

Pronóstico gasopetrolífero en la asociación ofiolítica cubana aplicando modelación matemática

J. E. Gómez-Herrera¹, O. Rodríguez-Morán¹, S. Valladares-Amaro¹, J. Ruiz-Shulcloper², R. Pico-Peña², G. Echevarría-Rodríguez¹, R. Tenreyro-Pérez¹, R. Otero-Marrero¹, E. Cheremisina³, R. Cruz-Toledo¹, G. Barceló-Carol¹, J. Alvarez-Castro¹, M. Barea-Centeno¹ y R. García-Sánchez¹.

¹ Centro de Investigaciones y Desarrollo del Petróleo. MINBAS. Ciudad Habana, Cuba.

² Instituto de Cibernética, Matemática y Física. Academia de Ciencias de Cuba, Habana, Cuba.

³ Instituto Gubkin. Moscú, Rusia.

Recibido: 11 de septiembre, 1992; aceptado: 28 de septiembre, 1993.

RESUMEN

Cuba es uno de los pocos lugares en el mundo donde se obtiene producción industrial de petróleo en rocas de la asociación ofiolítica. El primer yacimiento descubierto fue Motembo en 1881 y el más reciente Cantel en el año 1978. Los afloramientos de ofiolita –en su mayoría de serpentinita– pueden medir desde pocos metros hasta varios kilómetros de extensión y están sobreco-rridos en dirección de sur a norte, presentado gran tectonismo y metamorfismo superpuesto. Estos yacimientos de poca profundidad presentan grandes débitos de hidrocarburo en su etapa de explotación inicial, el cual migró desde rocas sedimentarias más profundas principalmente carbonatos. Se detectaban por la perforación de pozos cerca de las manifestaciones de hidrocarburo en la superficie o en las exploraciones hacia objetivos más profundos, como las secuencias carbonatadas de la Unidad Tectono-Estratigráfica (UTE) Placetas y Camajuani. Se creó una hipótesis genético-dinámica de la formación del cinturón ofiolítico y sus cabalgamientos y un modelo geólogo-geofísico para explicar las características de estas trampas. A partir de este modelo y sobre la base de una novedosa metodología de modelación matemática, se aplicó a problemas de reconocimiento de patrones en dominios poco formalizados del conocimiento, se procesó la información correspondiente a las áreas en estudio y se dieron respuestas a muchas interrogantes de esta problemática.

PALABRAS CLAVE: Modelación, exploración, reconocimiento de patrones, asociación ofiolítica.

ABSTRACT

Cuba is among the few places in the world where petroleum production is obtained from ophiolitic rocks, basically serpentines. The oldest discovery was in the year 1881 (Motembo oil field) and the most recent in 1978 (Cantel oil field). Oil migrated from underlying sedimentary rocks, mainly carbonates. The ophiolites and underlying rocks are overthrust from south to north. Oil fields are small but shallow and initially prolific. They were found by drilling near oil seeps or searching for deeper carbonate targets –Placetas and Camajuani TSU's. Recently a new genetic-dynamic hypothesis was created concerning the overthrust belt, and a new geologic model of these traps, applying mathematical simulation of pattern recognition about little-formalized knowledge, was used.

KEY WORDS: Simulation, exploration, pattern recognition, ophiolitic.

INTRODUCCION

El archipiélago cubano se encuentra entre las penínsulas de Yucatán (México) y la Florida (EUA), separando el Golfo de México, Bahamas y el Mar Caribe, regiones con gran producción y potencial de hidrocarburos. Cuba tiene muchos rasgos comunes en su evolución geológica y en la geología petrolera con las citadas regiones. En 1881 se iniciaron las perforaciones para buscar petróleo en Motembo, descubriéndose nafta y gas entre 200-300m de profundidad en rocas serpentiniticas. Después del descubrimiento en Motembo, las perforaciones petroleras se hicieron considerando en gran medida las manifestaciones superficiales de hidrocarburos, encontrándose las mayores densidades de perforación en la porción norte de las provincias de la Habana, Matanzas, y la Región Central. Definimos una Unidad Tectono-Estratigráfica (UTE) como un área de desarrollo de rocas con relaciones estratigráficas, limitadas por fallas profundas cuya paleogeografía guarda relaciones más o menos sucesivas o coherentes. Cuando una UTE tiene una relación estratigráfica y paleogeográfica diferente con las regiones que la rodean, la definimos como Terreno.

BOSQUEJO GEOLOGICO

De acuerdo con la evolución geológica, los rasgos de la constitución geológica actual y las características de los yacimientos descubiertos, se establecen dos provincias petrolíferas en los límites del archipiélago cubano: la provincia petrolífera norte cubana y la provincia petrolífera sur cubana. En la provincia petrolífera norte cubana se encuentra nuestra área en estudio, la cual ocupa la mitad norte de la isla y los mares adyacentes (Figura 1). Aquí existe una tectónica de cabalgamientos muy intensa para los sedimentos de la cuenca del Jurásico-Cretácico Medio y los sedimentos sinorogénicos de edad Campaniano-Eoceno Medio que los recubren, ubicados hacia la parte meridional –ocupando la parte superior del corte– y una tectónica menos intensa para las rocas de la misma edad de ambientes someros y profundos ubicados hacia la parte septentrional.

La tectónica tuvo una influencia decisiva en los procesos de generación de hidrocarburos, formación de reservorios sellados, trampas, así como para la migración y entrapamiento de los hidrocarburos. En esta provincia se

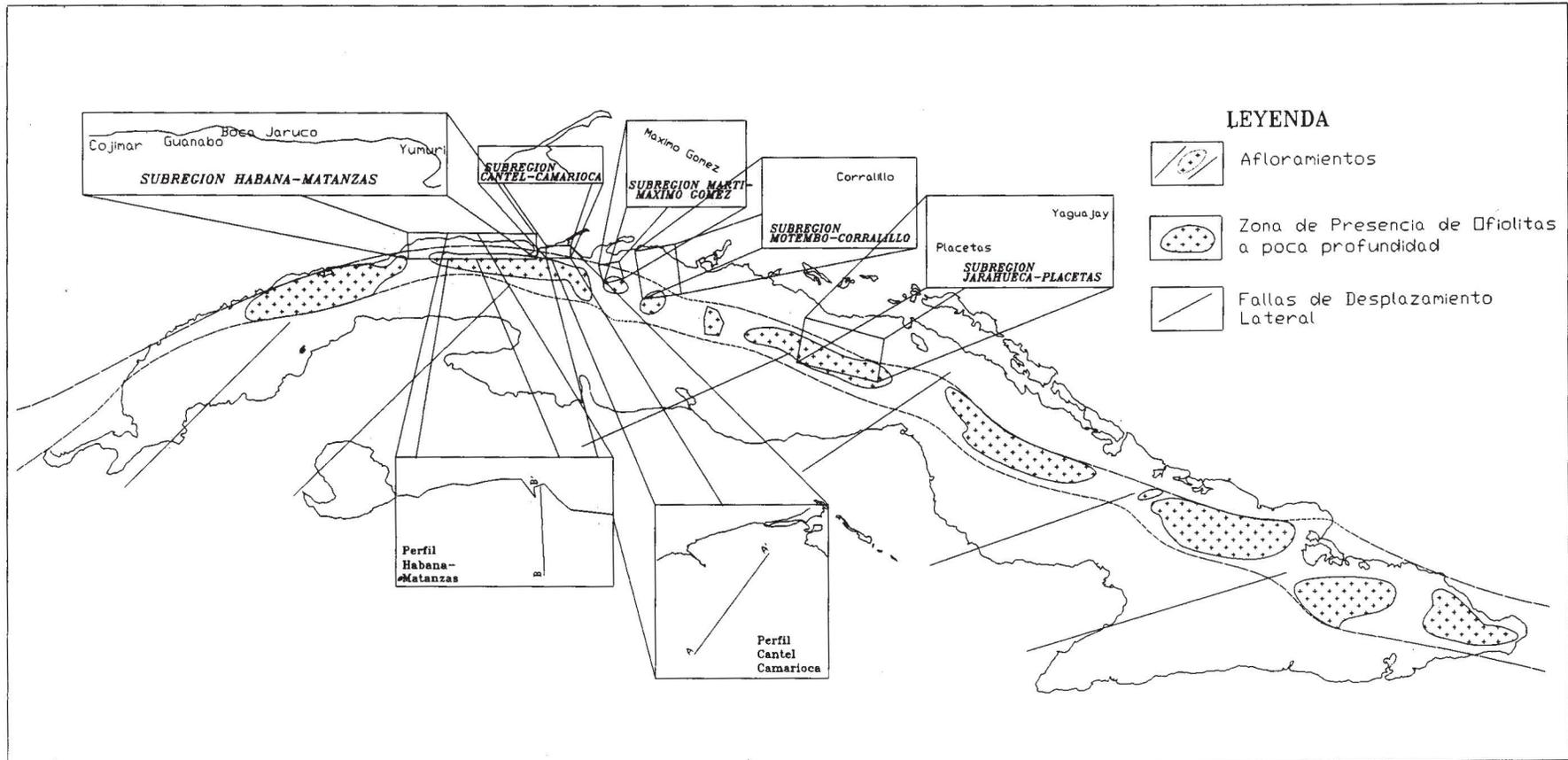


Fig. 1. Cinturón ofiolítico de Cuba y ubicación geográfica de las subregiones gasopetrolíferas.

han descubierto varios yacimientos de hidrocarburos asociados a las UTE Zaza, Placetas y Camajuani.

Nuestra área en estudio se encuentra subdividida en cinco subregiones que son:

- Subregión Habana-Matanzas
- Subregión Cantel-Camarioca
- Subregión Martí-Máximo Gómez
- Subregión Motembo-Corralillo
- Subregión Jarahueva-Placetas

donde están ubicados los principales yacimientos de petróleo que producen en ofiolitas (Tabla 1).

La UTE Placetas es una secuencia estratigráfica de deriva-drifting y sedimentos sinorogénicos asociados- caracterizada por sedimentos carbonatados, terrigenos y carbonatado-silíceos, con particular abundancia de silicitas en la parte alta del Cretácico Inferior, con superposición de mantos cabalgados de sur a norte y repeticiones de secuencias. En algunas partes encontramos presencia de elementos piroclásticos, provenientes de fuentes cercanas del Terreno Zaza. Existen en estos sedimentos numerosas mani-

festaciones de petróleo y asfalto, sobre todo en el Cretácico y Paleógeno.

La UTE Camajuani –también de deriva– está formada por rocas sedimentarias de edad Kimmeridgiense. Abarca rocas carbonatadas, carbonatado-silíceas y carbonatado-fragmentarias sin manifestaciones de magmatismo.

Los hidrocarburos conocidos de estas UTE son variables, desde petróleos extrapesados altamente sulfurados y resinosos hasta petróleos muy ligeros con bajos contenidos de azufre.

El terreno Zaza está definido como un conjunto de rocas del arco insular volcánico del Cretácico y la corteza oceánica asociada a ofiolitas.

Se habla de dos tipos de ofiolitas mezcladas tectónicamente:

- uno vinculado a una corteza oceánica sobre la que se formó un arco de islas volcánicas, que no posee cobertura sedimentaria y está cortado por diques y granitoides de afinidad con el arco volcánico;

Tabla 1

Características generales de los principales yacimientos en el complejo ofiolítico.

