

# Geociencias UO

Órgano de difusión científica de la Universidad Olmeca

Volumen 6, número 1, enero-junio 2023.

<https://geocienciasuo.olmeca.edu.mx>



---

## Imagen de la portada / Cover image / Imagem da capa

El Popocatepetl es un volcán activo situado en el altiplano central de México, se localiza en los linderos de los estados de Morelos, Puebla y el Estado de México; el volcán está situado en los 19° 01'39; 24.9" latitud norte y en los 98° 37'39; 25.1" de longitud oeste, a 43 km de la ciudad de Puebla; su elevación es de 5426 msnm. Durante el mes de marzo de 2023 el volcán produjo muchas erupciones, esta foto corresponde a la del día 29. Fotografía de Ana Karen Castellanos, cuenta de Instagram @ann.rockast

Popocatepetl is an active volcano located in the central highlands of Mexico, it is located on the borders of the states of Morelos, Puebla and the State of Mexico; the volcano is located at 19° 01'39; 24.9" north latitude and 98° 37'39; 25.1" west longitude, 43 km from the city of Puebla; its elevation is 5426 meters above sea level. During the month of March 2023 the volcano produced many eruptions, this photo corresponds to the 29th. Photograph by Ana Karen Castellanos, Instagram account @ann.rockast

O Popocatepetl é um vulcão ativo localizado no planalto central do México, nas fronteiras dos estados de Morelos, Puebla e do Estado do México; o vulcão está localizado a 19° 01'39; 24,9" de latitude norte e 98° 37'39; 25,1" de longitude oeste, a 43 km da cidade de Puebla; sua elevação é de 5.426 metros acima do nível do mar. Durante o mês de março de 2023, o vulcão produziu muitas erupções, e esta foto corresponde à 29ª. Foto de Ana Karen Castellanos, conta do Instagram @ann.rockast

---

### Comisión Técnica

|                            |                                     |                             |
|----------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|
| <b>Editores</b>            | Julio César Javier Quero            | José Alejandro Chablé Gómez |
| <b>Revisores</b>           | Héctor de Paz (corrector de estilo) |                             |
| <b>Trabajo de imágenes</b> | Brenda Ivonne Basurto Aguilar       |                             |

---

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 stuck to the publishing standards, published in <http://www.olmeca.edu.mx/>.

**The contributions must be written in Spanish.**

Esta revista é uma publicação científica da Universidade Olmeca, na qual se editarão artigos originais relacionados às Ciências da Terra e suas disciplinas que enfatizem os trabalhos realizados na América Latina. A revista *Geoscience* aceitará apenas os itens que aderirem às diretrizes editoriais, publicado em <http://www.olmeca.edu.mx/>

**As contribuições devem ser escritos em espanhol.**

---

*Geociencias UO*. Órgano de difusión científica de la Universidad Olmeca, volumen 6, número 1, enero-junio 2023, publicación bi-anual, editada por la Universidad Olmeca, A. C., Carretera Villahermosa - Macuspana, km 14, Dos Montes, Centro, C. P. 86280, Villahermosa, Tabasco, México, a través de la Coordinación Editorial. Teléfono: + 52 (993) 187 9700. Ext. 1140 y 1141, correos electrónicos: [editorial@olmeca.edu.mx](mailto:editorial@olmeca.edu.mx)

Reserva del Derecho al Uso Exclusivo: 04-2019-092513413800-102. ISSN versión impresa: 2683-3174, ISSN versión electrónica: 2954-3533. 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 29 de junio de 2023, con un tiraje de 400 ejemplares.

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

D. R. © 2019. 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 por escrito de la Universidad Olmeca, A.C.**

---

# Geociencias UO

Órgano de difusión científica de la Universidad Olmeca



UNIVERSIDAD OLMECA  
*Rojiz de Sabiduría*

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

## EDITORES EN JEFE

### **Francisco García Hernández**

Doctor en Ciencias por la Colorado School of Mines  
Investigador y experto en Petróleo.

### **Heberto Ramos Rodríguez**

Maestro en ingeniería Petrolera por la UNAM y  
maestro en Administración de Empresas por la  
Universidad Olmeca.

## CONSEJO EDITORIAL

### **Emilio Alberto De Ygartua Monteverde**

Doctor en Ingeniería Constitucional Electoral por la  
Universidad Carlos III de Madrid, España y doctor en  
Gobierno y Administración Pública en el IAPET.  
Rector Universidad Olmeca, A. C.

### **Beatriz Zumalacárregui de Cárdenas**

Doctora en Ciencias Químicas  
Universidad Tecnológica de La Habana, Cuba.

### **José Luis Naranjo Henao**

MCS. docente de geología y fotogeología en la  
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de  
Caldas, Colombia

### **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.

### **Rodiber López Méndez**

Ingeniero Bioquímico por el Instituto Tecnológico Superior  
de la Región Sierra, Teapa, Tabasco, México.  
Director General Académico de la Universidad Olmeca.

### **Rosa María Prol Ledesma**

Especialista en energía geotérmica y en Sistemas de  
información geográfica y Teledetección de los recursos na-  
turales. Investigadora del Instituto de Geofísica de la UNAM

### **Tomás Ramírez Maldonado**

Doctor en Ciencias de la Ingeniería por la  
Universidad Nacional Aeroespacial de Ucrania.  
Catedrático de la Universidad Olmeca.

### **Gabriel Enrique Baquedano Moreno**

Maestro en Ciencias por el Centro interdisciplinario de  
Investigación y Docencia en Educación. Catedrático de la  
Universidad Olmeca.

### **Oswaldo Federico Donoso**

Ingeniero en Minas por la Universidad de Santiago de  
Chile. Investigador y experto en Petróleo.

# Geociencias UO

Órgano de difusión científica de la Universidad Olmeca



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

## COMITÉ DE ARBITRAJE

**Oswaldo Rodríguez Morán**

Presidente del Comité de Arbitraje

**Manuel Enrique Pardo Echarte**

Doctor en Ciencias Geológicas.  
Universidad Tecnológica de La Habana (CUJAE).  
Investigador del Centro de Investigación del  
Petróleo de Cuba.

**Claudio Bartolini**

Geólogo por la Universidad de Sonora, México;  
Master en Geología/Ciencias de la Tierra,  
Universidad de Arizona. Ph.D. en Geología/Ciencias de la  
Tierra, Universidad de Texas en El Paso, EUA.  
Miembro de la American Association of  
Petroleum Geologists.

**Oswaldo Rodríguez Morán**

Master en Geología Petrolera, Universidad de Pinar del  
Río, Cuba. Doctor en Ciencias Técnicas,  
Universidad Tecnológica de La Habana.

**Jorge Luis Torres Zafra**

Máster en Ciencias Geológicas.  
Instituto de Geología y Paleontología (IGP).  
Servicio Geológico de Cuba.

**Olga Castro Castiñeira**

Doctora en Ciencias Geológicas.  
Centro de Investigación del Petróleo.  
Universidad Tecnológica de La Habana.

**Norma Rodríguez Martínez**

Doctora Ciencias Geológicas.  
Académica de Mérito de la Academia de  
Ciencias de Cuba.

**Héctor Fernández Núñez**

Master en Ingeniería Geofísica.  
Doctor en Ciencias Técnicas.  
Universidad Tecnológica de La Habana.

**Reinaldo Rojas Consuegra**

Master en Geología.  
Doctor en Ciencias Geológicas.  
Centro de Investigación del Petróleo de Cuba.

# Sumario

|   |  |    |
|---|--|----|
| Presentación  | <i>Emilio Alberto De Ygartua Monteverde</i>  | 4  |
| Carta al editor   | <i>Zulema Domínguez Sardiñas</i>   | 5  |
| Burbujas mánticas» en el origen y evolución del planeta Tierra  | <i>Francisco de Asís Formell Cortina</i>   | 7  |
| Composición de las facies radioláricas cenozoicas y sedimentogénesis del sello regional en la Franja Norte Petrolera Cubana           | <i>Carlos Morales Echevarría y Osmany Pérez-Machado Milán †</i>  | 25 |
| Interpretación geofísico-morfométrica en apoyo a la cartografía geológica de la Hoja 3985-III(1:50000) Varadero, Cuba                 | <i>Pardo-Echarte, M.E., Hechavarría-Govin, E., Rodríguez-Morán, O.</i>   | 36 |
| Clasificación supervisada de imágenes de satélite en <i>Google Earth Engine</i> del municipio de Othón P. Blanco Quintana Roo, México | <i>Luis Antonio Mora-Tembre, Jorge Armando López Chan y Cecilia Elizabeth Olivares Braus</i>                           | 46 |
| Aplicación de registros de imágenes en las investigaciones geólogo-petrofísica en Cuba  | <i>Katherine Cruells Torres, Dania Brey del Rey, Olga Castro Castiñeira, Danalys Juliá Bello y Sheyla Pozo Alfonso</i> | 54 |



# Presentación



**E**Con gran entusiasmo, entregamos el ejemplar número 11 de Geociencias UO una selección diversa y dinámica de artículos que abarcan una amplia gama de temas dentro del campo de las Ciencias de la Tierra, con las colaboraciones de especialistas de varias instituciones iberoamericanas.

Exploraremos los intrincados procesos que dieron forma a nuestro planeta en el artículo titulado «Burbujas mánticas en el origen y evolución del planeta Tierra»; adentrándonos en las profundidades de la Tierra, descubriremos cómo estas burbujas han dejado su huella en la configuración de nuestro mundo y en los fenómenos geológicos que aún influyen en nuestro entorno.

Continuando nuestro viaje, nos adentraremos en el maravilloso mundo de las «Composiciones de las facies radiolíticas cenozoicas y sedimentogénesis del sello regional en la Franja Norte Petrolera Cubana», en un artículo que nos sumergirá en los misterios de la sedimentogénesis y nos guiará a través de las complejidades de la formación de sedimentos en una región de vital importancia económica y geológica.

Con un enfoque más práctico, «Interpretación geofísico-morfométrica en apoyo a la cartografía geológica de la Hoja 3985-III (1:50000) Varadero, Cuba» nos llevará a explorar cómo las técnicas geofísicas y morfométricas pueden ser herramientas esenciales en la cartografía geológica moderna, permitiéndonos visualizar y comprender de manera más precisa y detallada los rasgos geológicos de una región.

Nuestra travesía nos lleva al espacio, donde la «Clasificación supervisada de imágenes de satélite en Google Earth Engine del municipio de Othón P. Blanco, Quintana Roo, México» nos mostrará cómo las tecnologías de imágenes de satélite y la inteligencia artificial pueden converger para proporcionar una visión integral y actualizada de la geografía terrestre, siendo un recurso invaluable para la investigación y la planificación.

Por último, exploraremos la importancia de las imágenes en el texto «Aplicación de registros de imágenes en las investigaciones geológico-petrofísicas en Cuba» este artículo demostrará cómo las imágenes pueden revelar información profunda sobre las características geológicas y petrofísicas, aportando una comprensión más rica y detallada de las estructuras subterráneas.

Estos fascinantes artículos reflejan el compromiso constante de la comunidad científica con la exploración y comprensión de nuestro planeta. Cada estudio nos desafía a mirar más allá de la superficie y a descubrir las historias y procesos que moldean nuestro mundo. Sin duda, esta edición de Geociencias UO nos invita a expandir nuestros horizontes y a maravillarnos con la intrincada y asombrosa historia del planeta Tierra.

Que su lectura les sea interesante y enriquecedora.

Dr. Emilio De Ygartua Monteverde  
Rector

## Carta al editor<sup>1</sup>:

A: Mtro. Julio César Javier Quero  
Coordinador Editorial de la Universidad Olmeca

Reciba mis respetuosos saludos. Me dirijo a usted para manifestar mi opinión sobre el artículo Resultados de algunos «Métodos de Exploración no Sísmica en diferentes regiones gasopetrolíferas del occidente y centro de Cuba», de los autores Manuel Enrique Pardo Echarte y Osvaldo Rodríguez Morán, publicado en la revista Geociencias UO, volumen 1, número 1, octubre 2017- marzo 2018.

Es conocido que 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. 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 la consecuente disminución del riesgo de exploratorio. (Schumacher, 1996 and Saunders et al, 1999).

Concuerdo con lo expuesto sobre los métodos geofísico-morfométricos, pero según mi experiencia, debía de considerarse el empleo de los métodos de geoquímica de superficie además del complejo Redox, fundamentalmente el análisis de las fracciones más ligeras del petróleo, Gases C1-C4 para enriquecer los argumentos aquí planteados según Dominguez, 2018 y 2021)

El estudio en cuestión concluye con una versión cartográfica de sectores de interés gasopetrolífero en el occidente y centro de Cuba, de vital importancia para el desarrollo de la exploración en Cuba.

Atentamente y deseándole éxitos en sus funciones



Dra.C. Ing. Zulema Domínguez Sardiñas  
Investigador Titular  
UCTB Geología. Grupo Exploración CEINPET. CUPET  
29 de junio 2023

**REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS**

- 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

**Domínguez, Z.**, 2018. Informe Final Proyecto 7082 CEINPET-CUPET Exploración para gas no convencional. Área: Motembo-Jarahueca

**Zulema Domínguez Sardiñas, Lourdes Jiménez de la Fuente y Manuel. E. Pardo Echarte**, Aplicación de métodos no Convencionales para Exploración de Gas: Área Motembo. Cuba. Revista Geociencias UO Vol 5, Núm. 2. 2022.



## «Burbujas mánticas» en el origen y evolución del planeta Tierra

Francisco de Asís Formell Cortina<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Doctor en Ciencias Geológicas. Investigador Titular. Jubilado. ORCID 0000-0003-2435-8465. Correo electrónico.: franciscocodeasisfc1939@gmail.com*

### RESUMEN

La Geología es una ciencia empírica y sus fundamentos se basan en lo esencial en la observación de los procesos actuales y su extrapolación al pasado para entender lo que ocurrió en los millones de años de vida de la Tierra; de esa forma muchas teorías basadas en la observación de hechos simples y comunes se han desarrollado y con posterioridad han podido ser, sino comprobadas por completo, al menos sustentadas de manera científica. Sobre la base de la observación del comportamiento de fluidos con relatividad densos en condiciones de ebullición, es que se desarrolla una teoría que extrapola ese comportamiento a las condiciones que debieron existir desde el origen del planeta Tierra. Esto influyó en la distribución y precipitación de sus materiales constitutivos por densidades durante toda su evolución hasta el presente, lo que pone de relieve su accionar en el tiempo y su papel en el modelaje del planeta Tierra. Como consecuencia de la acción de estas burbujas mánticas se revela su papel en la génesis de terremotos y volcanes y también en la formación de montañas y arcos de islas volcánicas, así como, en el crecimiento de los continentes en contraste con los postulados de la tectónica de placas

sobre estos eventos. Se propone que el origen de los arcos de islas volcánicas de Cuba pudiera deberse a la acción de las burbujas mánticas. Se presenta una clasificación de las burbujas mánticas sobre la base de su accionar en diferentes condiciones y relaciones océano-continentes.

**Palabras clave:** Burbujas mánticas, terremotos, volcanes, arcos de islas volcánicas

### ABSTRACT

Geology is an empirical science and its foundations are essentially based on the observation of current processes and their extrapolation to the past to understand what happened in the millions of years of life of the Earth; In this way, many theories based on the observation of simple and common facts have been developed and subsequently have been able to be, if not completely verified, at least scientifically supported. Based on the observation of the behavior of relatively dense fluids in boiling conditions, a theory is developed that extrapolates that behavior to the conditions that must have existed since the origin of planet Earth. This influenced the distribution and precipitation of its

constituent materials by densities throughout its evolution to the present, which highlights its actions over time and its role in modeling planet Earth. As a consequence of the action of these mantic bubbles, their role in the genesis of earthquakes and volcanoes is revealed, as well as in the formation of mountains and volcanic island arcs, as well as in the growth of the continents, in contrast to the postulates of tectonics. plaques about these events. It is proposed that the origin of the volcanic island arcs of Cuba could be due to the action of mantic bubbles. A classification of mantic bubbles is presented based on their actions in different conditions and ocean-continent relationships. Keywords: Mantic bubbles, earthquakes, volcanoes, volcanic island arcs

## RESUMO

A Geologia é uma ciência empírica e os seus fundamentos assentam essencialmente na observação dos processos atuais e na sua extrapolação para o passado para compreender o que aconteceu nos milhões de anos de vida da Terra; Desta forma, muitas teorias baseadas na observação de fatos simples e comuns foram desenvolvidas e, posteriormente, puderam ser, se não completamente verificadas, pelo menos apoiadas cientificamente. A partir da observação do comportamento de fluidos relativamente densos em condições de ebulição, desenvolve-se uma teoria que extrapola esse comportamento para as condições que devem ter existido desde a origem do planeta Terra. Isso influenciou a distribuição e precipitação de seus materiais constituintes por densidades ao longo de sua evolução até o presente, o que evidencia suas ações ao longo do tempo e seu papel na modelagem do planeta Terra. Como consequência da ação dessas bolhas mânticas, revela-se seu papel na gênese de terremotos e vulcões, bem como na formação de montanhas e arcos insulares vulcânicos, bem como no crescimento dos continentes, em contraste com o postulados da tectônica, placas sobre esses eventos. Propõe-se que a origem dos arcos de ilhas vulcânicas de Cuba possa ser devido à ação de bolhas mânticas. Uma classificação das bolhas mânticas é apresentada com base em suas ações

em diferentes condições e relações oceano-continente.

**Palavras chave:** Bolhas mânticas, terremotos, vulcões, arcos de ilhas vulcânicas

## INTRODUCCIÓN

La teoría de la deriva continental de Alfred Wegener se desarrolló basándose en las similitudes de las costas de América del Sur y de África que coinciden como dos piezas de un rompecabezas. El principio de James Hutton, de que el presente es la llave del pasado, ha guiado el desarrollo de la Geología por varios siglos y ha servido para tratar de recomponer la compleja historia del desarrollo de la Tierra, pero a pesar de que el principio de Hutton en general es válido, los procesos por los que ha atravesado el planeta han sido tan complejos e intensos, que aún con ese principio como guía de análisis es difícil llegar a imaginar y comprender todo lo que ha ocurrido, sobre todo por algo que el principio de Hutton no considera de forma explícita que es la magnitud e intensidad de los procesos pretéritos en comparación con los presentes. Las leyes que han regido desde el principio el desarrollo de la Tierra son conocidas y son las mismas desde siempre, pero los procesos que se han desarrollado controlados por esas leyes han sido enormes y complejos, pero no por ello, indescifrables a partir de simples conjeturas, toda vez que se han regido por las mismas leyes básicas.

## MATERIAL Y METODO

Sobre la base de la información obtenida del conocimiento acumulado de los rasgos y características del desarrollo espacio-temporal del planeta Tierra y de las diferentes teorías que contribuyen a su esclarecimiento y con la utilización del método de razonamiento inductivo-deductivo como base del mismo, se propone la acción permanente de fuerzas termo dinámicas en el modelaje evolutivo del planeta, desde su origen y su tránsito hasta el estado de madurez actual.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tierra es un organismo vivo que cumple, como

todos los organismos vivos, sean animados o inanimados, las leyes que rigen la vida, es decir, nacer, desarrollarse, madurar, envejecer y morir. La Tierra en la actualidad es un planeta maduro que comienza a presentar síntomas evidentes de declinación. En primer lugar, el tiempo de la Tierra es su propio tiempo, es decir, es el tiempo que transcurre desde su nacimiento hasta su muerte, pero no medido desde el tiempo humano. Cada ser vivo recorre su propio tiempo, en otras palabras, el concepto de tiempo es relativo, es privativo de cada ser vivo incluyendo los seres inanimados y es de forma fatal inexorable.

El planeta Tierra nació como una masa incandescente en ebullición, sin atmósfera ni océanos ni corteza con un volumen mayor que el actual y una densidad menor y con un fatal destino, un enfriamiento constante de sus materiales.

En aquellas condiciones aquel sistema fundido comenzó a diferenciarse según la densidad de los materiales constitutivos, de acuerdo con la ley de la gravedad. Al principio no había corteza, todos los materiales eran líquidos o gaseosos y se expelían de forma constante como burbujas. El contacto con las temperaturas del espacio hacía que se condensasen y de esa forma comenzaron a formarse los océanos y la atmósfera terrestre, ninguna agua vino del exterior como a veces algunos autores postulan, todos los océanos y la atmósfera terrestre se formaron a partir de la condensación de sus materiales constitutivos. Los alúmino-silicatos (SIAL), por tener una densidad menor, flotaban en el sistema fundido y formaban una escoria, mientras que los materiales más densos (SIMA) se situaban por debajo. Al final en el centro del sistema se acumulaban los metales pesados (Fe, Ni). El sistema así diferenciado por sus densidades comenzó a enfriarse paulatinamente. La escoria flotante constituida de forma esencial por SIAL, navegaba sobre el SIMA, dirigido por la rotación y la traslación de la Tierra y por la acción de las burbujas mánticas que existieron desde el principio. Estas burbujas se formaban como resultado de la «ebullición» de los materiales primarios constitutivos y su frecuencia de formación y sus dimensiones dependían de la temperatura y de la den-

sidad del, llamémosle «magma primigenio» y se distribuían de forma aleatoria en toda la superficie del planeta.

El continente primigenio, que fue la escoria original era parte de la ya formada corteza que era fina y estaba en estado plástico, se mantuvo como un único continente hasta que el sistema logró enfriarse lo suficiente para pasar del estado plástico al rígido; no fue hasta que la corteza pasó del estado plástico al estado rígido que se hizo posible su fracturación en distintas placas. Además, con una corteza ya bastante rígida el acceso libre de las burbujas a la superficie se restringió al punto que las burbujas solo accedían a la superficie del planeta a través de las zonas de debilidad existentes sobre todo entre las placas de relación continente-océano. Este mecanismo de acreción constante de los continentes primigenios a partir de la sucesión de pulsos de burbujas mánticas condujo a la formación de sistemas montañosos plegados con magmas semiplásticos o fallados con magmas fríos, rígidos, según las condiciones de presión/temperatura, en tanto, la corteza seguía engrosándose a costa de los materiales del manto que continuaban enfriándose. Este proceso continúa hasta el presente de manera que la corteza terrestre mantiene un engrosamiento constante, mientras que el manto se enfría de forma sucesiva y a partir de su reducción, continua el aporte de nuevos materiales a la corteza.

Desde el principio existió una zona de debilidad entre la corteza continental y la corteza oceánica, aún antes de la fracturación del súper continente. Una vez que el continente único alcanzó el estado de rigidez empezó a fracturarse debido a la acción de dos fuerzas motoras, la rotación de la Tierra que movía el manto y la acción de las burbujas mánticas formadas en el manto por el estado de «ebullición» de este. En esos momentos ya la Tierra poseía una atmósfera que al principio no tenía la constitución actual de gases y los océanos se formaban sobre la ya enfriada, lo suficiente, superficie del manto habiéndose creado ya una corteza sobre el manto y bajo los continentes que se engrosaba constantemente. La formación de una corteza rígida sobre el manto ocasionó que los continen-

tes a la deriva formaran zonas de fractura profunda en el contacto con la corteza oceánica por donde ascenderían las burbujas mánticas a la superficie y lo hacen hasta el presente.

Desde hace muchos años, sobre todo a partir del trascendental descubrimiento de Wegener del «*drift* continental» y la ulterior confirmación de Hess sobre la creación de corteza en la cordillera atlántica centro oceánica y su consumo de nuevo al manto mediante el proceso de «subducción» en el borde continental oeste de América, se ha sugerido la existencia de corrientes en el manto que gobernarían el movimiento de las placas en que se divide la corteza. Estas corrientes, llamadas en general «corrientes de convección», se ha supuesto que se mueven de forma divergente desde las profundidades del manto hacia arriba y después hacia abajo en círculos de movimiento constante, unos horarios y otros anti horarios. Esto pudiera no ser así. Si se considera que el manto está constituido por rocas fundidas y por lo tanto con fluidez, el movimiento de estos fluidos (magma), pudiese no ser constante, sino estar controlados por las leyes de la termodinámica y comportarse al igual que otros fluidos que al llegar al estado de ebullición dispersan el calor acumulado en su interior en forma de burbujas gaseosas que ascienden a la superficie del fluido y crean en unos casos volcanes cuando el magma logra expelerse y en otros, terremotos cuando el magma no logra expelerse. Como la Tierra es una esfera (esferoide de revolución) estas burbujas de ebullición distribuidas en todo el volumen del manto tienden a alcanzar la superficie de forma preferente a lo largo de las áreas en que el manto contacta los continentes que flotan sobre él porque son todas áreas de fracturas y por tanto de debilidad. La distancia entre la burbuja formada en el manto y la zona de contacto con la corteza en la zona de debilidad cortical va a determinar la intensidad del efecto termodinámico sobre la superficie.

La posible existencia de burbujas mánticas no es algo nuevo en la literatura, desde hace muchos años los investigadores, en lo fundamental geofísicos, han descubierto anomalías en el manto que le han lla-

mado «manchas» «plumas», o «burbujas» Sin embargo, se destaca que estas anomalías detectadas por métodos geofísicos tienen un carácter estático, mientras que las burbujas mánticas que el autor propone son dinámicas producto de la ebullición constante del manto y actúan desde el origen de la Tierra.

Muchos trabajos se han publicado sobre estas anomalías mánticas. En el presente trabajo se ha respetado el término escogido por los autores de esos trabajos para denominar esas anomalías, pero entiéndase que siempre están referidos a lo que el autor considera burbujas mánticas.

En un artículo de Duncombe (2019) se evidencia sobre la base de la información sísmica profunda, la existencia de «manchas» mánticas. Sin embargo, no se concluye acerca de la naturaleza de tales anomalías ni de su trascendencia catastrófica en el origen y evolución de la Tierra. Faltó a los autores el reconocimiento del papel de tales anomalías en el tiempo y su carácter dinámico.

La existencia de plumas, manchas o burbujas en el manto ha sido revelada y estudiada por muchos investigadores, pero de modo lamentable, no han podido descifrar aún ni su origen ni su carácter ni su dinamicidad. En realidad, la visión y opinión que existe hasta ahora presenta un carácter estático, se notan las plumas mánticas, pero no se conoce ni su origen ni su posible accionar y mucho menos su papel en la evolución del planeta.

### **Consideraciones sobre las leyes que controlan el origen y evolución de la Tierra**

Las diferentes teorías sobre la geodinámica de la Tierra han adolecido siempre de una debilidad fundamental. En ninguna de las teorías sobre el origen y desarrollo de la Tierra se considera el motor dinámico que controla y rige ese desarrollo; ni la teoría geosinclinal ni la tectónica de placas, lo colocan en su lugar ni evalúan su real papel en el desarrollo geodinámico de la Tierra.

Las hipótesis elaboradas por diferentes investigadores para explicar el origen de Cuba adolecen de la misma omisión (**Figuras 1, 2, 3, 4**).

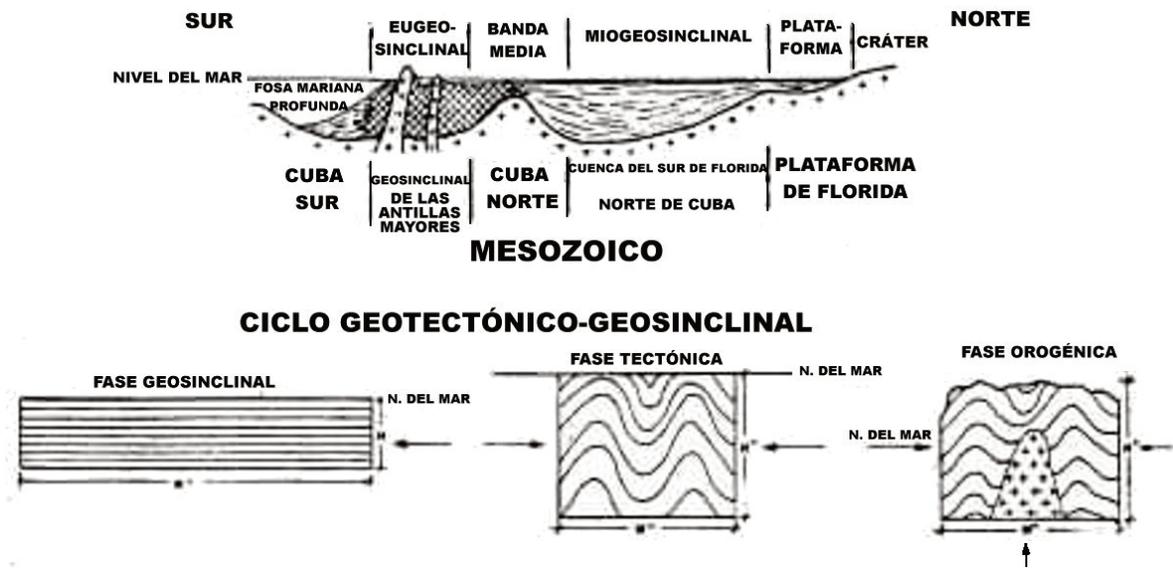


Figura 1. Reconstrucción palinspática según la teoría Geosinclinal (Según Ilich y Meyerhoff, 1980).

