

**FEBRERO  
SUPLEMENTO  
2026**



# **MAYA**

**REVISTA DE GEOCIENCIAS**





# MAYA

## REVISTA DE GEOCIENCIAS

**Revista Maya:** Revista Maya de Geociencias que (RMG) nace del entusiasmo de profesionistas con la inquietud de difundir conocimientos relacionados con la academia, investigación, la exploración petrolera y Ciencias de la Tierra en general.

El objetivo principal de la revista es proporcionar un espacio a todos aquellos jóvenes profesionistas que desean dar a conocer sus publicaciones. Los fundadores de la revista son *Luis Ángel Valencia Flores, Bernardo García Amador y Claudio Bartolini*.

Otro de los objetivos de la Revista Maya de Geociencias es incentivar a profesionales, académicos, e investigadores, a participar activamente en beneficio de nuestra comunidad joven de geociencias.

La Revista tendrá una publicación mensual, por medio de un archivo PDF, el cuál será distribuido por correo electrónico y compartido en las redes sociales. Esta revista digital no tiene fines de lucro. La RMG es internacional y bilingüe. Si desean participar o contribuir con algún manuscrito, por favor comuníquense con cualquiera de los editores.

Las notas geológicas tienen como objetivo el presentar síntesis de trabajos realizados en México y en diferentes partes del mundo por jóvenes profesionales y prestigiosos geocientíficos. Son notas esencialmente de divulgación, con resultados y conocimientos nuevos, en beneficio de nuestra comunidad de geociencias. Estas notas no están sujetas a arbitraje.

*\*Es importante aclarar, que las opiniones científicas, comerciales, culturales, sociales etc., no son responsabilidad, ni son compartidas o rechazadas, por los editores de la revista.*

**Portada de la revista:** En la parte inferior de la fotografía, la Formación Summerville (color naranja) del Jurásico medio, sobre ella en forma discordante, el Miembro Tidwell, y en la parte superior las areniscas del Miembro Salt Wash, ambos pertenecientes a la Formación Morrison del Jurásico superior. Little Egypt area, Utah. Fotografía: **Jhonny E. Casas**.

**Revista Maya:** The Revista Maya de Geociencias (RMG) springs from the enthusiasm of professionals with a desire to distribute knowledge related to academic research, exploration for resources and geoscience in general.

The main objective of the RMG is to provide a place for young professionals who wish to distribute their publications. The founders of the Revista are Luis Ángel Valencia Flores, Bernardo García and Claudio Bartolini.

A further objective of the RMG is to encourage professionals, academicians and researchers to actively participate for the benefit of our community of young geoscientists.

The RMG is published monthly as a PDF file distributed by email and shared through social media. This digital magazine has no commercial aim. It is international and bilingual (Spanish and English). If one wishes to participate or contribute a manuscript, please contact any of the editors.

The geological notes aim to synthesize work carried out in Mexico and other parts of the world both by young professionals and prestigious geoscientists. These notes are produced principally to reveal new understandings for the benefit of our geoscientific community and are not subjected to peer review.

Revista de difusión y  
divulgación geocientífica.

# EDITORES



**Luis Ángel Valencia Flores** (M.C.). Ingeniero Geólogo y Maestro en Ciencias en Geología, egresado de la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura-Unidad Ticomán, Ciencias de la Tierra, del Instituto Politécnico Nacional. Cuenta con 25 años de experiencia. Ha trabajado en el Instituto Mexicano del Petróleo, Petróleos Mexicanos, Schlumberger, Paradigm Geophysical, Comisión Nacional de Hidrocarburos, Aspect Energy Holdings LLC, Facultad de Ingeniería de la

UNAM, actualmente es académico del Instituto Politécnico Nacional (posgrado y licenciatura) donde imparte asignaturas especializadas en la caracterización de yacimientos petroleros. Es estudiante del Doctorado en Energía en el IPN, especializándose en la exploración de Hidrógeno Natural y fuentes alternas de energías.

[luis.valencia.11@outlook.com](mailto:luis.valencia.11@outlook.com)  
[lvalenciaf@ipn.mx](mailto:lvalenciaf@ipn.mx)



**Bernardo I. García-Amador** es Investigador Asociado "C" de Tiempo Completo del Instituto de Geofísica de la UNAM. En 2024 obtuvo su doctorado en Ciencias de la Tierra por la UNAM. Su línea de investigación versa en la aplicación del Paleomagnetismo, Magnetismo de Rocas y Anisotropía Magnética para resolver problemas en Tectónica, Geología Estructural, Vulcanología, y el

Análisis de Cuencas Sedimentarias; siendo autor y coautor de diversas publicaciones científicas. Además, desde el 2018 ha impartido el curso de Tectónica en la Facultad de Ingeniería de la UNAM, un tema que le apasiona en las geociencias.

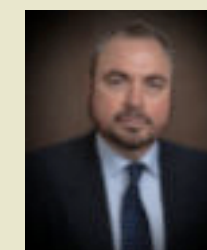
[bernardo.garcia@ingenieria.unam.edu](mailto:bernardo.garcia@ingenieria.unam.edu)



**Josh Rosenfeld** (Ph.D.). He obtained an M.A. from the University of Miami in 1978, and a Ph.D. from Binghamton University in 1981. Josh joined Amoco Production Company as a petroleum geologist working from 1980 to 1999 in Houston, Mexico and Colombia. Upon retiring from Amoco, Josh was employed by Veritas DGC until 2002 on

exploration projects in Mexico. He has been a member of HGS since 1980 and AAPG since 1981, and currently does geology from his home in Granbury, Texas.

[jhrosenfeld@gmail.com](mailto:jhrosenfeld@gmail.com)



**Claudio Bartolini** (Ph.D.) is presently a senior exploration advisor at Petroleum Exploration Consultants Americas. He has more than 25 years of experience in both domestic and international mining and petroleum exploration, mainly in the United States and Latin America. Claudio was an associate editor for the AAPG Bulletin and he has edited several books on the petroleum geology of

the Americas. He is a Correspondent member of the Academy of Engineering of Mexico.

Claudio was made an Honorary Member of the AAPG in 2022 in recognition of his service to the Association, and his devotion to the science and profession of petroleum geology.

[bartolini.claudio@gmail.com](mailto:bartolini.claudio@gmail.com)

# COLABORADORES



**Ing. Humberto Álvarez Sánchez.** Más de 5 décadas dedicadas a la geología de Cuba occidental y central. Cartógrafo en los macizos metamórficos y ofiolíticos de Cuba central y editor cubano de la Expedición checoslovaca Escambray II. Autor/coautor de 23 unidades del Léxico Estratigráfico de Cuba y miembro de las subcomisiones del Jurásico, Cretácico y Paleógeno de la Comisión del Léxico. Es el descubridor del mayor depósito cubano de fosforitas marinas. Gerente de Operaciones de Geotec, S.A.; dirigió exploraciones de Cu y Au en la Cordillera Central de Panamá y Perú para Juniors canadienses. Country Manager de Big Pony Gold de Utah y Geólogo Senior de Gold Standard Brasil, exploró prospectos de oro en el basamento cristalino de Uruguay y en los Estados de Santa Catarina y Mato



**Ramón López Jiménez (Ph.D.)** es un geólogo con 14 años de experiencia en investigación y en varios sectores de la industria y servicios públicos. Es un especialista en obtención de datos en campo, su análisis y su conversión a diversos productos finales. Ha trabajado en EEUU, Mexico, Colombia, Reino Unido, Turquía y España. Su especialidad es la sedimentología marina de aguas profundas. Actualmente realiza investigación en



**José Antonio Rodríguez Arteaga** es Ingeniero geólogo, egresado de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica de la Universidad Central de Venezuela, Caracas, con más de 30 años de experiencia. En sus inicios profesionales laboró como geólogo de campo por 5 años consecutivos en prospección de yacimientos minerales no-metálicos de la región Centro-Occidental de Venezuela.

Tiene en su haber labores de investigación en Geología de Terremotos y Riesgo Geológico asociado o no a la sismicidad. Es especialista en Sismología Histórica, Historia de la Sismología y Geología venezolanas. Ha recibido entrenamiento profesional en

Grosso del Norte. El Ministro de Comercio e Industrias lo nombró Miembro de la Comisión "Ad Honorem" del Plan Maestro de Minería de Panamá. El Banco Interamericano de Desarrollo le encargó de redactar el Proyecto de Geología y Minería y parte de su Misión Especial para su entrega al Gobierno panameño. Anterior Miembro del Consejo Científico de GWL de la Federación Rusa y Representante del BGS en América central. Director de Miramar Mining Panamá y Minera Santeña, S. A., reside en Panamá y redacta obras sobre geología de Cuba y Panamá. En el repositorio Academia edu, se encuentran 22 artículos suyos.

[geodoxo@gmail.com](mailto:geodoxo@gmail.com)

afloramientos antiguos de aguas someras y profundas de México, Turquía y Marruecos en colaboración con entidades públicas y privadas de esos países. Es instructor de cursos de campo y oficina en arquitectura de yacimientos de aguas profundas y tectónica salina por debajo de la resolución sísmica.

[r.lopez.jimenez00@aberdeen.ac.uk](mailto:r.lopez.jimenez00@aberdeen.ac.uk)

Metalogenia, Ecuador y Geomática Aplicada a la Zonificación de Riesgos en Colombia. Tiene en su haber como autor y coautor, tres libros dedicados a la catalogación sísmológica del siglo XX; a la historia del pensamiento sísmológico venezolano y la coordinación de un atlas geológico de la región central del país, preparado junto al Dr. Franco Urbani, profesor por más de 50 años de la Escuela de Geología de la Universidad Central. Actualmente prepara un cuarto texto sobre los estudios de un inquieto naturalista alemán del siglo XIX y sus informes para los terremotos destructores en Venezuela de los años 1812, 1894 y 1900.

[rodriguez.arteaga@gmail.com](mailto:rodriguez.arteaga@gmail.com)



**Natalia Silva (MSc):** Geóloga de la Universidad Industrial de Santander, Postgrado en Petroleum Geoscience de la Heriot-Watt University y Máster en Energías Renovables y Sostenibilidad Energética de la Universitat de Barcelona. Su carrera empieza en la minería de esmeraldas en el Cinturón Esmeraldífero Oriental de Colombia y en proyectos mineros de Níquel colombianos. Tiene más de 10 años de experiencia en el sector de hidrocarburos en desarrollo de

yacimientos y geomodelado en cuencas petrolíferas de los Estados Unidos, Colombia, Ecuador y Brasil. Más recientemente, su carrera está enfocada en el aprovechamiento de energías renovables, principalmente de energía solar, ha elaborado proyectos de generación eléctrica a partir de instalaciones fotovoltaicas en Europa y los Estados Unidos.

[ensilvacruz@gmail.com](mailto:ensilvacruz@gmail.com)



**Miguel Vazquez Diego Gabriel,** es estudiante de la carrera de Ingeniería Geológica en la Universidad Nacional Autónoma de México (Facultad de Ingeniería), sus principales áreas de interés a lo largo de la carrera han sido la tectónica, geoquímica y mineralogía. Es un

entusiasta de la divulgación científica, sobre todo en el área de las Ciencias de la Tierra.