Yacimiento	Area (km ²)	Tipo de trampas	Tipo de depósitos	Prof. (km)	Sello
Bacuranao Cruz Verde	1.6	De pantalla tectónica litológica	Masivo	0.25-0.70 1.50-1.90	Arcilla de P ₂ ¹ y K ₂ Serpentinas
Guanabo	0.6	De pantalla tectónica litológica	Masivo	0.70-0.82 1.15-1.28	Arcilla de P ₂ ¹ y K ₂
Brisas	0.4	De pantalla tectónica litológica	Masivo	0.70-1.03 1.12-1.16	Arcilla de P ₂ ¹ y K ₂
Peñas Altas	0.4	De pantalla tectónica litológica	Masivo	0.50-0.75	Arcilla de P ₂ ¹ y K ₂
Sta. María	0.36	De pantalla litológica	Masivo	1.7	Serpentinas compactas
Via Blanca	3.75	De pantalla litológica	Masivo	0.40-1.37	Arcilla de P ₂ ¹ y K ₂
Boca de Jaruco	2.8	De pantalla tectónica litológica	Masivo	0.70-0.84	Arcilla de P ₂ ¹ y K ₂
Yamuri	0.92	De pantalla litológica	Masivo	0.66-0.68	Arcilla de P ₂ ¹ y K ₂
Camarioca	0.3	De pantalla litológica tectónica	Masivo	0.60-0.80	Arcilla de P ₂ ¹ y K ₂
Cantel	3.0	De pantalla litológica tectónica	Masivo Abovedado	0.38-0.68	Arcilla de P ₂ ¹ y K ₂
Motembo	6.0	De pantalla litológica	Masivo	0.15-0.50	Serpentinas compactas
Jarahueca	1.2	De pantalla litológica	Masivo	0.80-0.90	Serpentinas compactas

- otro que se considera un relicto de la corteza oceánica de un antiguo mar marginal situado entre el talud continental de Las Bahamas y el archipiélago volcánico.

Las rocas más abundantes son las serpentinitas, con componentes de los complejos de ultramafitas serpentinizadas y en melange que forman:

- asociaciones dunito-harzburgíticas
- gabros, gabro-dibasas y troctolitas bandeadas y anfibolizadas
- diabasas
- basaltos

La asociación ofiolítica forma una serie de escamas tectónicas pertenecientes a mantos sobrecorridos en el Cretácico Superior Tardío y en el Eoceno Medio (Echevarría, 1985) los cuales sufrieron procesos de alteración muy variados donde predominan las acciones físicas, mecánicas, deslizantes e hidroquímicas. En algunos casos los procesos son tan intensos que ocultan totalmente la naturaleza primaria de las rocas, produciendo grandes problemas en los análisis litológicos preliminares.

Las rocas que componen la asociación ofiolítica no poseen porosidad primaria sino de tipo secundario debido a los procesos anteriormente enumerados, amplificadas por las cercanías a fallas o grandes fracturas (Valladares *et al.*, 1991). Como esta secuencia no constituye roca madre, el petróleo entrampado en ellas proviene de las rocas sedimentarias de la UTE Placetas y Camajuani principalmente.

La existencia del petróleo está condicionada por fallas postorogénicas que sirven de vías de migración del petróleo de las rocas sedimentarias infrayacentes, de la fracturación, la cercanía a los bordes frontales de los mantos intraeugeosinclinales o al borde frontal final del sobrecorrimiento (Figura 1) o a fallas inversas de los pliegues escamas y al eventual bloqueo del espacio poroso efectivo por parte del material secundario. Estas rocas a su vez pueden constituir sellos locales cuando las serpentinitas están muy alteradas –serpentinitas hidratadas– y cuando no están fracturadas o las fracturas están selladas por minerales secundarios –generalmente cuarzo y/o calcita.

Los petróleos encontrados en los yacimientos del Terreno Zaza son muy variables desde pesados muy sulfurados hasta ligeros. La frecuencia de acumulaciones de petróleo ligero se incrementa hacia el sur.

Presentamos la relación de todas las unidades estratigráficas muestreadas de los mapas geológicos a una escala 1: 50 000 de nuestras áreas en estudio en número de 54 formaciones (Linares y Lobachev, 1985; Linares, 1986) agrupadas en 28 paquetes litológicos con iguales características formacionales –edad geológica, composición litológica, etc. (Gómez *et al.*, 1991; Valladares, 1985) (Tabla 2).

ESTUDIOS GRAVIMETRICOS

El campo gravimétrico de las anomalías de Bouguer en escala 1:50 000 de Cuba, de norte a sur, presenta una zona

de máximos mayores de 40 mGal, cuyo origen se atribuye al ascenso de secuencias carbonatadas más densas del Jurásico y Cretácico Superior, una zona de mínimo general al sur de la anterior, que coincide en la superficie con el límite septentrional del Terreno Zaza y por último una zona de máximos al sur de la anterior, cuyo origen se asocia al acercamiento a la superficie de las secuencias del arco volcánico –Terreno Zaza– subyacentes a los depósitos sinorogénicos, flyschoides y olistostrómicos del Cretácico Superior Tardío y Paleógeno Temprano. La complejidad y heterogeneidad que presenta la asociación ofiolítica y la morfología impredecible de los cuerpos rocosos que la conforman, hace que la resolución de la tarea inversa en la gravimetría sea muy difícil. Esta macromezcla de rocas de diferente densidad –asociación ofiolítica y rocas vulcanógeno-sedimentarias– del arco volcánico y sus cuencas asociadas, hacen bastante variable el campo gravimétrico. A esto se suman los distintos grados de metamorfismo, intemperismo, mineralización secundaria, fracturación y otras, de la que es víctima esta secuencia, proporcional a la intensidad de cabalgamiento existente.

Estas zonas se caracterizan por una gran variabilidad horizontal de la densidad a la profundidad de estudio, que produce campos residuales alineados con gradientes más o menos fuertes que se pueden caracterizar mediante el cálculo del gradiente regional horizontal.

ESTUDIOS MAGNETOMETRICOS

Los estudios aeromagnetométricos en escala 1:50 000 revelaron la presencia de un campo con gradientes suaves en la franja norteña de Cuba, entre 0-300 nT. Inmediatamente al sur de esta zona se detecta una región de mínimos regionales asociados a la presencia de las rocas serpentiniticas en la superficie.

Más al sur, el campo se caracteriza por la disposición caótica de las anomalías de menor extensión areal, positivas, que corresponden a las rocas del arco volcánico, con excepción de los lugares de cuencas paleogénicas.

Los intensos procesos tectónico-metamórficos que afectan a la asociación ofiolítica hacen que a medida que aumenta la serpentización, se liberen de la red de minerales máficos los átomos de hierro (Fonseca y Castillo, 1984), que al oxidarse o hidratarse conforman minerales altamente magnéticos. Ocurre también que la continuación de estos procesos haga perder estas propiedades magnéticas, por lo que junto a las anteriormente descritas aparecen rocas apenas magnéticas.

Esto explica por qué en las zonas de afloramiento de las ofiolitas existe un campo particularmente caótico con una gran cantidad de máximos y mínimos y una extensa gama de valores de intensidad magnética en función del tipo de ofiolita.

Al quedar enterradas bajo las secuencias terciarias, las ofiolitas disminuyen drásticamente su influencia en el campo magnético medido en superficie.

Tabla 2
Conjunto de unidades estratigráficas

DESCRIPCION LITOLÓGICA			
Nº orden Compl.	Edad del Compl.	Código Compl.	Descripción litológica
0	-	0	Sin litología
1	Q	9	Depósitos carbonatados-terígenos arcillas, etc.
2	N ₂	4,16	Calizas arenosas, arcillas calcáreas
3	N ₂	53-20	Arcillas, brechas conglomeradas Camajuaní
4	N ₁ -P _g	8,2,12,15,17	Arcillas calcáreas, calizas organógenas, calizas arcillosas
5	P ₃	13,52	Margas, calizas, conglomerados polimícticos
6	P ₃₋₂	11	Calizas, arcillas, margas
7	P ₂₋₂	28-54	Brechas, conglomerados, polimícticos
8	P ₂ ¹⁻²	36,34,26	Olistostromas policomponentes de calizas, serpentinitas y brechas
9	P ₂ ^{1/2}	27,31	Marga, calizas, areniscas calcáreas
10	P ₁₋₂	6,23	Arenisca polimíctica, conglomerados polimícticos y vulcanomícticos
11	P ₂ ¹	24	Brechas, calcarenita
12	K ₂ ^{m2} - K ₂ ^{cp}	1,32,42	Calcarenitas, gravelitas, brechas-conglomerados
13	K ₂ ^{m2} - K ₂ ^{cp}	19,37,43	Conglomerados polimícticos, areniscas, gravelitas arcósicas
14	K ₂ ^{cm}	29	Calizas, margas, conglomerado polimícticos, tufitas
15	K ₂ ^{s-cp}	25,51	Lavas, tobas, dacitas (UTE terreno Zaza), aglomerados andesibasaltos
16	K ₁ ^a - K ₂ ^{cm}	33	Silicitas cuarzo-calcedónicas, aleurolitas
17	K ₁ ^a - K ₂ ^{cm}	7,21,46	Calizas microgranulares, arcillas, silicitas con intercal. de arenisca
18	K ₁ ^{al} - K ₂ ^c	30	Calizas con brechas de dolomitas
19	K ₂ ^{cn-s}	14,39,44	Tobas zeolitizadas, tobas andesidacitas (zona Zaza), arenisca tobaceas
20	K ₁ ^{a-al}	10,18,50	Serpentinitas, gabros, dibasas, asociación ofiolítica
21	K ₁ ^{h-br}	22	Calizas microgranulares arcillosas.
22	K ₁ ^{h-br}	5	Areniscas arcósicas, calizas
23	K ₁ ^{a-al}	40,47	Lavas de doleritas, basaltos toleíticos, basaltos, tobas, basálticas
24	K ₁ ^{a-al}	3	Tobas andesíticas, dacitas, tufitas
25	K ₁ ^{cn} - K ₂ ^t	45	Calizas, areniscas y aleurolitas polimícticas
26	J ₃ ¹ - K ₁ ^y	35,38,41	Calizas, dolomitas, margas
27	J _r ²	49	Rocas evaporíticas
28	-	48	Granitoides

ESTUDIOS SISMICOS

Toda la isla fue atravesada de norte a sur y de este a oeste por una red de perfiles sísmicos regionales, que incluyeron la sismicidad de Reflexión de Punto Profundo Común y de Refracción, con registros y procesamiento digitales.

Como los métodos sísmicos son poco resolutivos en estas zonas complicadas, fue empleada una técnica experimental de interpretación de los primeros arribos de las ondas refractadas en los sismogramas de reflexión con recubrimiento múltiple, la cual ofreció un buen resultado en la determinación de las profundidades de emplazamiento de

las ofiolitas. Desgraciadamente este tipo de determinación no fue extensivo para todas las áreas en estudio (Tenreiro y Echevarría, 1986).

AEROESPECTROMETRIA DE RAYOS GAMMA

Las anomalías radiométricas multicanales nos sirven de indicadores de zonas favorables para la acumulación de petróleo en la asociación ofiolítica, particularmente en el caso del potasio, donde encontramos ciertas coincidencias de anomalías sobre zonas históricamente productivas (Lufriú *et al.*, 1986) lo que concuerda con estudios sobre la materia efectuados en otros países (Saunders, 1983).

