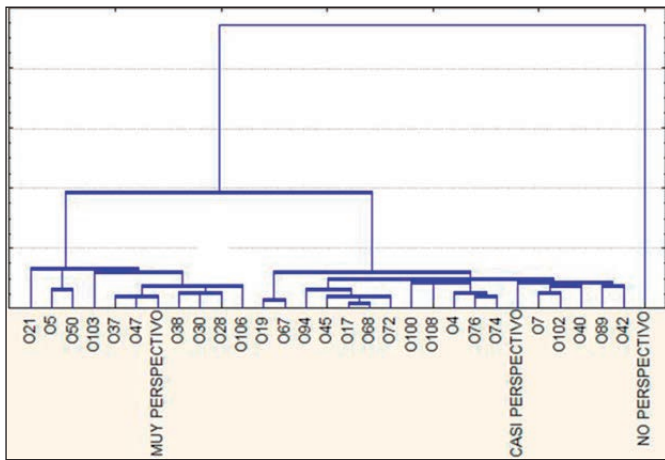


Figura 8. Dendrograma que representaría la clasificación supervisada de la en la Tarea 6.

cuantitativo-espacial. En la Figura 9 se muestra una parte de la TOP de esta tarea y el resultado de la clasificación espacial no supervisada de la región simulada. Una variante de pregunta para esta tarea es:

Se ha dividido en celdas cuadradas de 500 x 500 metros una región, limitada por las coordenadas del punto inferior izquierdo [438000, 325000] y por las coordenadas del punto superior derecho [442500, 329500] de coordenadas Lambert. Cada celda posee 7 atributos geológico-geofísicos los cuales han sido tipificados. (1) Haga una clasificación no supervisada de las celdas del área a partir de sus atributos, para ello se entrega la Tabla de Objeto-Propiedades Tabla 7. Utilice el dendrograma para realizar la clasificación a partir de la formación de grupos más estable que posea el sistema. (2) Construya el mapa de la región y la zonación correspondiente al resultado de la clasificación. (3) Construya una tabla con las columnas: GRUPO, #CELDAS, AREA, para calcular el área que representa cada grupo obtenido. (4) Haga una interpretación de los resultados desde el punto de vista cualitativo-espacial.

Este sistema de simulación de tareas docentes para la solución de problemas supuestos de la Geociencias, se diseñó en la plataforma *Microsoft Excel*. Se utilizaron tanto el procedimiento de cálculo de celdas dinámicas, como la programación de macros en *Visual Basic*, para dar solución a cada uno de las tareas de la asignatura.

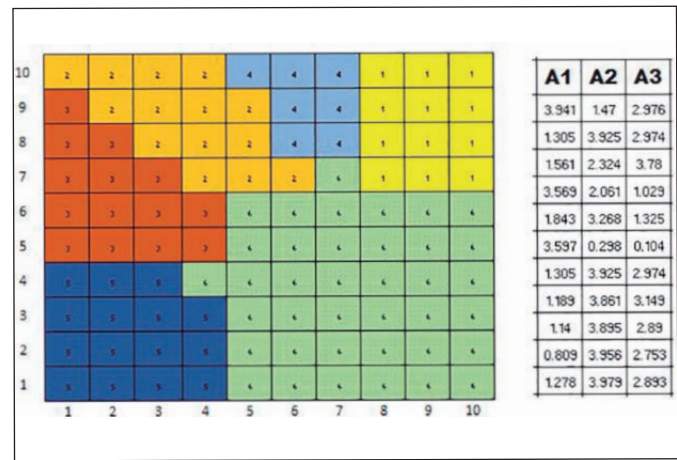


Figura 9. Resultado de la clasificación no supervisada de datos espaciales correspondiente a la Tarea 7. A la derecha se muestra una parte de la Tabla de Objeto-Propiedades suministrada para esta tarea.

En la hoja principal del programa (DatosGenerales) se introducen los nombres de los estudiantes que representan la matrícula del curso vigente (Figura 10). En esta hoja también se debe introducir el curso a que hace referencia la corrida, por ejemplo: 2016-17. De forma informativa aparece también el enunciado de cada una de las siete tareas docentes y sus siglas utilizadas por el programa. Aparece una imagen de una PC que representa un hipervínculo a la ejecución del programa (Figura 9).