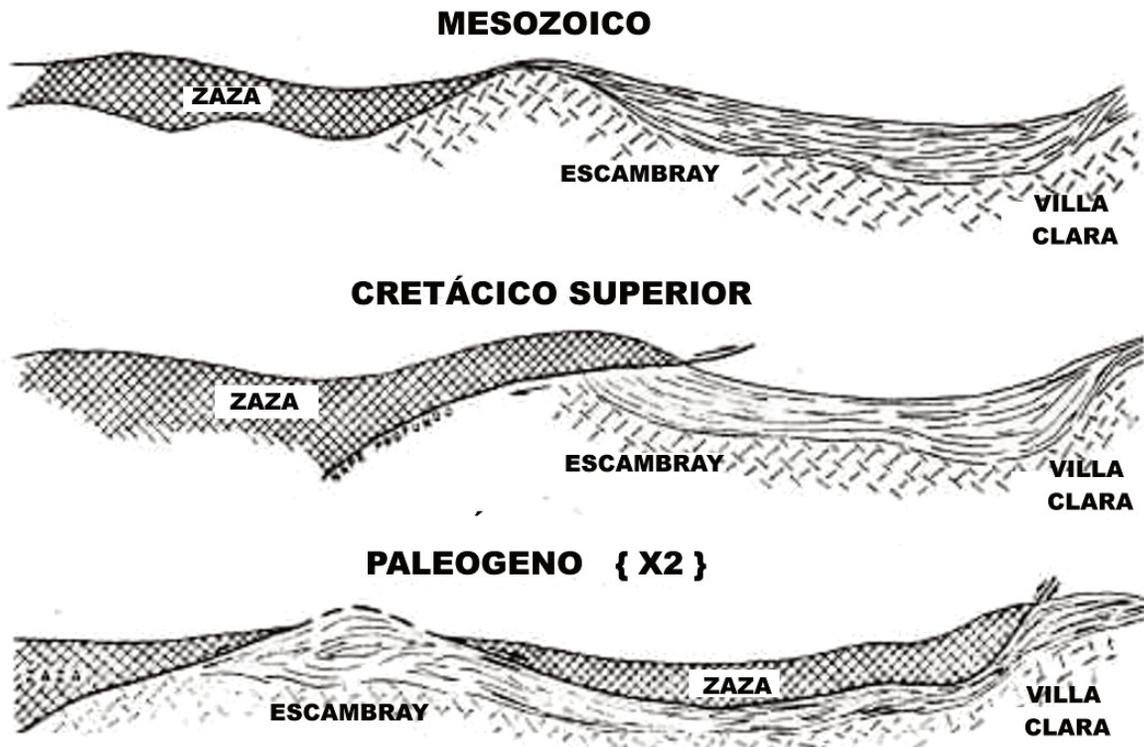


Figura 2. Reconstrucción palinspática según la hipótesis del Nape Profundo (Somin, 1978).

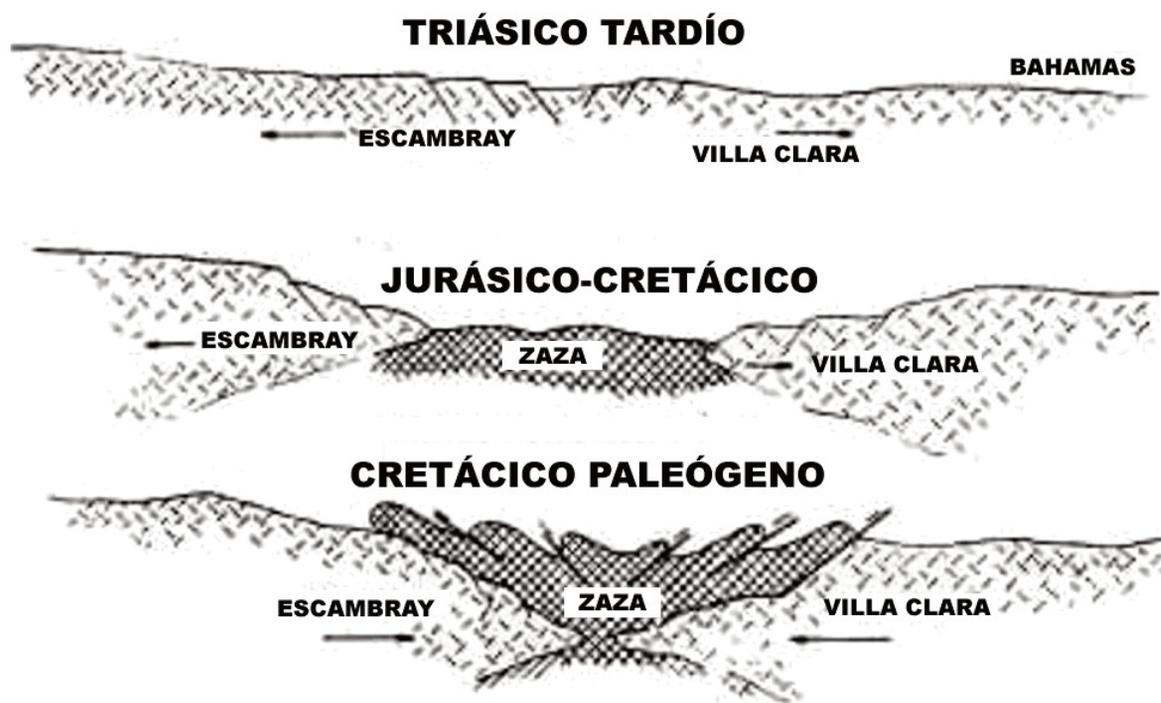


Figura 3. Reconstrucción palinspática según la hipótesis del Hongo Parautóctono (Somin, 1976 e Iturralde, 1981).

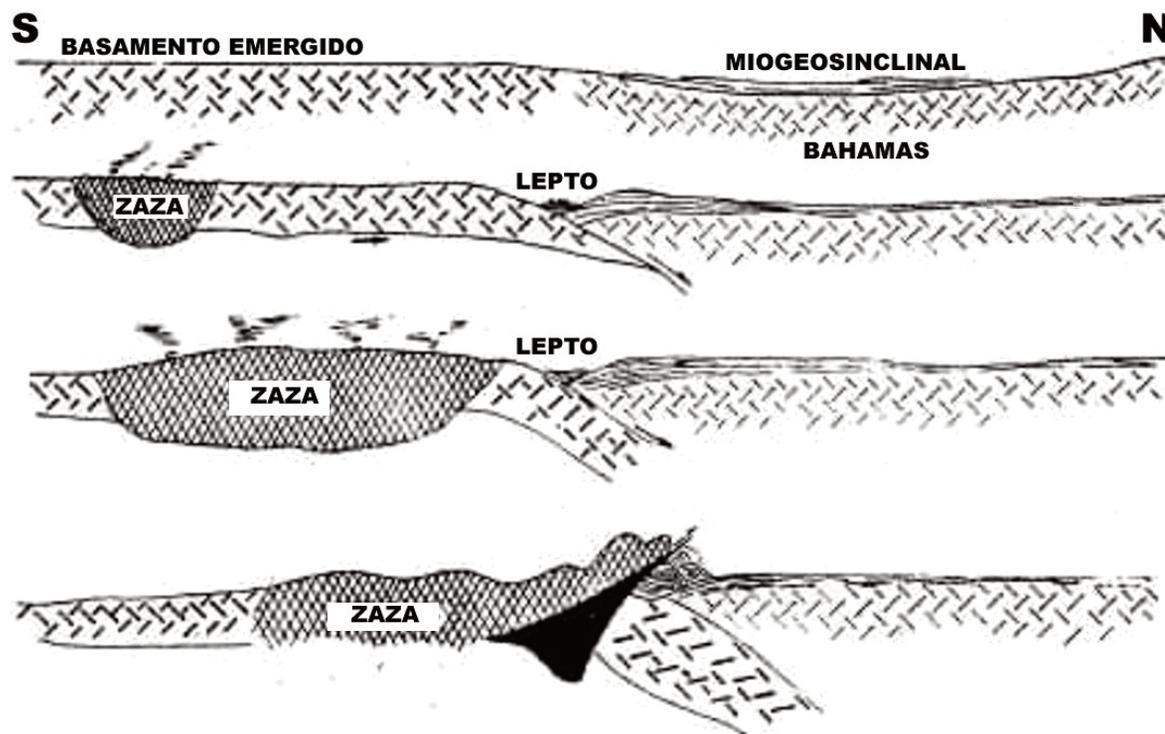


Figura 4. Reconstrucción palinspática según la hipótesis de Peive del corrimiento de masas continentales (Knipper y Cabrera, 1974).

La teoría geosinclinal asume la existencia de un eugeosinclinal donde ocurre vulcanismo y magmatismo intrusivo y un miogeosinclinal tranquilo donde no hay magmatismo sin explicar de forma convincente la fuente y el motor del orógeno eugeosinclinal.

Por su parte, la actual muy en boga tectónica de placas concentra de manera principal los mecanismos de la geodinámica del planeta en la movilidad de las placas litosféricas y sus interrelaciones y solo de manera muy subordinada señala como probables motores de esa dinámica a las llamadas «corrientes de convección», pero insiste en el papel motor de las propias placas litosféricas para explicar, por ejemplo, el origen de los terremotos o del recurrente mecanismo de las placas subducentes y suprasubducentes y sus relaciones para la consideración del origen de los arcos de islas volcánicas (AIV) o de las cadenas de montañas como los Andes. Uno de los pilares teóricos fundamentales de la tectónica de placas es que, como existe creación de corteza en las grandes zonas de rift, como en la cordillera centro-atlántica, entonces es necesario que exista una zona de consumo de corteza para que se mantenga el equilibrio cortical. Esa concepción es la que da origen al concepto de subducción. Esto no es siempre así, la corteza terrestre está en constante crecimiento y así lo atestiguan las enormes cordilleras montañosas como las Rocallosas y los Andes que se elevan miles de metros sobre el nivel del mar y que sin dudas representan un engrosamiento de la corteza. Por otra parte, la corteza terrestre es un cuerpo vivo, en constante evolución, que se engrosa de manera constante a partir del enfriamiento paulatino y sistemático del manto a medida que todo el planeta se va enfriando. Por eso, considerar la existencia de la subducción para un supuesto mantenimiento constante de la corteza a medida que ocurre la creación de la misma en otros lugares es muy discutible.

Para la formación de los arcos de islas volcánicas la tectónica de placas postula que ellos ocurren cuando las placas de suprasubducción son oceánicas, es decir, hay una relación subducción-suprasubducción océano-océano, pero aquí surgen varias interrogantes, la primera y más evidente, que se deriva de la

arraigada costumbre de ver siempre los esquemas explicativos de la teoría dibujados en un plano, cuando en realidad toda la dinámica del planeta es tridimensional, es que habría que preguntarse aquí también, porqué si las relaciones inter placas oceánicas son regionales en el espacio a lo largo de enormes distancias, la formación de los arcos de islas volcánicas no es sincrónica a lo largo de esas zonas de contacto. Además, si hay una placa en subducción en estado rígido o semi rígido, cómo es posible que los materiales mánticos asciendan a través de la placa suprasubducente sin tener en cuenta la barrera que supone una placa rígida o semi rígida en subducción. La tercera pregunta que surge es porqué el desarrollo de los arcos de islas volcánicas ocurre a manera de pulsos temporales, caracterizados en el espacio por formas semi arqueadas, lo que hace suponer que su origen y desarrollo no está relacionado tan solo con las relaciones inter placas oceánicas.

Todo el basamento de la tectónica de placas está en la asunción de que, si se crea corteza por unos 10 000 km, la mitad, unos 5 000 km se asume estar subducidos en el margen oeste de las Américas. Este supuesto axioma no deja margen a ningún tipo de especulación y representa la sólida fortaleza de la tectónica de placas, pero qué ocurriría si esto no fuese así.

Casi todos los geólogos coinciden en que los continentes flotan sobre el manto y siempre desde el inicio flotaron a manera de la escoria del sistema en ebullición, mientras los elementos de mayor densidad se concentraban más abajo en la formación del manto. La masa continental primigenia única ha sido identificada y descrita como el super continente de Pangea.

En un momento determinado esa masa continental, ya rígida, comenzó a fracturarse creándose diferentes placas litosféricas todas de carácter continental cuyas relaciones con el manto siempre fueron y son todavía hoy en día heterogéneas debido a sus diferentes densidades lo que provoca que los continentes tengan profundas raíces que cumplen el principio de la isostasia, mientras que la corteza oceánica es fina y está en contacto directo con el manto. Eso fue y es así, lo que ha ocurrido es que el concepto de placas

litosféricas en la literatura se ha extendido e incluye también a los materiales de la corteza oceánica, creándose un supuesto mosaico planetario de placas continentales y oceánicas integradas lo que requiere del concepto de creación y consumo de corteza para poder entender su existencia.

Si se consideran solo como flotantes en un sustrato mántico a las placas continentales, entonces, se derrumban los basamentos de la tectónica de placas porque no habría necesidad de considerar ni zonas de creación de corteza ni zonas de consumo de corteza, serían solo las placas litosféricas continentales las que se moverían y así lo hacen sobre un sustrato homogéneo mántico que se enfría según avanza la placa continental en su retaguardia y se mantiene activo y caliente en el frente de avance de la placa continental. Este razonamiento explicaría la existencia del llamado cinturón de fuego circumpacífico como frente activo del avance de las placas continentales y daría un sentido más lógico y dialéctico a las relaciones manto-corteza oceánica. Si en realidad lo que ocurre es que las placas litosféricas continentales flotan y se trasladan a través del medio mántico el concepto de creación y consumo de corteza pierde su sentido. Ese concepto supone relaciones rígidas entre las placas li-

tosféricas, considerándose además que las placas litosféricas comprenden tanto segmentos continentales como segmentos oceánicos litosféricas activas mientras que la corteza oceánica es de un carácter pasivo que sirve de medio por el que transitan las placas continentales; dicho de otra manera, la corteza oceánica que se crea a partir de los centros de expansión, es solo la cicatriz que queda al avance de la placa continental y de ninguna forma acrece al continente. El acrecimiento continental ocurre en el borde activo situado en el frente del movimiento de la placa continental por donde, de forma sistemática y constante, ascienden los materiales mánticos y crean sistemas montañosos o cadenas de arcos de islas volcánicas que en última instancia acrecen a los continentes y aumentan su masa con nuevos materiales de origen mántico. Como regla general, tanto en las relaciones directas océano-continente o en las relaciones océano-océano en otros márgenes en el frente de contacto se desarrollan profundas depresiones como por ejemplo la fosa de Marianas donde la enorme profundidad de la misma adelgaza la corteza oceánica de tal forma que el frente de acreción no cuenta con una corteza oceánica bastante potente como para subducir. Este fenómeno ocurre a todo lo largo del cinturón circumpacífico por lo que el arrai-

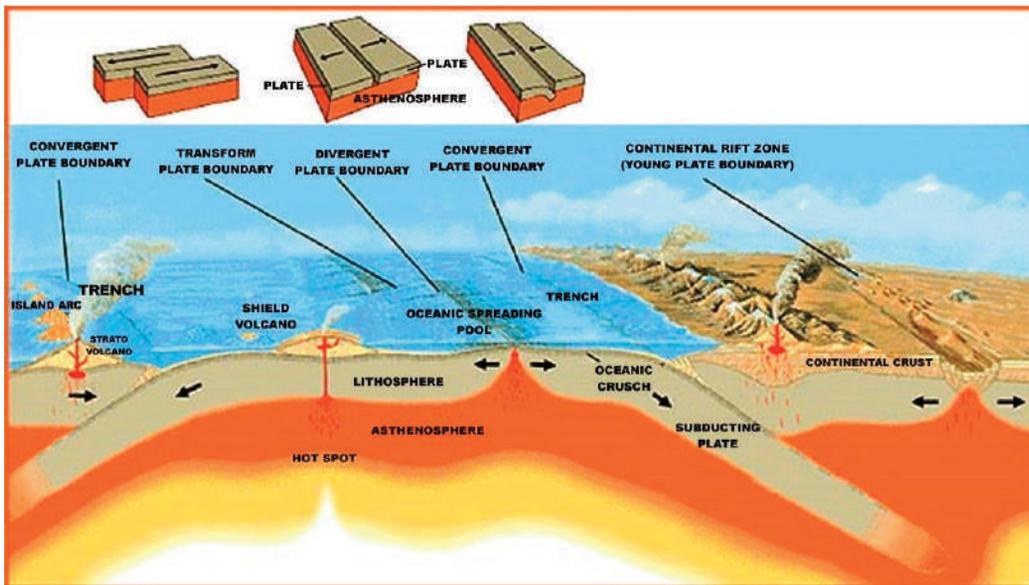


Figura 5. Esquema de relaciones directas océano-continente y océano-océano (Tomado de: Generalidades sobre zonas de suprasubducción: Ofiolitas tipo SZZ. Universidad de Barcelona).

gado concepto de placas oceánicas rígidas que subducen continentes o márgenes oceánicos pierde su sentido (**Figura 5**).

Todos los supuestos puntos de origen de las placas oceánicas en subducción ocurren a partir de trincheras oceánicas con independencia de que sean en relaciones océano-continente u océano-océano, pero las trincheras oceánicas están tan cerca del manto y la placa oceánica por tanto tan delgada que se hace difícil considerar una placa oceánica tan rígida y potente como para subducir y crear las supuestas relaciones de subducción-suprasubducción que impedirían el flujo de materiales mánticos, al tener estos que atravesar una placa rígida (**Figura 5**). Más difícil y absurdo es considerar placas oceánicas que subducen por más de 1500 km para influir en la formación de la cadena montañosa de las Rocallosas como ha sido propuesto para la placa de Farallones.

La existencia sistemática de trincheras oceánicas en los frentes de avance de las placas litosféricas continentales tanto en las relaciones continente-océano o mar marginal-océano no se relaciona con la subducción de una placa oceánica sino a la erupción de una burbuja mántica pulsante. Las burbujas mánticas siempre producen trincheras en su frente y en su retaguardia. Las trincheras de retaguardia crean las zonas de debilidad cortical por donde ascenderán las nuevas burbujas mánticas en el siguiente pulso; esto se observa muy bien en el sistema de arcos de islas volcánicas de las Marianas.

Las burbujas mánticas actúan según pulsos temporales. Al alcanzarse un punto crítico en la ebullición los materiales mánticos incluidos los fluidos y los gases ascienden y provocan burbujas que forman montañas o arcos de islas según el carácter de las zonas de debilidad cortical en las relaciones continente-océano u océano-océano. Una vez ocurrida la erupción es necesario que transcurra un lapso de tiempo para que tenga lugar una nueva acumulación de energía y el ascenso y erupción de una nueva burbuja mántica. Resulta obvio que con el enfriamiento sistemático del manto la intensidad y frecuencia de las burbujas mánticas ha ido disminuyendo en el tiempo; tanto la for-

mación de arcos de islas volcánicas como de montañas ya no tienen la intensidad que tenían hace millones de años, aunque el mecanismo de formación sea el mismo.

El tema de la posible existencia de corrientes de convección en el manto que justificasen y controlasen el movimiento de las placas litosféricas es muy discutible. Cuando se trata de componer en la esfera diferentes sistemas de convección, unos horarios y otros antihorarios, uno se tropieza con la dificultad de que la tendencia real del movimiento de las placas litosféricas no se satisface con un supuesto esquema planetario de corrientes de convección. Sin embargo, si se observa en detalle los grandes sistemas de rift en la Tierra como la cordillera centro atlántica o el gran rift del «cuerno de África» o el nuevo rift que divide África en dos, se observa que todos siguen una tendencia de desarrollo anti horaria coincidente con la rotación de la Tierra. Así mismo el avance de la placa continental del Asia oriental hacia el Pacífico, con profusión de sistemas de arcos de islas volcánicas, favorece la idea de un papel determinante de la rotación de la Tierra en el mecanismo planetario de movimiento de las placas litosféricas el cual, por supuesto, no excluye la existencia de movimientos locales de placas controlados por factores internos subordinados.

La rotación anti horaria de la Tierra por un lado y la existencia de un manto plástico sobre el cual «flotan» los continentes rígidos, que controlados por la isostasia poseen raíces más profundas que aquellas de la corteza oceánica, provoca relaciones de compresión-distensión, océano-continente sistemáticas. De esta forma, se evidencia por ejemplo que la costa oeste americana está en condiciones de compresión porque el continente avanza en compresión hacia la corteza pacífica, mientras que en la costa oriental de Asia la corteza pacífica se aleja del continente y se crean entonces allí condiciones de distensión. Ambos fenómenos, que actúan de forma sistemática y constante, podrían atribuirse a la acción de la rotación de la Tierra y sería una explicación plausible de porqué en el primer caso se forman montañas (relaciones de compresión) y en el otro se forman arcos de islas volcánicas (relaciones de distensión). Si se observa con deteni-

miento el comportamiento en el tiempo de las placas litosféricas continentales desde la fracturación de Pangea, se evidencia la acción distensiva provocada por la rotación de la Tierra. La separación de las Américas de la Pangea original ocurrió a partir de una gran fractura de distensión formada en la cordillera central de Pangea, cuyos remanentes aún hoy se observan tanto al oeste en los Apalaches y la cordillera de Escocia como al este en el pequeño Atlas marroquí y en la península escandinava. Es también evidente que los grandes rifts de la Tierra desde la época de Pangea se orientan en dirección norte-sur. Esto es concordante con la idea de una fuerza rotacional distensiva constante actuante como es la rotación de la Tierra. La idea de corrientes de convección de circulación meridional horaria y antihoraria no es causa para haber producido fracturas por distensión regionales extendidas en dirección N-S; solo fuerzas de rotación ecuatoriales son capaces de producir fracturas distensivas meridionales.

Si al principio hubo un solo súper continente entonces también hubo un solo súper océano, el súper Pacífico. Toda la expansión continental ocurrida a partir de la fracturación de Pangea ha significado una disminución constante del Pacífico la cual continúa hasta el presente y el nacimiento y desarrollo consecuente de nuevos océanos. En otras palabras, los continentes se han expandido siempre y el Pacífico ha ido contrayéndose a expensas de una sola fuerza reguladora, la rotación de la Tierra.

Como es conocido el eje de la Tierra es inclinado con relación al sol. Ese ángulo de inclinación del eje de la Tierra se denomina eclíptica. Esa inclinación del eje de la Tierra influye de manera decisiva en la distribución de esfuerzos durante la rotación y provoca que haya habido una mayor concentración de las masas continentales en el hemisferio norte que en el hemisferio sur. Igualmente, la ocurrencia de micro placas oceánicas de dirección ecuatorial es posible que se deba al mismo fenómeno que se observa muy bien en la distribución de fallas distensivas ecuatoriales a todo lo largo de la gran cordillera centroatlántica. Esa distribución de esfuerzos es probable que haya contri-

buido a la formación de la placa oceánica del Caribe. Una de las paradojas enigmáticas de la tectónica de placas es la ausencia de subducción en el contacto de la corteza oceánica que se crea en el centro del Atlántico con la costa este de las Américas por un lado y con la costa oeste del África por el otro. Si la distensión centro atlántica fuese el motor para la migración continental a ambos lados del rift centro atlántico, debiera haber subducción en los bordes continentales más cercanos al rift; sin embargo, esto no es así. En el caso de las Américas el contacto activo ocurre a todo lo largo de la costa oeste de las Américas y continúa en todos los bordes continentales que rodean al océano Pacífico. Esto sugiere que, en realidad, no es el rift centro atlántico el motor de la migración continental, sino son los continentes per se los que migran y han migrado siempre desde la ruptura primigenia de Pangea debido a su carácter de masas flotantes en un substrato más denso impulsadas por la rotación de la Tierra, que ha conducido a una sistemática migración continental de los fragmentos del súpercontinente siempre contra el súper océano. De ahí la formación del llamado cinturón de fuego del Pacífico que es el borde activo de las masas continentales fragmentadas de la primigenia Pangea que resbalan contra el Pacífico impulsadas por la fuerza creada por la rotación de la Tierra.

Tanto la separación y distribución de los materiales constitutivos de la Tierra en capas según sus diferentes densidades, así como su rotación y traslación alrededor del Sol ocurren gracias a la acción de la fuerza universal de la gravedad. Sin embargo, las fuerzas eruptivas generadas por la fusión de los materiales constitutivos del núcleo provocan los orógenos termodinámicos, que en forma de burbujas han actuado desde el principio en el modelaje del planeta mucho antes que las placas litosféricas móviles. Por eso es lícito afirmar, sin lugar a dudas, que el accionar de las placas litosféricas es consecuencia y nunca causa del desarrollo y evolución de la Tierra desde su origen, que de acuerdo con el principio de la conservación de la materia transita desde un origen incandescente hasta un final frío y seco sin posibilidad de albergar vida orgánica.

Con los adelantos de la astronomía y de las técnicas de observación cada día se advierte el nacimiento de nuevos cuerpos celestes y la muerte de otros, evidenciándose la dinámica de la evolución del universo o de los multiversos, de la cual la Tierra no escapa. El propio sistema planetario así lo evidencia.

La idea de que las corrientes de convección, sugerida por la tectónica de placas constituya el motor de la dinámica de las placas es muy dudosa y ha conducido a buscar otras causas de esa dinámica como el autor ha razonado; también otros investigadores han arribado a una conclusión semejante y han lanzado una nueva hipótesis.

Un equipo de tres investigadores ha sugerido que la causa de la dinámica de las placas litosféricas reside en la interacción de las fuerzas gravitatorias del Sol, la Luna y la propia Tierra.

La clave de su hipótesis, expuesta este 27 de enero del 2022 en la revista *GSA Special Papers* (de la Sociedad Geológica de EE.UU.), es el denominado «baricentro», el foco de las masas en un sistema de cuerpos en órbita. Está desequilibrado, según el estudio y la culpa es de la deriva lunar, la misma que provoca las mareas. El alargamiento de la órbita lunar y una extensión radial mensual del baricentro próximo a los 1000 km son dos fenómenos vinculados y se relacionan con la atracción gravitatoria del Sol sobre la Luna, que es un valor 2.2 veces mayor que la terrestre sobre su propio satélite natural. Las temperaturas en las capas superiores del planeta son el resultado de la fuga de calor radiogénico desde el interior hacia el espacio, pero una combinación de aceleración e inercia causa mucho más efecto sobre los movimientos en la litosfera.

Ese desequilibrio genera tensiones que las cá-lidas, gruesas y fuertes capas interiores del planeta permiten soportar, mientras que la litosfera delgada, fría y quebradiza responde fracturándose según explicó la primera autora del estudio, Anne Hofmeister, geofísica de la Universidad de Washington en San Luis. Sin la Luna y las oscilaciones que se provocan entre el baricentro y el centro físico de la Tierra no se vería esta actividad de las placas.

En este sentido, dice Hofmeister y lo recoge un comunicado universitario, la Luna es grande y su tamaño y la distancia concreta del Sol son esenciales para provocar la dinámica de las placas litosféricas de la Tierra.

Para validar esta idea, los investigadores aplicaron sus cálculos a varios planetas rocosos del Sistema Solar y sus lunas, ninguno de los cuales ha tenido actividad tectónica confirmada hasta la fecha. La investigación mostró que la presencia y longevidad del vulcanismo y del tectonismo dependen de una combinación concreta del tamaño de la Luna, la orientación orbital de ésta y la proximidad al Sol.

### **Sobre el origen de los terremotos**

Existe una estrecha relación entre los epicentros de los sismos y los bordes de placas tectónicas. Las zonas de alta sismicidad se correlacionan de forma evidente con el mapa mundial de placas tectónicas. El 90 % de los sismos se generan a profundidades menores de 100 km. Los que resultan ser muy dañinos tienen en general un origen muy poco profundo. Los terremotos superficiales tienen un hipocentro a menos de 70 km de profundidad, es decir, dentro de la litosfera; los intermedios entre 70 y 300 km y los profundos entre 300 y 700 km de profundidad. La existencia de terremotos a esas profundidades contradice de forma dramática la asunción en boga de que los mismos se producen por la presión acumulativa de las placas tectónicas en relaciones de subducción. A profundidades de 700 km la placa «subducente» entraría ya en estado plástico y es muy poco probable que pueda ejercer alguna presión acumulativa sobre la placa continental.

Por todo lo anterior supone que el mecanismo formador de terremotos no es de origen dinámico formado sólo por la acumulación de energía y el alcance de un punto crítico en las zonas de consumo de corteza como resultado de una creación constante de corteza en otros lugares. Según el razonamiento del autor, la corteza no se forma de manera constante, sino de forma aleatoria en dependencia de la acción de las burbujas del manto controlada por las leyes de la termodinámica y en dependencia de los siguientes factores:

densidad del fluido, volumen, temperatura y tiempo. Las burbujas en realidad son la causa del vulcanismo y de los terremotos. El hipocentro de un terremoto es una burbuja en ascenso proveniente del manto; por eso cuando esa burbuja que genera gases, choca con la corteza, ese golpe de los gases a presión provoca un movimiento de la corteza de ondas concéntricas a partir de un centro (epicentro) que es el punto donde los gases de la burbuja chocan con la corteza. La ocurrencia de un golpe de gases inicial seguido por movimientos ulteriores más débiles (réplicas) es consistente con la idea de un origen neumatolítico de los terremotos. En realidad, el mecanismo propuesto por Hess de creación constante de corteza en la cordillera centro oceánica y su ulterior consumo en la costa oeste de América no funciona así. La creación de corteza ocurre a expensas del vulcanismo que sucede cuando una burbuja proveniente del manto logra fracturar la corteza y expeler los productos mánticos en la superficie. Una evidencia de la expresión del vulcanismo como resultado de la ascensión de burbujas mánticas es la forma semicircular de todos los archipiélagos de origen volcánico. Todos, sin excepción, tienen forma arqueada (de ahí su denominación de «arcos de islas volcánicas») porque todos sin excepción son originados por burbujas en ebullición provenientes del manto. El tiempo y por tanto, la velocidad de ascensión de las burbujas mánticas es una función del volumen, densidad y temperatura de los materiales mánticos (magma). Y como la temperatura del manto decrece de manera constante desde el origen de la Tierra, la velocidad y frecuencia de las burbujas también decrece de igual forma.