El potasio tiene interés debido a que suponemos que sus concentraciones están relacionadas con la degradación de los silicatos y procesos de meteorización. Es soluble, se transporta a grandes distancias y ocurre en sedimentos detríticos, arcillas –por adsorción–, evaporitas y calizas.

GEOQUIMICA ORGANICA

Las determinaciones geoquímicas están basadas en la obtención de anomalías de metano, en función del contenido total de este gas en la roca y los procesos de adsorción y/o absorción del gas por la roca –de preferencia arcillosa– que se supone procede de los depósitos de hidrocarburos en la profundidad, siendo también posible la presencia de anomalías atribuibles a fallas o fracturas (Duchscherer, 1984). Históricamente ha sido considerado como un índice directo en la búsqueda de hidrocarburos.

También lo asociamos con los posibles contenidos de potasio, donde se incluyen procesos de reducción-oxidación química experimentados en el subsuelo y que contribuyen a la formación de anomalías geoquímicas-espectrométricas (Klimer, 1983).

Para tratar de comprobar esta teoría, realizamos un trabajo estadístico donde se analizaron 2233 muestras de las zonas de los yacimientos. Se comprobó que existía una coincidencia significativa entre anomalías de metano y potasio y las zonas productoras de petróleo en ofiolitas, en un 65 por ciento.

TELEDETECCION

Estos métodos nos dan elementos geológicos-estructurales de importancia regional asociados a fracturamientos mayores, fallas locales alineadas o límites estructurales, nodos o uniones frecuentes en rocas competentes, alineamientos marcados por los contrastes entre la autóctona vegetación de tipo xerófila y otras vegetaciones asociadas a zonas húmedas condicionadas a las fallas.

ESTUDIO GEOMORFOLOGICO

Mediante la aplicación de los métodos morfométricos caracterizamos las distintas áreas y determinamos estructuras neotectónicas con posibilidades gasopetrolíferas.

Estos métodos son: la pendiente, para determinar la influencia que ejercen los movimientos neotectónicos de ca-

rácter oscilatorio, y la disección vertical del relieve para revelar las dislocaciones disyuntivas de gran extensión, regiones morfoestructurales, mesoestructurales, etc. En regiones con una alta disección vertical es prácticamente imposible obtener un buen yacimiento de petróleo en ofiolitas, ya que los posibles reservorios estarían muy destruídos por los movimientos tectónicos recientes (Barea, 1990).

El método de la densidad tectónica por unidad de área nos permitirá analizar las zonas con distinta variación de las densidades de agrietamiento tectónico, lo cual está íntimamente relacionado con los procesos de origen endógeno de actividad tectónica.

DESCRIPCION DEL MODELO CONCEPTUAL GEOLOGICO

Sobre la base de la información existente en las diversas zonas productoras de petróleo se seleccionaron dos subregiones importantes y con información suficiente para desarrollar en cada una un modelo con características geológico-geofísicas representativas de estos yacimientos tipos.

Estas son:

- Subregión Habana-Matanzas
- Subregión Cantel-Camarioca

La elaboración de los modelos se basa en perfiles gravimétricos y aeromagnéticos regionales interpretados con técnicas bidimensionales en los cuales los cuerpos geológicos son representados por polígonos cerrados con valores aproximados de densidad y susceptibilidad magnética (Figura 2 y 3) (Talwani y Worzel, 1959; Talwani y Heirtzler, 1964).

Para la modelación del efecto gravimétrico y magnético se contó con datos de densidad y susceptibilidad de las rocas medidas en los testigos de los pozos (Gómez et al., 1986), datos provenientes de la interpretación de los registros geofísicos de pozos (Gómez et al., 1989), datos gravimétricos (Prol, 1989) y datos aeromagnéticos (Lufriú et al., 1985).

MODELO GRAVIMETRICO

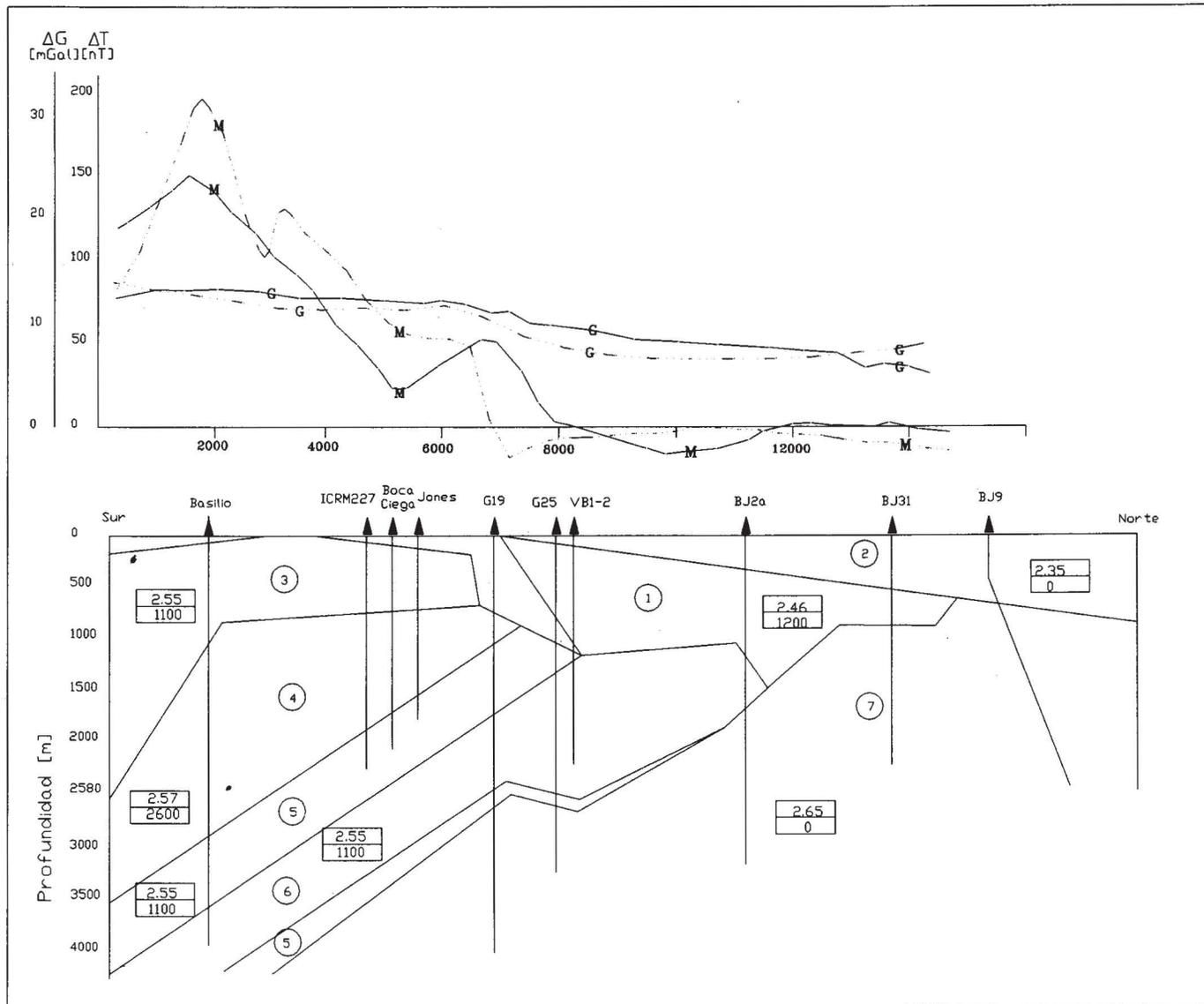
Subregión Habana-Matanzas

El modelo representado en la Figura 2 está constituido por siete unidades geológicas (Tabla 3).

Tabla 3

Descripción de los cuerpos que conforman el modelo. Subregión Habana-Matanzas

Cuerpo	Complejo	Edad	Densidad [g/cm ³]	Suceptibilidad [SI]
2	Post-orogénico	Q-N-P	2.35	-----
1	Orogénico I (Fm. Vía Blanca)	K ₂ ^{cp-m}	2.45	1200
3 y 6	Ofiolita alterada (terreno Zaza)	K ₁ ^{ap-al}	2.55	1100
4	Ofiolita compacta	K ₁ ^{ap-al}	2.57	2600
5	Melange ofiolítico	K ₂ ^{cp-m}	2.55	1100
7	UTE placetas (Alóc. miogeosincl.)	K ₁ ^{ap-al}	2.65	-----



LEYENDA

Anomalia de Bouguer Calculada	Anomalia de campo magnetico total Observada	Nombre del Pozo	Ofiolitas Alteradas	Dragénico
Anomalia de Bouguer Observada	Densidad [g/cm3] / Susceptibilidad [SI]	FM. Vía Blanca	Ofiolitas Compactas	Alóctono Miogeosincl
Anomalia de campo magnetico total Calculada	Pozos Petroleros	Postorogénico	Melange	

Fig. 2. Modelo geológico-geofísico de la subregión Habana-Matanzas.

La densidad de referencia es de 2.65 g/cm³ de la secuencia carbonatada de la UTE Placetas. Este modelo reproduce con bastante aproximación la forma y magnitud de las anomalías gravimétricas observadas. Se infiere que las anomalías positivas del campo gravimétrico son producto de la posición estructural de los plegamientos, tanto de la UTE Zaza como de la UTE Placetas.

- 0-4600m Observamos que los valores de anomalía de Bouguer son mayores por la presencia de grandes espesores de ofiolita asociadas al área de Basilio.
- 4600-8000m Disminuyen los valores del campo que parece que obedecen a una disminución de los espesores de la ofiolita y a la tendencia regional de levantamiento dado por los cuerpos carbonatados más profundos.
- 8000m El campo se presenta bastante estacionario con pocas variaciones, condicionado a los espesores sedimentarios post-orogénicos y orogénicos.

Subregión Cantel-Camarioca

Aquí generalizamos el corte geológico a 8 cuerpos, debido a que se unieron cuerpos con igual densidad (Tabla 4 y Figura 3).

En esta modelación se utilizó la densidad de la UTE Placetas como densidad de base o referencia de 2.60 g/cm³.

- 0-3850m Se observa una brusca disminución de la intensidad del campo, donde el cuerpo que representa al orogénico de la UTE Placetas -cuerpo 3- es el que más aporta a su disminución. Además se infiere un efecto acumulativo de supuestos cuerpos de ofiolitas más al sur.
- 3850-6000m Podemos observar un efecto anómalo positivo residual, atribuible a las secuencias

de carbonatos, que levantan las secuencias alóctonas del Terreno Zaza y UTE Placetas -cuerpo 3 y 8.

- 6000m-final Aquí el campo disminuye aunque con una tendencia a mantenerse cuasi-estacionario, debido a cierta estabilización en profundidad y en densidad de los cuerpos más profundos y espesores estables de la secuencia sedimentaria.

MODELO AEROMAGNETOMETRICO

Subregión Habana-Matanzas.

Observando la anomalía de campo aeromagnético total, podemos dividir nuestro modelo en tres grandes zonas.