En la ejecución de este programa se crean de modo automático dos carpetas en la raíz donde se esté ejecutando el simulador. Una carpeta contendrá las tareas docentes en un fichero en *Excel* (*.xls), para cada uno de los estudiantes listados en la hoja principal (DatosGenerales), con el nombre de carpeta: PDG_2016_2017_Estudiantes y la otra PDG_2016_2017_Profesor, donde estarán las respuestas a las tareas docentes de cada uno de los estudiantes en un fichero en *Excel* (*.xls) (Figura 11).

CONCLUSIONES

Se logró generar de forma automática tareas docentes que cumplen con los objetivos de la asignatura de Procesamiento de Datos en la Geociencias de la carrera de Ingeniería Geofísica, como respuesta a los limitados casos reales de tareas geológico-geofísicas existentes:

- a) Se analizaron los fundamentos y exigencias de cada una de las tareas geológico-geofísicas con objetivos docentes, de forma tal que cumplen con los objetivos docentes trazados por el Departamento de Geociencias de la Facultad de Civil de la Universidad Tecnológica de La Habana.

SIMULADOR DE TAREAS SOBRE EL PROCESAMIENTO DE DATOS EN LA GEOCIENCIA

NO	Nombre y apellidos	Curso:	
1	Baez Gutierrez Rigoberto	2016-2017	
2	Bejerado Kindelán Aliss María		
3	Carbonell López Yaneska		
4	Díaz Méndez Ana Laura		
5	Dopico Acosta Diana		
6	Estrada Ramos Yinet		
7	Forcada Labrador Carlos E.		
8	Fuentes Rodríguez Dairy Rocío		
9	Fundora Uffo Dayana E.		
10	García Martínez Ariel		
11	González Trujillo Omar		
12	Garciga Acosta Anabel		
13	Guerra Errasti Claudia		
14	Hechavarria Govin Elizabeth		

Tarea	Tema	Siglas	Sele
1	Análisis Exploratorio de Datos	AED	
2	Métodos de Interpolación	MIT	
3	Análisis Estructural	AET	
4	Regionalización de variables	RGV	
5	Análisis de Componentes Principales y Análisis de Factores	ACP-AF	
6	Clasificación Supervisada	CS	
7	Clasificación no Supervisada	CNS	

Figura 10. Hoja principal (DatosGenerales) donde se introduce la matrícula del curso vigente.