La teoría de la tectónica de placas, como se ha dicho con anterioridad, tiende a explicar todo el mecanismo de desarrollo y evolución de la Tierra basándose en la supuesta dinámica evolutiva de las placas litosféricas concentrándose en el supuesto accionar de la creación de corteza en algunos lugares y su consumo en otros. Esto no es así. En primer lugar, la corteza terrestre, desde el principio, ha crecido a partir de las masas constituyentes de los sistemas montañosos que no siempre existieron y que son

el resultado de las relaciones en compresión alimentadas por las burbujas mánticas en los límites de los continentes con los océanos y en segundo lugar, la corteza se ha engrosado a partir del enfriamiento constante del manto. Hay que recordar que los límites distinguidos entre corteza y manto y dentro del mismo son límites asumidos por la información geofísica sobre la base de las diferentes densidades de los materiales. El problema que ha adolecido la Geología siempre ha sido la prevalencia de las concepciones estáticas del origen y evolución de la Tierra, incluidas las concepciones de la tectónica de placas que con mucho es la más dinámica de las teorías. Sin embargo, aún la tectónica de placas está limitada, primero porque concentra los principales mecanismos de acción entre las placas litosféricas en las relaciones dinámicas entre las mismas. Ejemplo de esto es la ocurrencia de los terremotos y segundo, porque no toma en cuenta el carácter de organismo vivo que es la Tierra y su constante evolución. Si no se toma en cuenta la transcurriencia del tiempo de vida de la Tierra desde su surgimiento, no se podrá nunca entender la dialéctica de su evolución. Así mismo en la teoría se postula que el origen de los terremotos y el vulcanismo se vincula con las relaciones de compresión-subducción entre placas litosféricas; muy poco hace énfasis la teoría en el papel de las fuerzas internas del planeta que se generan en diferentes zonas del manto y participan en el desarrollo y modelaje de la corteza. Un solo mecanismo se postula para explicar el movimiento de las placas litosféricas y es el de la supuesta existencia de corrientes de convección en el manto que dirigen el movimiento de las placas.

La teoría de la tectónica de placas postula una zona de fractura centro-atlántica, donde se crea corteza y una zona en el borde América-Pacífico donde se consume corteza. Visto así, parece simple y convincente, al igual que la idea de la existencia de corrientes de convección en el manto como mecanismo generador del movimiento de las placas también es seductora. En un esquema plano, presente en todos los trabajos sobre esta temática al parecer no hay discusión, pero cuando se trata de llevar esos pos-

tulados a una esfera (esferoide de revolución) es mucho más complicado el asunto. Por ejemplo, ¿Cómo se distribuyen en el espacio las corrientes de convección en la esfera? ¿Dónde se encuentra la fractura equivalente pacífica de la centro-atlántica? ¿Cuáles fueron las relaciones de creación y consumo de corteza que llevaron a la India a colisionar con Asia? ¿Cómo accionan las corrientes de convección para mover de manera convincente el mosaico de placas tectónicas existente? Al parecer, hay más razones para suponer causas aleatorias en la distribución y movimiento de las placas tectónicas que regularidades de creación y consumo de corteza dirigida por las supuestas corrientes de convección.

La teoría que se acepta en la actualidad de que los terremotos tienen un origen dinámico y son el resultado de la acumulación de energía en el contacto de las placas continentales con las placas oceánicas y llegado el límite elástico de los materiales en compresión liberan la energía de forma abrupta que provoca los movimientos telúricos es muy discutible.

La primera pregunta que surge es: ¿por qué si la acumulación de energía por compresión es constante a lo largo del límite de placas, los terremotos se producen en un punto de ese contacto y no por miles o cientos de kilómetros a todo lo largo del contacto?

La segunda pregunta es: ¿por qué si las fuerzas que actúan desde la expansión del fondo oceánico son tangenciales a la superficie, los terremotos tienen un hipocentro puntual y un epicentro también puntual a profundidad a partir del cual la energía asciende en forma de ondas concéntricas?

Así mismo, otras preguntas pudieran hacerse, por ejemplo, es conocido que el vulcanismo, así como los movimientos sísmicos se alinean a lo largo de la zona de contacto entre placas continentales y oceánicas conocido como el cinturón circumpacífico o cinturón de fuego, entonces, si las relaciones de subducción entre placas que generan presiones a todo lo largo de esas zonas fuesen las únicas responsables tanto del vulcanismo como de la sismicidad, ¿por qué la ocurrencia de sismos y de erupciones volcánicas es aleatoria y se desarrollan muchas veces

dentro de los continentes y los océanos, bien lejos de las zonas de subducción? Por ejemplo, considérese el famoso súper volcán de Yellowstone o la dramática y violenta erupción del volcán de Krakatoa que creó una nueva isla a finales del siglo XIX. Resulta evidente que la teoría de las placas tectónicas por sí misma no es capaz de resolver estos enigmas.

Otra pregunta pudiera ser ¿Por qué los terremotos son predecibles por los animales y aún por las personas segundos antes de que comiencen los movimientos? Una ruptura entre placas en compresión no lo explicaría, pero una burbuja gaseosa en ascenso lo explica perfectamente. Por último y como colofón, son notables las recientes revelaciones de la NASA de la ocurrencia de terremotos en Marte y aún en la Luna, cuerpos celestes que no poseen placas litosféricas móviles.

### **Sobre el origen del vulcanismo y la orogenia**

La recurrencia en el tiempo del vulcanismo se explica también por la existencia de estas burbujas mánticas que una vez expelidas vuelven a acumular gases en el tiempo y erupcionan nuevamente, proceso este que se rige por las leyes de la termodinámica y por la persistencia de los canales de debilidad creados en erupciones anteriores. Los canales de debilidad, al igual que las variaciones en la composición del magma, van también a condicionar los diferentes tipos de volcanes que se conocen. El magma y sus gases acompañantes tienen que vencer la corteza para erupcionar y por tanto, las características de los canales de debilidad cortical van a influir de manera decisiva en el tipo de vulcanismo resultante. Así, si se necesita una alta presión para vencer la resistencia de la corteza, el vulcanismo resultante será del tipo vesubiano, explosivo, con gran cantidad de gases y cenizas; si por el contrario los canales son expeditos como en los hotspots, las erupciones serán casi sin presión del tipo «hawaiano».

Los continentes tienen una densidad mucho más ligera que las rocas del manto. En realidad, los continentes flotan y siempre, desde el inicio han flotado sobre los materiales más densos del manto; los

continentes son la escoria del primigenio sistema en ebullición que fue la Tierra en sus inicios.

La dinámica de los continentes también está signada por las burbujas mánticas, cuando éstas se originan debajo de las raíces de los continentes, en su proceso de ascensión provocan movimientos orogénicos en los continentes que hacen ascender las masas continentales que forman montañas. No todas las montañas, como se considera en la actualidad, son producto de la colisión de placas. Esto se muestra en la forma semiarqueada de muchos de los sistemas orogénicos del mundo, los Apalaches, las Rocallosas, los Himalayas, los Alpes, los Andes. En muchos de estos sistemas orogénicos la forma de arco de los mismos sugiere la intervención en su formación de burbujas ascendentes del manto.

Es muy probable que el crecimiento de los continentes haya ocurrido a expensas de los materiales acrecidos provenientes del manto en forma de burbujas. La existencia de grandes sistemas orogénicos plegados sugiere que en su formación intervinieron fuerzas termo-dinámicas que suministraron el suficiente calor para que los plegamientos se produjeran; si no hubiese habido suficiente calor para mantener los paquetes rocosos en estado plástico, no hubiera habido plegamientos sino cizallamientos. Por eso, considerar solo a las colisiones entre placas tectónicas como la causa para la formación de las grandes cadenas montañosas en el mundo es muy discutible. (Figura 6).

Hay que notar que tanto los terremotos como los volcanes se sitúan con preferencia, pero no de forma exclusiva, en las regiones de interacción de placas oceánicas con placas continentales, es decir, en zonas de debilidad tectónica por donde las burbujas tienden a expelerse (Figura 7).

Si logran expeler resulta un volcán. Cuando no, entonces, será un terremoto; ambos fenómenos tienen una relación espacial y temporal, lo que evidencia la íntima relación genética entre ellos. Tanto volcanes como terremotos se alinean con preferencia, en áreas específicas de la corteza terrestre y las burbujas en presencia de una corteza sólida buscarán las zonas de debilidad para poder expeler los gases con-

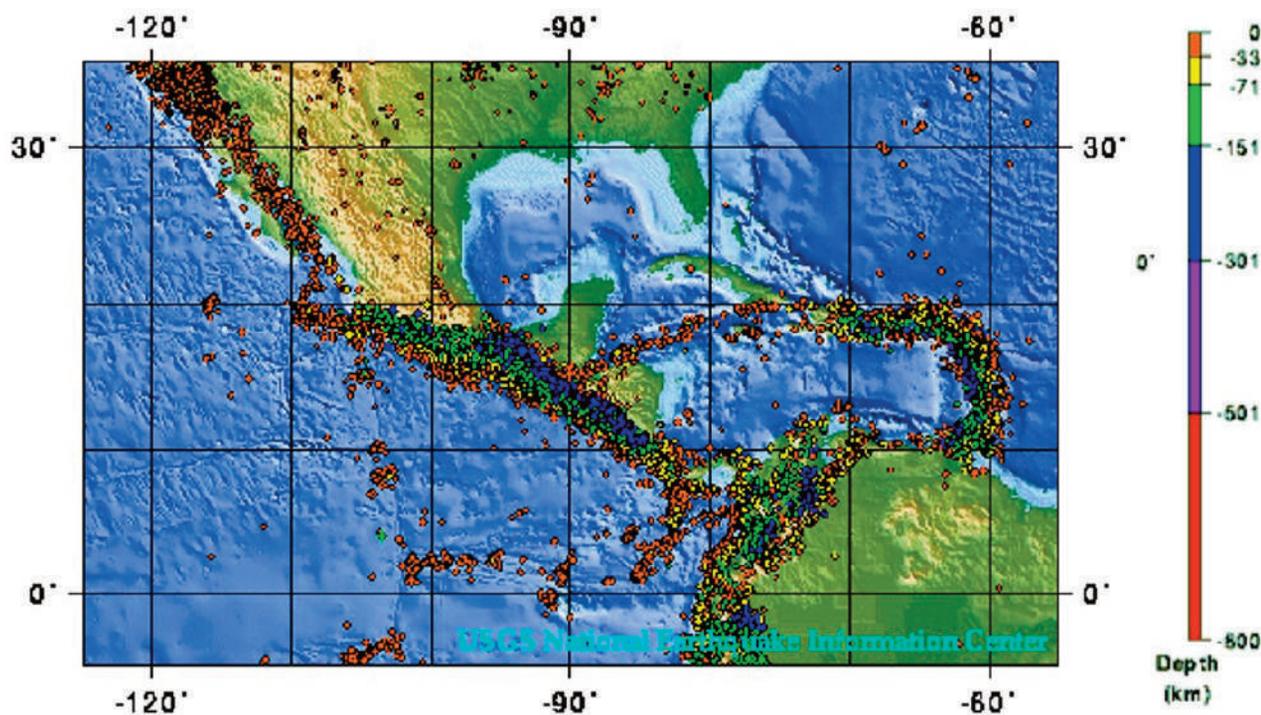
tentivos. Sin gases en los materiales del manto no habrá burbujas y no habrá por tanto ni vulcanismo ni movimientos telúricos. Como se ha mencionado, una de las formas de crecimiento de la corteza son los arcos de islas volcánicas que de forma sistemática se originan en relaciones de distensión cortical.

Un ejemplo del papel de las burbujas mánticas en el origen y desarrollo de los sistemas de arcos de islas volcánicas son los sistemas cubanos de arcos de islas volcánicas.

En el Triásico superior-Jurásico inferior se afirma que existió un mar marginal cuyos restos emergidos aún se observan en la formación terrígena Cordillera de la Costa que aflora en la costa norte de Venezuela; durante el Jurásico superior ese mar se profundizó por hundimiento de la cuenca oceánica donde se desarrollaba. Bien por adelgazamiento de la corteza oceánica o por apertura del fondo oceánico (*rift*) y gracias a la ascensión de burbujas mánticas comenzó en



Figura 6. Montaña Ferdernrothern (3180 m), Alpes Bernese, Suiza. Pliegues espectaculares de la colisión entre África y Europa (Tomado del Fotógrafo Bernhard Edmaier).



**Figura 7.** Distribución de los terremotos en el área del Caribe y Centroamérica, Norteamérica-sur y Suramérica-norte (Ilustración del USGS. *National Earthquake Information Center*).

el Cretácico inferior el desarrollo de un sistema de arcos de islas volcánico.

Muchos de los modelos evolutivos del Caribe han considerado la existencia de un «gran arco volcánico» como una entidad única e indivisible (Pindell y Barrett, 1990; Pindell, *et al.* 1994). Sin embargo, con el transcurso de los años y a medida que se ha profundizado en el tema, se han revelado una serie de evidencias que confirman la existencia de diversas unidades de arco (Iturralde-Vinent, 1996 c, d, ed. 1997, 1998; Kerr *et al.*, 1999). Esto último está en concordancia con la idea del autor de la existencia de burbujas mánticas, como mecanismo motor del origen y desarrollo de los arcos de islas volcánicos, porque las burbujas mánticas ocurren en pulsaciones sucesivas de gases a alta presión y temperatura lo que permite un desarrollo y evolución del arco discernible por las características petrológicas de sus componentes.

Al principio un evento catastrófico ocurrió cuando una potente burbuja mántica logró atravesar la delgada corteza oceánica y comenzó la formación

de lo que se ha denominado arco boninitico.

Las rocas de este arco inicial, han sido descritas por Kerr *et al.* (1999) como parte de las rocas básicas que aparecen y conforman bloques tectónicos entre las secuencias del complejo ofiolítico. En el referido trabajo se propone que dichas boninitas representan un magmatismo de arco volcánico, que con posibilidad comenzó durante un período pre-Albiense y abortó temprano en el Cretácico. En Cuba Central un indicio de la existencia de este arco es el complejo de las rocas metamórficas e intrusivas de la zona de Iguará-Perea (Millán, 1996). Allí afloran pequeños intrusivos con afinidad geoquímica de arco de islas, que cortan diabasas anfibolitizadas que se interpretan como el substrato oceánico metamorfozido del arco boninitico (Iturralde-Vinent, 1998). La existencia de terrenos terrígenos y carbonatados metamorfozados (Pinos, Escambray) sugieren que ellos son ventanas tectónicas de los terrenos sedimentarios que ocupaban el fondo oceánico cuando ocurrió el surgimiento catastrófico del original arco de islas volcánico.

Después de una pausa en que se generó nueva acumulación de volátiles ocurrió una nueva pulsación del mecanismo de formación del AIV y comenzó a formarse el arco primitivo durante el accionar de una nueva burbuja mántica.

En Cuba constituyen indicios directos de un arco primitivo, las rocas del Albiense Medio y más antiguas, que se conocen sólo en la región de Las Villas (Fm. Los Pasos), equivalentes a basaltos, traquibasaltos y dacitas, intercalados con rocas piroclásticas, epiclásticas y sedimentarias (Iturralde-Vinent, 1996 d, 1998; Kerr *et al.*, 1999). Otra evidencia está relacionada con la presencia de clastos de rocas plutónicas y volcánicas en los conglomerados de edad Aptiense-Albiense que se localizan al sur de Santa Clara y en Camagüey (Iturralde-Vinent, 1996 d, 1998).

Finalmente, una nueva acumulación de energía generó una tercera burbuja que renovó la actividad volcánica y comenzó la tercera etapa de desarrollo del sistema volcánico de arcos de islas con la formación del vulcanismo de arco volcánico Albiense–Campaniense.

Como se observa, la concepción de la probable existencia de burbujas mánticas como mecanismo termodinámico generador de la energía requerida para la formación de los arcos de islas volcánicos es concordante con la historia de formación y desarrollo del sistema volcánico de arcos de islas cubano del Cretácico.

### **Clasificación de las burbujas mánticas**

Sobre la base de la distribución de las burbujas mánticas en la superficie terrestre estas pudieran clasificarse en 4 grupos a saber:

1.- Burbujas ascendentes a través de las zonas de compresión. Estas burbujas, al ascender a través de contactos entre placas que están en compresión tienden a generar tanto vulcanismo, así como, numerosos terremotos porque las burbujas no encuentran una salida a la superficie debido al estado de compresión entre las placas actuantes.

2.- Burbujas ascendentes a través de las zonas de distensión. En las zonas de distensión de corteza, al estar las placas divergiendo, no hay acumulación suficiente de gases y por tanto de presión y por eso el vulcanismo y los terremotos tienen menor ocurrencia.

3.- Burbujas ascendentes dentro de la corteza continental. El proceso de ascensión de las burbujas mánticas a través de los continentes es lento y requiere de enormes presiones. En el pasado, las burbujas generadas bajo el primigenio súper continente cumplían con esas condiciones y en su ascenso creaban montañas y enormes volcanes. Actualmente, las burbujas actuantes bajo los continentes generan menores presiones, su actividad es menos catastrófica y sólo remanentes de los antiguos súper volcanes se observan, como es el caso del súper volcán de Yellowstone.

4.- Burbujas ascendentes dentro de la corteza oceánica. Las burbujas que ascienden del manto a través de la corteza oceánica, al haber un menor espesor de la corteza suelen producir enormes erupciones submarinas que con frecuencia crean islas. En esas condiciones la sucesión e intensidad de los procesos favorecen más al vulcanismo que a los sismos. Sin embargo, cuando estas burbujas generan un sismo, estos suelen ser muy intensos y ocasionar destructivos tsunamis.

### **CONCLUSIONES**

- El concepto de burbujas mánticas es original, no existe precedencia en la literatura y viene a complementar las ideas que se tenían, hasta el momento, sobre las regularidades espacio-temporales en el origen y evolución de la Tierra.
- El planeta Tierra desde su origen y durante todo su desarrollo ha estado de manera dramática influenciado por las burbujas mánticas que han estado presentes desde los orígenes del planeta. Ellas han conducido

toda la evolución del planeta que de forma fatal transita desde una completa incandescencia y mediante un enfriamiento constante, hasta un final frío sin atmósfera y sin agua.

- Los terremotos y los volcanes son manifestaciones de fenómenos de genética similar signados por la acción de las burbujas mánticas y donde las relaciones espaciales entre las placas tectónicas sólo han contribuido como vías de acceso del magma y sus gases a la superficie. Ambos fenómenos tienen un factor genético común que es la expulsión de magma con gases a presión desde el manto a través de burbujas mánticas que se generan en el manto y que ascienden por zonas de debilidad tectónica.
- Hay que desechar la idea de mecanismos solo dinámicos provocados por las placas litosféricas para explicar el origen de los terremotos. Las fuerzas generadoras de los terremotos y de los volcanes son de origen termodinámico y profundo con prevalencia de gases a presión.
- El descubrimiento del origen neumatolítico de terremotos y volcanes a partir de las burbujas mánticas como mecanismo genético, constituye una herramienta de valor para la mejor comprensión de ambos fenómenos y su posible pronóstico.
- A diferencia de la idea de las corrientes de convección como motor de las placas; se propone la acción de fuerzas universales como la gravedad y la rotación de la Tierra como mecanismos rectores de la dinámica de las placas litosféricas de la Tierra.
- De acuerdo con las áreas de impacto de las burbujas mánticas con la superficie del planeta se distinguen 4 tipos: (a) De las zonas de compresión, (b) De las zonas de distensión, (c) Intra-continetales y (d) Intra-oceánicas

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Duncombe, J.**, 2019, El misterio sin resolver de las manchas de la Tierra, *Eos*, 100, <https://doi.org/10.1029/2019EO117193>.
- Hofmeister Anne**, 2022, «El motor principal de los movimientos tectónicos de la Tierra está en el cielo» *Revista GSA Special Papers de la Sociedad geológica de los EE.UU.*
- Iturralde-Vinent, M.A.**, 1996c, El arco de islas volcánicas del Cretácico. In: *Oliolitas y Arcos Volcánicos de Cuba* (Ed. Iturralde-Vinent, M.A.). IGCP Project 364, Special Contribution 1, pp. 179-189.
- Iturralde-Vinent, M. A.**, 1996d, Evidencias de un arco primitivo (Cretácico inferior) en Cuba. In: *Oliolitas y Arcos Volcánicos de Cuba* (Ed. Iturralde-Vinent, M.A.). IGCP Project 364, SpecialContribution 1, pp. 227-230.
- Kerr, A. C., Iturralde-Vinent, M. A., Saunders, A.D., Babbs, T.L., Tarney, J.**, 1999, A new plate tectonic model of the Caribbean: Implications from a geochemical reconnaissance of Cuban Mesozoic volcanic rocks. *Geological Society of America Bulletin*, 111, pp. 1581-1599.
- Millán, G.**, 1996, Metamorfitas de la asociación ofiolítica de Cuba. In *Oliolitas y Arcos Volcánicos de Cuba* (Ed. Iturralde-Vinent, M.A.). IGCP Project 364 SpecialContribution 1, Miami, USA, pp. 147-153.
- Pindell, J.**, 1985, Alleghenian reconstruction and the subsequent evolution of the Gulf of Mexico, Bahamas and proto-Caribbean Sea. *Tectonics* 3, pp. 133-156.
- Pindell, J., Cande, S., Pitman, W., Rowley, D., Dewey, J., Labrecque, J., Haxby, W.**, 1988, A plate-kinematic framework for models of Caribbean evolution. *Tectonophysics*, 155, pp. 121-138.
- Pindell, J., Dewey, J.F.**, 1982, Permo-Triassic reconstruction of western Pangea and the evolution of the Gulf of Mexico-Caribbean region. *Tectonics* 1 (2), pp. 179-212.

**Pindell, J.L.**, 1994, Evolution of the Gulf of Mexico and the Caribbean. In: Caribbean Geology: An Introduction (Eds. Donovan, S.K., Jackson, T.A.). U.W.I. Publishers' Association, Kingston, Jamaica, pp. 13-39.

**Pindell, J.L., Barrett, S.F.**, 1990, Geological evolution of the Caribbean region; A plate-tectonic perspective. In: Dengo, G., Case, J.E.

(Eds.), The Caribbean Region (The Geology of North America, vol. H). Geol. Soc. Am., Boulder, CO, pp. 339-374.

Fecha de recepción: 20 de enero de 2023

Fecha de arbitraje: 1 de febrero de 2023

Fecha de aprobación: 20 de febrero de 2023



## Composición de las facies radioláricas cenozoicas y sedimentogénesis del sello regional en la Franja Norte Petrolera Cubana

Carlos Morales Echevarría<sup>1</sup> y Osmany Pérez-Machado Milán<sup>2†</sup>

<sup>1</sup> Licenciado en Geología. Doctor en Ciencias Técnicas. JSC ZARUBEZHNEFT. Avenida 3ra, e/78 y 80. Edificio Habana, Piso #5, Oficina 506, Centro de Negocios Miramar. Playa. C.P.11300. La Habana, Cuba. ORCID ID 0000-0001-8754-6134. Correo electrónico.: cmorales@nestro.ru

<sup>1</sup> Ingeniero Geólogo. Máster en Geología Petrolera. Investigador Agregado. Centro de Investigación del Petróleo, Cuba, CP 10200. ORCID ID 000-0003-2326-5469. Correo E.: milan@ceinpet.cupet.cu

### RESUMEN

La Formación Vega Alta, constituye el sello regional en la Franja Norte Petrolera Cubana (FNPC). Estudios anteriores definen en esta formación dos paquetes de sedimentos, uno de naturaleza carbonatada silíceo arcillosa, constituido por intercalaciones flyschoides de limolitas, lutitas, cretas y pedernales; dispuestos en la base, próximo a los reservorios, y el segundo de naturaleza olistostrómica en la parte superior de la unidad. Estos sedimentos presentan numerosos cambios faciales tanto laterales como longitudinales, reflejo de las condiciones de sedimentación. Desde el punto de vista litológico se reporta creta y pedernal radiolárico, los cuales constituyen un marcador regional. El conocimiento de los procesos sedimentarios que caracterizan la deposición de esta facies, es de gran importancia para comprender sus variaciones faciales, aspecto que dificulta las correlaciones, en especial cuando se trata de pozos exploratorios horizontales y desviados, lo que constituye el problema principal de esta investigación. Lograr la caracterización y presentar algunas consideraciones sobre los procesos sedimentológicos que tienen lugar en la deposición de estas facies, constituye el objetivo del trabajo; su cumplimiento se logra

a través de la aplicación de un conjunto de métodos que integran el análisis litológico facial de las facies radioláricas, en conjunto con el estudio bioestratigráfico. Se aplica la microscopía electrónica y la difracción de rayos X, lo que permite implementar un estudio integral de esta unidad sedimentaria. Se utilizan datos litológicos y bioestratigráficos de pozos exploratorios perforados en la FNPC. Se obtiene una caracterización integral de esta facies, infiriéndose sus condiciones de sedimentación, logrando correlacionarla a todo lo largo de la FNPC.

**Palabras clave:** Facies, carbonatos, silicitas, radiolarios, radiolaritas, correlación.

### ABSTRACT

Vega Alta Formation represents the regional seal within the Cuban Northern Oil Belt. Previous studies defined two different sediment packages in this formation: one of clayey siliceous carbonate nature, located at the base and near the reservoir units, which consists of interbedded flyschoid siltstones, shales, cherts and cherts; and the second of olistostrome nature at the upper section of the unit. It has been noti-

ced that these sediments possess numerous facies changes both lateral and longitudinal, as reflection of the sedimentation conditions. Chalks and radiolaric cherts have been reported in these deposits, which are considered to be a regional marker. The understanding of the facies depositional processes and their lithological composition are important elements to figure out the facies changes, aspect that makes the correlation among wells difficult, especially when dealing with deviated and horizontal exploratory wells, which is the main problem of this research. Achieving the characterization and presenting some considerations about the sedimentological processes that take place in the deposition of these facies, constitute the objectives of this work. To achieve this objective a set of methods were applied to integrate the facial lithologist analysis of the radiolaric facies, and the biostratigraphic study. Electron microscopy and X-ray diffraction are applied, which helped to implement an integral study of the sedimentary unit. Lithological and biostratigraphic data from exploratory wells drilled in the FNPC are used. An integral characterization of this facies was achieved, inferring its sedimentation conditions, managing to correlate it throughout the FNPC.

**Key words:** Facies, carbonates, silicites, radiolarians, radiolarites, correlation.

## RESUMO

A Formação Vega Alta, constitui o selo regional do Cinturão Petrolífero do Norte de Cuba (FNPC). Estudos anteriores definem dois pacotes de sedimentos nesta formação, um de natureza argilosa siliciosa carbonatada, constituído por intercalações flyschoid de siltitos, xisto, giz e sílex; dispostos na base, próximo aos reservatórios, e o segundo de natureza olistostômica no topo da unidade. Esses sedimentos apresentam inúmeras alterações faciais laterais e longitudinais, reflexo das condições de sedimentação. São relatados giz e sílex litologicamente radioláricos, que constituem um marcador regional. O conhecimento dos processos sedimentares que caracterizam a deposição desta fácies é de grande importância para a com-

preensão de suas variações faciais, aspecto que dificulta as correlações, principalmente quando se trata de poços exploratórios horizontais e desviados, o que constitui o principal problema do presente estudo. . pesquisa. Alcançar a caracterização e apresentar algumas considerações sobre os processos sedimentológicos que ocorrem na deposição dessas fácies constitui o objetivo deste trabalho; O cumprimento do mesmo é conseguido através da aplicação de um conjunto de métodos que integram a análise litológica facial da fácies radiolárica, juntamente com o estudo bioestratigráfico. São aplicadas microscopia eletrônica e difração de raios X, o que permite realizar um estudo abrangente desta unidade sedimentar. São utilizados dados litológicos e bioestratigráficos de poços exploratórios perfurados no FNPC. Obtém-se uma caracterização integral desta fácies, inferindo as suas condições de sedimentação, conseguindo correlacioná-la ao longo do FNPC.

**Palavras chave:** Fácies, carbonatos, silicites, radioláricos, radiolaritos, correlação.

## INTRODUCCIÓN

La Formación Vega Alta, se manifiesta en la FNPC como el sello regional de los reservorios. Ha sido objeto de numerosos estudios e investigaciones durante los últimos cinco años, definiéndose en la formación dos paquetes fundamentales, uno de naturaleza carbonatada silíceo arcillosa y otro de carácter olistostromico. Por lo general, la base de la formación, sector más próximo a los reservorios, presenta mayor concentración de rocas arcillosas, intercaladas por silicites y rocas carbonatadas. Dada la posición y características mineralógicas de estas rocas se consideran parte de la unidad litológica sellante de la formación (Morales y otros 2013).