- 0-4200m Donde se observan anomalías importantes presuntamente provocadas por el carácter de la ofiolita alterada y su orogénico con gran cantidad de bloques de ofiolitas.
- 4200-6600m Donde existe también un comportamiento anómalo del campo producto de los elementos anteriormente descritos, con un menor grado de metamorfismo, más el melange ofiolítico en posición estructural.
- 6600m-final Representa un campo más tranquilo que justifica el modelo como la gradual desaparición de los mantos de ofiolita y sus elementos magnéticos.

Subregión Cantel-Camarioca.

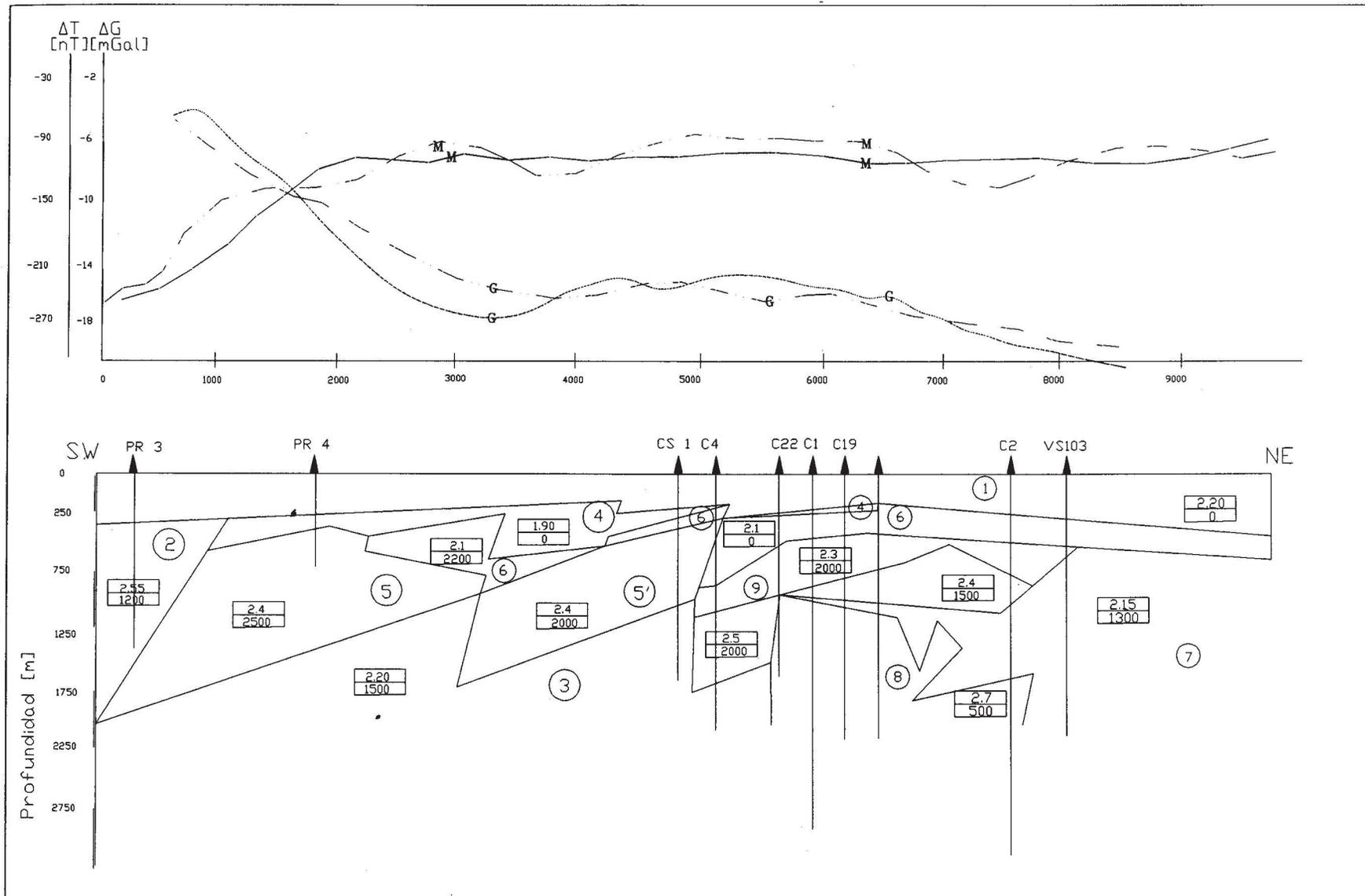
El modelo magnetométrico lo subdividimos en tres partes para su interpretación (Figura 3).

- 0-2000m El campo aeromagnético -caótico- aumenta abruptamente producto de la presencia de cuerpos ofiolíticos (5 y 5') de textura alterada.

Tabla 4

Descripción de los cuerpos que conforman el modelo de la subregión Cantel-Camarioca

Cuerpo	Complejo	Edad	Densidad [g/cm ³]	Susceptibilidad [SI]
1	Post-orogénico	Q-N-P	2.20	-----
2	Orogénico I (Fm Vía Blanca)	K ₂ ^{cp-m}	2.55	1200
4	Orogénico II (sello)	K ₂ ^m	1.90	-----
6	Orogénico III (Fm. Amaro)	K ₁ ^m	2.10	-----
9	Orogénico IV (Conglomerado)	K ₂ ^m	2.1-2.3	2000-2200
5 y 5'	Terreno Zaza	K ₁ ^{ap-al}	2.40	2000-2500
3	Orogénico de Placetas	K ₂ ^{cp-m}	2.20	1500
7	Orogénico V (areniscas arcóscas)	K ₂ ^{cp-m}	2.15	1300
8	UTE Placetas (Alóc. miogeosincl.)	K ₂ ^{ap-al}	2.60	500



LEYENDA

- | | | | | |
|---|---|--------------------|---------------------|---|
| Anomalía de Bouguer Calculada | Anomalía de campo magnético total Observada | Postorogénico | Secuencia Terrigena | Areniscas Arcosicas |
| Anomalía de Bouguer Observada | Nombre de Pozos | Fm. Vía Blanca | Serpentinitas | Aloctono Miogeosinclinal |
| Anomalía de campo magnético total Calculada | Pozos Petroleros | Presunto Drogénico | Conglomerados | Densidad [g/cm ³]
Susceptibilidad [SI] |

Fig. 3. Modelo geológico-geofísico de la subregión Cantel-Camarioca.

- 2000-6500m Donde el campo aeromagnético se comporta con una alteración media con algunas inflexiones correspondientes a las zonas de sobreempuje.
- 6500m-final Un campo aeromagnético tranquilo donde no se refleja el borde frontal principal de sobrecoarrimiento eugeosinclinal.

CRITERIOS DE BUSQUEDA

En función de los modelos geológico-geofísicos, del estudio de los atributos y del análisis histórico, se resumen los siguientes criterios para la búsqueda de petróleo en la asociación ofiolítica.

- 1.- Presencia de estructuras positivas de las secuencias carbonatadas bajo los mantos ofiolíticos.
- 2.- Relativo poco espesor de los mantos ofiolíticos, y la existencia de ventanas tectónicas.
- 3.- La cercanía del borde frontal del cabalgamiento eugeosinclinal.
- 4.- La existencia de una antiforma en las ofiolitas.
- 5.- Los halos de gases hidrocarburos, fundamentalmente metano.
- 6.- Los manaderos de hidrocarburos son el criterio histórico más utilizado en la búsqueda de yacimientos en la asociación ofiolítica de Cuba septentrional.
- 7.- Zonas con baja disección vertical y densidad de tectoneamiento.

PROCESO DE MODELACION MATEMATICA

Para la realización de nuestro modelaje se hace necesario definir primeramente los objetivos principales a lograr:

- a) Estudio de las áreas dadas como productoras de petróleo y secas para la asociación ofiolítica en la Zona Norte Cubana a escala 1: 50 000.
- b) Determinación del complejo de métodos geológico-geofísicos más eficientes, capaces de discriminar objetivos posibles productores y no productores si se cumple la factibilidad de este análisis.
- c) Verificación general del modelo y su futura confiabilidad, para la tarea de pronóstico.
- d) Confeccionar el pronóstico gasopetrolífero delimitando las áreas productivas y no productivas y su semejanza a determinado patrón.

En nuestro caso los problemas a modelar son de dos tipos:

- 1.- Sabemos de grupos -clases- de objetos geológicos, relativos a yacimientos conocidos, descritos en términos de un conjunto de atributos geólogo-geofísicos de dife-

rente naturaleza y queremos determinar, mediante la analogía con estos objetos, la relación de otro del cual no poseemos información alguna de productividad -clasificación con aprendizaje.

- 2.- Se describen objetos sobre la base de los mismos atributos, y se quiere determinar el grado de incidencia de estos en el fenómeno que estudiamos -selección de variables.

Nuestro modelaje se complica por estar incluido en una disciplina poco formalizada -o poco estructurada- de las geociencias (Cheremesina, 1989), donde no poseemos en muchos casos, cabal conocimiento de las leyes que rigen el comportamiento de nuestros objetos en el universo en cuestión y no se posee toda la información sobre el grado en que influyen los objetos que se estudian. Aquí se trabaja a partir de criterios múltiples para la solución de los problemas, que no es única en la mayoría de los casos. Por lo general, trabajamos sobre la base de analogías, experiencias y observaciones acumuladas (Gavat, 1973). Se formulan las descripciones de objetos frecuentemente sobre la base de atributos de naturaleza cuantitativa y cualitativa, en forma simultánea.

Teniendo presente estos elementos y la máxima metodológica que "del modelo matemático no se parte, sino que a él se llega" (Davis, 1986), y la no conveniencia de aplicar modelos matemáticos de naturaleza estadística, recurrimos a la utilización de técnicas de modelaje matemático de reconocimiento de patrones con algoritmos de votación con enfoque lógico-combinatorio, en particular basados en la Teoría de Testores (Cheremesina y Shulcloper, 1990), que han sido materializadas en el sistema automatizado PROGNOSIS (Shulcloper et al., 1992).

El sistema automatizado PROGNOSIS es un sistema-herramienta orientado a especialistas no familiarizados con las técnicas computacionales ni con los modelos matemáticos, que para su explotación sólo exige el conocimiento de la especialidad del usuario al que va dirigido el sistema y que a su vez brinda información esencial para que el mismo no sea una "caja negra" para el usuario. Este sistema permite trabajar con variables cualitativas y cuantitativas simultáneamente y en forma diferenciada en función de su modelo geológico.

Los algoritmos de votación son modelos de algoritmos de reconocimiento de patrones basados en el principio de presupuestos de búsqueda de semejanzas o analogías, con casos conocidos, no sólo en las descripciones completas de los objetos, sino también entre los subconjuntos de los atributos que definen al objeto.

Objeto es un conjunto ordenado de los valores que tomen las variables o atributos que describen a una unidad definida para su estudio.

Un Testor -en nuestro caso un Testor Típico- es el resultado de una matriz de aprendizaje de la cual no es posible eliminar una columna sin que se altere la condición de no presentar filas iguales -objetos- en clases diferentes.

Una matriz de aprendizaje es un conjunto de descripciones en términos de una serie de rasgos -variables- pre-determinados, organizados en forma tabular -matricial- y agrupados según las clases a que pertenezcan.