[diegogabriel807@gmail.com](mailto:diegogabriel807@gmail.com)



**Daniela Kristell Calvo-Ramos** es Ing. Ambiental de la Univ. Politécnica de Chiapas, Maestría y Doctorado en Ciencias de la Energía en la Univ. Autónoma de Querétaro. Actualmente en estancia Posdoctoral en Centro de Geociencias UNAM-Juriquilla. Sus líneas prioritarias de investigación son: (1) síntesis de materiales fotocatalíticos, (2) síntesis de materiales grafénicos, (3) fotodegradación de colorantes en aguas, (4) foto-oxidorreducción de metales en agua y (5) contaminación de metales en agua. En su programa posdoctoral está

trabajando en preparación de muestras (separación en columnas de intercambio iónico) y análisis (Espectrometría de Masas Multicolector con Plasma Acoplado Inductivamente ICP-MMS) para medición de isótopos estables de zinc, cobre y hierro en diferentes materiales naturales (agua-roca). También es docente en la Escuela Nacional de Estudios Superiores (ENES-UNAM Juriquilla).

[dcalvo@geociencias.unam.mx](mailto:dcalvo@geociencias.unam.mx)

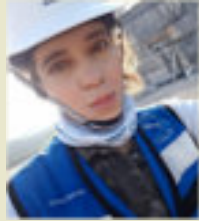


**Rafael Tenreiro Pérez,** se gradúa de ingeniero en geofísica de exploración de petróleo en 1974 en la Academia Estatal de Petróleo de Azerbaiyán, Master en Ciencias en Geología del Petróleo en la Universidad Politécnica CUJAE de la Habana en 1981 y Doctor en ciencias en Geofísica de Exploración la Universidad de Petróleo Gubkin de Moscú, Rusia, en 1987.

Tiene cuarenta y ocho años de experiencia en la Industria petrolera en Cuba y en otros países fundamentalmente en la especialidad de exploración de yacimientos de petróleo y gas. Durante este tiempo transitó desde ingeniero geofísico de adquisición hasta

Jefe de Exploración de la empresa petrolera nacional de Cuba - Cupet, cargo que ocupó por 16 años hasta su retiro en 2016. Investigador científico también recorre desde Aspirante a Investigador a Investigador Titular. Fue Jefe técnico del programa de exploración en la Zona Económica Exclusiva del Golfo de México. Director Técnico del Comisión para la Plataforma Extendida de Cuba. Tiene más de doscientas publicaciones que incluyen artículos científicos, presentaciones en eventos, conferencias, mapas, monografías y libros de texto. Premio de Geología Antonio Calvache Dorado de la Sociedad Cubana de Geología en 1992. En estos momentos trabaja en la empresa australiana Melbana Energy Limited.

[tenreiro2015@gmail.com](mailto:tenreiro2015@gmail.com)



**Laura Itzel González León / Ingeniera geóloga ambiental**

Profesionista inclinada a la Geología aplicada a obras de ingeniería civil y a riesgos geológicos desencadenados por fenómenos antrópicos y naturales. Experiencia en

levantamientos geológico-estructurales, logueo geológico, instrumentación geotécnica, cartografía de riesgos, supervisión de perforaciones y difusión de geopatrimonio.

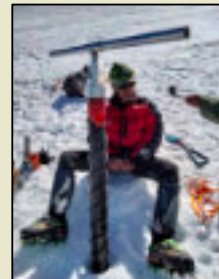
[gleon.laura@gmail.com](mailto:gleon.laura@gmail.com)



**Rodolfo Rafael Avalos Alejandre** Es ingeniero geólogo por la Facultad de Ingeniería (2022), actualmente estudiante de la maestría en ciencias de la Tierra por el Instituto de Geociencias. Realizó su estancia profesional en la unidad minera Fresnillo (2019), yacimiento correspondiente con su trabajo de tesis. Su principal interés es el entender procesos geológicos de escala regional enfocados en la exploración de yacimientos minerales a partir

de análisis de Mineralogía Avanzada, estudiando variaciones en especies minerales, texturas, asociaciones, grados de cristalinidad, emulsiones por exsolución y elementos menores en solución sólida. Es divulgador científico centrado en la astronomía, historia de la ciencia y cultura desde 2015 en la plataforma Astro Camp MX, montañista entusiasta desde 2021 y fotógrafo de paisaje desde 2021.

[r.avalos@astrocamp.mx](mailto:r.avalos@astrocamp.mx)



**Dr. Alejandro Carrillo-Chávez.** Ingeniero Geólogo del Instituto Politécnico Nacional, Maestría en La Universidad de Cincinnati, y Doctorado en la Universidad de Wyoming. Inició su trabajo en el Instituto Mexicano del Petroleo y después inició vida académica en la Universidad Autónoma de Baja California Sur. En 1998 ingresó al a Unidad Investigación en Ciencias de la Tierra (UNICIT) UNAM, Campus Juriquilla (actual Centro de Geociencias). Su trabajo inicial fue sobre petrografía ígnea y metamórfica. En academia inició dando clases de petrología ígnea y metamórfica.

Actualmente es Tutor del Posgrado en Ciencias de la Tierra UNAM. Su maestría fue sobre yacimientos minerales metálicos y su doctorado sobre geoquímica ambiental. Actualmente sus líneas de investigación son: Metales Pesados en Medio Ambiente, Hidrogeoquímica, Geoquímica Isotópica de Metales Pesados e Hidrogeoquímica de Salmueras Petroleras. A la fecha es responsable de un Proyecto UNAM y CONAHCyT sobre Concentraciones de metales e isotopía estable de Zn y Hg en agua de lluvia, nieve y núcleos de hielo en glaciares mexicanos. [ambiente@geociencias.unam.mx](mailto:ambiente@geociencias.unam.mx)



La **Dra. Norma E. Olvera Fuentes**, estudió la carrera de Física en la Facultad de Ciencias, su Maestría en el Instituto de Física y su Doctorado en Ciencias de la Tierra, en el ICAyCC, UNAM. Sus líneas de investigación tanto en licenciatura como en maestría versaron sobre el problema cuántico de difracción espacio-temporal de Moshinsky para diversas geometrías.

Bajo la dirección del Dr. Carlos Gay, su investigación doctoral analizó por medio del uso de mapas cognitivos difusos los posibles impactos que el cambio climático puede tener sobre la vulnerabilidad hídrica de la ZMVM. Su tesis doctoral fue galardonada con el Primer Lugar del Primer Premio a la Investigación en Cambio Climático PINCC-UNAM, 2023.

Con casi 20 años de labor docente, ha impartido clases en la Facultad de Ciencias y en la Facultad

de Ingeniería de la UNAM, así como en la División de Ingeniería del Tecnológico de Monterrey, Campus Santa Fe. Institución que le otorgó la Presea por Excelencia Académica como profesora de Cátedra. Como escritora tiene publicados tres libros como única autora y 5 como coautora. El número de Impluvium Gestión Integral de Sequías, en el que el Dr. Gay y la Dra. Olvera son coautores de artículo, es referencia de consulta que el CENAPRED presento para su curso "Sequías: un reto en la reducción del riesgo", marzo del 2024.

Actualmente la Dra. Olvera es Investigadora Posdoctoral del Instituto de Ingeniería de la UNAM, miembro del Sistema Nacional de Investigadores e invitada como líder de opinión del periódico Excelsior.

[norma.olvera@atmosfera.unam.mx](mailto:norma.olvera@atmosfera.unam.mx)

## Nuevo Canal Youtube de la Revista Maya de Geociencias

Es un gran placer informarles que hemos establecido un Canal Youtube de nuestra Revista Maya para la difusión de videos de temas de Ciencias de la Tierra. Ya iniciamos nuestras actividades en: <https://www.youtube.com/channel/UCYJ94EyLj4LqnVbbTXh5vpA>

### Estimados colegas,

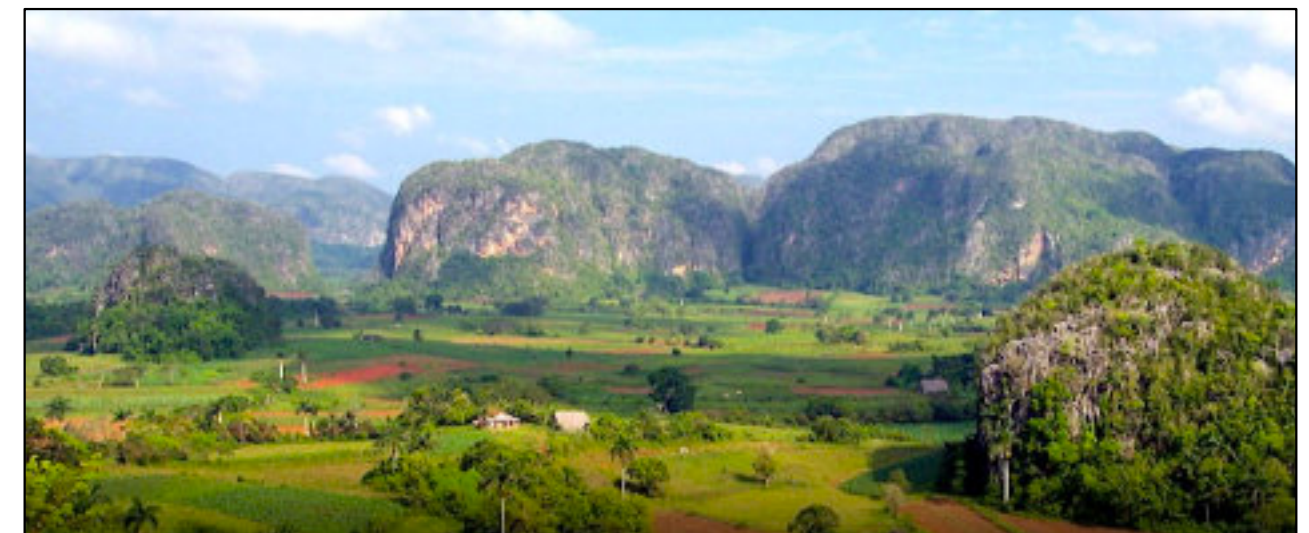
Te invitamos a que visites la página web de nuestra Revista Maya de Geociencias, donde podrán encontrar (en formato PDF), todas las revistas que hemos publicado hasta ahora, mismas que pueden descargar de la página. También estaremos incluyendo información adicional que sea de utilidad para nuestras comunidades de geociencias.

<http://www.revistamaya.com/>



## Visítanos en Revista Maya de Geociencias

<https://www.facebook.com/groups/430159417618680>





Tertiary mylonites, Catalinas metamorphic core complex, Tucson, Arizona. Photo by Claudio Bartolini.