Durante perforaciones realizadas a través de estas rocas, se han reportado manifestaciones de gas, por lo cual pudiera pensarse en acumulaciones importantes de hidrocarburos no convencionales en estos depósitos. Es frecuente observar entre esas intercalaciones facies radioláricas caracterizadas por cretas radioláricas

intercaladas entre radiolaritas, silicitas, arcillas y limolitas, las cuales, por reportarse en la mayoría de los pozos en la base de la formación, se consideran un marcador regional.

Los sedimentos a estudiar constituyen sedimentos sinorogénicos, acumulados por la acción de pulsos tectónicos y compresión. La sedimentación gravitacional ocurre a grandes profundidades, donde el espesor de los sedimentos puede alcanzar varios cientos de metros y presentar deformaciones intensas e intercaladas con escamas arrancadas del substrato. Se considera que la clave de la relación entre la procedencia y la cuenca, está gobernada por la tectónica, la cual controla la distribución de los diferentes tipos de sedimentos clásticos. El aporte a partir de zonas orogénicas está caracterizado por detritus que se acumulan en depresiones de cuencas de antepaís con una rápida subsidencia. Este detritus proviene de rocas sedimentarias y metasedimentarias levantadas, plegadas y falladas y están caracterizados por un melange de rocas de la corteza oceánica y lodos pelágicos. Hacia estas depresiones llegan corrientes turbidíticas cargadas de sedimentos de naturaleza clástica, la cuenca de antepaís recibe detritus reciclados a partir del cinturón deformado. Los fragmentos suelen ser en su mayoría de granos de carbonatos y pedernal, en otros casos específicos se reportan granos de feldespatos potásicos (Arche, 1992).

El origen sinorogénico de estas rocas propicia la heterogeneidad y los cambios faciales, lo que dificulta en gran medida, la correlación de estas facies y los trabajos de exploración. La caracterización litológica y bioestratigráfica de esta facies radiolárica, permitirá definirla mejor, tanto desde el punto de vista litológico como genético, así como definir mejor su importancia como rocas sellos dentro de esta unidad, lo que contribuirá a un mejor entendimiento de las condiciones de su sedimentación y facilitará orientar mejor los trabajos exploratorios durante la perforación de pozos.

El término de facies fue utilizado por primera vez a principios del siglo XIX (Gressly, 1838). Fue definido en el sentido del conjunto de características lito-

lógicas y faunísticas de una unidad estratigráfica que permite distinguirla de las adyacentes. En el año 1970, Selley, definió una facies sedimentaria, como un conjunto de rocas sedimentarias que se distinguen de otras por su geometría, litología, estructuras sedimentarias, distribución de paleocorrientes y fósiles asociados (Arche, 1992).

La realización del análisis litólogo facial acompañado de la investigación bioestratigráfica en conjunto con la aplicación de la difracción de rayos X (DRX) y la microscopía electrónica de barrido con microanalizador de rayos X (SEM), permitirá obtener la caracterización litólogo-petrográfica de esta facies y presentar criterios sobre las condiciones de su sedimentación, objetivos principales de esta investigación.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

Para la aplicación del estudio litólogo-estratigráfico, se consultaron informes anteriores de trabajos de campo y se realizaron nuevas campañas de campo para reconocer y muestrear las rocas en superficie. Además, se estudiaron informes de pozos en los cuales se revisaron, en lo fundamental, el dato litológico. Otra base de datos de gran importancia, son las secciones delgadas de núcleos, pertenecientes a la colección del Centro de Investigación del Petróleo (CEINPET). La colección tiene la ventaja de ofrecer una información segura y de alta calidad. También el uso de las muestras de canal de pozos constituye una fuente de información importante sobre todo en áreas donde no se cuenta con núcleos y registros geofísicos.

El presente análisis litológico es un estudio a realizar por áreas. Las áreas seleccionadas la integran los yacimientos: Guanabo, Vía Blanca, Boca de Jaruco, Jibacoa, Yumurí, Puerto Escondido, Seboruco y Varadero.

Entre los conceptos importantes utilizados en el estudio litólogo-facial, están el de facies, litofacies y microfacies. En esta investigación se partió del concepto operacional de facies (Krumbein y Sloss, 1963), donde se definen tipos de facies, que podrían ser llamadas facies descriptivas convencionales o facies descriptivas cuantificadas. Para estos autores, las facies

son variaciones laterales en ciertos aspectos, de una unidad estratigráfica, casi siempre estudiadas de modo cuantitativo y pueden referirse a aspectos litológicos o biológicos (Reguant, 1971). La elección de los aspectos o caracteres, está en función del problema del análisis planteado. En esta investigación se optó por utilizar este concepto de facies al tener en cuenta que el estudio abarcó tanto aspectos litológicos como biológicos, por lo que se propuso mantener el término de microfacies para las descripciones en escala microscópica. La valoración y caracterización de la facies radiolarítica, se realizó sobre la base del tetraedro fundamental para la clasificación de las rocas sedimentarias (Segura, 1963). El gráfico ternario presenta en uno de sus vértices el carbonato, en el resto de los vértices se colocan las arcillas y el pedernal. Si se tiene en cuenta que estas manifiestan un contenido de carbonatos mayor al 30 % (Arche, 1992), se toma este parámetro de referencia para definir las (Figura 1).

En el estudio litólogo-facial, las radiolaritas se evidenciaron intercaladas entre las facies radioláricas; no se pudieron ver como un aspecto litológico independiente. Se añaden datos de los análisis de la difracción de rayos X (DRX) y de la microscopía elec-

trónica de barrido con microanalizador de rayos X (SEM), para completar de forma integral esta investigación. El objetivo de la difracción de rayos X, es indicar la estructura tridimensional de cada sustancia química cristalina, o en su ausencia, el conjunto de distancias interplanares e intensidades. Cada sustancia cristalina posee un ordenamiento tridimensional de sus especies atómicas propio de ellas. Al someterse una muestra cristalina a una radiación X monocromática, a partir de un determinado ángulo de incidencia entre la radiación y la muestra, se obtiene un conjunto de efectos de difracción propios de cada especie según la estructura cristalina. Este conjunto de reflexiones propicia la caracterización por comparación con lo que se ha reportado en la literatura para determinar el compuesto químico bajo estudio (Morales, 2008).

Para la Difracción de rayos X (DRX), las muestras seleccionadas fueron trituradas para alcanzar la granulometría que exige el ensayo. La realización de los difractogramas fue por el método de polvo y se registraron en un equipo Philips PW 1710 con las siguientes características:

|                         |                      |
|-------------------------|----------------------|
| Goniómetro              | <b>Vertical</b>      |
| Sistema de focalización | <b>Bragg-Bretano</b> |

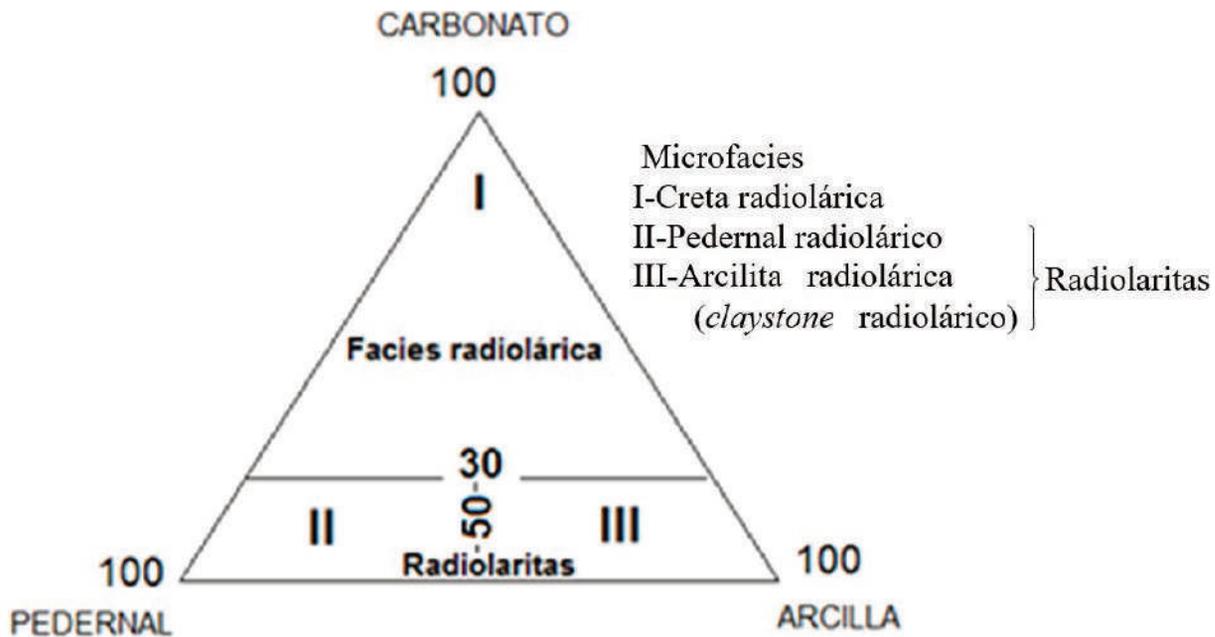


Figura 1. Clasificación de la facies radiolarítica, modificado por el autor a partir de Segura (1973).

|  |                   |
|--|-------------------|
| Radiación K $\alpha$                                     | <b>Fe</b>         |
| Filtro   | <b>Mn</b>         |
| Diferencia de potencial aplicado                         | <b>30 KV</b>      |
| Corriente anódica  | <b>20 mA</b>      |
| La calibración del equipo se verifica con patrón externo | <b>Silicio</b>    |
| Registro angular   | <b>6-80° (20)</b> |

Todos los difractogramas se registraron según variante de medición punto a punto (programa 13), paso angular de 0.05° y tiempo de medición en cada posición de 3 segundos. Los resultados numéricos de intensidades relativas y ángulos de difracción se convirtieron en difractogramas continuos con el empleo del programa Origin 7.0. Las distancias interplanares se determinaron con el programa Ttod para PC. El análisis cualitativo de fases se realizó con la utilización de la Base de Datos PCODFWIN; versión 1.30 JCPD-SICDD/ 2002, compatible con Windows 98 para Office 2000.

En la microscopía electrónica se utilizó el equipo: TESCAN. Vega 51305 B. El microscopio integra un sistema de microanálisis por espectroscopía de dispersión de energía de rayos X, EDS (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy), modelo Inca 350, con un detector de silicio para elementos ligeros y resolución de 138eV de la Oxford Instruments. Para la realización de la microscopía electrónica de barrido las muestras se recubrieron con oro, las imágenes observadas se obtuvieron mediante el empleo de detectores de electrones secundarios y electrones retrodispersos. En los espectros obtenidos en el eje de las Y se reportaron los porcentajes de las sustancias elementales presentes en las muestras y en el eje de las X los valores correspondientes a la dispersión de la energía perteneciente a la espectrometría de rayos X (Morales, 2012).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Caracterización litológico-petrográfica

Desde el punto de vista litológico, la microfacies fundamental es la creta radiolárica, en ocasiones con componente arenoso. Además de la creta radiolárica, están

presentes el pedernal radiolárico y la arcillita radiolárica. Estos litotipos son denominados como radiolaritas cretosas o radiolaritas (**Figura 2**). Las radiolaritas cretosas de forma general son friables, de colores gris claro a gris verdoso, a veces presentaron color pardo de varios tonos, debido a la elevada impregnación de petróleo; la fina pseudoestratificación (juntas de disolución) es un elemento distintivo. En sección delgada se caracterizó por la presencia de abundante fauna fósil: foraminíferos planctónicos, radiolarios y abundante nannoplancton (cocolitos), el pedernal arcilloso radiolárico, en ocasiones algo carbonatado y fracturado y rocas silíceo arcillosas radioláricas. De forma general en gran parte de los pozos perforados en la FNPC, se reporta esta facies. En pozos de Canasí, Puerto Escondido y Jibacoa, se observan cretas arcillosas con abundantes radiolarios intercaladas entre pedernales radioláricos arcillosos y de forma subordinada, material arenoso siliciclástico de cuarzo, serpentinita y plagioclasas.

En el área de Seboruco en la base de la Formación Vega Alta, se observa creta radiolárica arcillosa de color verde claro a pardo claro, se intercala pedernal radiolárico arcilloso, porosidad móldica vacía o rellena por petróleo. El pozo Varadero 709, en los 2110 m, reporta creta radiolárica arcillosa de color blanco-gris, claro a pardo claro (por impregnación), masiva, firme a poco friable, con visibles radiolarios recristalizados a calcedonia, se observa en sección delgada escasos cocolitos y nannoconus al parecer redepositados; la impregnación es uniforme y en manchas.

Desde el punto de vista petrolero, las cretas constituyen importantes reservorios, pero también pueden actuar como capas impermeables de rocas que entrapen yacimientos si se encuentran enterradas a profundidades mayores de 2000 m, dada su baja permeabilidad y la plasticidad que éstas alcanzan a grandes profundidades.

### Consideraciones sedimentológicas

Las cuencas cenozoicas en Cuba evolucionaron de modo similar a las del Cretácico Superior Campaniano-

Maastrichtiano, o sea, el mecanismo de aporte y deposición estuvo dado por el levantamiento y la subsidencia implantados por la actividad tectónica.

La sedimentación de la Formación Vega Alta, tuvo lugar en una cuenca profundizada, con probabilidad por el acercamiento desde el sur de nuevos cabalgamientos (ofiolitas fuera de secuencia), que por su gran peso provocó el hundimiento significativo de las porciones de la cuenca hacia el norte, donde se depositaron secuencias de aguas más profundas determinadas, en primer lugar, por la acumulación de espesores pequeños de arcillas las cuales llegaban a la cuenca provenientes de la destrucción de las rocas del margen continental, el arco volcánico cretácico y la corteza oceánica.

Dentro de estas secuencias de aguas profundas se depositan las facies radioláricas. Estas rocas constituyen en la FNPC un marcador regional próximo a los reservorios, conocidas como radiolaritas cretáceas por tener más del 50 % de radiolarios. Estas se observan también en el pozo Yamagua IX perforado por REPSOL-YPF y se reportan en numerosos yacimientos: Habana del Este, Guanabo, Vía Blanca, Jibacoa, Canasí Yumurí y Varadero.

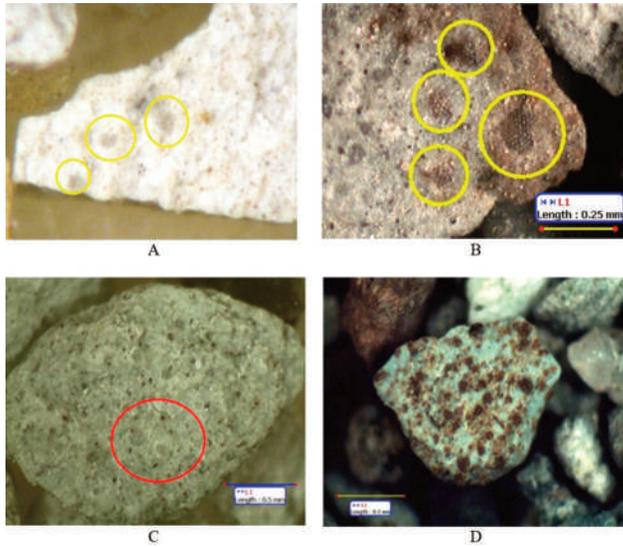
De modo conceptual, las facies radioláricas manifiestan un contenido de carbonatos mayor al 30 %. Se caracterizan por cretas, calizas o arcillas silíceas rojas y verdes con gran abundancia de radiolarios, los cuales pueden estar calcitizados. A nivel mundial se conocen en diferentes edades, y especial desarrollo tienen la de los Alpes, Cárpatos, Apeninos, Béticas, etc. (Arche, 1992). El alto contenido de carbonatos y la presencia de foraminíferos planctónicos poco resistentes a los procesos de disolución que ocurren a grandes profundidades, indica que la deposición de esta facies debió realizarse en condiciones de escasa velocidad de sedimentación, sin aportes terrígenos por encima del nivel de compensación de los carbonatos (C.C.D, carbonate compensation depth) entre 1000 y 2000 m o por lo menos, por encima de la lisoclina, en condiciones de relativo reposo tectónico en la cuenca (Arche, 1992).

La influencia de las condiciones climáticas

favoreció el desarrollo de los procesos erosivos durante la formación de estos sedimentos. Hacia la parte final del Paleoceno, ocurrió un ascenso marcado de la temperatura global, que parece estar reflejado en la base de los depósitos turbidíticos típicos del Eoceno inferior a medio temprano. Este intervalo refleja la ocurrencia de intensas lluvias de carácter regional y global, como respuesta climática planetaria hacia el equilibrio ambiental coherente, ante el clima cálido y el alto contenido de CO<sub>2</sub> atmosférico, impuesto en la primera mitad del Paleógeno. La violenta meteorización de los silicatos se extendió a amplias áreas de la región, compuestas por las vulcanitas cretácicas y paleogénicas en formación. Ello propició la erosión de gigantescos volúmenes de sedimentos siliciclásticos que fueron transportados y depositados por flujos turbulentos en las cuencas marinas circundantes a las tierras emergidas (Rojas y Denis, 2013).

El origen de la sílice en solución debe atribuirse a la meteorización de los minerales silicatados (plagioclasas, feldespatos). Estas rocas en los procesos de meteorización se alteran a minerales arcillosos, los cuales a través de procesos de neomorfismo se transforman en sílice. Las altas concentraciones de sílice presentes en la cuenca cenozoica, propicia el desarrollo de los radiolarios los cuales se manifiestan como organismos oportunistas.

Los estudios realizados en pozos de la FNPC, observaron intercalaciones entre las facies radioláricas, de pedernales radioláricos y arcillitas radioláricas, las cuales constituyen radiolaritas (**Figura 2, A, B y C**). De forma conceptual, las radiolaritas se caracterizan por presentar un contenido de carbonatos por debajo del 30 %. Desde el punto de vista genético se forman sobre corteza oceánica, aunque después de numerosas discusiones establecidas en cuanto a la profundidad de deposición de las radiolaritas, algunas pueden ser parte de redepósitos de materiales transportados por corrientes de turbidez (y otras corrientes marinas) hasta surcos profundos procedentes de relieves adyacentes menos profundos. La presencia de turbiditas indican condiciones paleogeográficas, tectónicas y deposicionales de secuencias sedimentarias antigua,

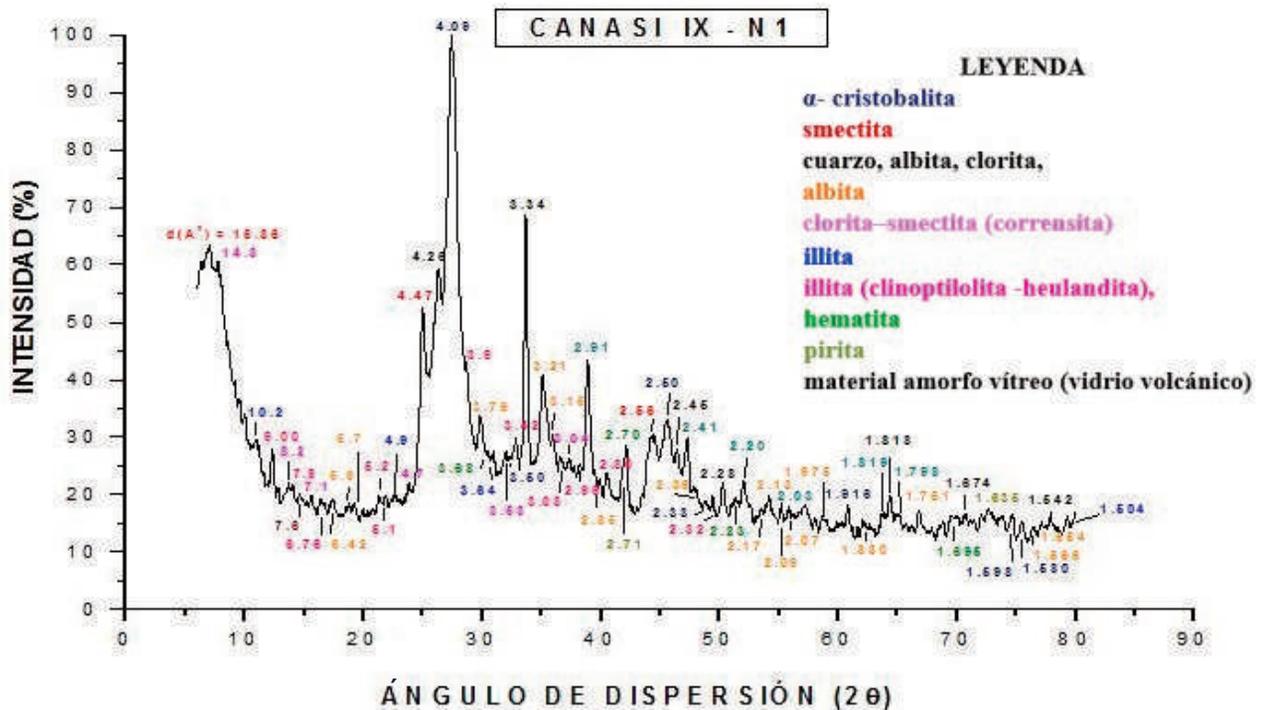


**Figura 2.** Facies radiolárica. (A) Pozo Varadero 709; creta radiolárica, obsérvese radiolarios (círculos); profundidad 2 140 m, 20x. (B) Pozo Boca de Jaruco 1001, claystone radiolárico (radiolarita), radiolarios bien preservados (círculo), profundidad 3 290m, 50X. (C) Pozo Puerto Escondido 11, claystone radiolárico de color verde (radiolarita), radiolarios bien preservados (círculo), piritizado, profundidad 1555 m, 20X. (D) Pozo Guanabo 102, pedernal arcilloso radiolárico (radiolarita). Se observa que los radiolarios están impregnados (porosidad móldica), profundidad 4070 m, 50x.

las cuales se relacionan con una situación de aguas profundas junto a un margen continental (a menudo convergente). Su formación requiere al menos una plataforma inclinada y alguna forma de tectonismo que active el flujo de densidad mediante avalanchas.

En el caso de la Formación Vega Alta, se considera que la existencia de estas radiolaritas, se debe al gran enriquecimiento de sílice acontecido en la cuenca y a los procesos neomórficos antes descritos, unido a corrientes turbidíticas provenientes de terrenos adyacentes. También la disolución de los esqueletos opalinos de esponjas y radiolarios se considera una fuente de sílice para la formación de capas de pederuales y de constituyentes silíceos autógenos tales como la cristobalita, el cuarzo y la calcedonia.

Los análisis de difracción de rayos X realizados, indican la presencia de los minerales arcillosos montmorillonita e illita (grupo esmectitas), y cristobalita (Figura 3). Es conocido que las arcillas del grupo de las esmectitas se forman a partir de transformaciones ocurridas en rocas de origen volcánico, en el caso cubano, vinculadas con los sedimentos procedentes del arco volcánico cretácico.



**Figura 3.** Difractograma de polvo, muestra M-18 (Canasi IX).

Los procesos diagenéticos producidos durante el enterramiento, implican cambios mineralógicos que afectan a los minerales arcillosos. A grandes profundidades con el aumento de la presión y la temperatura, las arcillas se hacen muy reactivas. La reacción más significativa que ocurre a profundidad es la de la conversión de esmectita a illita. En esta conversión la esmectita pierde su agua interlamilar a unos 1000 y 1300 °C, al pasar a interstratificados de montmorillonita e illita.

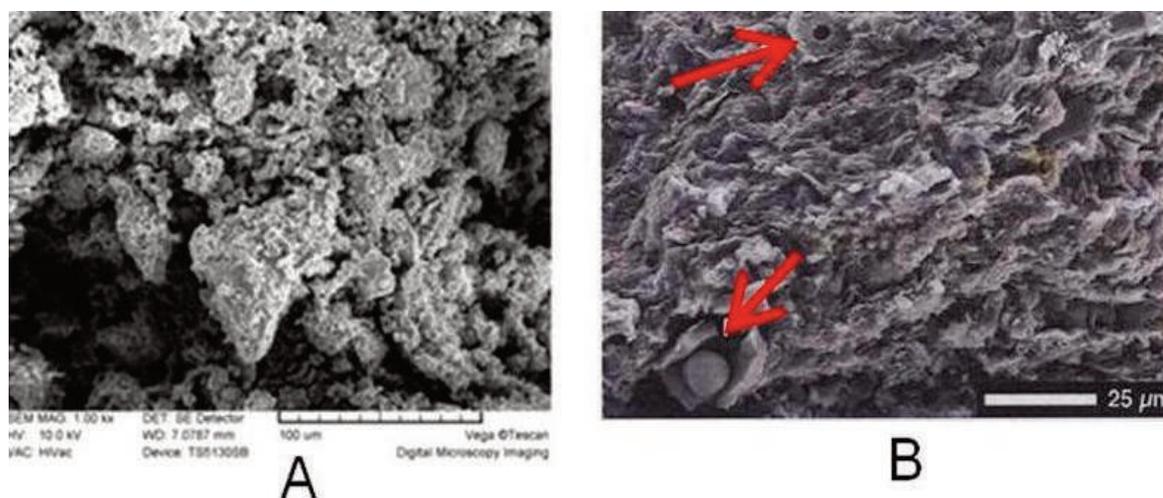
La presencia en las arcillas estudiadas, de vidrio volcánico en conjunto con minerales, como la analcima y la heulandita, determinados en los análisis de difracción de rayos X, constituye una evidencia que indica a las rocas volcánicas como la principal fuente de aporte (Figura 3). Tanto la analcima como la heulandita son minerales secundarios acumulados en grietas y fisuras de rocas ígneas, en lo fundamental basaltos. Estos minerales, al igual que la cristobalita, se originan de la alteración de rocas volcánicas (Morales, 2021).

Esta facies radiolaria en gran parte de los pozos estudiados, se caracterizan también por la presencia de una fracción arenosa y o limosa de cuarzo, pedernales, feldespatos, plagioclasas y serpentinitas. Al parecer, toda esta fracción responde a procesos de resedimentación y redeposición producida a través de

corrientes turbidíticas, provenientes de fuentes de aportes muy productivas. Este origen explica la variable composición de los granos y la mala selección de los mismos. En los trabajos realizados en los sedimentos cubanos, se constataron en estas rocas, señales de deslizamientos submarinos determinados por manchas carmelitosas, verdosas de forma irregular. Esto podría inferir que estos sedimentos pudieran haberse desplazados de zonas donde se depositaron de forma inicial propensa al desarrollo de radiolarios, vinculadas con probabilidad, a secuencias ofiolíticas (Morales, 2021).

Los rasgos texturales típicos observados en las imágenes obtenidas a través de la microscopía electrónica (**Figura 4A y 4B**), indican la existencia de aglomerados de arcilla y la ausencia de laminación, que indica que las rocas estudiadas se depositaron en ambientes de elevada energía. La laminación es determinada por el proceso de sedimentación. En ambientes tranquilos la deposición se presenta según la dirección de orientación preferencial y la roca exhibe textura laminar en todas las escalas, en tanto que, en ambientes altamente energéticos, las rocas arcillosas, por lo general, no presentan laminación, o sea, su textura es al azar (Morales, 2021).

El porcentaje de minerales arcillosos, por lo general, varía con la distancia de la fuente de aporte.



**Figura 4.** (A) Micrografía, Illita –Smectita, pozo Canasí 1X, Núcleo 1, Formación Vega Alta. (B) Las flechas señalan poros ocluidos de sílice (ópalo).

Las cretas puras se relacionan en lo fundamental con procesos transgresivos en áreas de aporte poco productivas y lejanas (Sholle, 1977).

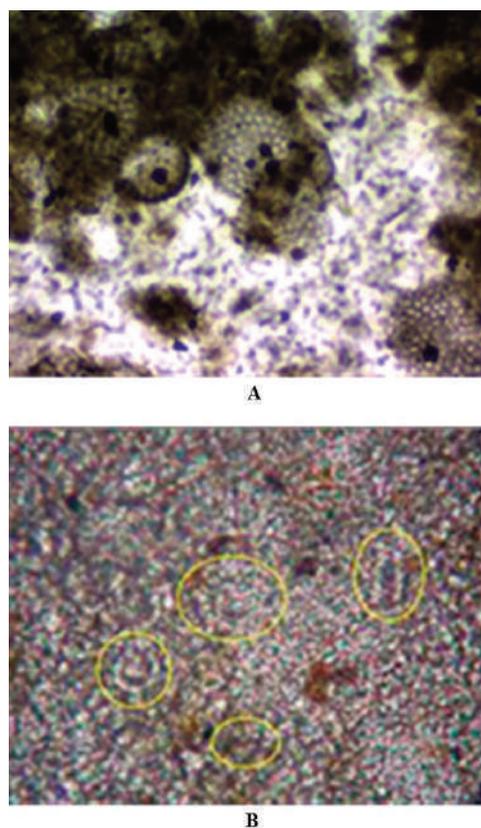
Esta facies presenta variaciones microfaciales, tanto laterales como verticales, reflejo de sus características sinorogénicas. Las transiciones microfaciales se dividen en tres tipos. El primer tipo refleja facies de aguas someras, caracterizadas por calcarenitas y areniscas. El segundo tipo de variación facial, representa la transición hacia áreas donde se incrementa el aporte terrígeno clástico (no en aguas profundas). Esta variación facial se caracteriza por el paso de las cretas a limolitas y lutitas. El tercer tipo de variación es común solo en sedimentos abisales y refleja el paso de cretas formadas encima del nivel de compensación de carbonatos (C.C.D) hacia facies por debajo de este nivel, donde se incrementan los procesos de disolución. Estas facies se caracterizan de forma litológica, por la presencia de lutitas negras y pedernales (Hancock, 1975).