En los algoritmos de votación se determinan parámetros como son los sistemas de conjuntos de apoyo, las funciones de semejanza, criterios de comparación y selección de variables (Ponce de León *et al.*, 1987).

Sistema de conjuntos de apoyo, son subconjuntos de columnas -rasgos- de una matriz de aprendizaje que se determinan sobre la base de la modelación del problema en cuestión.

Funciones de semejanza son las que permiten establecer si dos descripciones de objetos son semejantes o de lo contrario da la medida de esa semejanza. Esto está dado por un criterio de comparación que es el procedimiento que establece para cada uno de los tipos de variables -booleanas, cualitativas o cuantitativas- admitidas por el sistema.

Los criterios de selección de variables están basados en el concepto del Testor Típico donde se calculan ciertas magnitudes denominadas peso informacional de una variable y peso informacional de un objeto, que nos dan sendas medidas de la relevancia de los atributos y los objetos, respectivamente. El peso informacional de una variable es una magnitud que el sistema calcula mediante el uso de los Testores Típicos de la siguiente forma:

$$P_{(x)} = |T_{(x)}| / |T| \quad (1)$$

donde T denota el conjunto de todos los Testores Típicos de la matriz de aprendizaje; $T_{(x)}$, aquellos que contienen al atributo x y las barras denotan el cardinal del conjunto T, es decir la cantidad de elementos.

El peso informacional de un objeto se define como:

$$P_{(x)} = \frac{1}{\sigma} \sum_{j=1}^n a_j(o) P(x_j) \quad (2)$$

siendo σ la suma de los pesos informacionales de todas las variables; n, el número total de variables y $a_j(o)$ se calcula mediante el número de elementos de la columna j coincidentes, divididos por el cardinal de la clase. Mientras más coincidencias existan -frecuencia de aparición en la clase- en la columna, mayor será la incidencia e importancia de dicho objeto en la clase.

Por esta vía pueden ser resueltos cuestiones como:

- 1.- Conocer los atributos o rasgos que más inciden en el problema dado.
- 2.- Utilizar menos rasgos que los que se tiene cuando no se sabe cuál(es) eliminar.

- 3.- Conocer los vínculos que existen entre algunos de los rasgos que describen los objetos de su problema.
- 4.- Conocer cuáles son los objetos más representativos dentro de su clase.

Existen muchos criterios de comparación para la semejanza (Shulcloper, 1990) pero haremos referencia solamente a los utilizados. Cuando el atributo sea de naturaleza cualitativa -aquellos atributos que expresan cualidades, propiedades o estados-, el criterio de semejanza será k-valente, utilizando el criterio de comparación por igualdad simple -ejemplo: gradiente alto=1, gradiente medio=2, gradiente bajo=3. Si el atributo es de naturaleza cuantitativa, el criterio de comparación será el de intervalo y error admisible. Por ejemplo, para la definición de la intensidad del campo aeromagnético tenemos:

Valor mínimo=-100 nT	< - 500	Alto negativo
Valor máximo= 100 nT	-500 - -150	Medio negativo
Error admisible= \pm 25 nT	-150 - - 50	Bajo negativo
	- 50 - 50	Fondo no anómalo
	50 - 150	Bajo positivo
	150 - 500	Medio positivo
	> 500	Alto positivo

Si comparamos dos valores del campo tales que 150nT y 160nT, veremos que para nuestro modelo esos valores serán iguales.

Esta metodología y su software han sido aplicados con buenos resultados en problemas de la medicina (cardiología), sismología (Ruiz-Shulcloper *et al.*, 1992), y otras en Cuba. Bajo otras ópticas se aplicó en la búsqueda de minerales en Rusia (Sirovinskaia, 1986; Konstantinov, 1975).

ESQUEMA DE ELABORACION DE LA INFORMACION

Toda la información proviene de la digitalización del área en estudio usando una malla cuadrada de 500x500m, la cual consideramos nuestra unidad básica de muestreo (um) mínima -a todos los atributos- para que las anomalías asociadas al grado de perspectividad tengan suficiente resolución en determinar estructuras y/o formas contrastantes no menores de un kilómetro cuadrado.

El concepto de anomalía depende del método y tipo de atributo que se analice, por lo que de forma genérica definimos como anomalía aquel efecto del campo o propiedad analizada (Weeler, Krystinik, 1987) que sea igual o sobrepase en dos veces la precisión de su levantamiento o error metodológico (Botezatu, 1976).

El grado de perspectividad se definirá como las zonas dentro de los yacimientos, que son productivas por la información de pozos dentro de ellas y/o por los indicios de la geología de mucha evidencia -manifestaciones de hidrocarburos, criterios de expertos etc.

La definición de no perspectividad no siempre estará bien categorizada. Algunos especialistas prefieren trabajar

sólo con los patrones definidos como perspectivas o lo que es lo mismo, con aprendizaje parcial (Ruíz Shulcloper y Alaminos, 1992).

De acuerdo con nuestros presupuestos, objetivos principales y factibilidad del modelaje, trabajaremos con dos modelos:

a) Modelo Simple (Cualitativo trivalente) en que consideramos la presencia de la anomalía con su signo [positi-

va (+1) y negativa (-1)] o ausencia de esta (0) y utilizaremos 12 atributos descritos en la Tabla 5.

b) Modelo General (Cuantitativo) donde se analizan 22 atributos de acuerdo con su intensidad, error de medición y valores ranqueados o intervalizados, enumerados en la Tabla 6.

Para nuestro modelo contamos con 438 objetos estudiados que se agrupan en 20 clases (Tabla 7a, b y c).

Tabla 5
Atributos utilizados en el MODELO SIMPLE

DESCRIPCION DE LA VARIABLE	SIMBOLO
- Litología	LITO
- Residual de promediación gravimétrica (R=1500m)	R3
- Residual de promediación gravimétrica (R=2000m)	R4
- Residual de promediación gravimétrica (R=3000m)	R6
- Gradiente regional del residual de promediación gravimétrico (R=1500m)	GR3
- Gradiente regional del residual de promediación gravimétrico (R=3000m)	GR3
- Gradiente regional gravimétrico de Bouguer	GN
- Intensidad del campo aeromagnético	MAG
- Gradiente regional del campo aeromagnético	MGG
- Geoquímica de metano	MET
- Espectometría de potasio	POT

Tabla 6
Atributos utilizados en el MODELO GENERAL

DESCRIPCION DE LA VARIABLE	SIMBOLO
- Distancia al frente de cabalgamiento eugeosinclinal principal	DIST-DFT
- Distancia a la manifestación más cercana	D-MANIF
- Distancia sobre 55° de acimut al frente de cabalgamiento principal tangencial (paralelo a las fallas transversales principales)	D-TFRT7
- Distancia sobre 55° de acimut al macizo de ofiolita aflorante más cercano	D-MACIZ
- Densidad de tectoalineamiento	DENS-TECT
- Dirección de tectoalineamiento	DIRC-TECT
- Altura media	ALT-MED
- Altura máxima	ALT-MAX
- Pendiente	PEND
- Disección vertical	DISEC
- Levantamiento geológico de superficie	LITO
- Anomalía gravimétrica de Bouguer	Go
- Residual de promediación gravimétrica (R=1500m)	RES-R3
- Residual de promediación gravimétrica (R=2000m)	RES-R4
- Residual de promediación gravimétrica (R=3000m)	RES-R6
- Gradiente regional del residual de promediación gravimétrico (Radio=1500m)	GR3
- Gradiente regional del residual de promediación gravimétrico (Radio=2000m)	GR4
- Gradiente regional del residual de promediación gravimétrico (Radio=3000m)	GR6
- Gradiente regional gravimétrico de Bouguer	GRAG
- Intensidad de las anomalías de potasio	POT
- Intensidad del campo aeromagnético	MAG
- Gradiente máximo aeromagnético	GMAG

Tabla 7a.

Región gasopetrolífera Habana-Matanzas

P A T R O N	P E R S P E C T I V A				T O T A L
	SI		NO		
	CODIGO	Nº	CODIGO	Nº	
Bacuranao	BAP	38	BAN	8	46
Boca de Jaruco	BJP	12	BJN	42	54
Basilio	BSP	5	BSN	40	45
Cruz Verde	CVP	12	CVN	8	20
Guanabo	GBP	8	GBN	13	21
Santa María	STP	8	STN	24	34
Vía Blanca	VBP	10	VBN	11	21

Tabla 7b.

Región gasopetrolífera Cantel-Camarioca

P A T R O N	P E R S P E C T I V A				T O T A L
	SI		NO		
	CODIGO	Nº	CODIGO	Nº	
Cantel	CAP	17	CAN	30	47
Camarioca	KAP	--	KAN	34	34

Tabla 7c.

Región gasopetrolífera Motembo

P A T R O N	P E R S P E C T I V A				T O T A L
	SI		NO		
	CODIGO	Nº	CODIGO	Nº	
Motembo	MTP	86	MTN	30	116

METODOLOGIA DEL TRABAJO

Solución para el Modelo Simple

Mediante criterios de expertos agrupamos nuestros patrones en 7 grupos afines.

- | | | |
|---------------|---------|---------------|
| 1.- BAN y BSN | 3.- CVN | 5.- BAP y BSP |
| 2.- CAN y KAN | 4.- MTN | 6.- CAP |
| | | 7.- CVP y MTP |

No aparecen en este análisis algunos patrones como el yacimiento Boca de Jaruco, Guanabo, Santa María y Vía Blanca debido a que son yacimientos que poseen muy poca información.

Aplicando en el algoritmo de votación el concepto de Testor Típico y como criterio de semejanza las variables cualitativas K-valentes, obtuvimos los siguientes resultados de los Pesos Informacionales:

- | | | | |
|--------------|-------------|-------------|--------------|
| LITO - [1] | R6 - [1] | GR4 - [0] | POT - [1] |
| R3 - [0.5] | GN - [0] | GR6 - [0] | MAG - [1] |
| R4 - [0.5] | GR3 - [0] | MET - [1] | GMAG - [0] |

Este análisis en función de los pesos informacionales está justificado por los resultados de los Testores Típicos, los cuales nos dan combinaciones de atributos o variables resolutivos para nuestra tarea (Tabla 8).

Tabla 8

Combinaciones de test típico para el MODELO SIMPLE

ATRIBUTOS	COMBINACIONES DE TESTORES TÍPICOS	
	1	2
LITO	X	X
R3	X	
R4	X	
R6	X	X
MET	X	X
POT	X	X
MAG	X	X

Se muestran en la Tabla 9 las características generales de la matriz de aprendizaje traducidos al lenguaje geológico o sea no formalizados.

Solución para el Modelo General

A partir de un análisis mediante criterios de expertos agrupamos nuestros patrones en 9 grupos afines.

Se muestran en la Tabla 10 las características generales de la matriz de aprendizaje traducidos al lenguaje geológico, o sea no formalizados.