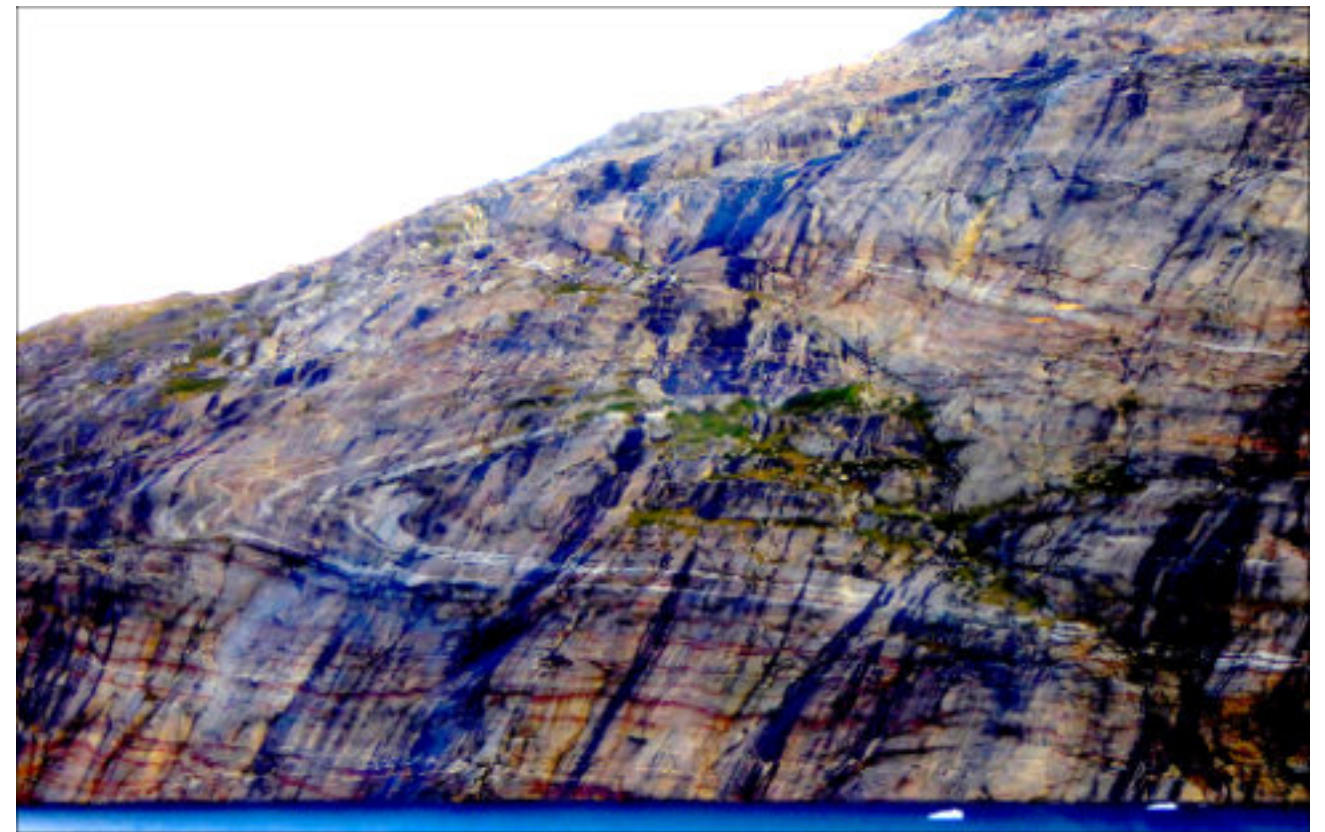
### Estimados Colegas

Ahora que hemos llamado su atención, aprovechamos la oportunidad para invitarlos cordialmente a participar en nuestra Revista Maya de Geociencias, con diversos Temas de Interés y Manuscritos Cortos relacionados a cualquier tema de las Ciencias de la Tierra y similares. Todos los trabajos son bienvenidos, puesto que la función primordial de la revista es la difusión de las geociencias.

Si los manuscritos son relativamente largos, también pueden ser publicados, pero en nuestras Ediciones Especiales de la revista, las cuales no tienen las limitaciones de tamaño, como los números mensuales de la revista.

*Nuestro agradecimiento a **Manuel Arribas Andrés**, un gran fotógrafo y excelente diseñador gráfico Español, por la creación del nuevo logotipo de la Revista Maya de Geociencias y sus indicaciones para la compaginación de la misma.*

Manuel Arribas Andrés. Fotógrafo de España: <https://www.instagram.com/manuel.arribas.andres/>



Prince Christian Fjord in Greenland. It shows a recumbent fold in the metamorphic rocks with some puzzling faulting. Photo by Joshua Rosenfeld.

### Esteemed colleagues

Now that we have your attention, we take this opportunity to cordially invite your participation in the Revista Maya de Geociencias in the form of short manuscripts touching upon diverse relevant themes of interest. All work is welcome, as the primary function of the magazine is to broadcast geoscientific ideas.

If the manuscripts are relatively long, they will be published in our magazine's Special Editions since the Special Editions do not have size limitations, as do our monthly issues (below).

#### Basic Instructions for Authors

Authors submitting material to be published in the Revista Maya de Geociencias are asked to adhere to the following editorial guidelines when sending manuscripts to the editing team and/or its collaborators:

(biographical sketches): a maximum of 3 pages

Notes on pioneers in the geosciences: a maximum of 4 pages

Themes "of interest to the community": a maximum of 4 pages

Geological notes: a maximum of 10 pages

**DICIEMBRE  
SUPLEMENTO**

**2026**

# EDICIÓN ESPECIAL XXVIII



## TABLA DE CONTENIDOS

<b>El etiquetado geológico en cervezas artesanales: creatividad, expresión visual y ciencia</b> Jesús S. Porras Moreno.....	11
<b>On using Google products for geologic remote sensing</b> Gary L. Prost.....	25
<b>Aplicación de las técnicas de filtrado e interpolación de Kalman a la incertidumbre estructurada del karst</b> Leslie F. Molerio-León.....	58
<b>Dolinización y regionalización de la recarga natural en el karst</b> Leslie F. Molerio-León, et al.....	76
<b>La tercera parte del Golfo de México que le pertenece a Colombia. un maravilloso, mágico y cinematográfico viaje a través del periodo Jurásico (versiones en Español e Inglés).</b> Edinson Alvarez.....	137
<b>Las giganucleares fuerzas geológicas y tectónicas que dieron origen al Golfo de México. (versiones en Español e Inglés).</b> Edinson Alvarez.....	215

## EL ETIQUETADO GEOLOGICO EN CERVEZAS ARTESANALES: creatividad, expresión visual y ciencia

**Jesús S. Porras Moreno**

Geólogo Consultor Senior

### Resumen

La cerveza es una de las bebidas más antiguas elaboradas por la humanidad y su historia está estrechamente vinculada al desarrollo de las sociedades. En las últimas décadas, la cerveza artesanal ha adoptado nuevas formas de comunicación e incorporado estrategias narrativas orientadas a destacar el origen, la identidad local y la singularidad del producto. En este contexto, el uso de referencias geológicas en el diseño de etiquetas constituye un fenómeno emergente que integra elementos de las geociencias con recursos gráficos y simbólicos.

Este trabajo analiza el etiquetado geológico como un recurso visual y narrativo que integra fundamentos materiales de la geología con estrategias simbólicas y comunicacionales. Se propone una tipología de motivos geológicos recurrentes y se evalúan sus funciones en la construcción de identidad territorial, diferenciación de marca y divulgación científica informal.

Palabras clave: geología; cerveza artesanal; etiquetado geológico; diseño gráfico; narrativa.

### INTRODUCCIÓN

La cerveza constituye una de las bebidas más antiguas y culturalmente significativas de la historia humana. Evidencias químicas de su elaboración han sido identificadas en fragmentos cerámicos de más de 4.000 años de antigüedad, mientras que en Mesopotamia su pureza estaba garantizada por disposiciones legales severas. En el Antiguo Egipto formaba parte del sustento ritual del más allá, y en diversas culturas del norte de Europa fue considerada una bebida asociada a lo divino.

Más allá de su dimensión histórica, la cerveza mantiene una relación particularmente estrecha con las geociencias. Esta afinidad, frecuentemente señalada en comunidades de trabajo de campo, no responde a estereotipos culturales, sino a una realidad material: los principales atributos de calidad de la cerveza están directamente condicionados por variables geológicas.

El crecimiento sostenido del sector de la cerveza artesanal ha estado acompañado por una progresiva valorización del origen, el proceso productivo y la identidad local. En este escenario, la etiqueta adquiere

un rol central como interfaz comunicacional entre el producto y el consumidor. Paralelamente, se observa un aumento en el uso de referencias geológicas, explícitas o implícitas, en el diseño de etiquetas, fenómeno que puede definirse como etiquetado geológico.

El presente trabajo, a diferencia de otros que se enfocan al proceso de fabricación de la cerveza y uso de acuíferos y terroirs de características litológicas y geológicas particulares, tiene como objetivo analizar este recurso desde una perspectiva geológica y comunicacional, identificando patrones iconográficos recurrentes y discutiendo su significado en términos descriptivos y culturales-científicos.

### LA ETIQUETA COMO RECURSO VISUAL Y NARRATIVO

Las etiquetas de cerveza han evolucionado significativamente en diseño y función, especialmente en las últimas décadas, en paralelo con la expansión del mercado cervecero y la aparición de nuevas marcas. Más allá de su valor estético, cumplen un papel central en la decisión de compra, actuando como un dispositivo clave de comunicación y diferenciación en el punto de venta.

Históricamente, las primeras cervezas incluían información mínima grabada en la botella, pero con la industrialización de finales del siglo XIX las etiquetas adquirieron protagonismo como elementos distintivos de marca.

El diseño de etiquetas y el empaque y embalaje en la cerveza, se ha convertido, con el tiempo, en un espacio clave de creatividad y diferenciación. En un mercado cada vez más competitivo, las pequeñas cervecerías no solo apuestan por la calidad del producto, sino también por diseños originales que expresan personalidad, conocimiento del negocio y valores propios. Las etiquetas, en botellas y latas, funcionan como piezas visualmente atractivas que captan la atención del consumidor y fortalecen el vínculo con la marca.

En la actualidad, particularmente en el ámbito de la cerveza artesanal, las etiquetas se han consolidado como un componente central de la identidad del producto. Estas destacan por el uso intensivo de recursos gráficos, cromáticos y tipográficos, así como por la incorporación de materiales y acabados especiales, relieves, papeles

texturizados, troquelados y efectos metálicos, que refuerzan su carácter singular y son capaces de expresar información técnica, valores simbólicos y referencias territoriales

(<https://garinetiquetas.com/blog/2022/11/23/evolucion-de-etiquetas-de-cerveza/>).

La cerveza artesanal se distingue por etiquetas y logotipos creativos, porque sus productores cuidan tanto la bebida como su imagen, y por las preferencias de los consumidores, quienes suelen elegir nuevas cervezas por curiosidad, humor u originalidad, y eso se refleja directamente en el diseño (The FullPint, 2018).

En contraste con las cervezas industriales tradicionales, las marcas artesanales invierten más tiempo y recursos en construir una estética propia, apoyándose en decisiones estratégicas sobre color, forma y material, integradas al diseño o usadas como contraste, entre el color de la cerveza, la botella y la etiqueta, hasta la elección entre formatos estándar o diseños personalizados.