#### Consideraciones bioestratigráficas

Otro aspecto importante, es el hecho de que gran parte de estas facies radioláricas constituyen de forma litológica, cretas de nanoplancton calcáreo (**Figura 5**), donde las arcillas son el componente insoluble más importante presente en estas rocas. Estos sedimentos presentan una biota caracterizada por radiolarios, cocolitos y foraminíferos pelágicos. Estos organismos desarrollan un estilo de vida pelágico, lo cual indica que los sedimentos descritos se acumulan en condiciones de aguas profundas en cuencas abiertas. Estudios detallados de las asociaciones de nanoplancton calcáreo y radiolarios realizados en el Núcleo 1 del pozo Canasí 1X, los datos primarios de foraminíferos planctónicos y bentónicos grandes ya reportados, permitió la datación de los depósitos en el intervalo estudiado (1780-2015 m), esto permitió restringir la edad del mismo a Eoceno Inferior Ypresiano. Desde el punto de vista litológico, este límite está marcado por la aparición de las radiolaritas (**Figura 5 A**). A partir de los fósiles encontrados, se infiere que existía un ambiente marino de aguas profundas con aportes de corrientes de turbidez en el momento de la sedimentación. Entre los radiolarios que

evidencian los procesos turbidíticos se señalan la *Conosphaera mammilata*, *Dictyomitra* sp, *Dictyomitra striata* del Cretácico superior.

Otro aspecto que indica también la influencia de las corrientes turbidíticas, es la presencia de nannoconus en conjunto con cocolitos y otros fósiles terciarios. Este es un hecho observado en secuencias similares del pozo Boca de Jaruco 1000. En los 3760 m se observan fragmentos de calizas con *Planorotalites* sp; *Morozovella* aff. *aequa*; *Acarinina* sp; *Chiloguembellina* sp; *Thorasphaera* sp; *Braarudosphaera bigelowi*; *Nannoconus* sl (redepositado); globigerínidos; cocolitos, donde se reporta una edad del Paleoceno-Eoceno Inferior parte baja, con redeposición del Cretácico Inferior (**Figura 5B**).



**Figura 5.** (A) Arcillita radiolárica, Canasí 1x, 100x, cn. (B) Nannoconita, recrystalizada de modo fino, nannoconus recrystalizados (círculo), impregnada de modo fuerte (sección delgada a partir de fragmentos redondeados de calizas, abundante matriz de creta friable, masiva, microlaminada por juntas de disolución de forma rara. Impregnación fuerte, uniforme. Profundidad 2160 m, 400x, pozo Varadero 709, cn.

## CONCLUSIONES

- Los estudios realizados en pozos de la FNPC observaron la presencia de rocas con un elevado contenido de radiolarios y abundante componente carbonatado (cretas de nanoplancton calcáreo) en más de un treinta por ciento, aspectos que permitieron definir las como facies radiolárica.
- Esta facies se manifiesta intercalada entre las facies arcillosas, carbonatada y las radiolaritas. Por su posición estratigráfica en la base de la formación, establecen una variación facial tanto lateral como vertical donde, de modo indistinto, es posible observar cretas radioláricas, claystone o pedernales radioláricos (radiolaritas). La posición de estas litologías, justo encima del reservorio, constituyen un marcador regional conocido como «Marcador de Radiolaritas», lo que confirma el vínculo entre la facies radiolárica y las radiolaritas *sensu stricto*, lo que constituye un marcador regional próximo a los reservorios en la FNPC, dentro del sello regional.
- Estos sedimentos presentan una biota caracterizada por radiolarios, coccolitos y foraminíferos pelágicos donde se reporta una edad del Paleoceno-Eoceno Inferior parte baja, con redeposición del Cretácico Inferior. Los fósiles encontrados permitieron inferir que existía un ambiente marino de aguas profundas con aportes de corrientes de turbidez en el momento de la sedimentación.
- La presencia de estas rocas en la base influye de forma positiva en la calidad de la formación como sello, dada su baja permeabilidad y la plasticidad que éstas alcanzan a grandes profundidades.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**Arche, A.**, 1992, Sedimentología I. Edición corregida y aumentada. Madrid: Consejo Superior de

Investigaciones Científicas, p. 528

- Gressly, A.**, 1838, Observations géologiques sur le Jura soleurois. Nouveaux mémoires de la Société Helvetique des Sciences Naturelles. Neuchatel, 2, p. 349
- Hancock, J. M.**, 1975, The sequence of facies in the Upper Cretaceous of Northern Europe, compared with that in the Western Interior, in The Cretaceous System in the Western Interior of North America: Geolo. Assoc. Canada Spec. Paper 13: 83-118.
- Kantchev, I.**, 1978, Informe de Geología, Provincial Las Villas. Resultado de las investigaciones geológicas y levantamiento geológico a escala 1:250 000, años 1969-1975. Informe Inédito ACC., CNFG, La Habana (Cuba), (1), pp. 889-908.
- Krumbein, W.C., Sloss, L. L.**, 1963, Stratigraphy and Sedimentation. W.H. Freeman and Co., San Francisco, p. 660
- Morales, C.**, 2008, Estudio litológico facial del sello en la Franja Norte de Crudos Pesados. Departamento de Geología, Universidad de Pinar del Río, Tesis presentada en opción al Título Académico de Maestría en Geología, p. 106
- Morales, C.**, 2012, Evaluación Integral del Sello. Etapa 5. «Estudio integral de las rocas sellantes en los yacimientos petrolíferos de Cuba». Proyecto 7043. Centro de Investigación del Petróleo.
- Morales, C., George de Armas, E., López, S. García, D.**, 2013, Caracterización mediante métodos instrumentales del sello de Yacimientos petroleros de La Franja Norte de Crudos Cubanos, Anuario de la sociedad Cubana de Geología, (1), pp. 13-17.
- Morales, C.**, 2021. Estudio litológico facial del sello en la Franja Petrolera Norte Cubana. Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Facultad de Ingeniería Civil, Departamento de Geociencias. Tesis presentada en opción al Título Académico de Doctor en Ciencias Geológicas, p. 103

- Rojas, R., y Denis, R.,** 2013. Influencia climática de los sistemas turbidíticos del Paleógeno Cubano. Anuario de la sociedad Cubana de Geología, (1) , pp. 83-94.
- Reguant, S.,** 1971, Los conceptos de facies en estratigrafía. Acta geológica hispánica, VI (4): pp. 97-101.
- Segura, R.,** 1973, Introducción a la Petrografía: España, Ediciones URMO, Espartero, 10 Bilbao, p. 208
- Selley, P. A.**1977. Deposition, diagenesis and hydrocarbon Potential of deeper water Sedimentation. A.A.P.G. Continuing Education Course Notes Series, 7, p. 63.
- Sholle, P.,** 1977, Chalk Diagenesis and Its Relation to Petroleum Exploration: Oil from Chalks, a Modern Miracle? The American Association of Petroleum Geologists Bulletin, Treatise of Petroleum Geology, 61(7), pp. 363-390.
- Fecha de recepción: 20 de enero de 2023  
Fecha de arbitraje: 1 de febrero de 2023  
Fecha de aprobación: 20 de febrero de 2023



## Interpretación geofísico-morfométrica en apoyo a la cartografía geológica de la Hoja 3985-III (1:50000) Varadero, Cuba

Manuel E. Pardo Echarte<sup>1</sup>, Elizabeth Hechavarría Govin<sup>2</sup> y Osvaldo Rodríguez Morán<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Ingeniero Geofísico, Doctor en Ciencias Geológicas, Investigador Titular y Profesor Titular del Centro de Investigación del Petróleo, Churruca, No.481, e/ Vía Blanca y Washington, Cerro, La Habana, CP 10 600. ORCID ID: 0000-0003-0669-4413. Correo electrónico.: pardo@ceinpet.cupet.cu

<sup>2</sup> Ingeniera Geofísica. Instituto de Geología y Paleontología Servicio Geológico de Cuba (IGP-SGC). Vía Blanca, No. 1002 e/ Río Luyanó y Prolongación de Calzada de Güines, Reparto Los Ángeles, San Miguel del Padrón. C.P. 11000, La Habana, Cuba. ORCID ID: 0000-0002-9487-4408. Correo electrónico.: elishin96@gmail.com.

<sup>3</sup> Ingeniero Geofísico. Máster en Geología Petrolera. Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Titular e Investigador Titular de la Universidad Tecnológica de La Habana, «José Antonio Echeverría», Cujae, Ave 114 No. 11901, entre Cirovía y Rotonda, Marianao, C.P. 19390, La Habana, Cuba. ORCID ID: 0000-0001-9153-4603, Correo electrónico.: ormoran2016@gmail.com.

### RESUMEN

Como regla, las observaciones geológicas de campo complementadas con la información de sensores remotos resultan insuficientes a los fines de la cartografía geológica subsuperficial de un territorio, en particular, cuando su cuadro estructural es muy complejo. En estos casos, es imprescindible la asistencia de la interpretación geofísico-morfométrica. En tal sentido, es conocido que los campos potenciales ayudan, básicamente, al desciframiento estructuro-tectónico del territorio y en menor medida a la cartografía litológica de las diferentes unidades geológicas presentes, resultando a la inversa la contribución de la espectrometría gamma aérea. El objetivo de la investigación consistió en apoyar la cartografía geológica del área con una interpretación integrada geofísico-morfométrica. Los materiales utilizados fueron: Mallas del campo gravimétrico y aeromag-

nético a escalas 1: 50000 y de espectrometría gamma aérea a escala 1:100 000 de la República de Cuba; Modelo de Elevación Digital (90x90 m) de la República de Cuba y Mapa Geológico Digital a escala 1: 100000 de la República de Cuba. Los métodos utilizados fueron: gravimetría, aeromagnetometría, morfometría no-convencional y espectrometría gamma aérea. Como resultado de la investigación, se cartografió la estructura geológica subsuperficial (~500 m) del territorio a partir de la interpretación integrada gravi-magnética y morfométrica no-convencional. Además, se estableció y cartografió la composición litológica superficial a partir de la naturaleza radiactiva de los suelos residuales. Así se reconocen: depresiones estructurales, levantamientos de rocas del Margen Continental Norteamericano, límites tectónicos, presencia de volcánicos + ofiolitas, extensión en profundidad de cuerpos geológicos aflorantes y la presencia

---

Pardo-Echarte, M. E., Hechavarría-Govin, E., Rodríguez-Morán, O., 2023, Interpretación geofísico-morfométrica en apoyo a la cartografía geológica de la Hoja 3985-III (1:50000) Varadero, Cuba: Geociencias UO. v. 6, núm. 1, enero-junio 2023. pp. 36-45.

de rocas con contenidos de feldespato potásico, de arcillas, de carbonatos con fosfatización, de gabro-serpentinitas y de depósitos palustres.

**Palabras Clave:** Cartografía Geológica; Cartografía Estructuro-Tectónica; Cartografía Litológica; Gravitimetría; Aeromagnetometría; Modelo de Elevación Digital; Espectrometría Gamma Aérea.

## ABSTRACT

As a rule, field geological observations supplemented by remote sensing information are insufficient for the purposes of subsurface geological mapping of a territory, particularly when its structural framework is very complex. In these cases, the assistance of the geophysical-morphometric interpretation is essential. In this sense, it is known that the potential fields help, basically, the structural-tectonic decipherment of the territory and to a lesser extent the lithological cartography of the different geological units present, resulting in the inverse contribution of aerial gamma spectrometry. The objective of the research was to support the geological mapping of the area with an integrated geophysical-morphometric interpretation. The materials used were: gravimetric and aeromagnetic field grids at scales 1: 50 000 and aerial gamma spectrometry at scale 1:100 000 of the Republic of Cuba; Digital Elevation Model (90x90 m) of the Republic of Cuba and Digital Geological Map at a scale of 1:100000 of the Republic of Cuba. The methods used were: gravimetry; aeromagnetometry; non-conventional morphometry and aerial gamma spectrometry. As a result of the investigation, the subsurface geological structure (~500 m) of the territory was mapped based on the integrated gravi-magnetic and non-conventional morphometric interpretation. In addition, the surface lithological composition was established and mapped from the radioactive nature of the residual soils. Thus, the following can be recognized: structural depressions, rock uplifts of the North American Continental Margin, tectonic limits, presence of volcanics + ophiolites, extension in depth of outcropping geological bodies and the presence of rocks with potassium felds-

par content, clays, carbonates with phosphatization, of gabbro-serpentinites and marshy deposits. Keywords: Geological Mapping; Structural-Tectonic Cartography; Lithological Cartography; Gravimetry; Aeromagnetometry; Digital Elevation Model; Aerial Gamma Spectrometry.

## RESUMO

Via de regra, observações geológicas de campo complementadas por informações de sensoriamento remoto são insuficientes para fins de mapeamento geológico de subsuperfície de um território, principalmente quando seu arcabouço estrutural é muito complexo. Nesses casos, o auxílio da interpretação geofísico-morfométrica é essencial. Nesse sentido, sabe-se que os campos potenciais auxiliam, basicamente, na decifração estrutural-tectônica do território e em menor escala na cartografia litológica das diferentes unidades geológicas presentes, resultando na contribuição inversa da espectrometria gama aérea. O objetivo da pesquisa foi apoiar o mapeamento geológico da área com uma interpretação geofísico-morfométrica integrada. Os materiais utilizados foram: malhas de campo gravimétrico e aeromagnético na escala 1:50000 e espectrometria gama aérea na escala 1:100.000 da República de Cuba; Modelo Digital de Elevação (90x90 m) da República de Cuba e Mapa Geológico Digital na escala 1:100000 da República de Cuba. Os métodos utilizados foram: gravimetria; aeromagnetometria; morfometria não convencional e espectrometria gama aérea. Como resultado da investigação, a estrutura geológica subsuperficial (~500 m) do território foi mapeada com base na interpretação integrada gravi-magnética e morfométrica não convencional. Além disso, a composição litológica da superfície foi estabelecida e mapeada a partir da natureza radioativa dos solos residuais. Assim, podem ser reconhecidos: depressões estruturais, soerguimentos rochosos da Margem Continental Norte-Americana, limites tectônicos, presença de vulcânicos + ofiolitos, extensão em profundidade de corpos geológicos aflorantes e presença de rochas com teor de feldspato potássico, argilas, carbonatos com

fosfatização, de gabro-serpentinitos e depósitos pantanosos.

**Palavras chave:** Mapeamento Geológico; Cartografia Estrutural-Tectônica; Cartografia Litológica; Gravitometria; Aeromagnetometria; Modelo Digital de Elevação; Espectrometria Gama Aérea.

## INTRODUCCIÓN

El empleo de la geofísica en apoyo a la cartografía geológica es muy antiguo. Tradicionalmente, los datos aeromagnéticos han sido el principal parámetro aerogeofísico utilizado. Sin embargo, su empleo combinado con los datos de resistividad aparente (levantamiento aéreo electromagnético-AEM) y de espectrometría gamma aérea (EGA) logra un producto mucho más útil para este propósito. Potencialmente, otros métodos geofísicos pueden ser empleados para resolver problemas geológicos específicos, en particular los estructurales (detección de contactos y fallas y delimitación de cuerpos geológicos), tal es el caso de la gravimetría.

Como regla, las observaciones geológicas de campo complementadas con la información de sensores remotos resultan insuficientes a los fines de la cartografía geológica subsuperficial de un territorio, en particular, cuando su cuadro estructural es muy complejo. En estos casos, es imprescindible la asistencia de la interpretación geofísica-morfométrica. En tal sentido, es conocido que los campos potenciales ayudan, básicamente, al desciframiento estructuro-tectónico del territorio y en menor medida a la cartografía litológica de las diferentes unidades geológicas presentes, resultando a la inversa la contribución de la espectrometría gamma aérea (Pardo Echarte y Cobiella Reguera, 2017).

Según Dobrin y Savit (1988), el método gravimétrico resuelve los problemas del estudio de la constitución geológica regional, con mejores resultados para los cinturones plegados, lo que permite hacer la regionalización tectónica, con la caracterización de grandes elementos estructurales bajo la cubierta sedimentaria. Los mismos autores exponen, que el levanta-

tamiento aeromagnético es muy útil para la cartografía geológica de extensas regiones con una cubierta sedimentaria donde las características estructurales son reveladas a partir de la existencia de horizontes magnéticos, como ofiolitas, tobas, flujos de lava, areniscas y lutitas ferruginosas presentes dentro de la secuencia sedimentaria.

Con relación a la EGA, desde los años 80 (Duval, 1983) se comienzan a utilizar las composiciones de color, hoy llamados mapas ternarios, que hacen uso de las gamas de colores RGB (rojo, verde, azul) y CMY (cian, magenta, amarillo). Estos mapas son muy utilizados porque permiten delimitar unidades litológicas diferentes a partir de su expresión espectrométrica. En particular, la imagen compuesta de radioelementos ofrece muchas ventajas en términos de discriminación litológica basada en las diferencias de color y trama. Las imágenes destacan las áreas donde cada radioelemento tiene una absoluta o relativa concentración más alta.

La I.A.E.A. (2003), subraya la necesidad de integración de diferentes métodos geofísicos y su complementación con el Modelo de Elevación Digital (MED) e imágenes satelitales a fin de ayudar a la interpretación geológico-cartográfica. Para ello se utilizan en la actualidad modernas técnicas de procesamiento y Sistemas de Información Geográfica (Elton, Moreira y Silva, 2003).

Con relación al empleo del MED, Rasemman (2004) plantea que este es la pieza clave de los análisis morfométricos, equivalente informatizado de la cartografía clásica de elevaciones, tradicionalmente representada mediante curvas de nivel.

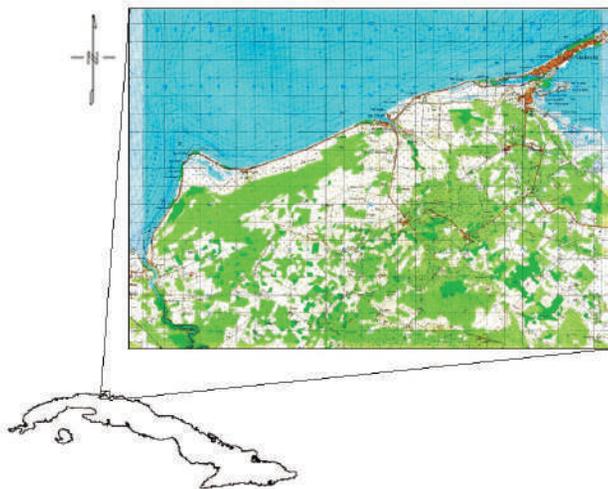
En la región de estudio (costa norte de Matanzas), los datos gravimétricos (Gb) y aeromagnéticos (DT) potencialmente permiten identificar diferentes rasgos geólogo-estructurales: por mínimos, los asociados a levantamientos de rocas del Margen Continental Norteamericano (MCN) (dentro del Cinturón Plegado y Cabalgado Norte Cubano (CPCNC) y a depresiones estructurales (D); por máximos, los vinculados con la presencia del Terreno Zaza (Hatten et al., 1988), esto es, volcánicos+ofiolitas (V). De otra parte,

el Modelo de Elevación Digital (MED) 90x90m pudiera reflejar algunos rasgos geológico-estructurales sobresalientes heredados en el relieve. En tanto, los alineamientos de campos potenciales como morfométricos permiten trazar los principales límites tectónicos del territorio. El objetivo de la investigación consiste, por ende, en apoyar la cartografía geológica del área con una interpretación integrada geofísico-morfométrica.

En la investigación se utiliza un enfoque que considera la aplicación de los métodos gravi-magnético y la morfometría no-convencional para cartografiar la estructura geológica subsuperficial (hasta ~ 500 m de profundidad), mientras que, para cartografiar la composición litológica superficial, a partir de la naturaleza radioactiva de los suelos residuales, se emplea la EGA.

### Ubicación Geográfica

La región de estudio (Hoja Cartográfica 3985-III a escala 1: 50 000, Varadero) se muestra en la Figura 1. Sus límites en coordenadas Lambert, Cuba Norte, son: X: 448000-475000; Y: 352000-371000.



**Figura 1.** Ubicación geográfica de la región de estudio.

### Marco Geológico Regional

Según Pardo Echarte y Cobiella Reguera (2017), el corte geológico de Cuba puede dividirse en dos grandes unidades estructurales y estratigráficas denominadas basamento plegado y cubierta. En el primero, el piso pre cenozoico está formado por tres complejos de

distinta naturaleza:

- Paleomargen continental pasivo mesozoico
- Asociación ofiolítica mesozoica
- Arcos volcánicos cretácicos (incluyendo su basamento metamórfico y la cubierta sedimentaria campaniana-maastrichtiana).

El paleomargen continental pasivo mesozoico considera: un margen distensivo septentrional-Margen Continental Norteamericano (MCN), extendido entre Pinar del Río (occidente) y el NW de Holguín (oriente), con una pequeña área en el extremo oriental de Cuba (Maisí) y un margen continental distensivo meridional con dos áreas - Isla de la Juventud y Macizo Escambray.

En el MCN, en los cortes entre La Habana y Camagüey, en superficie y en subsuelo, de norte a sur, se pueden distinguir las siguientes unidades tectono-estratigráficas (UTE): Cayo Coco, Remedios, Camajuaní y Placetas.

Las unidades Camajuaní y Placetas están despegadas de su basamento, en tanto Remedios es posiblemente paraautóctona y Cayo Coco, autóctona. Generalmente, las rocas de la asociación ofiolítica se disponen de forma estructural encima de la unidad Placetas, que contiene las capas depositadas de forma originaria más al sur.

La asociación ofiolítica mesozoica (AO), en el cinturón ofiolítico septentrional, está formada por rocas de la litosfera oceánica tectónicamente emplacedas sobre la UTE Placetas del MCN, que contiene las capas depositadas de forma originaria más al sur. Las rocas de la AO están representadas por ultramafitas serpentinizadas, serpentinitas, complejos cumulativos máfico-ultramáficos y rocas máficas (intrusivas y volcánicas).

Con respecto a las secuencias vulcanógeno-sedimentarias de la AO, en ocasiones, resulta difícil separarlas de las del Arco Volcánico del Cretácico (¿parte inferior Basamento?), para lo cual se requiere de estudios petroquímicos y petrográficos detallados.

Entre Pinar del Río y Camagüey, las rocas ofiolíticas subyacen a las sucesiones vulcanógeno-sedimentarias cretácicas. El contacto entre ambas es

siempre tectónico. Estas últimas contienen una mezcla caótica de serpentinitas y gabroides con rocas de las sucesiones referidas. De hecho, las deformaciones y mezcla tectónica de litologías son tan notables que, en esencia, la faja es un gran *melange*.

En gran parte de Cuba, ubicados de forma estructural sobre las rocas ofiolíticas y ocupando, en general, una posición más meridional, se disponen los arcos volcánicos (insulares) cretácicos (AVC), formados por cortes volcánicos y vulcanógeno-sedimentarios cretácicos, así como su substrato metamórfico y una cubierta sedimentaria del Cretácico Superior Tardío.

En Cuba occidental el afloramiento de los cortes vulcanógeno-sedimentarios cretácicos es mucho más limitado que en Cuba central. Las rocas del Cretácico Inferior están representadas por la Formación Chirino (Ducloz, 1960), que al igual que en Cuba central, contienen poco material sedimentario. El corte del Cretácico Superior es de limitado espesor y sus vulcanitas son calcoalcalinas, y contiene abundantes intercalaciones sedimentarias. A la integración de la AO y los AVC se le denominó Terreno Zaza (Hatten *et al.*, 1988).

Según Pardo Echarte y Cobiella Reguera (2017), el piso paleogénico del basamento plegado está formado por cuatro complejos:

- Arco volcánico Sierra Maestra-Cresta Caimán (AVSMC)
- Cuencas de antepaís
- Cuencas a cuestras paleogénicas
- Cuenca sinorogénica del Eoceno Medio y Superior del Sur de Cuba oriental.

Los vínculos entre los cuatro complejos del basamento paleogénico son mucho más claros y, a pesar de las considerables deformaciones y transporte horizontal sufridos por algunos, las relaciones espaciales primarias (paleogeográficas) entre ellos se conservan en esencia.

El AVSMC y la Cuenca intramontane del Eoceno Medio y Superior del sur de Cuba oriental no son tratadas en este tópico por encontrarse muy distantes del área de estudio y no ejercer influencia en su com-

posición y estructura geológica.

En lo relativo a las cuencas de antepaís a lo largo del norte de Cuba, desde el NW de Pinar del Río hasta Gibara (Holguín), las rocas del MCN son cubiertas por los depósitos de esta cuenca. Estos son sucesiones acumuladas en el frente de los mantos de cabalgamiento generados durante la orogénesis cubana, como consecuencia de la erosión de su región frontal y de la rápida subsidencia de la cuenca, debido al peso de los mantos de cabalgamiento.

La sedimentación en estas depresiones es coetánea con las deformaciones orogénicas y el fechado de sus depósitos marca la edad del evento (Campaniano tardío-Maastrichtiano al Paleoceno-Eoceno Inferior). Existe una estrecha imbricación entre las escamas tectónicas de la porción meridional de la cuenca de antepaís, formadas de manera mayoritaria por olistostromas y las escamas de rocas de la AO, del Arco Volcánico Cretácico y del MCN.

Este cinturón escamado es una faja plegada y fallada, con tectónica alpina de finas escamas, originado por una combinación de tectónica compresional y gravitacional (Cinturón Plegado y Cabalgado Norte Cubano-CPCNC). Según el Colectivo de Autores (2009), el CPCNC se caracteriza por varios niveles de pliegues de rampa contra falla inversa de rocas del MCN y su cobertura. Estos pliegues han sido probablemente complicados de forma adicional por accidentes de cizalla. Las rocas deformadas abarcan un intervalo de edad que va desde el Jurásico hasta el Eoceno.

En cuanto a las cuencas a cuestras (CC) son depresiones, generalmente pequeñas, desarrolladas en el dorso de los mantos de cabalgamiento durante el avance de estos. En el territorio cubano hay evidencias del desarrollo de varias de estas cuencas, especialmente durante el Paleógeno temprano (Cobiella Reguera, 2009; Linares Cala *et al.*, 2011). Al igual que con otras estructuras, las cuencas a cuestras cubanas modifican algunos de sus rasgos de una región a otra.

Según Pardo Echarte y Cobiella Reguera (2017), la cubierta eocénica-cuaternaria comprende los depósitos más jóvenes del corte estratigráfico, poco deformados en relación a las capas subyacentes, casi siem-

pre separados de estas por una discordancia estructural y sin presencia de rocas magmáticas. Sus estratos se acumularon, fundamentalmente, tras el cese de los movimientos de la orogénesis cubana. Sin embargo, en varias regiones se incluyen en la porción basal de la cubierta, sucesiones con cierto grado de complicación estructural y evidencias de acumulación en condiciones aún inestables. De acuerdo con esto, la cubierta se divide en dos:

- Sucesiones transicionales (Sinorogénico)
- Cubierta sensu strictus (Postorogénico).

### **Premisas Físico-Químico-Geológicas**

La alta densidad de los volcánicos y las ofiolitas permite distinguir, por máximos gravimétricos, las elevaciones estructurales de los mismos. Igualmente, su correspondiente elevada susceptibilidad magnética permite cartografiarlos sin dificultad por la aeromagnetometría y hasta diferenciarlos en algunos casos.

La caracterización litológica se ofrece en términos radioactivos: Predominio de variedades potásicas-presencia de feldespato potásico (en rojo); predominio de variedades urano-toríferas-presencia de calizas arcillosas (en azul-carbonatos fosfatados, predominantes y en verde-arcillas, predominantes); ausencia de elementos radioactivos-ultrabasitas y sedimentos costeros anegados (en negro).

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

### **Información y sus Fuentes**

Los materiales utilizados y sus fuentes son las siguientes:

- Mallas del campo gravimétrico y aeromagnético a escalas 1: 50 000 y de espectrometría gamma aérea (canales: U, Th y K) a escala 1:100 000 de la República de Cuba (Mondelo Diez *et al.*, 2011).
- El MED (90x90 m) (Sánchez Cruz *et al.*, 2015), con fuente en: <http://www.cgiar-csi.org/data/srtm-90m-digital-elevation>
- Mapa Geológico Digital de la República de Cuba a escala 1: 100 000 del Instituto de Geología y Paleontología-Servicio Geológico

de Cuba (IGP-SGC) (Colectivo de Autores, 2010).

### **Métodos y Técnicas**

Los métodos utilizados en la investigación son:

- Gravimetría (GB)
- Aeromagnetometría (DT)
- Morfometría no-convencional (MED)
- Espectrometría Gamma Aérea (EGA).

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

#### Gravimetría

Para la cartografía geólogo-estructural por datos gravimétricos se utilizó la primera derivada vertical (GbDV), equivalente a una residual a 500 m. La derivada horizontal total (GbDHT) se empleó para el trazado de los alineamientos tectónicos.

#### Aeromagnetometría

La litología magnética (volcánicos+ofiolitas) se puede distinguir directamente sobre la base de las observaciones del campo aeromagnético reducido al polo (DTrp) y su primera derivada vertical (DTrpDV). A partir de la última es posible, en ocasiones, diferenciar las ofiolitas de los volcánicos por una mayor intensidad de sus valores máximos. Los alineamientos tectónicos son trazados a partir del campo de la derivada horizontal total (DTrpDHT).