- | | | |
|---------------------|---------|---------|
| 1.- BAN y BSN | 4.- KAN | 7.- CVP |
| 2.- BAN y MTN y BSN | 5.- MTN | 8.- CAP |
| 3.- CAN | 6.- BSP | 9.- MTP |

Aplicando como *algoritmo de votación* el concepto de *Testor Típico* y utilizando como *criterio de semejanza* las variables cuantitativas *reales* y *Error admisible*, obtuvi-

mos los siguientes resultados en los *Pesos Informacionales*:

- | | | | |
|--------------|--------|------------|--------|
| 1.- DIST-DFT | [1] | 7.- RES-R4 | [.36] |
| 2.- D-TFRT7 | [.21] | 8.- RES-R6 | [.43] |
| 3.- LITO | [1] | 9.- MET | [.14] |
| 4.- DEN-TEC | [.64] | 10.- MAG | [.57] |
| 5.- DISEC | [.36] | 11.- GMAG | [.43] |
| 6.- RES-R3 | [.14] | | |

Se obtuvieron 14 combinaciones -Testores Típicos- capaces de identificar patrones ante objetos de desconocido parentesco de perspectiva (Tabla 11).

Los atributos restantes, que no aparecen en la Tabla 11, tuvieron pesos informacionales iguales a cero, o sea, no son resolutivos para el modelo.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES

- 1.- Para el desarrollo del pronóstico se estudiaron las zonas productoras y secas pertenecientes a las áreas patrones y se pudieron comprobar los modelos geólogo-geofísicos confeccionados para la zona norte cubana en escala 1: 50 000.
- 2.- Se pudo evidenciar la asociación de anomalías positivas de los residuales gravimétricos a el levantamiento de los carbonatos de la UTE Placetas.
- 3.- La interpretación magnética aclaró las características tectónicas del corte y su grado de metamorfismo.
- 4.- Cada modelo determinó el complejo de métodos geólogo-geofísicos más eficientes y resolutivos para la discriminación de objetivos y respectivos y no respectivos.

Tabla 9

Características generales de la matriz de aprendizaje del MODELO SIMPLE

Patrón	Calidad	Litología	A N O M A L I A											
			R3	R4	R6	GN	GR3	GR4	GR6	MET	POT	MAG	MGG	
I BAN-BSN	Buena	$K_1^1 - K_2^{m2}$ Conglomerado polimíctico, arenisca, ofiolitas	-& 0	-& 0	0	-	+	+	+	+	0	Mis &+	+	Mis & +
II CAN-KAN	Muy buena	P_2^Q Brecha conglomerado polimíctico	0	0	-& 0	0	+	+	+	+	0&+	0	-	+
II CVN	Mediocre	K_1-K_2 Ofiolitas, conglo. polimíct.	+	+	+	0	+	+	+	+	0	Mis	+	Mis
IV MTN	Buena	K_1-P_2 Conglo. polimíct., ofiolitas	-	0	?	-	+	+	+	+	0	0	0&+	+
V BAP-BSP	Mediocre	K_2^{m2} Conglo. polimíct. areniscas	+	+	+	-	+	+	+	+	0	+	+	+
VI CAP	Muy buena	P_2 Conglo. polimíct.	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	-	+
VI CVP-MTP	Buena	K_1-P_2 Ofiolitas conglo. polimíct	+	+	+	-	+	+	+	+	+	0	+	+

Grado de calidad: 0-40 aceptable, 40-70 mediocre, 70-80 bueno, >80 muy bueno.

Anomalía: No definido ?, no medida Mis, nula 0, positiva +, negativa -.

Tabla 10

Características generales de la matriz de aprendizaje del MODELO GENERAL

Grupo	Patrón	Calidad	Edad	Litología	D-Frente	Disf-Tag	Den-Tect	Disec
I	BAN-BSN	Aceptable	K_2^{cp-m2}	Cong. polim., aren. arg. arcos	Lejano	Algo lejano	Fuertemente	Grandemente
II	BAN-NTN-BSN	Aceptable	$Q-K_1$	Depósitos carbonat. terríg. + brechas conglom. polimícticas + cong. polim. aren. arg. arcos + serp. compl. ofiolítico.	Lejano	Medio lejano	Fuertemente Fracturado	Fuertemente diseccionado
III	CAN	Mediocre	Q	Depósitos carbonat. terríg.	Medio lejano	Transición	Fuertemente	Diseccionado
IV	KAN	Mediocre	Q	Depósitos carbonat. terríg.	Transición	Transición	Fuertemente	Muy
V	MTN	Mediocre	P_2	Brechas conglom. polimícticas	Fuertemente lejano	Medio lejano	Fuertemente fracturado	Poco diseccionado
VI	BSP	Aceptable	K_2^{cp-m2}	Cong. polim., aren., arg. arcos	Lejano	Medio	Fuertemente	Diseccionado
VII	CVP	Mediocre	K_1^{al-a}	Serp. compl. ofiolítico	Algo lejano	Algo lejano	Fuertemente	Muy disecc.
VIII	CAP	Buena	P_2	Brechas conglom. polimícticas	Medio lejano	Cercano	Medianamente fracturado	Diseccionado
IX	MTP	Mediocre	$P_{K_1^{2al-a}}$	Brechas conglom. polimícticas + serp. compl. ofiolítico	Fuertemente lejano	Medio lejano	Fuertemente fracturado	Muy poco diseccionado

Tabla 10

(Cont.)

Grupo	Patrón	A n o m a l í a s					
		R3	R4	R6	Metano	MAG	MGG
I	BAN-BSN	No anómalo	No anómalo	No anómalo	No anómalo	Muy bajo positivo	Muy alto
II	BAN-MTN-BSN	No anómalo	No anómalo	No anómalo	No anómalo	Medio positivo	Alto
III	CAN	No anómalo	No anómalo	No anómalo	No anómalo	Bajo negativo	Medio
IV	KAN	No anómalo	No anómalo	No anómalo	No anómalo	Muy bajo negativo	Alto
V	MTN	No anómalo	No anómalo	No anómalo	No anómalo	Alto positivo	Muy alto
VI	BSP	Muy bajo positivo	Muy bajo positivo	Bajo positivo	Muy bajo	Muy bajo positivo	Muy alto
VII	CVP	Muy bajo positivo	Bajo positivo	Bajo positivo	Bajo positivo	Missing	Missing
VIII	CAP	Muy bajo positivo	Bajo positivo	Muy bajo positivo	Muy bajo	Bajo negativo	Medio
IX	MTP	No anómalo	Muy bajo positivo	Bajo positivo	Bajo	Fondo no anómalo	Muy alto

Grado de calidad: Peso informacional de los individuos, 0-40, aceptable, 40-70 mediocre, 70-80 bueno, >80 muy bueno.

Anomalía: No medida Mis, nula 0, positiva +, negativa -.

Tabla 11

Combinaciones de Testor Típico para el MODELO GENERAL

ATRIBUTOS	COMBINACIONES DE TEST TIPICOS													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
DIST-DFT	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
D-TFRT7	X			X			X							
LITO	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
DENS-TECT	X	X	X		X		X	X	X		X			X
DISEC				X		X				X		X	X	
RES-R3													X	X
RES-R4			X	X				X	X	X				
RES-R6					X	X					X	X		
MAG	X	X	X	X	X	X	X						X	
GMAG								X	X	X	X	X		X
MET													X	X

- 5.- El modelo simple demostró sencillez, rapidez y calidad en el pronóstico ya que solamente definió dos combinaciones de atributos. Se puede limitar el pronóstico al uso del residual gravimétrico de radio=3 000m, siendo redundantes los demás.
- 6.- Las anomalías de intensidad magnética son significativas para diferenciar patrones y no para diferenciar el grado de perspectiva.
- 7.- En el modelo los atributos asociados a los gradientes no son significativos al pronóstico. Significa que no son resolutivos verdaderamente o su formalización no fue la mejor—puede ser extensible para cualquier otro atributo con información nula.
- 8.- El modelo general aunque con más atributos, no contradice lo enunciado por el modelo simple, cosa muy importante que nos acerca a la realidad objetiva ya que con diferentes enfoques, obtenemos resultados parecidos.
- 9.- Los atributos estructurales como son distancia al frente de cabalgamiento eugeosinclinal principal y distancia tangencial, dan un buen aporte a la caracterización de los patrones, aunque el primero se proyecta como un elemento capital para la diferenciación de estos.
- 10.- La densidad de tectoalineamiento nos confirma que el grado de fracturación debe ser moderado, para que permita desarrollar el reservorio, pero que no lo destruya. Un ejemplo práctico es la definición en el patrón Cantel como "medianamente fracturado" (Tabla 10), que es el que está mucho mejor conservado que sus otros homólogos y de ahí su buena productividad.
- 11.- Aquí ocurre una subdivisión bastante interesante con respecto a los patrones de BAN y BSN. Estos a su vez se dividen en dos grupos, siendo una posible interpretación que el primer grupo asociado BAN y BSN posee potencias mayores de ofiolita con una tectónica mucho

más complicada que el grupo II, donde además se suma el patrón MTN (Figura 2).

- 12.- Ya verificado el modelo geólogo-geofísico y los presupuestos enunciados para confeccionar el modelaje, se procedió a realizar el pronóstico gasopetrolífero en todas nuestras zonas no patrones, clasificándose 12501 objetos pertenecientes a nuestras áreas en estudio.

A modo de ejemplo práctico ilustramos nuestros resultados de la clasificación con el mapa pronóstico del área Cantel-Camarioca (Figura 4 y 5).

Para el modelo simple se delimita perfectamente el yacimiento Cantel en el centro del área evaluada. La mayoría del área se reporta como no perspectiva excepto la zona SE—con un tectonismo más intenso que el yacimiento Cantel—y con más baja confiabilidad.

El modelo general contornea perfectamente el área del yacimiento Cantel perspectivo y las zonas pertenecientes a los yacimientos no perspectivos Cantel y Camarioca.

Esta área clasificó como CAP netamente. Existe inmediatamente hacia el sur, una zona de tipo CVP, cuando el modelo simple nos da una clasificación de tipo Cantel. Aquí encontramos una contradicción apreciable con nuestro modelo simple, por lo que esta región debe de estudiarse con cuidado. Hacia el este se observa un área con características de perspectiva muy dispersa y con menor grado de confiabilidad.

- 13.- La validez del pronóstico está avalada por la perforación de 48 pozos ubicados por todas las áreas -de tipo wildcat. Existe una coincidencia de un 80% entre los resultados de ensayo y producción de estos pozos y los dados por los dos modelos (Gómez et al., 1991).