En la cerveza artesanal, la etiqueta se ha consolidado como un medio clave de identidad y diferenciación. En conjunto, estas prácticas transforman la etiqueta en un recurso descriptivo complejo, capaz de comunicar simultáneamente información técnica, valores simbólicos, referencias territoriales y una identidad de marca bien definida y reconocible (<https://thefullpint.com/sponsored/science-behind-beer-branding/>).

**EL ETIQUETADO GEOLÓGICO: funciones comunicacionales**

En un contexto geológico, el diseño de las etiquetas de cerveza artesanal no es una simple elección decorativa, sino una estrategia de comunicación que conecta el origen del producto con la experiencia del consumidor y se fundamenta en la autenticidad y origen (del terroir), la sofisticación del diseño y la narrativa geológica o

geográfica. Utiliza colores, formas y materiales para representar procesos naturales y el tiempo geológico de manera clara y accesible. El color de la cerveza, el contraste con la etiqueta y el uso de paletas asociadas a rocas, fósiles, minerales o paisajes refuerzan la idea del origen y aspecto natural. A su vez, papeles especiales, texturas o etiquetas troqueladas aportan una dimensión táctil vinculada a lo natural y lo territorial. Así, la etiqueta supera su función informativa y actúa como un recurso narrativo que conecta la cerveza con el paisaje y la historia geológica que le da identidad.

El etiquetado geológico cumple múltiples funciones: diferenciación en un mercado altamente competitivo, construcción de identidad territorial, generación de valor simbólico y cultural, y difusión indirecta de conceptos geológicos en contextos de divulgación no formal. En este sentido, la geología actúa como un recurso comunicacional que integra ciencia, diseño y consumo.

A diferencia de las etiquetas de vino, donde la geología se emplea de manera sobria y técnica para destacar el terroir, el origen y la calidad del producto, con un enfoque informativo y elegante, en las etiquetas de cerveza la geología se manifiesta de forma más libre, alegórica y expresiva. Volcanes, fallas, fósiles, minerales, paisajes y procesos geodinámicos se utilizan como símbolos de energía, intensidad y carácter o investigación. En este contexto, el rigor científico suele quedar en segundo plano frente al impacto visual y descriptivo. El estilo gráfico es generalmente más colorido, informal y creativo, en sintonía con la cultura cervecera artesanal y la búsqueda de identidades propias.

En síntesis, mientras el vino recurre a la geología para explicar el origen, la cerveza la emplea para construir un relato visual y emocional.



Figura 1. Selección de etiquetas y latas de cervezas artesanales que incorporan referencias geológicas y paleontológicas en su diseño gráfico.

**MOTIVOS GEOLÓGICOS EN ETIQUETAS DE CERVEZA: Metodología y Clasificación**

El artículo se elaboró a partir de una recopilación amplia y diversa de información proveniente principalmente de blogs especializados, sitios web, redes sociales y material personal y disponible en internet, complementada con referencias generales sobre geología, diseño y cultura cervecera. Aunque las fuentes no son exclusivamente académicas, su variedad y calidad permitieron identificar tendencias, enfoques y ejemplos representativos, aportando una base sólida y coherente para el análisis desarrollado.

El estudio se basó en un conjunto amplio y representativo, aunque no exhaustivo, de imágenes de etiquetas de cervezas artesanales y de las fuentes disponibles, procedentes de distintos países, lo que permitió identificar patrones recurrentes y proponer una clasificación general de los tópicos geológicos utilizados. A partir de este análisis, los temas geológicos presentes en las etiquetas pudieron organizarse en siete categorías principales, que abarcan desde usos principalmente visuales y simbólicos hasta referencias de carácter técnico-científico.

**Fósiles y Tiempo Geológico**

**a) Fósiles**

Se trata de una categoría muy común y fácilmente reconocible en el mundo de las cervezas artesanales, que utiliza fósiles y referencias paleontológicas locales como eje principal del diseño. Incluye alusiones a fósiles, tiempo geológico, eras, periodos, rocas y secuencias estratigráficas.

Estos elementos suelen transmitir la idea de algo antiguo y duradero, conectado con el paso del tiempo y la historia del lugar. Por eso funcionan bien para reforzar la identidad local de la cerveza y se han vuelto muy comunes en el diseño de etiquetas del mundo cervecero.

Las representaciones más habituales recurren a iconos paleontológicos ampliamente reconocibles, como dinosaurios (T. Rex, Velociraptor, Allosaurus), amonites y trilobites, así como restos óseos (huesos y vértebras) y fósiles emblemáticos como el Megalodon y los ictiosaurios, además de megafauna prehistórica (mamuts, mastodontes, Smilodon o “dientes de sable”). En contraste, la presencia de otros tipos de fósiles y registros paleontológicos menos conocidos es escasa, lo que evidencia una preferencia por imágenes de alto impacto visual y fácil identificación por parte del público.



Figura 2. Etiquetas de cervezas que integran referencias paleontológicas en su diseño: amonites y trilobites (arriba) y bestias prehistóricas (abajo).

Muchas etiquetas contienen ilustraciones e impresiones muy técnicas y detalladas de fósiles, capas o cortes estratigráficos, o una estética evocativa, como es el caso de la edición de la Burgess Shale Geoscience Foundation (BSGF) y Big Rock Brewery quienes lanzaron Shale Ale, una cerveza de edición limitada cuya etiqueta homenajea a Walcott y a los fósiles del Burgess Shale (505 Ma), destacando su extraordinaria diversidad y formas de vida primitivas y singulares (Eaton, 2009).

Algunas marcas utilizan el espacio de la etiqueta para dar datos sobre la especie fósil representada, buscando despertar el interés por la ciencia, por lo que su función es marcadamente educativa. La etiqueta de Ichthyosaur “Icky” IPA de Great Basin Brewing Co. usa el esqueleto de un ictiosaurio como elemento central vinculando la cerveza con la historia geológica y el pasado prehistórico de la Tierra de forma clara y atractiva. El nombre “Icky” introduce un tono informal derivado de Ichthyosaur, mientras que expresiones como “Distinct, not extinct” y “200 million years in the making” establecen una conexión simbólica entre el fósil, el tiempo geológico y el proceso de elaboración de la cerveza.

La cerveza Black Ven (Lyme Regis Brewery) toma su nombre de los acantilados de Blue Lias, ubicados al este de Lyme Regis, donde la célebre paleontóloga Mary Anning encontró su primer ictiosaurio en 1811. Trae un esqueleto de un ictiosaurio en su etiqueta.

La Emu Bay Shale Ale (Kangaroo Island Brewery) es originaria de Kangaroo Island, Australia Sur, una región famosa por sus lagerstätten fósiles del Cámbrico. Emu Bay es el yacimiento fósil más reconocido, y la cerveza fue creada para celebrar los descubrimientos

paleontológicos realizados en la isla. La ilustración de la etiqueta representa fragmentos de un trilobites.



Figura 3. Etiquetas con referencias a especies fósiles y regiones fosilíferas emblemáticas. En estos casos, el diseño gráfico adopta un enfoque técnico y detallado, incorporando ilustraciones precisas de fósiles.

La línea de Cervezas Patagonia (Chile), elaborada por Cervecería Austral, utiliza animales prehistóricos del registro fósil chileno como eje visual de sus etiquetas. Variedades como la Red Lager, asociada al Smilodon; la Blong Lager encarnada por un Amonite, la Hoppy Lager, representada por el perezoso gigante Mylodon; y la Lotus Lager, protagonizada por el dinosaurio Chilesaurus diegosuarezi, conectan la cerveza con el pasado geológico del territorio chileno. Su último lanzamiento, la Black Lager incluye la imagen de un Megaloceros, enorme ciervo de la Edad de Hielo como imagen publicitaria, a pesar de que este animal tuvo su rango geográfico limitado a Eurasia.

La cervecera estadounidense Fossil Fuels Brewing Company (FFBC) ha desarrollado una receta de cerveza artesanal tipo saison elaborada a partir de levaduras encontradas en una hoja de 45 millones de años (Eoceno), conservada dentro de una pieza de ámbar. Sus etiquetas suelen reflejar este origen prehistórico (<https://undertheinfluence.beer/urcontent/2017/3/6/i-trying-it-45-million-year-old-yeast-beer>). Esta cervecería utiliza etiquetas con dibujos de esqueletos de animales extintos, inspirados en ilustraciones científicas y de museo. El diseño se completa con la referencia a levaduras antiguas (AY108) y se caracteriza por un estilo simple y de un solo color, sobrio y sin adornos innecesarios, que refuerza una imagen clara y cuidada. En las etiquetas se identifican ilustraciones estilizadas de esqueletos fósiles correspondientes a distintos animales: una tortuga marina (Pale Ale), un mamífero cuadrúpedo de gran porte, asociado al megaterio (Stout), un reptil marino de cuerpo alargado, similar a un ictiosaurio (Saison), y una aparente ave primitiva no voladora, de pico comprimido y ligeramente curvo, que alude a la transición evolutiva entre dinosaurios y aves (Wheat). (<https://www.eater.com/2016/8/23/12608902/beer-45-million-year-old-yeast-fossil-fuels-brewing>)

La cervecería Lost Rhino Brewing Co., basada en Virginia (USA), en colaboración con Paleo Quest, crearon la cerveza Bone Dusters, elaborada con una levadura silvestre obtenida de un fósil de ballena de aproximadamente 35 millones de años. Tanto la etiqueta como la estrategia de comunicación se centran en este origen paleontológico singular. El diseño gráfico muestra una vértebra de ballena estilizada, que funciona como una referencia paleontológica clara y fácilmente reconocible para el público, priorizando el impacto visual por sobre la precisión anatómica.

Sauropod es el nombre de una línea de cervezas artesanales tipo sour (ácidas) producidas por la cervecería británica Staggeringly Good Brewery. Esta serie se caracteriza por el uso de grandes cantidades de fruta y diseños de latas con ilustraciones esquemáticas de dinosaurios, entre los que se identifican velociraptors, pterodáctilos y saurópodos.

Cervezas artesanales de Saltillo, Coahuila, construyen una identidad poderosa a partir del patrimonio paleontológico del norte de México, utilizando dinosaurios emblemáticos como eje narrativo y visual. Cada etiqueta presenta una especie distinta, Velafrons, Carnotaurus, T-Rex y Coahuilaceratops, ilustrada con un lenguaje gráfico contemporáneo, de colores sólidos y siluetas de fósiles, que combina ciencia, cultura regional y diseño artesanal.

El uso de dinosaurios en etiquetas de cervezas artesanales ilustra cómo la paleontología se incorpora al diseño de forma lúdica y accesible. En la serie de cervezas de la cervecería Staggeringly Good (Reino Unido), figuras prehistóricas como el Velociraptor se utilizan como elementos centrales del diseño, evocando el tiempo geológico y el pasado geológico profundo. Aunque estilizadas y alejadas del rigor científico, estas imágenes aportan identidad, diferenciación y un fuerte atractivo visual, permitiendo conectar la cerveza con referencias

paleontológicas ampliamente reconocibles sin requerir conocimientos especializados por parte del consumidor.