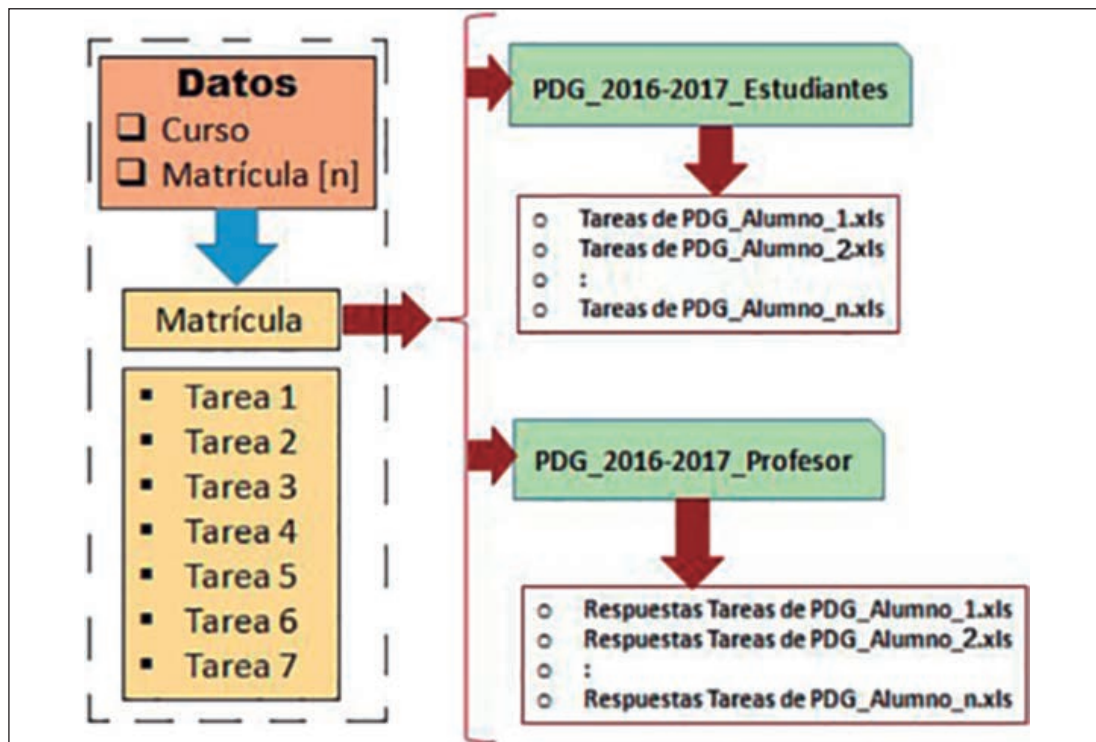


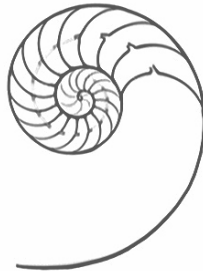
Figura 11. Esquema general del simulador de tareas docentes.

- b) Se diseñaron los algoritmos pertinentes para simular cada una de las tareas docentes y las respuestas correspondientes, ésta última, como herramienta de chequeo de estas tareas para el profesor de la asignatura.
- c) Se diseñaron los algoritmos generadores sobre la plata-

forma de Microsoft Excel para la creación de las tareas docentes propuestas, con la opción de aumentar la variedad de tareas geólogo-geofísicas y rangos para la generación de los diferentes tipos de datos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alfonso, J. A.**, 1979-82, Tratamiento numérico de datos geológicos, Conferencia de curso de postgrado. Facultad de Ingeniería Civil. ISPJAE. Ciudad de La Habana. Inédito.
- Alfonso, J. A.**, 1989, Estadísticas en las ciencias geológicas. Editorial ISPJAE. Tomo I, pp. 477 y Tomo II, 308 pp.
- Cramer, H.**, 1968, Elementos de la teoría de las probabilidades. Editora Aguilar, Madrid. Davis, J. C., 1986, Statistics and data analysis in geology. John Willey and Sons. Inc. New York, 550 pp.
- Dixon, W., Massey, F.**, 1966, Introducción al análisis estadístico. Editora del Castillo, Madrid.
- Freud, J. E.**, 1977, Estadística elemental moderna. Editora Pueblo y Educación, 466 pp. Krumbain, W., Graybill, F., 1961, An Introduction to Statistical Models in Geology. McGraw-Hill, New York.
- Ostle, B.**, 1977, Estadística Aplicada. Editora Científico-Técnica. Ciudad de La Habana, 629 pp.
- Objetivos y Secuencia de Actividades de la asignatura Procesamiento de Datos en la Geociencias**, 2015, Carrera de Ingeniería Geofísica Aplicada de la Facultad de Civil de la Universidad Tecnológica de La Habana.
- Spiegel. M. R.**, 1971, Teoría y problemas de estadística. Editora Ciencia y Técnica. Instituto Cubano del Libro. La Habana, 359 pp.





UNIVERSIDAD OLMECA

Raíz de sabiduría

Invitación

La revista *Geociencias*. Órgano de difusión científica de la Universidad Olmeca, invita a investigadores y maestros de esta casa de estudios, así como de universidades y centros de investigación de Iberoamérica, a participar con artículos originales en nuestra revista.

Podrán consultar las **Normas Editoriales** en el sitio web: www.olmeca.edu.mx o solicitarlas a los correos:

revistageociencias@gmail.com
revista.uo@gmail.com

www.olmeca.edu.mx



Universidad Olmeca, A. C., Carretera Villahermosa - Macuspana, km 14, poblado Dos Montes, Centro, C. P. 86280, Villahermosa, Tabasco, México.



UNIVERSIDAD OLMECA

Raíz de sabiduría

<http://www.olmeca.edu.mx>