- 14.- Se comprobó en los análisis efectuados que la realización del pronóstico en escala 1: 50 000 para la búsqueda

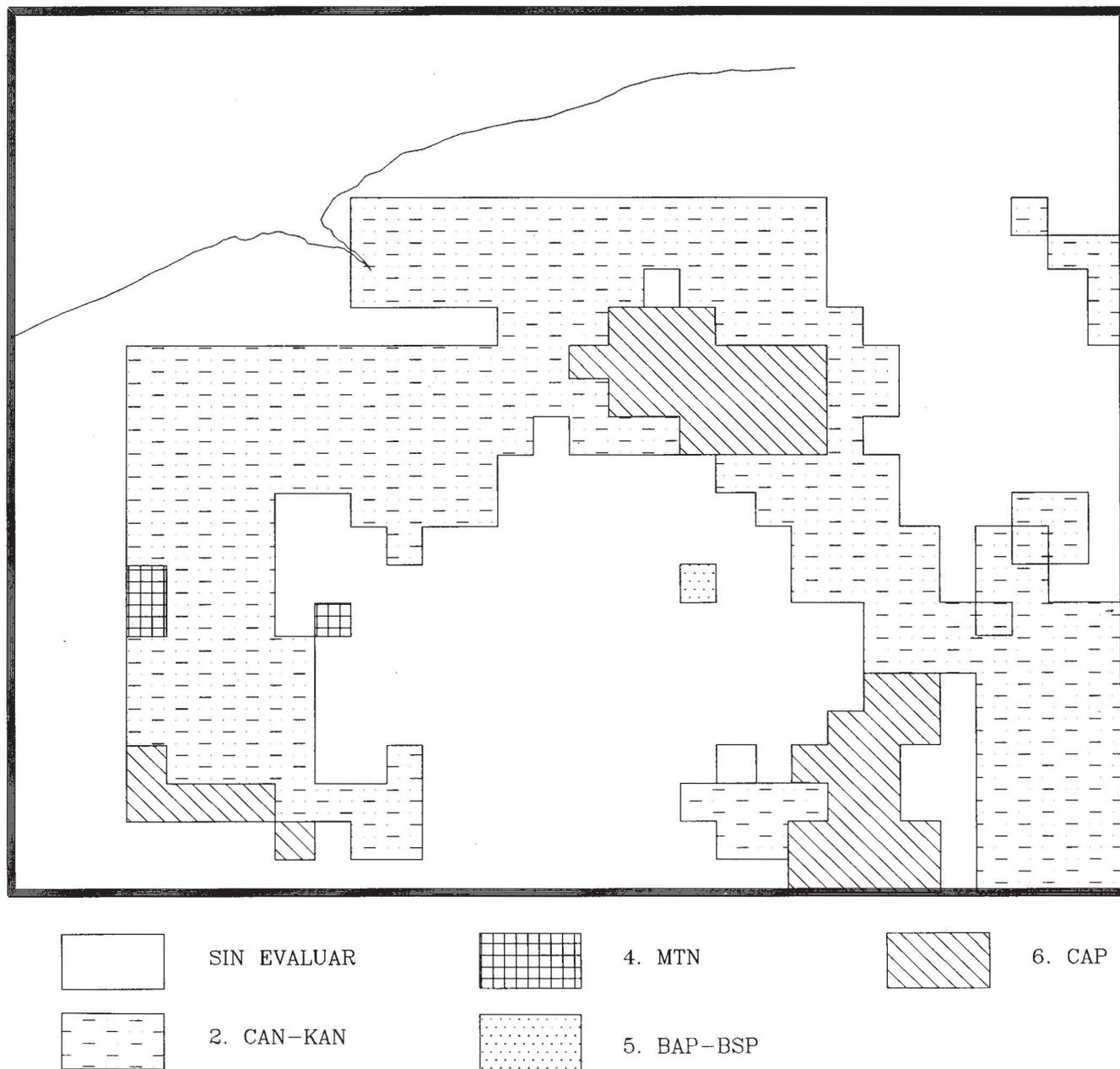


Fig. 4. Mapa pronóstico subregión Cantel-Camarioca, modelo simple. Escala 1:100000.

da de objetos perspectivos en las ofiolitas constituyó un límite aceptable para restringir las áreas de prioridad máxima pero no suficiente para ubicar pozos de explotación directamente. A una escala mayor, por ejemplo en 1:100 000, se pierden las características de los objetos interesantes y solamente se logra información general de tipo geológico, o sea, se pierden las especificaciones de la ofiolita en función de su perspectiva gasopetrolífera.

15.- Esta técnica de reconocimiento de patrones con aprendizaje aplicado a las ciencias poco formalizadas, utilizando los Testores Típicos, demostró ser una técnica útil y confiable para esta tarea del pronóstico. Estudia-

mos complementar en el futuro metodologías de pronóstico utilizando técnicas difusas.

16.- Es necesario fortalecer el estudio del modelo geológico-geofísico mediante las tareas directas -inversión- para los campos geofísicos como los presupuestos geológicos.

17.- Hacemos énfasis en que este pronósticos no tiene suficiente confiabilidad para ubicar pozos de exploración directamente, sino que nos sirve para restringir áreas sujetas a estudios geológicos, geomorfológicos y geofísicos más detallados.

18.- Se realizó una comparación entre los pronósticos de los dos modelos mediante el análisis de sus diferentes

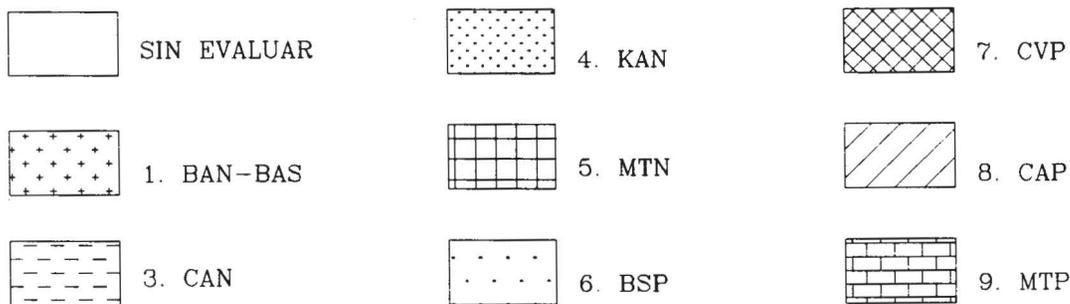
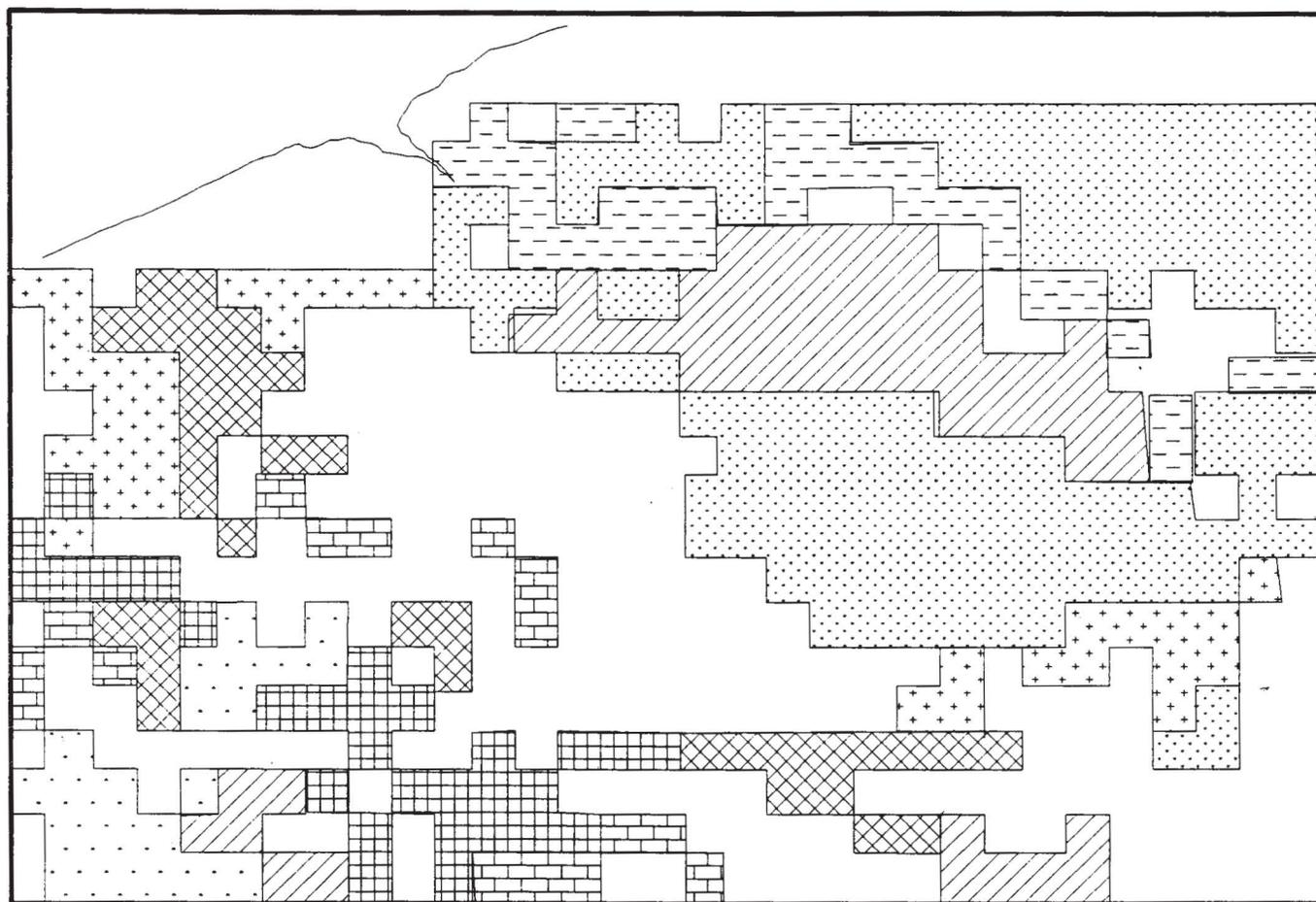


Fig. 5. Mapa pronóstico subregión Cantel-Camarioca, modelo general. Escala 1:100000.

resultados, confeccionándose un mapa al que llamamos Modelo Combinativo (Figura 6).

Consideramos varias categorías como son:

- No perspectivo y/o perspectivo de 1er orden. Cuando coinciden los resultados de los pronósticos de los modelos en relación a la perspectividad.
- No perspectivo y/o perspectivo de 2do orden. Cuando uno de los modelos da una respuesta y el otro se abstiene.
- Contradictorio. Cuando las respuestas entre los modelos son diametralmente diferentes.

Pueden existir múltiples interpretaciones. Nosotros nos limitamos a decir solo el bajo índice de contradicciones, que se mantiene estable entre el 6 al 8% para todas las subregiones, muy por debajo de la media histórica de los resultados de los pronósticos a esta escala, que está en el orden del 25 al 50% de error.