Figura 4. Etiquetas de cervezas artesanales con temática de dinosaurios, que evidencian una amplia diversidad de enfoques gráficos y narrativos. Se reconocen estilos que van desde ilustraciones científicas y naturalistas hasta representaciones estilizadas, caricaturescas y retro.

La cervecería Fossil Cove de Arkansas (USA) emplea ilustraciones de dinosaurios, paisajes geológicos y referencias al registro fósil como eje central de sus etiquetas, rindiendo homenaje a la historia geológica de la región de los Ozarks. Los diseños, de estilo colorido y “pop contemporáneo”, desarrollados junto a artistas locales, presentan dinosaurios en escenas dinámicas y humorísticas, integrados en entornos volcánicos, costeros o montañosos. Cervezas como la Blackberry Cream presenta un dinosaurio de placas dorsales (Stegosaurio) sobre un paisaje volcánico violeta, la Session IPA y la T-Rex Triplel recurren a un dinosaurio tipo T-Rex, mientras que Birch Ave Blonde presenta un dinosaurio bípedo en movimiento. En LaBrea Brown, un dinosaurio con cuernos diminutos, similar a un Triceratops (¿?) se sitúa en un entorno que sugiere un pozo de alquitrán y la IPA #3 incorpora un “dinosaurio volador” (Pterosaurio) en un nido o isla dominada por lúpulo.



Figura 5. Etiquetas de cervezas artesanales con variada iconografía de dinosaurios. Se reconocen ilustraciones humorísticas, estilizadas y de trazo simple con composiciones más narrativas, en las que el dinosaurio funciona como elemento central de identidad visual y diferenciación del producto.

En estos casos, los recursos, más estéticos que científicos, refuerzan la diferenciación de las marcas y

conectan la cerveza con referencias paleontológicas ampliamente conocidas por el público.

Otras marcas que aluden concretamente a dinosaurios son: Fossils & Feelings (Alternate Ending Beer Co.), Tooth & Claw (Off Color Brewing), Allosaurus Amber (Vernal Brewing), Pterodactyl Deathscreeam (Burnt City Brewing), Inner Dinosaur (Conshohocken Brewing), Dankosaurus (Cedar Creek Brewery), Concrete Dinosaur IPA (Right Brain Brewery), Pseudo Sue (Toppling Goliath Brewing), Velociraptor (Ciezo), Tricerahops (Ninkasi Brewing), Staggersaurus (Staggeringly Good Brewery), Palaeo Ale (s/d), Fossil (Nephente Brewing Co.), Dinosaur Terrible Strong, Sauropod e Iguanodon (Gentle Giant Brewing Company)

Entre las marcas o cervecerías que hacen alusión a diversos fósiles, se encuentran:

- **Amonites:** *Lyme Gold* (Lyme Regis Brewer), *Ammonite* (DBC), *Ammonite* (Symphonie-Le Grand Assemblage)
- **Genéricos:** *Fossil* (North Devonian Ale), *Fossil Fuel*, *Paleo Ipa*, *Gastropod #2* (Epic Ales)
- **Trilobites:** *Trilobite* (Urban Artifact), *Trilobite* (Blend #3), *Monkey Brew*
- **Bestias Prehistóricas:** *Mamut*, *Mamut 12º*, *Mammoth*, *Mastodon*, *Sabertooth*, *Sabertooth Tiger*

El Megalodon es otro de los fósiles favoritos para nombrar cervezas artesanales. Se reconocen varias marcas: *Megalodon Blonde* (Fossil Craft Beer), *Megalodon* (Champion), *Megalodon Double IPA* (RD), *Megalodon* (Burn City Brewing), *Megalodom* (Ninkasi Brewing Company), *Megalodon* (Atom Beers), *Megalodon Doble Imperial* (Cerveza Tiburón), *Mega Megalodon* (Humble Sea Brewing Co.).



Figura 6. Etiquetas y envases de cervezas artesanales inspiradas en el Megalodon. Las composiciones incorporan gráficos dinámicos, tipografías robustas y paletas contrastantes, con predominio del color azul, que evoca los océanos y mares donde habitó este gran depredador.

The Dunkes una Dunkelweizen (cerveza de trigo alemana oscura) elaborada por la Fat Head's Brewery en Ohio, en colaboración con el Cleveland Museum of Natural History. La cerveza fue lanzada como un homenaje al pez fósil oficial del estado de Ohio, el Dunkleosteus terrelli,

una de las especies marinas prehistóricas más emblemáticas de la región. Fue premiada con el Silver Award en la 2024 World Beer Cup. (<https://fatheads.com/brewing/awards/>)



Figura 7. La etiqueta de la cerveza “The Dunk” rinde homenaje al Dunkleosteus terrelli, pez fósil oficial del estado de Ohio y una de las especies marinas prehistóricas más emblemáticas de la región.

**b) Tiempo Geológico**

La iconografía de este grupo puede incluir tanto fósiles, huellas de dinosaurios, rocas, volcanes, cronogramas, líneas del tiempo, como hacer alusiones a formaciones, eras, periodos y épocas geológicas.

Nombres como Cambrian Gold, Cambrian Root, Paleozoic (Gentle Giant), Permian (Tall City Brewing Co), Mesozoic (Valley Brewing), Triassic (Underground Brewery), Triassic IPA, Jurassic Hefe Weizen, Jurassic (DBC), Jurassic Coast, Jurassic Bark, Jurassic IPA (Cameron’s Brewing), Cretaceous, Cretaceous Creatures (Boundary Bay Brewery), remiten directamente a periodos trascendentes de la evolución del planeta, asociados a cambios climáticos, extinciones, biodiversidad y geodinámica.



Figura 8. Conjunto de etiquetas de cervezas artesanales que incorporan referencias directas al tiempo geológico. Destaca el uso de nombres de eras y fósiles bajo distintos estilos gráficos, desde enfoques sobrios y tipográficos hasta composiciones ilustradas y narrativas.

La Gentle Giant Brewing Company, con sede en Pearl River, Nueva York, incorpora un dinosaurio de cuello largo en su logotipo y ofrece una amplia gama de cervezas cuyos nombres remiten explícitamente al tiempo geológico, como Paleozoic, Paleolithic y Jurassic, así como a dinosaurios emblemáticos, entre ellos Sauropod e Iguanodon.

**Petrología y Minerales**

Las etiquetas de cerveza inspiradas en minerales y rocas suelen centrarse en el origen natural del producto, especialmente en la composición geológica del agua, o en el uso de nombres de minerales, piedras y tipos de rocas para construir la identidad de la marca. La representación de rocas, cristales y minerales, así como de nombres tomados de la mineralogía y petrología, transmite ideas de solidez y conexión con la tierra. Estos elementos se emplean de manera simbólica para sugerir el carácter, la intensidad o la “personalidad” de la cerveza.

La representación de rocas, cristales y minerales, así como de nombres tomados de la mineralogía y petrología, transmite ideas de solidez y conexión con la tierra. Estos elementos se emplean de manera simbólica para sugerir el carácter, la intensidad o la “personalidad” de la cerveza.

Muchas cervecerías artesanales utilizan nombres de rocas, minerales o formaciones geológicas para sus cervezas y los refuerzan visualmente con colores inspirados en minerales. Tonos dorados, rojizos o blancos, asociados, por ejemplo, a la pirita, la hematita o la calcita, ayudan al consumidor a relacionar de forma intuitiva el tipo de malta, el cuerpo o el estilo de la cerveza. Otras usan nombres de formaciones o piedras locales para evocar la textura y el paisaje de su región, como Piedra Lisa, Pedra Grande, Black Stone, Black Rocks, Red Rock (s), Red Granite, GrayStone.



Figura 9. Ejemplos de etiquetas de cervezas artesanales inspiradas en litologías y materiales pétreos. Los diseños hacen referencia directa a rocas específicas mediante nombres, texturas gráficas y paletas cromáticas.

En el diseño gráfico predominan ilustraciones de minerales metálicos como hierro, cobre, pirita u oro, valorados por su impacto visual. Otras marcas adoptan una estética de grabado en piedra, que transmite dureza

y calidad, como ocurre en el caso icónico de Stone Brewing.

Entre los ejemplos de esta categoría se identifican cervezas cuyos nombres e ilustraciones hacen referencia directa a rocas, como Slate, Obsidian, Andesita, The Good Schist, Infinity Stone’s Throw, Lime Rock, Limestone, Sandstone, Moon Rocks, Granite, Rolling Rock y Stone Arch. También son frecuentes las alusiones a cristales y minerales, con denominaciones como Jasper, Crystal, Gold, Miner’s Gold, Crystal White y Nitro. Asimismo, es común el uso del término Ámbar para nombrar cervezas, aunque no se trate de un mineral en sentido estricto, sino de una resina fósil, empleada principalmente por su asociación visual y cromática con el color y el estilo de la cerveza.

Un caso destacado de la relación entre la cerveza y la geología regional es la cerveza Mica, elaborada en la localidad de Fuentenebro, Segovia (España). La marca toma su nombre de la mica, un mineral característico de la Sierra de Fuentenebro, una zona rica en recursos minerales. Tal como indica la propia etiqueta, esta referencia geológica se vincula también al entorno agrícola, ya que la cebada utilizada se cultiva en tierras próximas al río Duero. De este modo, la cerveza integra de forma explícita el sustrato geológico y el paisaje local en la construcción de su identidad y su relato de origen. (<https://www.geologiadeseegovia.info/cerveza-mineral/>)



Figura 10. Grupo de etiquetas de cervezas artesanales inspiradas en rocas ígneas (obsidiana, andesita), metamórficas (pizarras, esquistos), sedimentarias (calizas, areniscas) y minerales (jaspe, cristal y mica).

La Sandstone Lager (Young Henry Brewery) toma su inspiración directa de la arenisca que caracteriza al histórico Sandstone Precinct de Sidney. La fachada del hotel Capella Sydney, construida con bloques de arenisca extraídos del suburbio de Maroubra y decorada con tallas manuales de comienzos del siglo XX, sirve como referencia material y simbólica para la cerveza.

(<https://www.drinkstrade.com.au/news/limited-edition-young-henrys-brew-pouring-at-sydneys-capella/>)

Algunas etiquetas presentan ilustraciones de secciones delgadas (petrografía) o cristales geométricos de gran valor estético.

Cervecerías de menor escala, especialmente en España y México, han experimentado con etiquetas de papel de textura mineral, buscando generar una experiencia visual y táctil que recuerde al contacto con una roca real.

**Volcanismo y Procesos Geotérmicos e Hidrotermales**

**a) Volcanismo**

Las imágenes de volcanes, lava, magma y rocas volcánicas son habituales, y entre las más abundantes, en cervezas de perfil intenso y carácter marcado. En un plano simbólico, estos elementos remiten a energía, transformación y fuerza natural, cualidades que muchas marcas buscan asociar a sus productos.

Las etiquetas con temática volcánica suelen destacar su vínculo con el terroir geológico, aludiendo tanto al entorno donde se produce la cerveza (ejm. Volcanes del Sur, Chile; Malpeis, Lanzarote; Fuji Beer, Japón) como al uso de aguas filtradas por rocas volcánicas o de ingredientes vinculados a estos ambientes (ejemplo: Mauna Kea, Volcano, Volkan, Igneous, Fuji).