#### Morfometría no-convencional

El MED (90x90 m) se sometió a la separación regional-residual a partir de la Continuación Analítica Ascendente (CAA) a 500 m, según la experiencia del autor (Pardo Echarte, Reyes Paredes y Suárez Leyva, 2018). Para trazar los alineamientos tectónicos se utilizó la derivada horizontal total (MEDDHT).

#### Espectrometría Gamma Aérea

Para la EGA se determinaron las relaciones entre las variables espectrométricas, las cuales pueden resultar

más expresivas que los valores de las componentes espectrométricas originales para delimitar contactos litológicos. Además, se confeccionó el mapa ternario RGB (red, green, blue) de los tres radioelementos (K, Th y U, respectivamente). La cartografía litológica se realizó bajo el presupuesto de la presencia básica de suelos residuales, estableciendo los límites de las áreas con igual trama y color.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

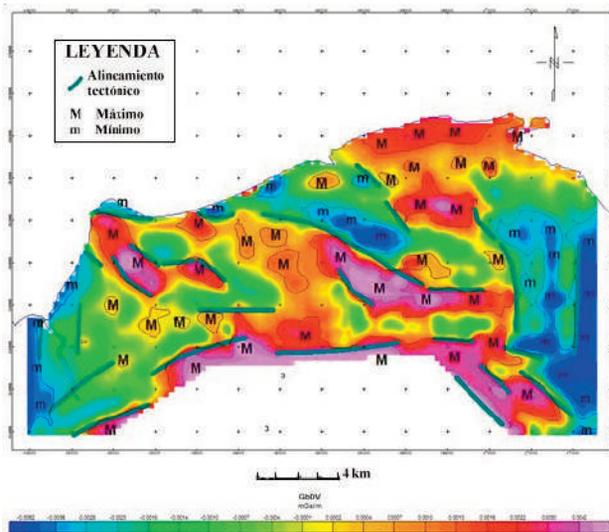
### Resultados

#### Gravimetría

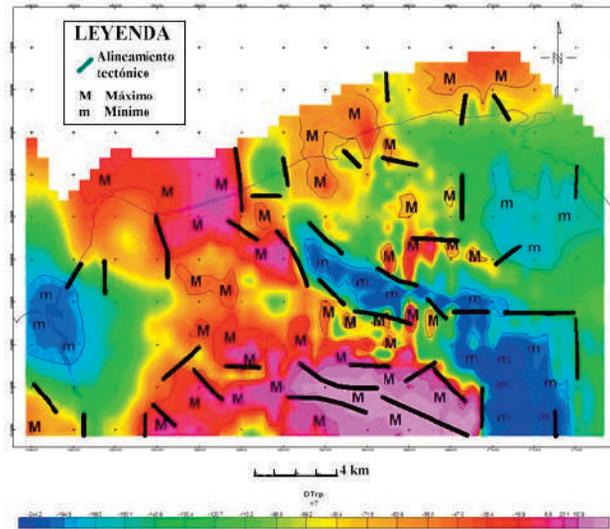
Los resultados de la cartografía geólogo-estructural por datos gravimétricos se presentan en la **Figura 2**. En general, los máximos están asociados a la presencia de rocas volcánicas y ofiolitas del Terreno Zaza y los mínimos a levantamientos de rocas del MCN dentro del CPCNC y a depresiones estructurales. Se evidencia en el subsuelo la sutura AO+AVC vs. MCN, cartografiada por los alineamientos tectónicos que separan los mínimos septentrionales de los máximos meridionales.

#### Aeromagnetometría

Los resultados de la cartografía geólogo-estructural por datos aeromagnéticos se presentan en la **Figura 3**. En general, los máximos están asociados a la presen-



**Figura 2.** Cartografía geólogo-estructural por datos gravimétricos (GbDV).



**Figura 3.** Cartografía geólogo-estructural por datos aeromagnéticos (DTrp).

cia de rocas volcánicas y ofiolitas del Terreno Zaza y los mínimos a levantamientos de rocas del MCN dentro del CPCNC y a depresiones estructurales. Aquí no se evidencia tan claramente en el subsuelo la sutura AO+AVC vs. MCN como en el caso anterior, solo parcialmente.

#### Morfometría no-convencional

Los resultados de la cartografía morfométrica por datos del MED (90x90 m) se presentan en la **Figura 4**. En la misma han sido trazados los alineamientos tectónicos por morfometría. A juzgar por la regionalización del campo del relieve, se observa un máximo estructural al sur del área vinculado con la presencia de un cuerpo de gabro-serpentinitas aflorado, mostrando que su extensión en profundidad pudiera ser mayor.

#### Estructura geológica de la región de estudio por datos gravi-magnéticos y morfométricos

Un esquema de la estructura geológica del territorio en base a la interpretación integrada de los datos geofísicos y morfométricos se presenta en la **Figura 5**. En él se ofrecen los principales alineamientos tectónicos, la sutura AO+AVC vs. MCN, las principales áreas de desarrollo de las rocas volcánicas y ofiolíticas (Terreno Zaza) y las posibles depresiones estructurales.

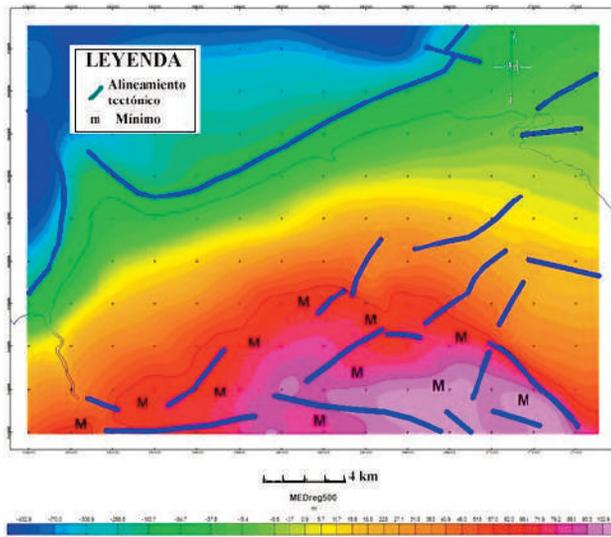


Figura 4. Cartografía morfométrica por datos del MED (90x90 m).

#### Espectrometría Gamma Aérea

Los resultados de la cartografía litológica por datos de la EGA se presentan en las Figuras 6-8. Las relaciones espectrométricas que ofrecen una mejor información fueron  $K/eTh$  y  $eTh/eU$ . En el mapa de la relación espectrométrica  $K/eTh$  (Figura 6) se distinguen zonas de máximos que son delimitadas a partir de alineamientos los cuales coinciden con algunos contactos litológicos presentes en el mapa geológico del territorio. El alineamiento que se observa al noroeste

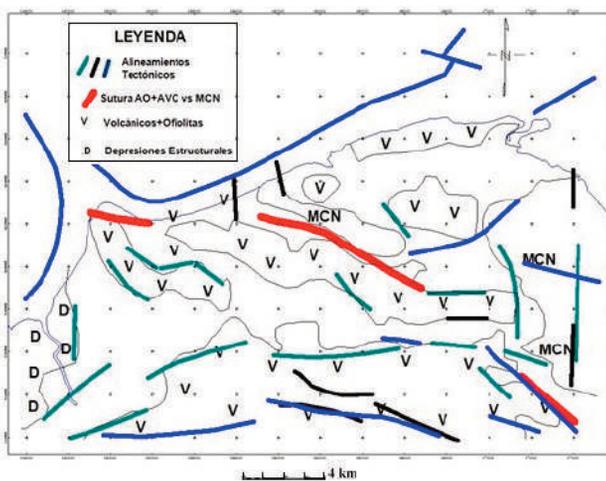


Figura 5. Esquema de la estructura geológica del territorio en base a la interpretación integrada de los datos geofísicos y morfométricos.

coincide, en algunas áreas, con el contacto litológico entre las formaciones Güines y Canímar. Hacia el sur, el alineamiento que se muestra concuerda con el contacto entre las rocas de la formación Vía Blanca con los gabros-serpentinitas. Al centro se distingue un alineamiento que coincide con el contacto litológico entre las formaciones Peñón, Perla y Güines. El alineamiento ubicado hacia el noreste no coincide con contactos litológicos, lo que pudiera ser una futura zona de estudio para comprobar geológicamente.

En el mapa de la relación espectrométrica  $eTh/eU$  (Figura 7) se observan tres alineamientos que coinciden con contactos litológicos reconocidos. El alineamiento que se distingue al norte concuerda con el contacto entre las rocas de las formaciones Jaimanitas y Canímar, mientras que el alineamiento que se encuentra hacia el sur, coincide con el contacto entre las formaciones Güines y Vía Blanca. El corto alineamiento ubicado al noreste delimita el contacto entre los depósitos palustres y la formación Jaimanitas.

En la Figura 8 (Mapa Ternario) han sido trazados los principales alineamientos tectónicos que responden al cuadro geológico más superficial, así como los límites de los principales campos litológicos (suelos residuales) con expresión radioactiva (rojo-naturaleza potásica-presencia de feldespato potásico, fundamentalmente en las Fms. Veloz, Vía Blanca, Perla y Peñón; verde-naturaleza torífera-presencia de arcillas y azul-naturaleza uranífera-presencia de fosfatización en carbonatos, fundamentalmente en las Fms. Güines, Colón y Loma Triana y; negro-ausencia de radioelementos-presencia de gabros-serpentinitas y hacia las costas, zonas de depósitos palustres).

#### DISCUSIÓN

La cartografía geofísico-morfométrica integrada ofrecida en esta investigación resulta, sin dudas, de utilidad para la cartografía geológica del área de estudio en elaboración ya que permite:

- Cartografiar la estructura geológica subsuperficial (~ 500 m) del territorio partir de la interpretación integrada gravi-magnética y morfométrica no-convencional, donde se re-

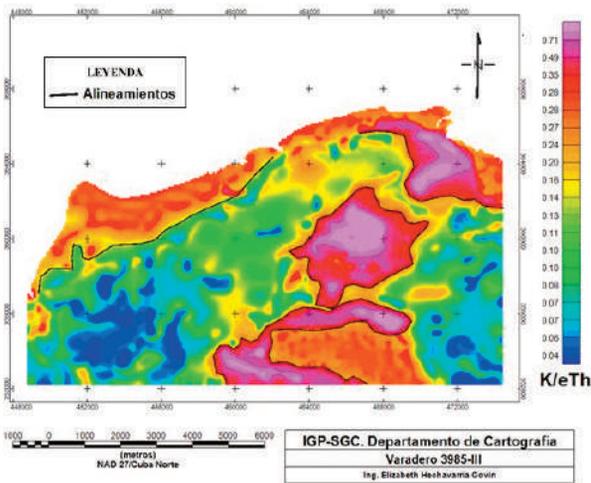


Figura 6: Mapa de la relación espectrométrica K/eTh.

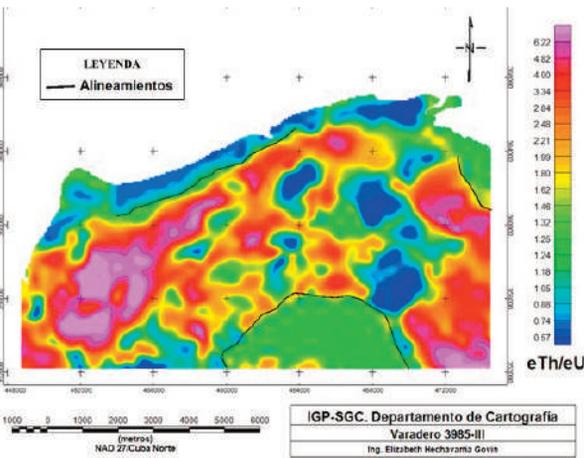


Figura 7: Mapa de la relación espectrométrica eTh/eU.

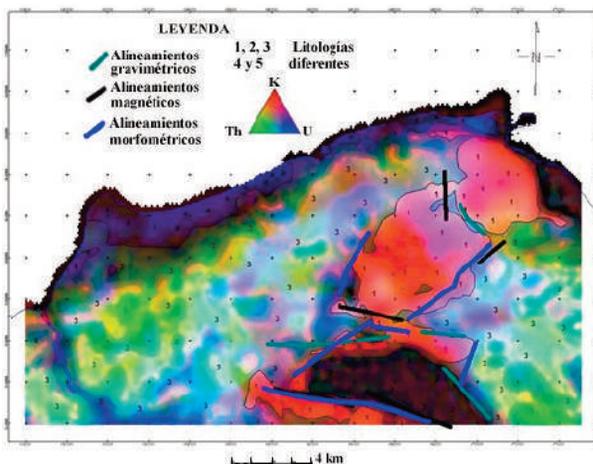


Figura 8. Cartografía litológica a partir del Mapa Ternario (K, Th y U).

conocen depresiones estructurales, levantamientos de rocas del MCN, límites tectónicos, presencia de volcánicos+ofiolitas y la extensión en profundidad de cuerpos geológicos aflorantes.

- Establecer y cartografiar la composición litológica superficial a partir de la naturaleza radioactiva de los suelos residuales, donde se reconoce la presencia de rocas con contenidos de feldespato potásico, de arcillas, de carbonatos con fosfatización, de gabro-serpentinatas y de depósitos palustres.

## CONCLUSIONES

- Se cartografió la estructura geológica sub-superficial (~500 m) del territorio partir de la interpretación integrada gravi-magnética y morfométrica no-convencional. Además, se estableció y cartografió la composición litológica superficial a partir de la naturaleza radioactiva de los suelos residuales. Así se reconocen: depresiones estructurales, levantamientos de rocas del MCN, límites tectónicos, presencia de volcánicos+ofiolitas, extensión en profundidad de cuerpos geológicos aflorantes y la presencia de rocas con contenidos de feldespato potásico, de arcillas, de carbonatos con fosfatización, de gabro-serpentinatas y de depósitos palustres.
- A juzgar por la regionalización del campo del relieve (a partir de la morfometría no-convencional), se observa un máximo estructural al sur del área vinculado con la presencia de un cuerpo de gabro-serpentinatas aflorado, mostrando que su extensión en profundidad pudiera ser mayor.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Centro de Investigación del Petróleo y al Instituto de Geología y Paleontología Servicio Geológico de Cuba por permitir el uso de información ordinaria en esta investigación. También, al Dr.

C. Reinaldo Rojas Consuegra y a la Dra. C. Olga Castro Castiñeira por la rigurosa revisión del manuscrito.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cobiella Reguera, J.L.**, 2009, Emplacement of the Northern Ophiolite Belt of Cuba. Implications for the Campanian-Eocene geological history of the northwestern Caribbean-SE Gulf of Mexico region. (In: James, K., M. Lorente, J. Pindell (Eds.). The Origin and Evolution of the Caribbean Plate, Geological Society of London Special Publication 328: 313-325.
- Colectivo de Autores**, 2009, Expediente Único del Proyecto 6004, "Exploración en la Franja Norte Petrolera Cubana". Inédito. Archivo, Centro de Investigación del Petróleo (Ceinpet), La Habana, Cuba, 22pp.
- 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.
- Dobrin, A. y Savit, M.**, 1988, Introduction to geophysical prospecting. McGraw-Hill International Editions 4ta Ed.
- Ducloz, C.**, 1960, Mapa Geológico de Matanzas a escala 1:20 000. Inédito. Centro Nacional del Fondo Geológico, Ministerio de Industria Básica. La Habana.
- Duval, J. S.**, 1983, Composite color images of aerial gamma-ray spectrometric data. *GEOPHYSICS*, 48: 722-735.
- Elton, L. D., Moreira A. y Silva T. A.**, 2003, Old Geophysical Data Applied to Modern Geological Mapping Problems: A Case-Study In The Seridó Belt, NE Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, 33(2-Suplemento): 65-72.
- Hatten, C.W., Somin, M.L., Millán Trujillo, G., Renne, P., Kistler, R.W., y Mattinson, J.M.**, 1988, Tectonostratigraphic units of central Cuba En: Barker, L., (Editor) Transactions of the 11th Caribbean Geological Conference, Barbados, 1986: 35.1-35.
- AGENCY**, 2003, Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data. Vienne, TECDOC-1363.
- Linares, E., García Delgado D., Delgado López O., López Rivera J., Strazhevich V.**, 2011, Yacimientos y manifestaciones de hidrocarburos de la República de Cuba. Centro de Investigaciones del Petróleo, La Habana, 480 pp.
- Mondelo Diez, F., Sánchez Cruz R. y otros**, 2011, Mapas geofísicos regionales de gravimetría, magnetometría, intensidad y espectrometría gamma de la República de Cuba, escalas 1:2000000 hasta 1:50 000. Inédito. IGP, La Habana, 278pp.
- Pardo Echarte M. E., Reyes Paredes O. y Suárez Leyva V.**, 2018, Offshore Exploration of Oil and Gas in Cuba using Digital Elevation Models (DEMs). SpringerBriefs in Earth System Sciences. DOI 10.1007/978-3-319-77155-7.
- Pardo Echarte, M.E. y 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.
- Rasemman, L.**, 2004, Análisis Morfométricos a partir del Modelo de Elevación Digital. Texto básico. México, 1ra Ed.
- Sánchez Cruz, R., Mondelo Diez, F.**, 2015, Mapas Morfométricos de la República de Cuba para las escalas 1:1 000000–1:50000 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>.

Fecha de recepción: 20 de enero de 2023

Fecha de arbitraje: 1 de febrero de 2023

Fecha de aprobación: 20 de febrero de 2023

## Clasificación supervisada de imágenes de satélite en Google Earth Engine del municipio de Othón P. Blanco, Quintana Roo, México

Luis Antonio Mora-Tembre<sup>1</sup>, Jorge Armando López Chan<sup>2</sup> y Cecilia Elizabeth Olivares Braus<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Licenciado en Biología, Estudiante de Maestría en Manejo de Zonas Costeras del TECNM/ITChetumal. Av. Insurgentes 330, Chetumal, Quintana Roo, México. C.P 77013. ORCID: 0000-0001-7648-2737 Correo E: M95390351@Chetumal.tecnm.mx

<sup>2</sup> Licenciado en Biología. Docente de la Licenciatura en Biología y Estudiante de la Maestría en Manejo de Zona Costera del TECNM/IT Chetumal. Av. Insurgentes 330, Chetumal, Quintana Roo, México. C.P 77013. ORCID: 0009-0007-5307-2429. Correo E: M95390351@Chetumal.tecnm.mx

<sup>3</sup> Ingeniera Geofísica. Candidata a obtener el grado de Maestría en Ingeniería Petrolera, estudiante de Maestría en Educación. Representante de la compañía EPYESA en Tabasco; Profesora de la Dirección de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Olmeca Carretera Villahermosa-Macuspana km 14, Poblado Dos Montes, C.P. 86280, Centro, Tabasco, México. ORCID 0009-0007-9592-9267. Correo E: colivares\_braus@hotmail.com

### RESUMEN

El monitoreo de las coberturas terrestres es un tema de suma importancia en los ámbitos gubernamental, académico y social por las implicaciones que tienen los cambios de las coberturas y usos de suelo en temas como sustentabilidad, riesgos, conservación de la biodiversidad, servicios ambientales y el cambio climático. De acuerdo con el reporte especial del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático del 2015, los cambios de cobertura de suelo a nivel mundial y regional de zonas por pérdida de cobertura forestal, limitan las trayectorias de mitigación global a 1.5 °C. El objetivo de la presente investigación es generar un mapa de coberturas para el municipio de Othón P. Blanco Quintana Roo, mediante el uso de imágenes satelitales y la plataforma *Google Earth Engine*, mediante el algoritmo «Random Forest». Se generó una imagen compuesta basado en la mediana de valores de pixel, del periodo

de enero a diciembre del 2020, se utilizaron escenas de Sentinel-2 que abarcan los límites del municipio y se recortó por máscara para emplear la capa de los límites municipales en *Google Earth Engine*. Posteriormente se creó una malla de entrenamiento a partir de ortomosaicos obtenidos mediante vehículos aéreos No Tripulados. Para obtener la validación cuantitativa de la precisión se empleó una matriz de confusión para determinar la precisión de la predicción de clases empleadas, se determinó ejecutar la función.confusionMatrix que determina la precisión temática de un mapa de cobertura terrestre. Se obtuvo un mapa de cobertura con 16 clases, la presión de entrenamiento es de 0.99. Se recomienda realizar métodos de control en campo para revisión similar a los empleados para generar la malla de entrenamiento y corregir los valores del clasificador. El aprendizaje automático operado a partir de esta plataforma web es bastante accesible en comparación

---

Mora-Tembre, L. A., López-Chan, J.A., Olivares-Braus, C. E., 2023, Clasificación supervisada de imágenes de satélite en *Google Earth Engine* del municipio de Othón P. Blanco, Quintana Roo; México, Cuba: Geociencias UO. v. 6, núm. 1, enero-junio 2023. pp. 46-53.

con los flujos de trabajo tradicionales que implican contar con equipo de cómputo de alto rendimiento.

**Palabras Claves:** Sentinel; *Google Earth Engine*; clasificación supervisada; árbol de clasificación de bosques aleatorios; aprendizaje automático.

#### ABSTRACT

The monitoring of land cover is a topic of great importance in the governmental, academic and social spheres due to the implications that changes in land cover and land use have on issues such as sustainability, risks, biodiversity conservation, environmental services and the climate change. According to the special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change of 2015, global and regional land cover changes in areas due to loss of forest cover limit global mitigation trajectories to 1.5 °C. The objective of this research is to generate a coverage map for the municipality of Othón P. Blanco Quintana Roo, through the use of satellite images and the Google Earth Engine platform, through the «Random Forest» algorithm. A composite image was generated based on median pixel values, for the period January to December 2020, using Sentinel-2 scenes spanning the city limits and clipped by mask using the City limits layer in Google Earth. Engine. A training mesh was created from orthomosaics obtained by Unmanned Aerial Vehicles, to obtain the quantitative validation of the precision, a confusion matrix was used to determine the precision of the prediction of the classes used, running the function `confusionMatrix`. which determines the thematic accuracy of a land cover map. A coverage map with 16 classes was obtained, the training pressure is 0.99. It is recommended to continue carrying out control methods in the field for review similar to those used to generate the training mesh and correct the values of the classifier. Machine learning powered from this web platform is quite accessible compared to traditional workflows that involve high-performance computing equipment.

**Keywords:** Sentinel; *Google Earth Engine*; supervi-

sed classification; random forest classification tree; machine learning.

#### RESUMO

El monitoreo de las coberturas terrestres es un tema de suma importancia en los ámbitos gubernamental, académico y social por las implicaciones que tienen los cambios de las coberturas y usos de suelo en temas como sustentabilidad, riesgos, conservación de la biodiversidad, servicios ambientales y el mudança climática. De acordo com o relatório especial do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas de 2015, as mudanças globais e regionais na cobertura da terra em áreas devido à perda de cobertura florestal limitam as trajetórias globais de mitigação a 1.5 °C. O objetivo desta pesquisa é gerar um mapa de cobertura para o município de Othón P. Blanco Quintana Roo, através do uso de imagens de satélite e da plataforma *Google Earth Engine*, através do algoritmo «Random Forest». Uma imagem composta foi gerada com base nos valores médios de pixel, para o período de janeiro a dezembro de 2020, usando cenas do Sentinel-2 abrangendo os limites da cidade e recortadas por máscara usando a camada de limites da cidade no *Google Earth. Engine*. Uma malha de treinamento foi criada a partir de ortomosaicos obtidos por Veículos Aéreos Não Tripulados, para obter a validação quantitativa da precisão, uma matriz de confusão foi usada para determinar a precisão da predição das classes utilizadas, executando a função `.confusionMatrix`. que determina a precisão temática de um mapa de cobertura da terra. Obteve-se um mapa de cobertura com 16 aulas, a pressão de treinamento é de 0,99. Recomenda-se continuar realizando métodos de controle em campo para revisão semelhantes aos usados para gerar a malha de treinamento e corrigir os valores do classificador. O aprendizado de máquina alimentado por essa plataforma da Web é bastante acessível em comparação com os fluxos de trabalho tradicionais que envolvem equipamentos de computação de alto desempenho.

**Palavras-chave:** Sentinel; Motor *Google Earth*;

classificação supervisionada; árvore de classificação de floresta aleatória; aprendizado de máquina.

## INTRODUCCIÓN

El monitoreo de las coberturas terrestres es un tema de suma importancia en los ámbitos gubernamental, académico y social por las implicaciones que tienen los cambios de las coberturas y usos de suelo en temas como sustentabilidad, riesgos, conservación de la biodiversidad, servicios ambientales y el cambio climático.

De acuerdo con el reporte especial del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) del 2014, los cambios de cobertura de suelo a nivel mundial y regional de zonas por pérdida de cobertura forestal, limitan las trayectorias de mitigación global a 1.5 °C.

Los estudios territoriales, la percepción remota y los sistemas de información geográfica, al ser capaces de obtener estos datos de manera ágil y a bajo costo, se han convertido en tecnologías fundamentales. Estas tecnologías se integran a la planeación territorial de forma que permiten actualizar la base de datos conforme se observan los cambios en el territorio.

La Comisión Nacional Forestal ha implementado el sistema Satelital de Monitoreo Forestal (SAMOF) con el objetivo de procurar el manejo sustentable e integral de las superficies forestales. La elaboración de cartografía a partir de la integración de datos geoespaciales, geoprocursos, algoritmos de aprendizaje automático llevado a cabo por la validación de expertos en gabinete y campo; es complejo.

- Los procesos de levantamiento de imágenes aéreas con sistema de aeronave pilotada a distancia (RPAS) han sido abordados por diferentes autores. Martínez Beatle en el 2017 presenta un manual de procesos de levantamiento fotogramétrico con el uso de drones con grado de consumo y software de código libre como es OpenDroneMap, así como su interfaz gráfica WebODM, estas plataformas son de código libre. Presenta, por lo tanto, las bases teóricas para

implementar flujos de trabajo efectivo; además de describir el funcionamiento de los algoritmos de postproceso empleados. El uso de fotografías aéreas de RPAS para la verificación de los sitios de cobertura permite enfrentar limitaciones de tiempo, de esta manera, el trabajo de campo se enfocó en áreas para la interpretación visual.

En la clasificación de imágenes se emplea el algoritmo Random Forest, (Breiman, 2001) el cual funciona a partir de un conjunto de árboles de decisiones independientes entre sí que se formulan a partir de un dato de vector aleatorio declarado previamente y se utilizan para entrenar y decidir sobre las muestras con múltiples niveles de árboles (**Figura 1**). Un conjunto de entidades de entrenamiento se clasifica a partir del conjunto de datos original mediante un método de muestreo y el tamaño de cada conjunto de entrenamiento es de una proporción aproximada de 2/3 del conjunto de datos original. Luego, se establecen árboles de clasificación para cada conjunto de entrenamiento para generar un árbol de decisiones compuesto por  $N$  árboles de clasificación. Durante el proceso de crecimiento de cada árbol, se seleccionan de manera aleatoria  $m$  atributos ( $m \leq M$ ) de todas las  $M$  variables características y se selecciona el atributo predominante para la rama del nodo interno de acuerdo con el principio mínimo del coeficiente de Gini entre estos  $M$  atributos. Al final, se establecen los resultados de predicción de los árboles de clasificación  $N$  y la categoría de nuevas muestras se determina mediante votación. 1/3 de los datos de cada muestreo no se seleccionó y el error OOB se genera al utilizar los datos fuera del conjunto para estimar el error interno.

Para procesar grandes conjuntos de datos para aplicaciones globales se emplea *Google Earth Engine* (Gorelick *et al.*, 2017) la potencia de computación en la nube de *Google Earth Engine* permite el procesamiento de petabytes de datos de imagen, combinados con otros datos vectoriales, dentro del entorno de la nube y elimina la necesidad de almacenar, procesar, y analizar los grandes volúmenes de datos satelitales en

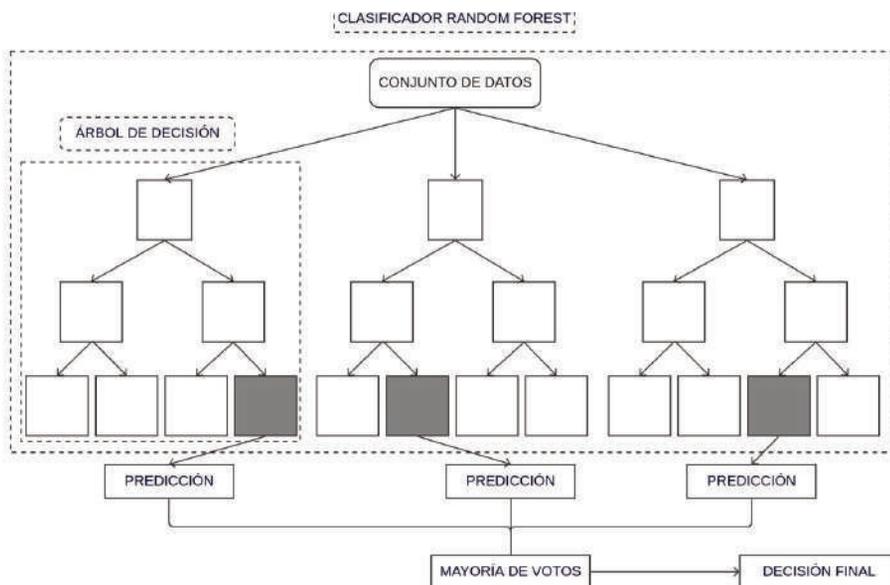


Figura 1. Diagrama del árbol de decisiones del clasificador Random forest. Tomado de Mbaadu (2022).

una computadora de oficina. para el análisis y la toma de decisiones finales (Kumar & Mutanga, 2018). El objetivo de la plataforma es reducir el tiempo invertido en el preprocesamiento y facilitar los análisis realizados con información geoespacial la plataforma es gratuita para uso académico y de investigación (Solórzona & Perilla, 2022).