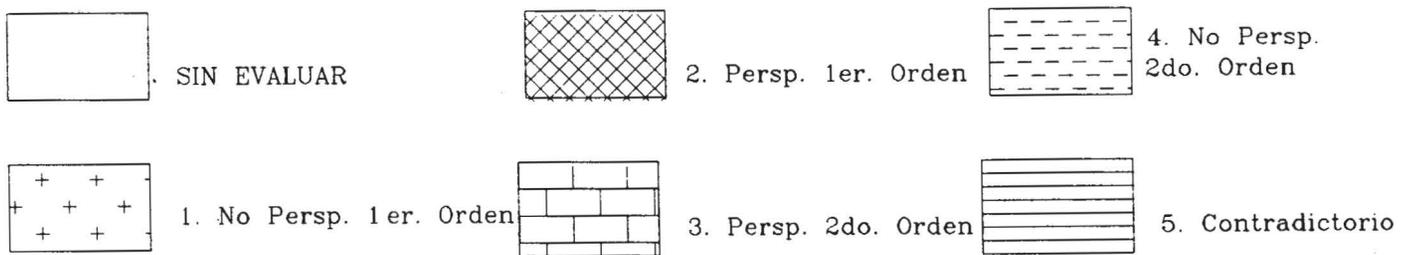
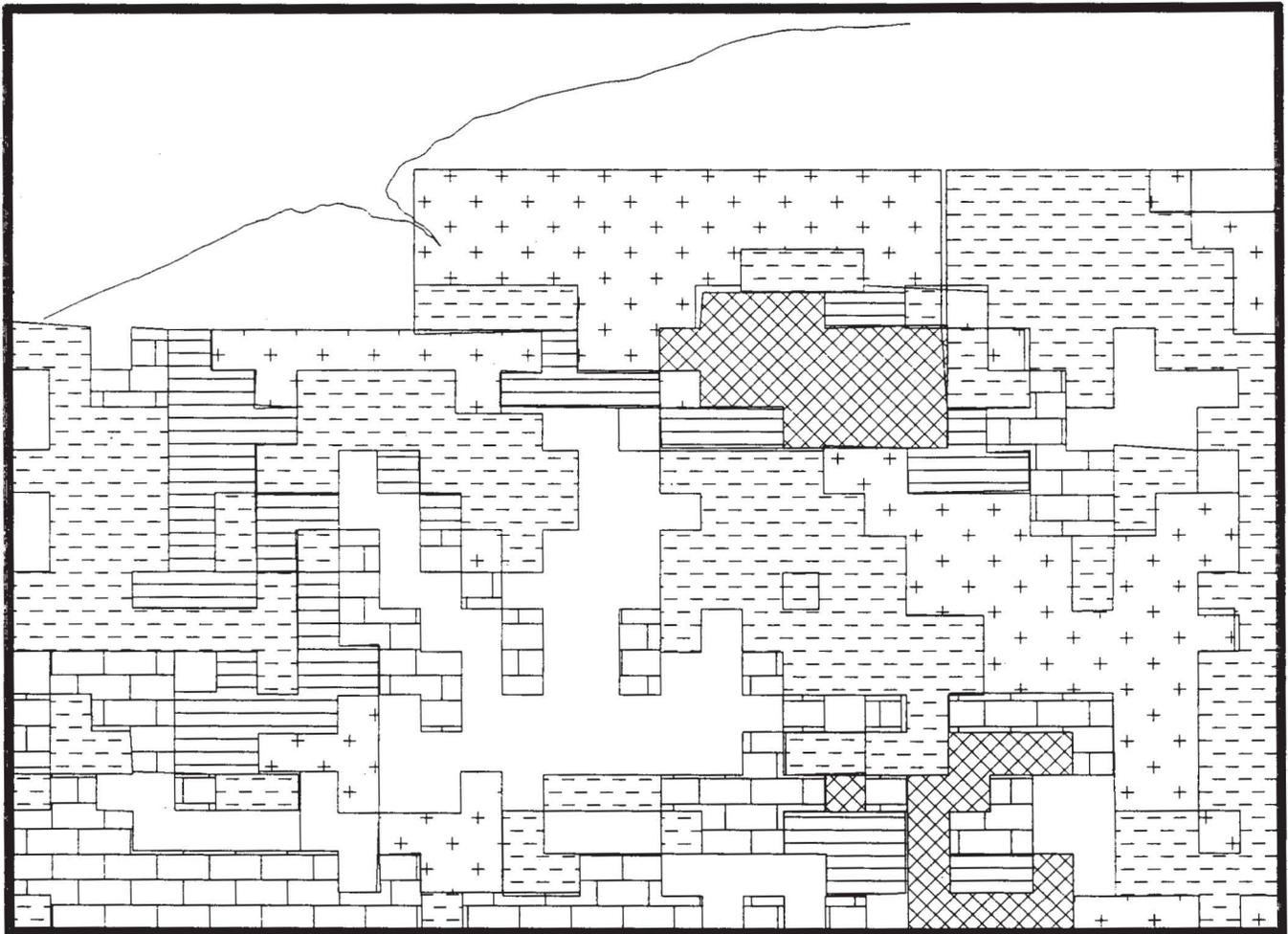


Fig. 6. Mapa pronóstico subregión Cantel-Camarioca, modelo combinativo. Escala 1:100000.

BIBLIOGRAFIA

- BAREA, M., 1990. Introducción, análisis y evaluación de la geomorfología para la prospección de yacimientos de hidrocarburos. Archivo Técnico. CIDP.
- BOTEZATU, R., 1976. Modele geofizice ale alcatuirii geologice a Romaniei. Editura Academiei, Bucuresti, Romania.
- CHEREMISINA, E., 1989. Sistema automatizado ALISA para la solución de problemas en zonas poco formalizadas del conocimiento. Un ejemplo de la Geología. *Revista Ciencias Matemáticas*, 10, 53-64.
- CHEREMISINA, E. y J. RUIZ SHULCLOPER, 1992. Cuestiones metodológicas de la aplicación de los modelos matemáticos de reconocimiento de patrones en zonas del conocimiento pocos formalizadas. *Revista Ciencias Matemáticas*, 13, 2, 93-108.
- DAVIS, J. C., 1986. Statistics and data analysis in geology. John Wiley and Sons. USA.
- DUCHSCHERER, W., 1984. Geochemical hydrocarbon prospecting. Tulsa, USA.
- ECHEVARRIA, G., 1985. Análisis bibliográfico de las ofiolitas, Archivo Técnico, CIDP, Cuba.

- FONSECA, E. y F. CASTILLO, 1984. Geoquímica de la asociación ofiolítica de Cuba. *Archivo Técnico Fondo Geológico, Cuba*.
- GAVAT, I., R. BOTEZATU y M. VISARION, 1973. Interpretarea Geologica a prospectiunii Geofizice. Editura Academiei, Bucuresti, Romania.
- GOMEZ, J. E., O. RODRIGUEZ et al., 1986. Análisis de la constitución geológica y de los datos sobre la capacidad gasopetrolífera en los yacimientos de la Subregión Habana-Matanzas. Tema de investigación 012. *Archivo Técnico Centro de Investigaciones y Desarrollo del Petróleo (CIDP), Cuba*.
- GOMEZ, J. E., O. RODRIGUEZ y S. VALLADARES, 1989. SISGEO. Sistema de Interpretación Geofísica. Serie Geológica. Número especial por el I Congreso de Geología de Cuba.
- GOMEZ, J. E., O. RODRIGUEZ y S. VALLADARES et al., 1991. Obtención de una metodología para la búsqueda de yacimientos de petróleo en rocas serpentínicas. *Archivo Técnico Centro de Investigaciones y Desarrollo del Petróleo (CIDP), Cuba*.
- KILMER, C., 1983. Radiation laws over productive areas seen as a geochemical phenomenon. *Oil and Gas Journal, 81*, 30.
- KONSTANTINOV, R. M., 1975. Soluciones lógico-informacionales de problemas geológicos. Editora Nauka. Moscú.
- LINARES, E. y LOVACHEV, 1985. Informe geológico sobre las investigaciones de la región Habana-Matanzas. *Archivo Técnico, CIDP, Cuba*.
- LINARES, E., 1986. Informe de los trabajos de levantamiento geológico del área Cantel-Camarioca a escala 1:20 000. Tema 012. *Archivo Técnico, CIDP, Cuba*.
- LUFRIU, L. y I. PADILLA, 1985. Informe de los resultados del levantamiento aerogeofísico complejo en el territorio nacional de Cuba. *Archivo Técnico Fondo Geológico, Cuba*.
- PONCE DE LEON, E., N. LOPEZ, RUIZ SHULCLOPER y J. AROCHA, 1987. Sistemas de selección y clasificación SSC. Reporte de Investigación del ICIMAF. No. 67, La Habana.
- PROL, J., 1989. Informe sobre los resultados de los trabajos gravimagnéticos de la región Habana-Matanzas. *Archivo Técnico Fondo Geológico, Cuba*.
- RUIZ SHULCLOPER, J., 1990. Modelos matemáticos para el reconocimiento de patrones. Monografía de la Univ. Central de Las Villas, Fac. de Matemática, Física y Computación. Cuba.
- RUIZ SHULCLOPER, J., R. PICO, L. ALVAREZ et al., 1992. Modelación matemática del pronóstico de magnitudes máximas de terremotos en la región del Caribe. *Colección Reconocimiento de elementos de estructuras espaciales*. Instituto de Geofísica y Astronomía, Instituto de Cibernética, Matemática y Física, Academia de Ciencias. Cuba, pp. 81-99.
- RUIZ SHULCLOPER, J., C. ALAMINOS et al., 1992. Modelación matemática del problema de discriminación de anomalías AGE perspectivas para las rocas fosfóricas de génesis sedimentaria. *Colección Reconocimiento de elementos de estructuras espaciales*. Instituto de Geofísica y Astronomía, Instituto de Cibernética, Matemática y Física, Academia de Ciencias. Cuba, pp. 65-80.
- RUIZ SHULCLOPER, J. et al., 1992. PROGNOSIS y sus aplicaciones a las Geociencias. Memorias del 3er Congreso Iberoamericano de Inteligencia Artificial IBERAMIA 92, Editorial LIMUSA.
- SAUNDERS, D., 1983. New perspectives on radiometric exploration for oil and gas. *Oil and Gas Journal, 83*, 37, 126-130.
- SIROTINSKAIA, S. V., 1986. Métodos lógicos de análisis de la información geológica. Nedra, Moscú.
- TALWANI, M. y HEIRTZLER, 1964. Computation of magnetic anomalies caused by 2-D structure of arbitrary shape. *Computer and Mineral Industries No. 9*. Stanford Univ., pp. 464-480.
- TALWANI, M. y J. WORZEL, 1959. Rapid computation for twodimensional bodies with application to the Mendocino submarine fracture zone. *J. Geophys. Res.*, 64, 10, 49-59.
- TENREYRO, R. y G. ECHEVARRIA, 1986. Recomendaciones para la introducción del método sísmico de refracción para la búsqueda de estructuras en la secuencia serpentínica. *Archivo Técnico, CIDP, Cuba*.
- VALLADARES, S., 1985. Metodología para la evaluación de los colectores y sus propiedades de las rocas pertenecientes al complejo alóctono eugeosinclinal. Tesis para aspirar al grado de Dr. en Ciencias Naturales, Cuba.
- VALLADARES, S., G. ECHEVARRIA, J. ALVAREZ y J. GOMEZ, 1991. Las ofiolitas de Cuba un caso interesante de producción petrolera mundial. Memorias del 3er Encuentro Científico de la Sociedad Cubana de Geología. Habana, Cuba.

WEELER, R. Y K. KRYSSTINIK, 1987. Evaluating coinciding anomalies along a fault trace or other "transverse" simulation and statistical procedures. U. S. Geological Survey, 1802. Washington.

J. E. Gómez-Herrera¹, O. Rodríguez-Morán¹, S. Valladares-Amaro¹, J. Ruiz-Shulcloper², R. Pico-Peña², G. Echevarría-Rodríguez¹, R. Tenreiro-Pérez¹, R. Otero-Marrero¹, E. Cheremisina³, R. Cruz-Toledo¹, G. Barceló-Carol¹, J. Álvarez-Castro¹, M. Barea-Centeno¹ y R. García-Sánchez¹.

¹ Centro de Investigaciones y Desarrollo del Petróleo. MINBAS. Oficinas N° 154, Habana Vieja, Cuba.

² Instituto de Cibernética, Matemática y Física. Academia de Ciencias de Cuba, Calle E N° 309 e/15, Vedado, Habana, Cuba.

³ Instituto Gubkin. Moscú, Rusia.