Muchas hacen referencia directa a volcanes locales o regiones volcánicas como: Volkan (Santorini, Grecia); Krakatoa y Tambora (Indonesia); Lava (Islandia); Volcano, Red Lava y Fire Rock (Hawaii), entre otras.

La cerveza mexicana Vesuvius (Dos Aves Brewing Co.) toma su nombre por el famoso volcán Vesubio cuya erupción del año 79 mató a Plinio El Viejo, el primero en documentar el Lupus Salictarius, refiriéndose al hoy conocido lúpulo, ingrediente fundamental en la elaboración de cerveza (<https://esdosavescerveceria.weebly.com/vesuvius.html>)



Figura 11. Etiquetas de cervezas artesanales con iconografía de volcanes y regiones volcánicas emblemáticas. Los diseños aluden a paisajes ígneos, erupciones y volcanismo activo.

El diseño gráfico recurre con frecuencia a paletas cromáticas que evocan distintas fases y productos del vulcanismo, como el negro de los basaltos y acantilados volcánicos, los grises de las cenizas y nubes piroclásticas, y los blancos de rocas como la piedra pómez.

Otras etiquetas incorporan ilustraciones de volcanes en erupción y explosiones, flujos de lava, campos de escoria o cumbres volcánicas, reforzando la idea de procesos geológicos activos y paisajes extremos.



Figura 12. Etiquetas de cervezas artesanales con temática del volcanismo activo, utilizando imágenes de coladas de lava, erupciones y paisajes ígneos extremos evocando regiones, procesos y productos volcánicos.

En algunos casos recientes, se han desarrollado etiquetas con relieves y texturas táctiles, que imitan la rugosidad de la piedra pómez o el basalto, ofreciendo al consumidor una experiencia sensorial que refuerza la conexión entre la cerveza y el vulcanismo.

Omnipollo, una productora sueca conocida internacionalmente por sus cervezas experimentales y creativas, y por su enfoque artístico y vanguardista tanto en sabores como en diseño, presenta una etiqueta de estilo moderno con un volcán de colores neón, diseñada por el artista Karl Grandin, que simboliza una "erupción" de sabores experimentales (<https://omnipollo.com/>)

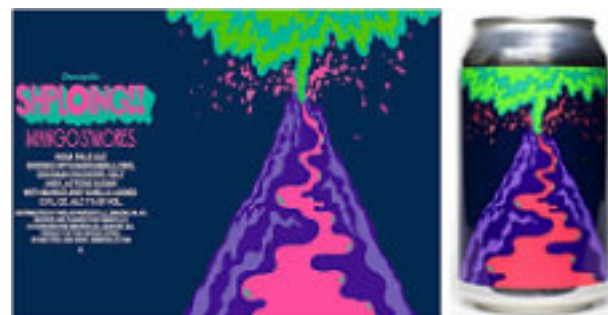


Figura 13. Etiqueta de la cerveza artesanal Shploing!! Mangos'Mores (Omnipollo). La moderna y colorida imagen simboliza una "erupción volcánica" y refuerza el carácter vanguardista y creativo de la marca.

Las etiquetas de Fossil Cove combinan distintos estilos de cerveza con dinosaurios y paisajes geológicos estilizados de mucho colorido. De ellas, la Paleo Ale se distingue por un escenario volcánico.

**b) Geotermia**

Esta categoría agrupa también etiquetas de cervezas que incorporan imágenes, nombres o referencias vinculadas a manifestaciones geotérmicas como géiseres, fumarolas, manantiales termales (hot springs) y vapor. Estos elementos se emplean principalmente con un valor simbólico y narrativo, asociado a ideas de energía, transformación, intensidad y origen natural.

Algunas marcas y tipos reconocidos son: Old Faithful Ale, Geyser Session Ipa, Yellowstone Golden Ale y Lager.

La cervecería italiana Vapori di Birra ubicada en Sasso Pisano, en la Toscana, una zona caracterizada por fumarolas boracíferas y el aprovechamiento de energía geotérmica, desarrolló, a partir de esta singularidad geológica, un proyecto basado en la sostenibilidad y el uso de vapor geotérmico como fuente principal de energía, siendo la primera en Italia en hacerlo. Esta identidad territorial se expresa también en su línea de cervezas, que incluye Geyser (Pale Ale), Sulfurea (Weiss), Magma (Amber Ale) y Thera (cerveza especial con miel), cuyos nombres aluden directamente a procesos geotérmicos.

**Geodinámica, Geología Estructural y Sismicidad.**

Esta categoría incluye etiquetas de cerveza que incorporan referencias visuales o conceptuales a los procesos internos de la Tierra y a las estructuras geológicas que estos generan. Comprende fallas, pliegues, fracturas, tectónica, placas y límites de placas, y terremotos.

Estos elementos se utilizan como recursos visuales y simbólicos para transmitir ideas de energía, fuerza y transformación, vinculando la cerveza con procesos naturales de gran escala y con la imagen de un planeta Tierra activo y en permanente cambio.

A través de nombres e imágenes sugerentes, como fallas, pliegues o esquemas tectónicos, las etiquetas comunican dinamismo y complejidad, aportando una estética asociada al movimiento y al equilibrio isostático del planeta. Aunque las representaciones no buscan rigor científico, facilitan una conexión clara entre el producto y la idea de una naturaleza en constante transformación.

Entre las etiquetas de cerveza relativas a tectónica de placas y movimientos de escala continental y global se encontraron: Plate Tectonics, Lithosphere, Tectonic Event, Tectonic Session, Pangea, Continental Drifter,

Mantle, Moho, Rift, Read Sea Rift, Dark Rift, Rift Valley y Great Rift.

En conjunto, estas etiquetas muestran cómo la tectónica, geodinámica y la estructura interna de la Tierra se utilizan como marco conceptual y visual en el diseño. Términos relativos como placas, litosfera o manto se representan de forma esquemática y remiten a distintos niveles y procesos del planeta, desde el movimiento de placas hasta la estructura profunda del manto y se traducen gráficamente mediante capas superpuestas, secciones esquemáticas de la Tierra, ondas sísmicas o composiciones circulares que evocan el interior del globo terrestre.

La cerveza The Ridge (Harviestoun Brewery), es llamada así en honor al Mid-Atlantic Ridge (Dorsal Meso-Atlántica), límite de placas que se extiende a lo largo del océano Atlántico y separa las placas norteamericana y sudamericana de las placas euro-asiática y africana, respectivamente.

(<https://www.scottishrealales.com/products/the-ridge-harviestoun>)



Figura 14. Set de etiquetas con motivos relativos a elementos representativos de la geodinámica terrestre.

En el conjunto de etiquetas de esta categoría se identifican cervezas artesanales que utilizan el concepto geológico de Pangea, éstas son: Pangea (Dogfish Head Brewery), Pangea (Domus Birrae), Secreto en Pangea (Hazy IPA), Pangea Ultima IPA (Azvex Brewing Company) y Pangea (Pangea Brewing Co.)



Figura 15. Etiquetas de cerveza con el tema Pangea, el supercontinente que existió desde el Carbonífero medio hasta el Jurásico (335 millones de años)

Otras etiquetas habituales dentro de esta categoría se inspiran en estructuras geológicas como fallas y pliegues, y en fenómenos sísmicos como terremotos y tsunamis, vinculados al movimiento de fallas y placas tectónicas. Estas referencias se emplean para comunicar ideas de energía, tensión y cambios repentinos.

Las etiquetas de Brasserie l'Origine du Monde se inspiran en la estructura interna de la Tierra y en los procesos geodinámicos. Sus diseños son simples y conceptuales, con referencias a capas, límites geológicos y pliegues como anticlinales y sinclinales, representados mediante formas geométricas y colores sobrios. Más que ilustraciones realistas, utilizan un estilo abstracto que remite al origen y a los procesos internos del planeta. Este enfoque aporta una identidad clara y coherente, que asocia la cerveza con ideas de profundidad, naturaleza y conocimiento científico de forma accesible.

Entre los ejemplos más conocidos se encuentran las cervezas Fault Line, Megathrust, Seismic, Balcones Fault y Seismic Sue; las variedades Earthquake Ale y Seismic Ale de la San Andreas Brewing Co.; Earthquake Lager (Drink Four Brewing Co.); Tremor (Seismic Brewing Co.) y AfterShock (Palmetto Brewing Company). Hasta una cervecería artesanal ubicada en California, EE. UU, especializada en la producción de cervezas artesanales con sabores únicos lleva como nombre Aftershock Brewing Company.



Figura 16. Etiquetas de cerveza que hacen referencia o ilustran fallas y estructuras geológicas.

La cerveza Balcones Fault-Red Granite hace alusión al sistema de falla de Balcones (Balcones Fault Zone) importante zona geológica de fallas normales que se extiende unas 450 millas en sentido SO-NE en la zona centro-suroeste de Texas.

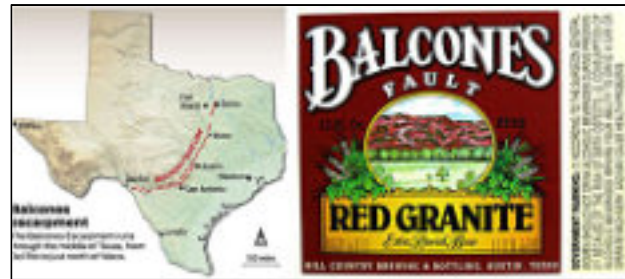


Figura 17. La cerveza Balcones Fault-Red Granite hace alusión al sistema de fallas de Balcones (Balcones Fault Zone) que cruza el centro de Texas en sentido SO-NE.

Dentro de este grupo también son frecuentes las etiquetas que utilizan el término Tsunami como nombre de la cerveza en distintas cervecerías (Four Elements Brewing, Pelican Brewing, Toppling Goliath, Windswept Brewing, 49th State Brewing, Hilo Brewing Co.).

En mayo de 2020, la cervecería chilena Kunstmann lanzó la cerveza "1960" en homenaje al terremoto y maremoto de Valdivia del 22 de mayo de 1960, el más intenso registrado a nivel mundial (magnitud 9.4-9.6). Esta edición especial estableció una analogía entre ese evento histórico y la pandemia de COVID-19, destacando la resiliencia de la comunidad local.



Figura 18. La cerveza Balcones Fault-Red Granite hace alusión al sistema de fallas de Balcones (Balcones Fault Zone) que cruza el centro de Texas en sentido SO-NE.

Las etiquetas de las cervezas de Seismic Brewing Co. (California) están claramente basadas en conceptos geológicos y sísmicos, combinados con referencias al paisaje local. Nombres como Alluvium, Liquefaction y Namazu aluden de forma directa a fenómenos vinculados a los terremotos, como los depósitos aluviales, la licuefacción de suelos y la mitología japonesa representada por el pez Namazu. El diseño gráfico es moderno y atractivo, con el uso de colores naturales y texturas que evocan paisajes modelados por las fuerzas internas de la Tierra. Además, las ilustraciones de árboles, flujos, ondas y animales simbólicos refuerzan

visualmente las ideas de movimiento, inestabilidad y transformación.