El objetivo del presente documento es generar un mapa de coberturas para el municipio de Othón P. Blanco Quintana Roo, mediante el uso de imágenes satelitales y la plataforma *Google Earth Engine*.

### Área de estudio

El municipio de Othón P. Blanco se encuentra al sur del estado de Quintana Roo, colinda al Este con el mar Caribe, al sur con el país de Belice y Guatemala, al oeste con el Estado de Campeche y al norte con el municipio de Bacalar. Cuenta con una extensión territorial de 1 179 017.66 hectáreas, es el municipio más grande del Estado de Quintana Roo y uno de los más grandes a nivel nacional (Pozo *et al.*, 2011).

La mayor superficie del municipio es considerada una planicie costera, con algunas irregularidades que no sobrepasan pendientes de 5 %; existen humedales, cuerpos de agua permanentes y zonas inundables en los periodos de lluvia en la zona norponiente de la

ciudad de Chetumal, suroriente de Subteniente López y norte de Huay-pix, por lo cual el crecimiento de la mancha urbana se orienta hacia el norte de la ciudad. El sistema principal lagunar-fluvial está formado entre la laguna de Bacalar y del Río Hondo, unida por una pequeña corriente de agua permanente conocida como el estero de Chaac. Al este de la ciudad de Chetumal se localiza la Bahía de Chetumal, cuya costa es baja y pedregosa; al sur se encuentra la desembocadura del Río Hondo, cubierta en su mayoría por mangle y áreas pantanosas de tal manera que se limita el crecimiento urbano. De acuerdo con la elevación se conocen dos zonas: la baja, en la que se encuentra inmediatamente la Bahía con una elevación máxima de dos metros sobre el nivel del mar y se extiende tierra adentro con una elevación de entre seis a nueve metros (Pozo *et al.*, 2011).

El clima es tropical cálido subhúmedo debido a la gran cantidad de ondas tropicales que acarrear gran cantidad de humedad en las estaciones de verano y principios de otoño. Durante el invierno, las masas de aire gélido se dirigen hacia el sur, un fenómeno que persiste hasta principios de marzo o incluso principios de abril. La temporada de secas más pronunciada es de abril y mayo. Las temperaturas oscilan entre los 18.8 °C y 33.0 °C en promedio. Las precipitaciones son de 1 100 a 1 400 mm anuales. A pesar de que se presentan fuer-

tes lluvias en verano y algunas sequías estacionales, existen precipitaciones pluviales en la mayor parte del año (Pozo *et al.*, 2011).

### MATERIALES Y MÉTODOS

Los tipos de vegetación identificados en el municipio Othón P. Blanco corresponden con las características de la selva alta subperennifolia, las selvas medianas subperennifolia y subcaducifolia, las selvas bajas subperennifolia y subcaducifolia, los tulares, las sábanas, los manglares y otros tipos de vegetación con menor extensión como los palmares, los petenes y la vegetación de dunas costeras (Pozo *et al.*, 2011).

Para realizar la clasificación de las imágenes de satélite y garantizar la compatibilidad de las clases generadas, con los productos anteriores, se emplearon las 16 clases señaladas en los mapas de cobertura del suelo generados a través del sistema Satelital de Monitoreo Forestal y que están registradas para el municipio de Othón P. Blanco en la capa de la línea base 2016 (Tabla 1).

La clasificación de las imágenes se realiza en la plataforma *Google Earth Engine* con el algoritmo de

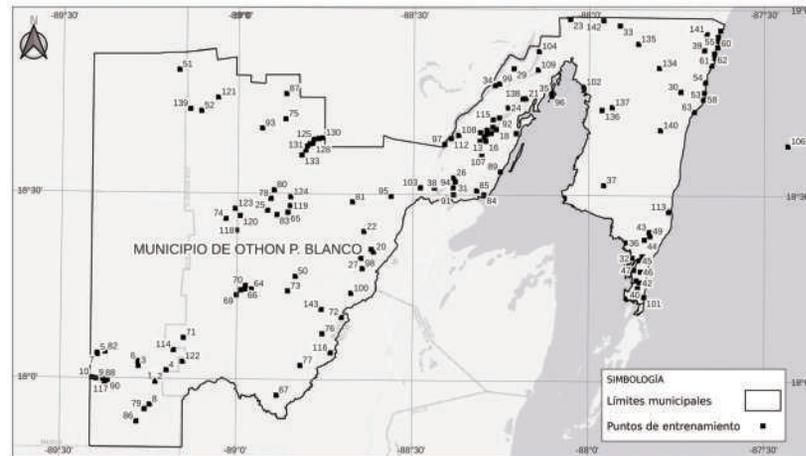
aprendizaje automático, «Random Forest». Para crear la malla de entrenamiento para el algoritmo, se generó una red de puntos al interior de cada uno de los polígonos de las clases de diez puntos por cada una de las clases, separados a cinco kilómetros de distancia entre cada uno (Figura 2). Para esto se empleó el algoritmo «Puntos Aleatorios dentro de polígonos» del programa QGIS. De la malla de puntos generados, 20 % es empleada para la validación de las muestras de entrenamiento y el resto para generar el entrenamiento del algoritmo (Breiman, 2001).

Con la capa de la malla de entrenamiento generada, se realizaron salidas a campo para realizar la verificación de los puntos de entrenamiento mediante la generación de ortomosaicos derivados de vuelos de vehículos autónomos no tripulados (VANT). Con los ortomosaicos se verificó los cambios de cobertura de suelo existentes, para la actualización de las clases asignadas (Martínez Batlle, 2017) (Figura 3).

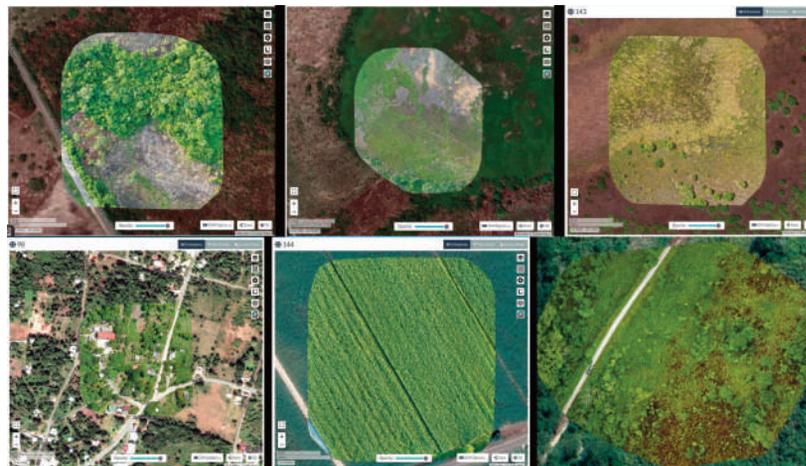
La clasificación se realiza en *Google Earth Engine* mediante el paquete de clasificadores, al emplear *Random Forest* con la función `ee.Classifier.smileRandomForest`.

| DESCRIPCIÓN SAMOF                          | Clases USV - INEGI         | ESTRATO |
|--|----------------------------|---------|
| Bosque Cultivado                           | BC y BI                    | C6      |
| Selva Baja y Mediana Subperennifolia       | SBQ, SBQP, SMQ, SG y VPN   | C8      |
| Manglar y Petén                            | VM y PT                    | C9      |
| Selva Alta Subperennifolia                 | SAQ                        | C11     |
| Selva Baja Caducifolia Subcaducifolia      | SBC, SBK, SBS, MST y VPI   | C12     |
| Selva Mediana Caducifolia y Subcaducifolia | SMC y SMS                  | C13     |
| Matorral Rosetófilo Costero                | MRC                        | C20     |
| Tular                                      | VT                         | C23     |
| Vegetación de Dunas Costeras               | VU                         | C24     |
| Pastizales Naturales                       | PN, PY, PH, VW, VS y VSI   | C28     |
| Pastizales Cultivado e Inducido            | PC y PI                    | C280    |
| Tierras Agrícolas                          | T, R y H Cultivos anuales  | C29     |
| Tierras Agrícolas                          | T, R y H Cultivos perennes | C290    |
| Urbano y Construido                        | ZU y AH                    | C30     |
| Suelo Desnudo                              | ADV y DV                   | C31     |
| Agua                                       | H2O, PRE y ACUI            | C32     |

Tabla 1. Clases empleadas para la clasificación de imágenes de satélite



**Figura 2.** Distribución de los puntos de entrenamiento en el municipio de Othón P. Blanco para el 2021.



**Figura 3.** Ortomosaicos a partir de la malla de entrenamiento en el municipio de Othón P. Blanco para el 2021.

Se generó una imagen compuesta basado en la mediana de valores de píxel, del periodo de enero a diciembre del 2020, se empleó como proveedor de las imágenes a la Agencia Espacial Europea para utilizar las escenas de Sentinel-2 que abarcan los límites del municipio de Othón P. Blanco con una resolución espacial de 10 metros por píxel, se recortó el raster de la imagen compuesta mediante el uso de la capa de los límites municipales en *Google Earth Engine* con la función `.clip()`. Las nubes y sombras de nubes se enmascararon con una probabilidad de nubes inferior al 10 % y se filtraron las escenas mayores a un 20 % de cobertura de nubes (Gorelick *et al.*, 2017) (**Figura 4**).

Sobre esta imagen se aplica la malla de entrenamiento para el algoritmo `ee.Classifier.smileRandomForest` obteniéndose una capa vectoriales de polígonos de una hectárea para cada punto, validada de la supervisión en campo con los ortomosaicos a partir de VANT's. Se generaron 93 puntos de cobertura terrestre, los puntos para validación de cuerpo de agua se realizaron con ayuda de los VANT's a la distancia sin generar los ortomosaicos, para reducir los tiempos de campo y de procesamiento (Martínez Batlle, 2017).

#### **Validación del entrenamiento**

Para obtener la validación cuantitativa de la precisión se empleó una matriz de confusión para determinar la



**Figura 4.** Imagen compuesta 2020 basada en mediana de valor de píxel.

precisión de la predicción de clases empleadas, al emplear la función `.confusionMatrix()` de Stehman, 1997 que determina la precisión temática de un mapa de cobertura terrestre (**Tabla 2**).

**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Se obtuvo un mapa de cobertura con las 16 clases (**Figura 5**). El resultado de la precisión general del entrenamiento: es de 0.99 lo cual señala una adecuada clasificación de las muestras que determina una suficiencia de las muestras de cada clase empleada para el entrenamiento del modelo clasificador (**Figura 6**).

Con respecto a la cuestión de la precisión de las clases, no es posible afirmar que la clasificación de la

imagen compuesta sea suficientemente adecuada para representar con precisión las clases propuestas presentes en la región en cuestión. Para garantizar la precisión del período de clasificación de la imagen compuesta del 1 de enero al 31 de diciembre de 2020, es necesario realizar inspecciones visuales aleatorias del producto y verificar manualmente la coherencia de la asignación de clases entre la imagen y los datos de campo. La segunda fase del proyecto requiere una cantidad significativa de esfuerzo y recursos, al tiempo que enfatiza la importancia de obtener una comprensión integral del campo de estudio. Basándonos en nuestra observación inicial, parece que los resultados estimados para los bosques cultivados se han exagerado, ya que los bosques de tamaño mediano con cierto grado de degradación se han clasificado como bosques cultivados; por lo tanto, sugerimos realizar más inspecciones de campo similares a las utilizadas para generar la malla de entrenamiento para rectificar los valores del clasificador.

**CONCLUSIÓN**

La accesibilidad del aprendizaje automático a través de esta plataforma web es considerablemente de mayor capacidad en comparación con los flujos de trabajo

|        |    | REFERENCIAS |     |      |     |      |      |      |      |      |     |     |      |      |      |      |     |
|--------|----|-------------|-----|------|-----|------|------|------|------|------|-----|-----|------|------|------|------|-----|
|        |    | 0           | 1   | 2    | 3   | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9   | 10  | 11   | 12   | 13   | 14   | 15  |
| CLASES | 0  | 620         | 0   | 0    | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0   | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0   |
|        | 1  | 0           | 950 | 0    | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0   | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0   |
|        | 2  | 0           | 0   | 1047 | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0   | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0   |
|        | 3  | 0           | 0   | 0    | 100 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0   | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0   |
|        | 4  | 0           | 0   | 0    | 0   | 1050 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0   | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0   |
|        | 5  | 0           | 0   | 0    | 0   | 0    | 1078 | 0    | 0    | 0    | 0   | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0   |
|        | 6  | 0           | 0   | 0    | 0   | 0    | 0    | 1052 | 0    | 0    | 0   | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0   |
|        | 7  | 0           | 0   | 0    | 0   | 0    | 0    | 0    | 1089 | 0    | 0   | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0   |
|        | 8  | 0           | 0   | 0    | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 1060 | 0   | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0   |
|        | 9  | 0           | 0   | 0    | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 320 | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0   |
|        | 10 | 0           | 0   | 0    | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0   | 974 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0   |
|        | 11 | 0           | 0   | 0    | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0   | 0   | 1099 | 0    | 0    | 0    | 0   |
|        | 12 | 0           | 0   | 0    | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0   | 0   | 0    | 1072 | 0    | 0    | 0   |
|        | 13 | 0           | 0   | 0    | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0   | 0   | 0    | 0    | 1065 | 0    | 0   |
|        | 14 | 0           | 0   | 0    | 0   | 1    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0   | 0   | 0    | 0    | 0    | 1062 | 0   |
|        | 15 | 0           | 0   | 0    | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0   | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 829 |

**Tabla 2.** Matriz de error de reposición con representación de reposición de las clases mapeadas

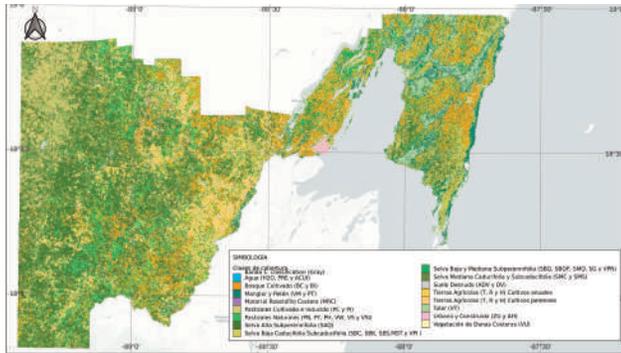


Figura 5. Mapa de cobertura generado del municipio de Othón P. Blanco para el año 2020.

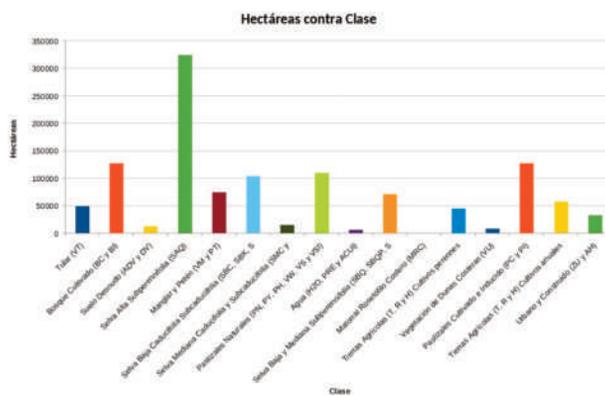


Figura 6. Valores de hectáreas por clase de cobertura de suelo.

convencionales que requieren el uso de equipos informáticos de alto rendimiento. Los drones sirven como un mecanismo de teledetección viable que nos permite obtener datos actuales y relevantes a un costo significativamente reducido, en comparación con la obtención de tiempo de satélite.

Pese a todas las opciones tecnológicas para reducir tiempos y costos, el trabajo para validar o calibrar en campo los datos obtenidos de sensores remotos es indispensable.

### Repositorio del Código GEE

El proceso de clasificación se ejecuta mediante el uso de las librerías específicas del lenguaje de programación desarrollado para en *Google Earth Engine*, al que se accede como referencia utilizando la siguiente dirección web: <https://code.earthengine.google.com/efa7a6b128383f63024d82ca38b7483f>

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**Breiman, L. 2001.** *Random Forests. Machine Learning*, 45(1), 5–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>

**Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. 2017.** *Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>

**IPCC, 2014:** *Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo principal de redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 157 págs.*

**Kumar, L., & Mutanga, O. 2018.** *Google Earth Engine Applications Since Inception: Usage, Trends, and Potential. Remote Sensing*, 10(10), 1509. <https://doi.org/10.3390/rs10101509>

**Martínez Batlle, J. R. 2017.** *Introducción a la fotogrametría aplicada a imágenes tomadas desde sistemas de aeronaves pilotadas a distancia (RPAS) o drones.* <http://repository.humboldt.org.co/handle/20.500.11761/36058>

**Pozo, C., Armijo Canto, N. y Calmé, S. (editoras).** 2011. *Riqueza Biológica de Quintana Roo. Un análisis para su conservación, Tomo I. El Colegio de la Frontera Sur (Ecosur), Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio), Gobierno del Estado de Quintana Roo y Programa de Pequeñas Donaciones (ppd). México, D. F.*

**Stehman, S. V. 1997.** *Selecting and interpreting measures of thematic classification accuracy. Remote sensing of Environment*, 62(1), 77-89.

Fecha de recepción: 14 de abril de 2023  
 Fecha de arbitraje: 21 de junio de 2023  
 Fecha de aprobación: 25 de junio de 2023

## Aplicación de registros de imágenes en las investigaciones geólogo-petrofísica en Cuba

Katherine Cruells Torres<sup>1</sup>, Dania Brey del Rey<sup>2</sup>, Olga Castro Castiñeira<sup>3</sup>, Danalys Juliá Bello<sup>4</sup> y Sheyla Pozo Alfonso<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Ingeniera Geóloga. Centro de Investigación del Petróleo, Churruca No 481, Cerro, La Habana, Cuba C.P. 12000. ORCID: 0000-0001-6297-938X. Correo E: [cruellsk@gmail.com](mailto:cruellsk@gmail.com).

<sup>2</sup> Ingeniera Geóloga. Centro de Investigación del Petróleo, Churruca No 481, Cerro, La Habana, Cuba C.P. 12000. ORCID: 0000-0001-8607-071X. Correo E: [daniala@ceinpet.cupet.cu](mailto:daniala@ceinpet.cupet.cu).

<sup>3</sup> Ingeniera Geofísica. Doctora en Ciencias Geológicas. Investigadora Auxiliar del Centro de Investigación del Petróleo, Churruca No 481, Cerro, La Habana, Cuba C.P. 12000. Profesora Titular de la Universidad Tecnológica de La Habana. ORCID: 0000-0003-4285-6774. Correo E: [olgac@ceinpet.cupet.cu](mailto:olgac@ceinpet.cupet.cu).

<sup>4</sup> Ingeniera Geóloga. Centro de Investigación del Petróleo, Churruca No 481, Cerro, La Habana, Cuba C.P. 12000. ORCID: 0000-0001-8747-2534. Correo E: [jdanalys96@gmail.com](mailto:jdanalys96@gmail.com).

<sup>5</sup> Ingeniera Geóloga. Centro de Investigación del Petróleo, Churruca No 481, Cerro, La Habana, Cuba C.P. 12000. ORCID: 0000-0003-2645-3502. Correo E: [sheylaopozo@gmail.com](mailto:sheylaopozo@gmail.com).

### RESUMEN

Este trabajo se propone realizar una integración de los datos preexistentes geólogo-petrofísicos de un pozo, a partir de la interpretación de registros de imágenes resistivas y caracterizar un intervalo correspondiente al reservorio de las formaciones del Grupo Veloz en la Franja Norte Petrolera Cubana, con el objetivo de definir el comportamiento textural y estructural de eventos geológicos a partir de la interpretación de registros de imágenes con la utilización del programa Techlog. La metodología utilizada en el proyecto se centra en el procedimiento de trabajo con el programa, para la creación, análisis e interpretación de registros de imágenes. A partir de la integración de estos métodos, se logró caracterizar el intervalo en cuestión (3965-4047 m) y se determinaron los rasgos texturales y estructurales presentes lo cual conllevó a los resultados siguientes: (1)

Los eventos geológicos de tipo límites de capas tienen un azimut SW con una inclinación alrededor de 90 grados, (2) la densidad de fracturas naturales (5f/m) es favorable para el fluido de hidrocarburos, se encuentran orientadas hacia el SE con un rumbo S-NE, (3) las micro-fallas se encuentran bien definidas con un azimut NW en las profundidades 3985, 3990, 3392 m, (4) en todo el intervalo se identificaron eventos geológicos relacionados con las distintas litologías, eventos tectónicos (fracturas y microfallas) bien definidos dentro de los carbonatos, por ser estos los de mayor fragilidad ante los procesos de estrés y (5) las propiedades petrofísicas muestran una porosidad efectiva media de 9.3 % y saturación media de agua de 86.4 %.

**Palabras clave:** Registro de imágenes eléctricas, FMI, Techlog, límites de capas, fracturas naturales, mi-

crofallas, buzamiento, azimut, registro geofísico, estructura.

## ABSTRACT

This work intends to carry out an integration of the pre-existing geologic-petrophysical data of a well from the interpretation of resistive image logs and to characterize an interval corresponding to the reservoir of the Group Veloz formations in the Cuban North Oil Belt, with the objective to define the textural and structural behavior of geological events from the interpretation of image records with the use of the Techlog program. The methodology used in the project focuses on the procedure of working with the program, for the creation, analysis and interpretation of image records. From the integration of these methods, it was possible to characterize the interval in question (3965-4047m) and the textural and structural features present were determined, which led to the following results: (1) The geological events of the layer boundary type have a SW azimuth with an inclination around 90 degrees, (2) the density of natural fractures (5f/m) is favorable for hydrocarbon fluid, they are oriented SE with a S-NE trend, (3) the micro-faults are well defined with a NW azimuth at depths 3985, 3990, 3392m, (4) in the entire interval geological events related to the different lithologies, tectonic events (fractures and microfaults) well defined within the carbonates were identified, for these being the most fragile in the face of stress processes and (5) the petrophysical properties show an average effective porosity of 9.3% and average water saturation of 86.4%.

**Keywords:** Electrical Imaging Log, FMI, Techlog, bed boundaries, natural fractures, microfaults, dip, azimuth, geophysical log, structure.

## RESUMO

Este trabalho pretende realizar uma integração dos dados geológico-petrofísicos pré-existentes de um poço a partir da interpretação de perfis de imagem resistiva e caracterizar um intervalo correspondente ao reservatório das formações do Grupo Veloz no Cin-

turão Petrolífero do Norte de Cuba, com o objetivo de definir o comportamento textural e estrutural de eventos geológicos a partir da interpretação de registros de imagens de com o uso do programa Techlog. A metodologia utilizada no projeto concentra-se no procedimento de trabalho com o programa, para a criação, análise e interpretação de registros de imagem. A partir da integração desses métodos, foi possível caracterizar o intervalo em questão (3965-4047m) e determinar as feições texturais e estruturais presentes, o que levou aos seguintes resultados: (1) Os eventos geológicos do tipo limite de camada têm um azimute SW com uma inclinação em torno de 90 graus, (2) a densidade de fraturas naturais (5f/m) é favorável para fluido de hidrocarbonetos, elas são orientadas SE com uma tendência S-NE, (3) as microfalhas são bem definidas com azimute NW nas profundidades 3985, 3990, 3392m, (4) em todo o intervalo foram identificados eventos geológicos relacionados às diferentes litologias, eventos tectônicos (fraturas e microfalhas) bem definidos dentro dos carbonatos, por serem estes os mais frágeis do frente a processos de estresse e (5) as propriedades petrofísicas apresentam porosidade efetiva média de 9,3% e saturação de água média de 86.4%.

**Palavras-chave:** Perfil de Imagens Elétricas, FMI, Techlog, limites de leito, fraturas naturais, microfalhas, mergulho, azimute, perfil geofísico, estrutura.

## INTRODUCCIÓN

El registro de imagen de microresistividad, FMI por sus siglas en inglés (Formation MicroImager) es la última generación de la familia de imágenes eléctricas de formación. Este registro, en lodos conductivos, provee imágenes eléctricas casi sin limitaciones en cuanto a las condiciones del hueco y ofrece la posibilidad de cuantificar la información, en particular para análisis de fracturas. La herramienta consta de cuatro brazos ortogonales, cada uno con un patín principal y un alerón abatible con 24 electrodos cada uno, que hacen un total de 192, los que adquieren igual número de curvas de resistividad, que luego son proce-

sadas y transformadas en imágenes micro eléctricas de la pared del pozo. Existen tres modalidades para el perfilaje: la modalidad de Imagen Total provee imágenes de alta resolución con cobertura casi total; la de Cuatro Patines provee imágenes parecidas al FMS; la de Dipmeter permite la adquisición de datos a partir de ocho botones con la finalidad de producir registros tipo SHDT (Castro-Castiñeira, 2017). Los registros de imágenes cobran gran importancia en las investigaciones de pozos, debido a la cantidad de información que se obtiene de ellos. Las imágenes serán de tipo sínicas o eléctricas. En este trabajo se utilizan las segundas para resolver las tareas planteadas.

En Cuba, más del noventa por ciento de la producción de hidrocarburos, proviene de la llamada Franja Norte Petrolera Cubana, que abarca el extremo norte de las provincias La Habana, Mayabeque y Matanzas, donde se han explotado a través de la historia yacimientos como Guanabo, Boca de Jaruco, Puerto Escondido y Varadero, entre otros.

El área donde se encuentra ubicado el pozo de estudio, está en el reparto Alamar, provincia La Habana, donde se han realizado múltiples investigaciones a lo largo del tiempo, para contribuir al desarrollo de la exploración de hidrocarburos en la zona.

Con la implementación de nuevas herramientas de alta tecnología, se ha concebido un enorme salto en el análisis y solución de problemas relacionados a la ingeniería y geología de reservorios. Esto exige un mayor nivel profesional, continuos estudios e investigaciones de las zonas complejas, con la intención de reducir la incertidumbre en la perforación de pozos y el desarrollo de los campos petroleros. El uso de las nuevas herramientas, combinado con el conocimiento regional desde el punto de vista geólogo-geofísico del área, ha propiciado el desarrollo de la exploración y explotación de hidrocarburos en la misma. No obstante, se requiere realizar una caracterización textural y estructural de algunos pozos para tener un conocimiento más detallado de lo que existe en profundidad.

Por este motivo, se escogió el pozo Cojímar para la realización de dicha caracterización, basándose en la integración de datos geólogo-geofísicos, donde

se utiliza como herramienta fundamental el programa Techlog, el cual permitirá hacer un trabajo muy actualizado y detallado con las imágenes de pared de pozo donde se establecen los tipos de fracturas principales y sus características estructurales.

Lo antes expuesto permite definir como problema científico, que a pesar de que el área Cojímar ha sido trabajada a lo largo de los años, no se cuenta con el estudio de un pozo donde se haya integrado la interpretación petrofísica con la geológica a través del análisis de los registros imágenes.

Por esto, el objetivo principal es establecer patrones de comportamiento de imágenes para diferentes eventos geológicos mediante la interpretación con el uso del programa Techlog.

En la búsqueda y exploración de yacimientos de petróleo no existe un método científico exacto, sino que es necesario utilizar diversas herramientas para facilitar el trabajo y además realizar múltiples tareas previas de estudio del terreno. Los métodos empleados dependen del tipo de terreno, sean geológicos o geofísicos.

## **MATERIALES Y METODOS**

Durante el desarrollo del proyecto se utilizaron los materiales siguientes:

1. Registros geofísicos estándar del pozo (resistividad, gamma natural, densidad neutrón, potencial espontáneo, radioactivos, eléctricos, sínicos).
2. Registros de microrresistividad de los datos primarios de imágenes del pozo.
3. Datos de inclinometría (survey, en formato Excel).
4. Datos litológicos y paleontológicos del pozo.
5. Software Techlog con todos los materiales de ayuda y cursos para el trabajo con el mismo.
6. Curso de entrenamiento de interpretación de imágenes y medición de echados.
7. Informe geológico del pozo.

### Métodos de análisis de la interpretación de registros de imágenes.

Para realizar la interpretación de un registro de imágenes, se tendrá en cuenta una serie de indicadores para lograr un análisis e interpretación adecuada de cada imagen. Se basa en la escala de colores con los diferentes filtros, la interpretación de echados de los eventos geológicos y textura gráfica de la imagen que es comparada con catálogos existentes.

### Escala de colores para la interpretación del registro de imágenes

La interpretación del registro de imágenes (FMI), se rige por una escala de colores que permite una correcta lectura de estas (Figura 1). En presencia de tonalidades más claras, corresponde a rocas con un nivel de resistividad alto y menor nivel de conductividad, a medida que avanza a tonos oscuros corresponde a una disminución de la resistividad y un aumento en la conductividad; por ejemplo, en rocas compactas carbonatadas se encuentran tonalidades claras, mientras que las lutitas poco consolidadas tienen una alta conductividad y poca resistividad y presentan una coloración más oscura. La variación en las tonalidades de los colores dependerá de las propiedades de la roca y el fluido.

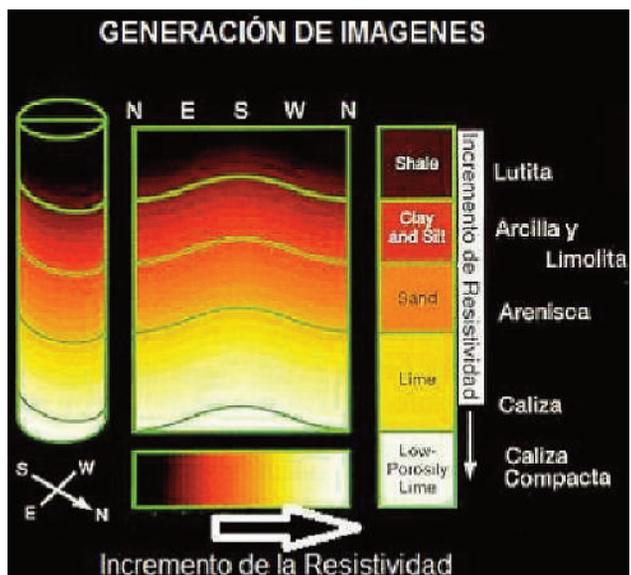


Figura 1. Escala de colores según variación de resistividad de la litología. Interpretación del registro de imágenes (FMI) (Modificado de Alvarado, 2010)

Para hacer énfasis en diferentes aspectos de la formación, se utilizan imágenes estáticas y dinámicas (Figura 2), se parte del análisis con la escala de colores. En las primeras las paletas de colores se aplican en todo el intervalo y son buenas imágenes para mostrar valores relativos de resistividad, pero, pierden detalle de la imagen; las segundas, se aplican las paletas de colores en el intervalo, pero por partes, de tal forma que es mejor el detalle de la imagen, aunque se pierde el sentido del colorido relativo. En la imagen dinámica es donde se realiza la interpretación por ser donde se obtiene mayor contraste entre los eventos pequeños (límites de estratos, fracturas, porosidad); sin embargo, en la imagen estática, es en la que observa que zonas son más resistivas con respecto a otras, lo que habla de cambios litológicos, por lo que la estática se auxilia en la identificación de límites litológicos.

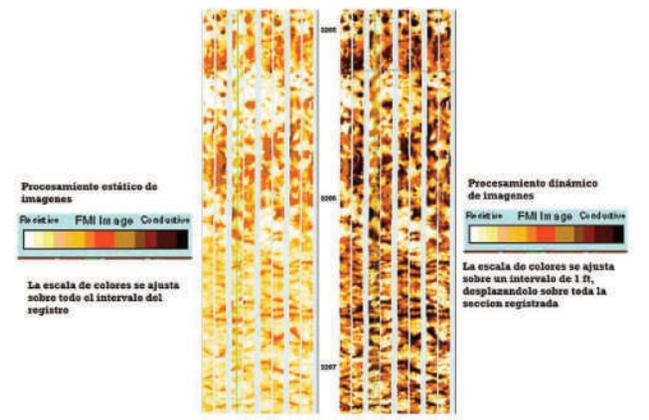
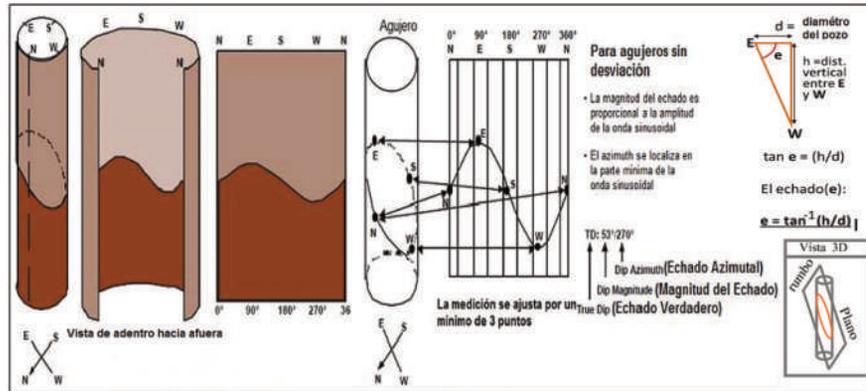


Figura 2. Representación de las imágenes dinámica (derecha) y estática (izquierda) del registro de imágenes FMI (Shahinpour-Atefeh, 2013)

### Interpretación de echados del registro de imágenes

Los echados son rasgos geológicos como: límites de capas, discontinuidades sedimentarias (discordancias, estilolitas). Cuando no son perpendiculares o paralelos al eje de la herramienta (eje del pozo), desarrollan sinusoides en las imágenes, cuya amplitud aumenta en la medida que lo hace el ángulo formado por dichos planos y el eje de la herramienta. El azimut del echado aparente de los eventos de este tipo, es dado por la orientación de la línea de máxima pendiente del plano representado por la sinusoide al cortar la pared cilíndrica.



**Figura 3.** Imagen donde se observa la orientación de los eventos (planos que cortan al agujero), que es el principio del cálculo del echado (Shahinpour-Atefeh, 2013)

drica del pozo, es decir la orientación de la línea que une la parte más alta con la más baja de las sinusoides (**Figura 3**).

Solo dos números permiten la descripción del echado (**Figura 4**):

**Buzamiento:** Ángulo pequeño entre la horizontal y el plano geológico, nunca es superior a 90 grados.

**Dirección de la inclinación:** Valor azimutal en grados hacia donde el plano se inclina. Alcanza hasta los 360 grados.

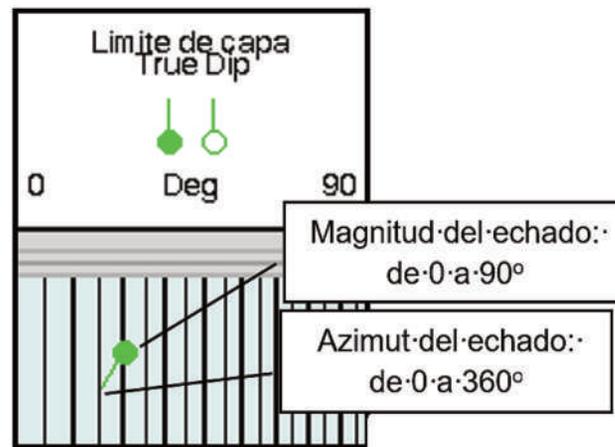
Los eventos tectónicos se clasifican por la presencia de fracturas naturales: conductivas, resistivas y microfallas, fracturas inducidas por la perforación y ovalización.

Los estudios de las imágenes de pozos, tienen gran importancia desde el punto de vista geológico y son de gran utilidad en los estudios de prospección de hidrocarburos como:

- Sedimentológico
- Estratigráfico
- Estructural
- Identificación de Fracturas Naturales e Inducidas
- Textural para análisis de reservorio
- Ovalización

### Procesamiento general con el software Techlog

El siguiente esquema (**Figura 5**) resume todo el proceso de utilización del programa Techlog, comienza en el montaje del registro de imágenes y luego



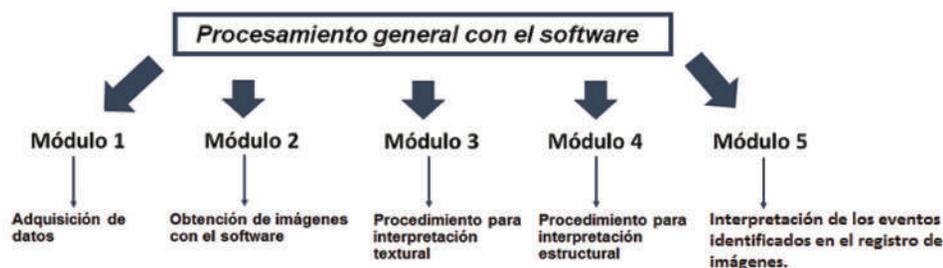
**Figura 4.** Plano de descripción del echado

todos los pasos llevados a cabo para los diferentes análisis e interpretaciones en el que se utilizan diversas herramientas proporcionadas por el programa.

Se inicia con una revisión y organización de los datos numéricos (**Módulo 1**) para importarlos en el programa con el formato correcto para luego referenciar estos datos una vez importados a través de la herramienta Índice (*index*).

Para crear las imágenes a partir de los datos numéricos (**Módulo 2**) se sigue un flujo de trabajo propio del programa denominado *Wizard*, este consta de cinco pasos hasta culminar con la creación de la imagen estática y dinámica.

Una vez creadas las imágenes, se toma en cuenta los métodos para realizar la interpretación mencionada en el epígrafe anterior: escala de colores, imá-



**Figura 5.** Esquema representativo del procesamiento general con el programa Techlog (Cruells-Torres, 2019)

genes estáticas y dinámicas, interpretación de echados.

Se determinan las texturas de las rocas según se observan en las imágenes y la identificación de eventos geológicos por intervalos con el objetivo de obtener un patrón de comportamiento texturo-estructural.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para la caracterización de un pozo se requiere un conjunto de estudios orientados a la definición de las características geológicas y geofísicas de un área, tanto en superficie como en profundidad principalmente, con el propósito de mejorar la exploración y explotación del área. Con esa intención, este capítulo va dirigido a caracterizar los eventos geológicos desde el punto de vista textural y estructural en profundidad del pozo Cojimar a partir de la integración de datos geológico-geofísicos del intervalo seleccionado.

Dicha caracterización se ha hecho a partir de los resultados obtenidos de la utilización del programa Techlog, con el procedimiento explicado en el capítulo anterior. Se realizó una interpretación textural y estructural del registro de imágenes en el intervalo 3965 a 4047 m correspondiente al reservorio principal perteneciente a los carbonatos del Grupo Veloz, que se integró con la información brindada por los registros geofísicos para la obtención de mejores resultados.

### *División e interpretación del corte analizado del pozo.*

El corte estudiado en el pozo, pertenece al reservorio 2 y desde el punto de vista litológico está caracterizado por carbonatos fracturados del tipo mudstone calcáreo, wackestone bioclástico con una fina recristalización y

bandeados, con impregnación ligera y tonalidades cremas a pardas en dependencia del aumento de la impregnación, estas rocas se intercalan con capas arcillosas con contenido calcáreo limoso pardo por impregnación y pedernales fracturados ámbar y negros. Con los registros convencionales se realizó una división en electrofacies en este reservorio.

Se dividió en tres electrofacies (2.1, 2.2 y 2.3), teniendo en cuenta las variaciones de las curvas y se observa que de la electrofacies 2.3 hacia la 2.1 existe una disminución del contenido de carbonatos. Según el resultado de la interpretación por análisis de elementos (módulo ELAN de GEOFRAME) se pudo precisar dichas variaciones. Este modelo está compuesto por dos tipos de calizas, arenisca e ilita (arcilla). La última electrofacies (2.3) pertenece el intervalo 3965-4047 m corresponde el análisis de FMI realizado en este trabajo.

En la **Tabla 1** se presentan las propiedades de las electrofacies obtenidas con ELAN donde se marcan los espesores totales, efectivos, las porosidades, así como la saturación de agua dentro de este reservorio, lo que permite caracterizarlo.

### *Análisis textural y estructural.*

Se parte de los resultados obtenidos del programa y de la información brindada por los registros geofísicos estándar y datos litológicos del pozo, se realizó una interpretación texturo-estructural de las imágenes, se tiene en cuenta eventos geológicos como: microfallas, fracturas naturales (conductivas y resistivas), discordancias y límites de capas.

En este acápite se exponen los resultados obte-

| Paquete  | EF  | Tope (m) | Base (m) | Espesor Total (m) | Espesor de reservorio (m) | Porosidad del reservorio (V/V) | Saturación de agua del reservorio (V/V) |
|----------|-----|----------|----------|-------------------|---------------------------|--------------------------------|---|
| Inferior | 2.1 | 3659.0   | 3742.5   | 83.5              | 80.6                      | 0.189                          | 0.744                                   |
|          | 2.2 | 3742.5   | 3902.0   | 159.5             | 154.8                     | 0.147                          | 0.815                                   |
|          | 2.3 | 3965.0   | 4047.0   | 119.5             | 112.8                     | 0.093                          | 0.864                                   |

**Tabla 1.** Propiedades de las electrofacies identificadas durante el análisis de los registros geofísicos del pozo

nidos después de procesar todos los datos primarios cargados en el programa.

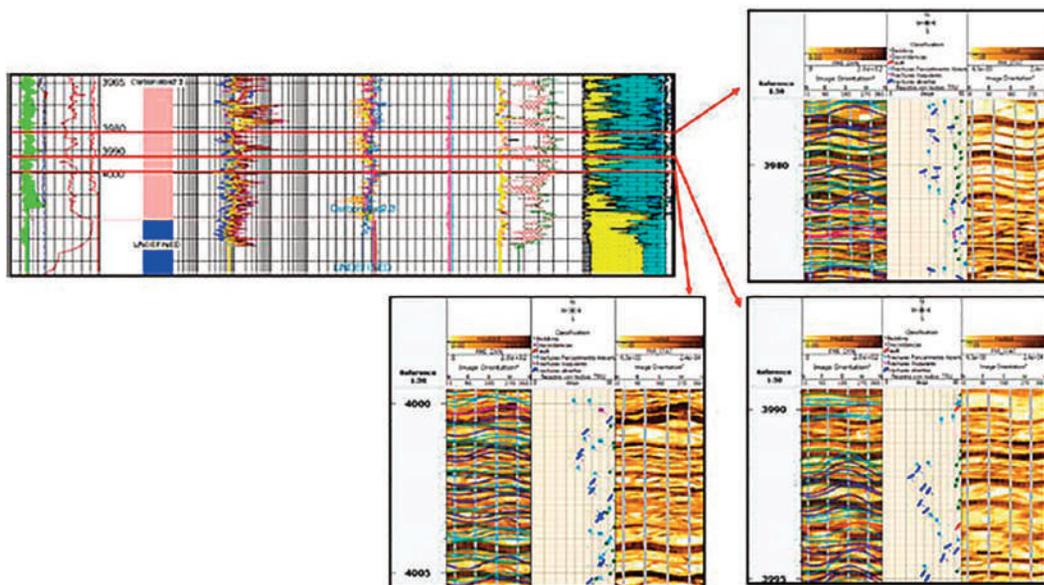
En la **Figura 6** se representa el intervalo estudiado por la interpretación de análisis de elementos (ELAN, izquierda) y las imágenes de pared de pozo obtenidas por la interpretación con el programa *Techlog* (derecha).

Como primera información se utilizaron los datos litológicos del intervalo atravesado por el pozo, con los que se pudo determinar la existencia de rocas como: caliza (60-90 %) de color crema, gris claro bandeadas y con estilolitos, con impregnación de petróleo, en menor proporción caliza blanca, claystone (Trz-20 %) de color gris de fácil lavado, pedernal (10-20 %) de color gris y ámbar, fractura concoidal, duro.

Se parte del análisis texturo-estructural realizado anteriormente, se obtiene como resultado en el intervalo todos los eventos geológicos identificados con el registro de imágenes, la representación en diagramas de rosetas, para reconocer la dirección preferencial, en cuanto a inclinación (azimut) y a rumbo. En la **Tabla 2** se expone el resumen de todos los eventos interpretados en el pozo, de los cuales se plantea:

Límites de capas: Son constantes para todo el registro, con un total de 263, presentan un rumbo preferencial NW-SE, ángulos de 80 a 90 grados aproximado y un azimut hacia el SW.

Fracturas naturales: Se identificaron fracturas abiertas, abiertas de forma parcial, selladas y vugulares.



**Figura 6.** Integración de las interpretaciones de análisis de elementos (ELAN) con las imágenes de pared de pozo en el intervalo 3965-4047 m (Cruells-Torres, 2019)

Las fracturas abiertas (parciales): Son las más abundantes para un total de 227 fracturas, se encuentran localizadas en los carbonatados. Según los resultados se describe con dirección de azimut preferencial hacia el SE entre los 160 y 120 grados, con un rumbo SW-NE y ángulos entre 60 y 90 grados de inclinación aproximadamente.

Las fracturas abiertas: En menor cantidad para un total de 47. Estas fracturas están asociadas en su mayoría a las capas de carbonatos debido a su capacidad de rupturas y se encuentran con una dirección de azimut preferencial hacia el SE entre los 150 y 110 grados, un rumbo SE-NW y ángulos entre 50 y 70 grados, algunas en los 90 grados.

Las fracturas vugulares: Son las menos representadas, con un total de 11 fracturas, poseen una dirección de azimut preferencial entre los 120 y 210 grados hacia el SE, un rumbo SW-NE, ángulos de 60 grados aproximadamente. Las fracturas vugulares son de gran importancia porque son las principales vías de movimiento de los fluidos y mejoran la permeabilidad del reservorio. Se encuentran localizadas en dos intervalos, a la profundidad de 3983 m y la de 4000 a 4002 m.

**Microfallas:** A lo largo de la trayectoria del pozo, en las profundidades de 3985.5 m, 3990 y 3992.5 m, se interpretó la presencia de micro desplazamientos muy evidentes, las cuales se adjudicaron a microfallas de tipo normal, con azimut de 300-340

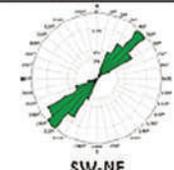
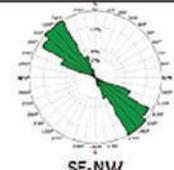
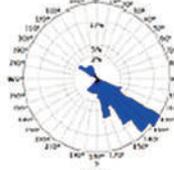
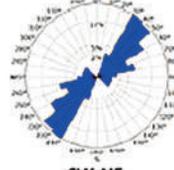
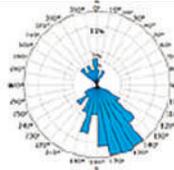
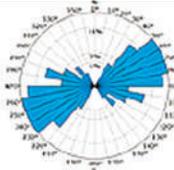
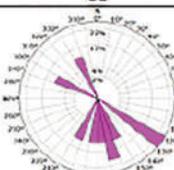
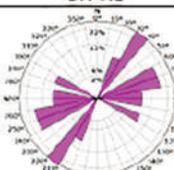
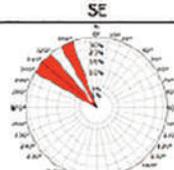
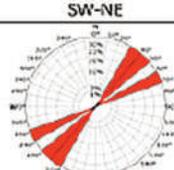
| Eventos                | Tipo de Evento                  | Cantidad de Eventos | Inclinación(Azimut)  | Rumbo(strike)  |
|------------------------|---------------------------------|---------------------|--|--|
| Eventos Geológicos     | Límites de capas                | 263                 | <br>SW-NE | <br>SE-NW  |
| Estructuras Tectónicas | Fracturas Abiertas              | 47                  | <br>SE   | <br>SW-NE |
|                        | Fracturas Parcialmente Abiertas | 227                 | <br>SE   | <br>SW-NE |
|                        | Fracturas Vugulares             | 11                  | <br>SE   | <br>SW-NE |
|                        | Microfallas                     | 3                   | <br>NW   | <br>SW-NE |

Tabla 2. Resumen de eventos interpretados en el pozo.

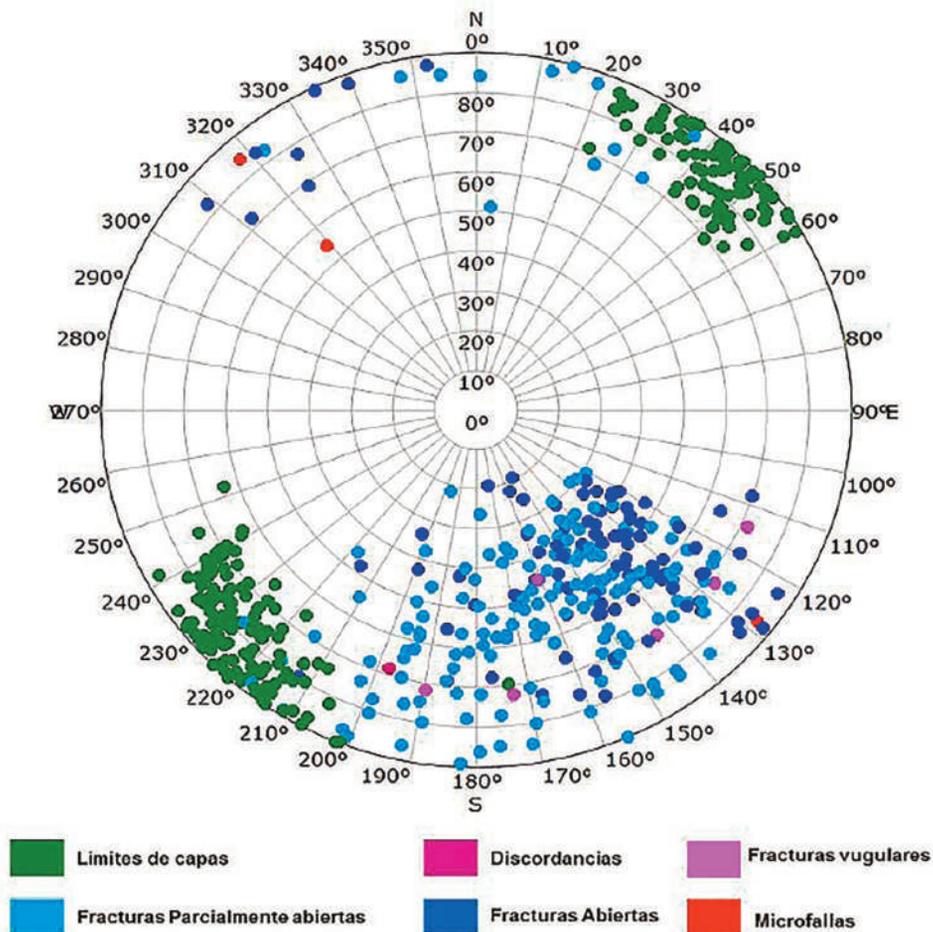
grados en dirección al NW y un rumbo SW-NE.

En la **Figura 7** se presenta la roseta de polaridad de los eventos interpretados en el intervalo estudiado dentro del pozo, se muestran los polos de los eventos identificados en el registro de imágenes, donde se observa que la mayor cantidad de fracturas abiertas y semi-abiertas se encuentran con un buzamiento SW entre los 130 y 180 grados aproximado y en menores proporciones existen fracturas vugulares con las características similares a las fracturas naturales mencionadas. Los eventos de tipo límites de capas se encuentran con dirección preferencial del azimut hacia el SW entre los 200 y 240 grados en su mayoría, aunque también hay existencia en menor por ciento hacia el NE entre los 60 y 30 grados.

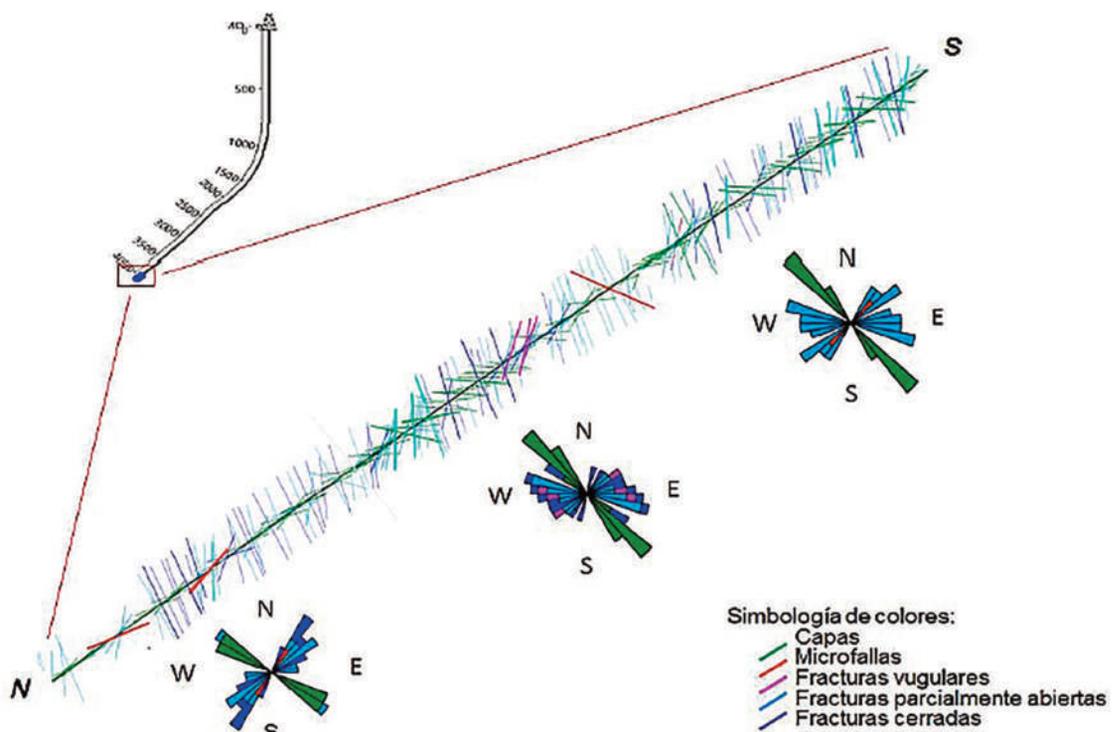
Después de la creación del diagrama de polaridad, se determina que estas microfallas tienen como promedio un azimut entre 300 a 340 grados que indica su dirección hacia el NW con ángulos de 310-320 grados. A ellas están asociadas abundantes fracturas, esto indica que existe la presencia de una zona muy tectonizada

El análisis permite concluir que en el intervalo estudiado existe gran cantidad de fracturas típicas de los reservorios carbonatados fracturados, los cuales son de gran interés para la exploración y producción de hidrocarburos en Cuba.

Como resultado final se presenta en la Figura 8, una proyección estructural del intervalo estudiado donde se grafican todos los eventos identificados du-



**Figura 7.** Roseta diagrama de polaridad evidenciando la ubicación espacial de los eventos geológicos identificados, así como los valores de azimut de límites de capas, fracturas naturales y microfallas (Cruells-Torres, 2019)



**Figura 8.** Vista estructural del intervalo 3965-4048 m con la representación de los diagramas rosetas de rumbo de los eventos donde muestra un cambio en la orientación de las fracturas naturales a causa del tectonismo del área (Cruells-Torres, 2019)

rante la interpretación. Se marcan las rosetas diagrama de rumbo, tanto de los límites de capas como de las diferentes fracturas naturales. Se mantiene en todo el intervalo el rumbo NW-SE para los límites de capas mientras que las fracturas varían desde E-W hasta NE-SW en el fondo del pozo. Se tendrá en cuenta la dirección preferencial y densidad de fracturas naturales, con el objetivo de definir trayectorias de futuros punzados en esta área, con mayor nivel de certeza e interceptar zonas con mayor densidad de fracturas y de esta forma acortar el tiempo de perforación y cortar la mayor cantidad de fracturas conductivas por el rumbo, para obtener una mejor producción.

## CONCLUSIONES

Con los resultados obtenidos del procesamiento con el programa Techlog, el análisis petrofísico y geológico se concluye:

1. A partir de los eventos geológicos y tectónicos determinados en las imágenes se es-

tablece:

- Un patrón de rocas carbonatadas fracturadas, donde los límites de capas predominantes tienen dirección de azimut SW, ángulos de buzamiento entre 80 y 90 grados con un rumbo de NW-SE.
- El patrón para las fracturas naturales conductivas presenta, en todo el intervalo estudiado, una dirección preferencial de azimut hacia el SE con una inclinación de 50 y 75 grados y un rumbo NE-SW. Las fracturas vulgares se encuentran aisladas a lo largo del intervalo, aunque son más abundantes en los 3982 m.
- Las tres microfallas presentes están muy bien definidas, clasificadas como tipo normal por el desplazamiento de las capas. Presentan un azimut con dirección NW y rumbo NE-SW, con asociación de abundantes fracturas naturales.

2. En la integración de las interpretaciones geólogo-geofísicas se obtuvo:
- Se identificaron intervalos de estratificaciones finas y laminares, los cuales están asociados a las intercalaciones de calizas, finas capas de arcilla y pedernales, descritas en el pozo, donde aparecen pequeños intervalos con seudobrechamiento de grano fino a medio.
  - En todo el intervalo se lograron identificar eventos geológicos y tectónicos relacionados con las distintas litologías, los eventos tectónicos (fracturas naturales y microfallas) bien definidos dentro de los carbonatos, por ser estos los de mayor fragilidad ante los procesos de estrés.
  - Las propiedades petrofísicas en el intervalo estudiado presentan una porosidad efectiva media de 9.3 % y una saturación media de agua de 86.4 %.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Castro, O.**, 2017, Evaluación petrofísica de formaciones gasopetrolíferas cubanas. La Habana, Cuba: ISBN 978959-7117-55-1.
- Cruells, T. K.**, 2019, Estudio integral geólogo-petrofísico para la caracterización en un intervalo del pozo Cojímar en la FNPC. Tesis de grado. 75 pp.
- Shahinpour, A.**, 2013, Borehole image log analysis for sedimentary environment and clay volume interpretation. Department of Petroleum Engineering and Applied Geophysics. Norwegian University of Science and Technology

Fecha de recepción: 15 de enero de 2023

Fecha de arbitraje: 6 de febrero de 2023

Fecha de aprobación: 25 de junio de 2023