Figura 19. Las etiquetas de Seismic Brewing Co. hacen referencia directa a fenómenos asociados a los terremotos, como los depósitos aluviales y la licuefacción de suelos, así como al pez Namazu, un siluro gigante de la mitología japonesa que, según la tradición, habita en las profundidades y cuyos movimientos provocan los sismos.

En todos los casos referidos, los nombres y diseños aluden directamente a la geodinámica terrestre y a sus procesos de mayor intensidad. Aunque elaboradas por cervecerías distintas, estas cervezas comparten un mismo enfoque descriptivo, que vincula el producto con la dinámica del planeta y con fenómenos naturales de gran escala.

**Geomorfología y paisaje**

Esta categoría reúne etiquetas de cerveza que hacen referencia a las formas del relieve y a los paisajes naturales modelados por procesos geológicos y climáticos. Incluye montañas, valles, ríos, lagos, costas y sistemas fluviales, cañones, desiertos o glaciares utilizados como recursos visuales y narrativos para destacar el origen territorial, la relación con el entorno y la presencia del agua como elemento fundamental en la elaboración de la cerveza

**a) Sistemas fluviales y lacustres**

Incluye referencias a ríos, lagos, cascadas, deltas y redes de drenaje. Se utilizan para evocar fluidez, frescura y el papel central del agua superficial en la elaboración de la cerveza. El diseño de las etiquetas suele referirse a ríos o lagos importantes de la región.

Ejemplos de etiquetas con nombres o imágenes relacionadas a esta categoría son: Cascade, Braided River, Wild River, Great Lakes, Lake Effect, Laguna.

**b) Formas costeras**

Abarca bahías, costas, acantilados y ambientes litorales. Estas referencias suelen asociarse al paisaje marítimo, al clima y a la identidad local.

Dentro de la categoría se identificaron nombres como: Two Bays, The Abyss, Big Wave, Arrecifes.

**c) Montañas y Cordilleras**

Comprende montañas, cordilleras, sierras, picos y crestas. Simbolizan solidez, altura y carácter, y se emplean con frecuencia para destacar identidad regional o un origen ligado a zonas montañosas. Evocan distintos aspectos de la morfología y de la geodinámica terrestre.

Las etiquetas de Alpen Beer utilizan paisajes alpinos como eje visual para transmitir origen, naturaleza y tradición. A través de imágenes de picos elevados, valles, lagos y praderas, cada cerveza se vincula a entornos naturales de montaña claramente reconocibles. Los nombres de las variedades (Pale Ale, Tyrol, Premium Pils, Weizen, Roggen) refuerzan esta conexión y asocian cada estilo de cerveza con regiones y paisajes alpinos específicos.

Las cervezas Powder Buoy (Pilsner), Silver Creekwater (Amber Lager) y Gold Town (Pale Ale) de Park City Brewing (Utah, USA) incluyen etiquetas y denominaciones que remiten al entorno montañoso de la región.

Otros ejemplos de la categoría son: Kilimanjaro, Sierra, Sierra Nevada, Matterhorn, The Ridge, Páramo, Castle Rock, La Montaña, Aconcagua, Mountain Beer, Mountain Beach, Mountain Time, Big Mountain, Outer Range

**d) Grandes paisajes y relieves singulares**

Incluye cañones, planicies extensas, desiertos o terrenos áridos y otros paisajes emblemáticos de gran escala como los glaciares. Estas referencias evocan amplitud, profundidad y singularidad geomorfológica.

Las etiquetas de Golden Ale de Uinta Brewing Co. muestran paisajes emblemáticos del oeste de Estados Unidos, como montañas y formaciones rocosas icónicas. Este enfoque gráfico refuerza la identidad de la cerveza al asociarla de manera directa con el paisaje, la naturaleza y el territorio.

La Pulpit Rock Brewing Company, americana de raíces noruegas, muestra en las etiquetas de sus cervezas artesanales una fuerte identidad gráfica basada en paisajes y formas geomorfológicas mediante

ilustraciones simples de cañones, valles incisos, estratos, acantilados y cursos de agua, y una paleta de colores sobria, sencilla y natural. El nombre de la cervecería se inspira en el icónico Preikestolen de Noruega, un impresionante acantilado de 604 metros que se eleva sobre el fiordo Lysefjord (<https://larsidar.substack.com/p/a-brewery-with-roots-in-norway-and>)



Figura 20. Las cervezas de Pulpit Rock Brewing Company, muestran en sus etiquetas ilustraciones de paisajes y formas geomorfológicas como cañones, valles incisos, estratos, cursos de agua y acantilados, entre ellos, el icónico e impresionante Preikestolen (Pulpit Rock), de 604 metros que se eleva sobre el fiordo Lysefjord en Noruega.

Algunos otros ejemplos identificados en la categoría son: Grand Canyon, Salt Flats, Mississippi Muds, Mud Pies, Glaciar

**e) Pendientes y Topografía**

Reúne nombres que aluden a inclinaciones, desniveles y rasgos topográficos generales, utilizados como metáforas de movimiento y dinamismo. Puede hacer referencia a grandes paisajes icónicos que evoquen profundidad, pendiente y amplitud del relieve. referencia a grandes paisajes icónicos que evoquen profundidad, pendiente y amplitud del relieve.

La cerveza Malacatí de Cervezas Victoria presenta una etiqueta inspirada en el icónico Caminito del Rey, con la imagen de una escaladora en el Desfiladero de los Gaitanes. La etiqueta es la imagen de una chica escalando en el Desfiladero de los Gaitanes con el puente colgante del Caminito del Rey al fondo. El diseño refuerza la identidad local del producto y su vínculo con uno de los paisajes más emblemáticos de Málaga (España).

Otros ejemplos conocidos son: Slope, UpSlope, Steep Slope, Slipery Slope, Steep Hill, Over the Hill, Incline Imperial.

**Geología**

**a) Geología y Terminología Geocientífica.**

Algunas cervecerías incorporan referencias explícitas a conceptos geológicos y emplean terminología geológica

directa como Hutton & Smith, Great Basin, Braided River, Lithology, Thin Section, Hiautus, Strata, Geo, Plankton y Minera, Field Assistant. En estos casos, la geología no solo funciona como inspiración estética, sino que forma parte central de la identidad de marca.

James Hutton y William “Strata” Smith son figuras clave de la geología moderna. Hutton introdujo la idea de tiempo geológico o tiempo profundo, fundamental para entender la historia de la Tierra, mientras que Smith realizó el primer mapa geológico, sentando las bases de la geología aplicada.

La cervecería Hutton & Smith Brewing Co. toma su nombre como homenaje a estos pioneros, vinculando la geología con la identidad de la marca cervecera. Además, entre sus cervezas se distinguen estos nombres: Igneous, Minerallite, Tectonic Session, The Good Schist, Strata y Fool’s Pyrite.



Figura 21. Etiquetas de cervezas artesanales que incorporan referencias explícitas a geólogos, conceptos geológicos o terminología geológica.

Destaca el caso de la Geological Society of America (GSA) quien en 2013 conmemoró su 125º aniversario con una cerveza especial elaborada junto a Left Hand Brewing Company. La Field Assistant Ale rinde homenaje al trabajo de campo en geología y a la figura del asistente, común a todas las especialidades, por lo que no se asocia a un tema geológico específico, sino a la práctica profesional en su conjunto.



Figura 22. La cerveza Field Assistant Ale, edición conmemorativa de la GSA, rinde homenaje a la figura del asistente de trabajo, especialmente al asistente de campo en geología.

**b) Referencias científicas y conceptuales generales.**

Nombres como Schiehallion, Evolution, Darwin’s Origin, Darwin y Darwin 1959 (Santa Cruz Brewery) se inscriben en un registro más amplio de divulgación científica, donde la geología y la historia natural funcionan como marco cultural y simbólico, sin aludir necesariamente a un proceso o forma geológica concreta. En este tipo de etiquetas, la geología deja de representarse de forma literal y se reinterpreta de forma alegórica.

La cerveza Schiehallion (Harviestoun Brewery) se vincula directamente con el experimento gravitacional realizado en esa montaña en 1774. Al tomar su nombre del Schiehallion, la cerveza evoca el lugar donde Hutton y Maskelyne demostraron que una masa rocosa podía desviar una plomada y permitir la estimación de la densidad y masa de la Tierra, confirmando las ideas de Newton. Schiehallion (1083 msnm) se consideraba la montaña ideal debido a su aislamiento y forma casi simétrica.



Figura 23. Etiqueta de la cerveza “Schiehallion”, inspirada en el monte Schiehallion (Escocia), escenario del experimento de Hutton y Maskelyne que permitió estimar la densidad de la Tierra y confirmar las ideas de Newton.

En el contexto cervecero, Darwin es utilizado para legitimar intelectual y culturalmente el producto, asociándolo con curiosidad, exploración, conocimiento y espíritu crítico. A diferencia de etiquetas geológicas que representan rocas, fallas o fósiles concretos, estas referencias son conceptuales y simbólicas, encuadrables dentro de una categoría genérica de ciencia, evolución y naturaleza.

Curious Mary DIPA es una cerveza de edición limitada, elaborada en colaboración con Mary Anning Rocks, una iniciativa que homenajea a Mary Anning, pionera de la paleontología. La cerveza y su etiqueta celebran su legado científico y la reciente inauguración de su estatua en Lyme Regis, reconociendo su aporte fundamental al estudio de los fósiles y su inspiración para las nuevas generaciones de científicos



Figura 24. Etiqueta de la cerveza “Curious Mary”, de edición limitada, elaborada en homenaje a Mary Anning, pionera de la paleontología mundial.

**Misceláneos**

**a) Latitud y posición geográfica.**

Nombres como Geography, The Map, Latitud Cero y Polar hacen referencia a coordenadas y extremos geográficos, evocando ideas de ubicación, clima y singularidad ambiental, más que a procesos geológicos específicos.

En las etiquetas de cervezas artesanales, los mapas simbolizan el origen y el vínculo con el territorio. También evocan ideas de exploración, conocimiento y leyenda, especialmente cuando incorporan referencias geográficas o geológicas.

**b) Fenómenos naturales y eventos.**

Algunas denominaciones hacen referencia a fenómenos naturales o astronómicos, como Sol, Estrella, Satellite, Meteor, Avalancha y Storm, que sugieren fuerza y movimiento y se reflejan de manera clara en el diseño de las etiquetas.

**CONCLUSIONES**

El etiquetado geológico en cervezas artesanales constituye un fenómeno cultural que trasciende el diseño gráfico. Mediante imágenes, nombres y referencias temáticas, la geología se vuelve accesible al público general y se integra a relatos sobre el origen, la identidad y el carácter de cada cerveza, funcionando como un recurso cotidiano y fácilmente comprensible.

Los casos analizados muestran que las referencias geológicas abarcan un amplio espectro, desde representaciones técnicamente precisas hasta usos más simbólicos y expresivos. Esta variedad permite adaptar los mensajes a distintos públicos y combinar contenidos científicos con estrategias visuales y narrativas atractivas.

Asimismo, se observan diferentes niveles de rigor conceptual. Mientras algunas etiquetas presentan conceptos geológicos correctamente aplicados, otras los reinterpretan de manera más libre y creativa. Esto refuerza el valor del etiquetado como un espacio de encuentro entre geología, diseño y cultura cervecera, y destaca su potencial para comunicar el conocimiento científico de forma clara, accesible y contextualizada.

Se encontró que las etiquetas más dominantes son las referidas a fósiles, principalmente dinosaurios y amonites, las asociadas a tectónica y vulcanismo y las inspiradas en paisajes geográficos.

#### DECLARACIÓN SOBRE EL USO DE IMÁGENES

Las ilustraciones incorporadas en este documento tienen una función estrictamente informativa. Todas pertenecen a sus respectivos autores, cervecerías o diseñadores. Este trabajo no reclama propiedad intelectual sobre ellas y su uso se limita al análisis crítico y académico, sin fines comerciales.

#### REFERENCIAS

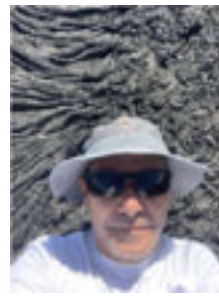
- Blair J. (2017) I Tried It: 45 Million-Year-Old Yeast Beer. Under the Jenfluence (<https://underthejenfluence.beer/urcontent/2017/3/6/i-tried-it-45-million-year-old-yeast-beer>)
- Chamlee V. (2016). Craft Beer Made With Prehistoric Yeast Is T-Rex Approved, Posted Aug 23, 2016, 4:30 PM GMT-3 (<https://www.eater.com/2016/8/23/12608902/beer-45-million-year-old-yeast-fossil-fuels-brewing>)
- Craft Beer (<https://www.craftbeer.com>)
- Danson, E., 2009. Weighing the world: The quest to measure the Earth.
- Eaton Susan R. (2009). Shale Ale' Offers Toast to Burgess ... and a 'Huzzah' to Walcott, too. AAPG Explorer Article
- Losekoot A. (2022-2023) Geology and Beer or How a good story is always within reach / Research Methods and Transferable Skills (2022-2023)[SEM1] RMTS Blog, The University of Edinburgh. ([https://blogs.ed.ac.uk/s1828351\\_research-methods-and-transferable-skills-2022-2023sem1/2022/12/02/the-geology-of-beers-or-how-i-needed-one-last-blog-and-drew-inspiration-from-what-was-in-my-hand/](https://blogs.ed.ac.uk/s1828351_research-methods-and-transferable-skills-2022-2023sem1/2022/12/02/the-geology-of-beers-or-how-i-needed-one-last-blog-and-drew-inspiration-from-what-was-in-my-hand/))

Parker M. (2023) Limited Edition Young Henry's brew pouring at Sydney's Capella in posted in Beer & Cider, On-Premise, Aug. 2, 2023, (<https://www.drinkstrade.com.au/news/limited-edition-young-henrys-brew-pouring-at-sydneys-capella/>)

The Full Pint (2018) The "Science" Behind Beer Branding (<https://thefullpint.com/sponsored/science-behind-beer-branding/>)

Untappd Website (<https://untappd.com/>)

#### SOBRE EL AUTOR:



Jesús S. PORRAS M. es Ingeniero Geólogo de la Universidad de Oriente con Maestría en Ciencias Geológicas de la Universidad Central de Venezuela.

Posee amplia experiencia profesional en la industria petrolera donde ha desempeñado

diversos cargos en proyectos tanto de exploración como de desarrollo de reservorios convencionales y no convencionales.

Actualmente se desempeña como Geólogo Consultor Senior liderando grupos de estudios integrados de yacimientos para operadoras nacionales e internacionales.

Tiene particular interés en temas de patrimonio geológico, geodiversidad y geoconservación, comunicación en geociencias, geología urbana y geoturismo.

Es miembro activo de diversas asociaciones profesionales y autor o coautor de más de 70 trabajos presentados en diferentes congresos geológicos nacionales e internacionales, simposios y revistas técnicas.

## On Using Google Products for Geologic Remote Sensing

Gary L. Prost\*

#### Abstract

Google Maps, Google Earth, and Google Street View freely provide imagery to anyone with access to the internet. These platforms provide the ability to zoom and pan, create oblique views, rotate the view direction, and to 'fly' over a landscape using nothing more than a basic pc or tablet. Most of these functions were time-consuming and expensive remote sensing applications not that long ago.

Google images can be used to determine access, map geology, map surface change, illustrate concepts, provide modern analogs for ancient geologic settings, measure distances, areas, and circumferences, and can establish scales for images and maps. This represents a sea change in the technology available and cost to the geologic community and general public.

#### Resumen

Google Maps, Google Earth, y Google Street View Proporcionan imágenes de forma gratuita a cualquier persona con acceso a Internet. Estas plataformas brindan la capacidad de hacer zoom y panorámicas, crear vistas oblicuas, rotar la dirección de la vista y "volar" sobre un paisaje usando nada más que una PC o tableta básica. La mayoría de estas funciones eran aplicaciones de teledetección costosas y que consumían mucho tiempo no hace mucho tiempo.

Las imágenes de Google se pueden utilizar para determinar el acceso, cartografiar la geología, y cambios de superficie, ilustrar conceptos, proporcionar análogos modernos para ambientes geológicos antiguos, medir distancias, áreas y circunferencias, y puede establecer escalas para imágenes y mapas. Esto representa un cambio radical en la tecnología disponible y el costo para la comunidad geológica y el público en general.

#### Introduction

Back in the old days, say 15 years ago, a remote sensing expert required a dedicated computer and expensive software to process imagery that was available to the public from limited sources like the US Geological Survey, NASA, the European Space Agency, SPOT Image, or the Russians linking imagery to geographic coordinates and linking imagery to geographic coordinates and Topography was highly specialized, and extracting geospatial information such as distances between objects or area calculations took some effort. Draping an image over topography and creating oblique views was time-consuming and expensive, thus limiting the number of views available. Image resolution available to the public was on the order of several meters to hundreds of meters (Prost, 2014).

With the introduction of Google Maps (2005), Street View (2007), and Google Earth (2010) over the past decade all that has changed. Full disclosure: I have no financial interest in Google; neither I nor anyone in my family works for Google; and I am not promoting the use of Google or their products. Using a desktop, laptop, or tablet computer with internet access you now have available high-resolution (15 m to 15 cm) imagery from around the world, at multiple dates, can zoom in to sub-meter resolution or out to continent-scale, can view from any elevation, inclination angle, or compass direction, can effortlessly view imagery in 3D and rotate the image in real-time, can superimpose rivers, landmarks, roads, and

\* G.L. Prost GeoConsulting, El Cerrito, California; [www.garyprostgeology.com](http://www.garyprostgeology.com)

political boundaries, and can search for places and extract the location as latitude-longitude and elevation instantaneously. You can determine the difference in elevation between locations, measure the distance between points, and calculate the area and circumference of an object. Once at a location you can view photos others have taken there, see what hotels, restaurants, and gas stations are nearby, and in most parts of the world you can view outcrops and road signs along all major and many minor roads. Whereas these products may have been intended for the real estate or tourism industries, they have been an unqualified boon to geologists as well. Some of the key uses for these products in the field of geology are reviewed.

### Access and Logistics

Preparing for field mapping is often more than half the battle. It can save you time (and money) in the field by focusing on areas of interest, reveal previously unknown significant areas, and help plan access and logistics. In fact, you can begin mapping before going to the field, and spend field time confirming your work rather than starting from scratch.

Google Maps (<https://www.google.com/maps/>) provides vertical imagery and corresponding base maps at multiple scales. These maps show roads and towns, as well as tourist stops and infrastructure (hotels, gas stations, restaurants). You can quickly determine the distance between locations in mi or km and the average time to travel this distance. You can use the “Measure Distance” feature to determine the distance between points not on regular roads, for example, along trails or between outcrops. While there are other programs, such as Apple Maps, that do similar things, Google has set the standard for this type of mapping.

Geologic mapping projects can take advantage of vertical images to plot geology directly on the imagery. You can “drive” the program along roads using Street View and check out roadcuts and outcrops, determine what can be seen from the road, and assess the condition of the road (for example, will 4WD be required). Click on a point to get the latitude and longitude location, then right-click and select ‘measure distance’ to begin measuring the distance from this point to another.

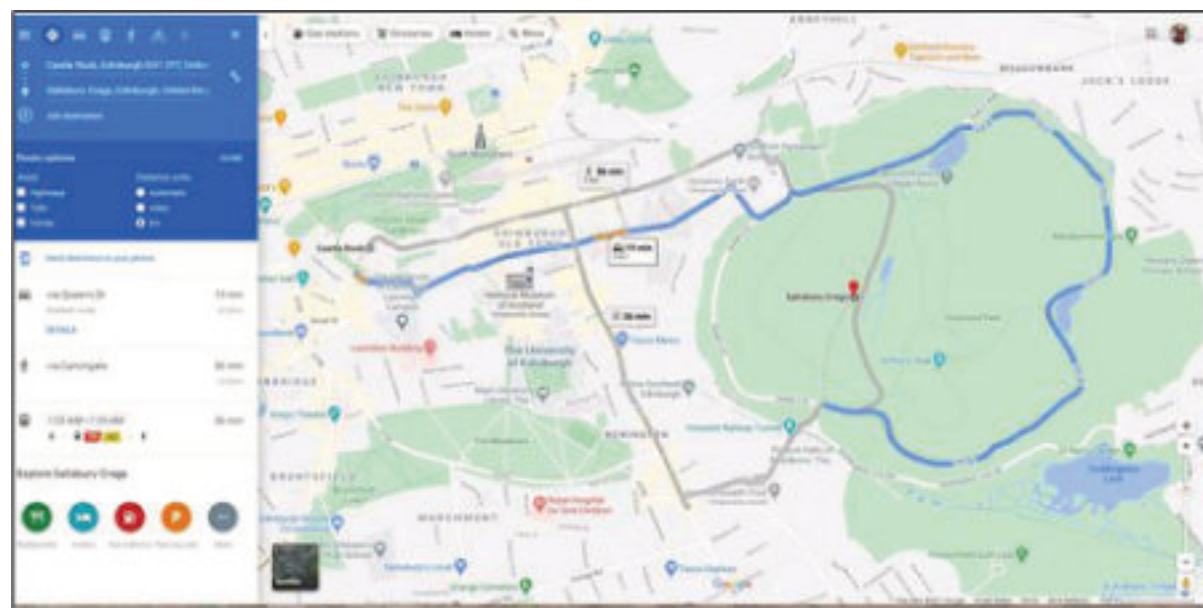


Fig 1. Google Maps base maps show roads, water features, and cultural features. Distance and time between multiple points are easily determined. Detailed driving directions are provided. This map shows

central Edinburgh, Scotland, and the driving options for getting from Edinburgh Rock (Edinburgh Castle) to Salisbury Crags.



Fig 2. Google Maps image map of central Edinburgh, Scotland. Imagery ©2021 CNES/Airbus, Getmapping plc, Infoterra Ltd & Bluesky, Maxar Technologies, The Information Group. Map data ©2021 Google.

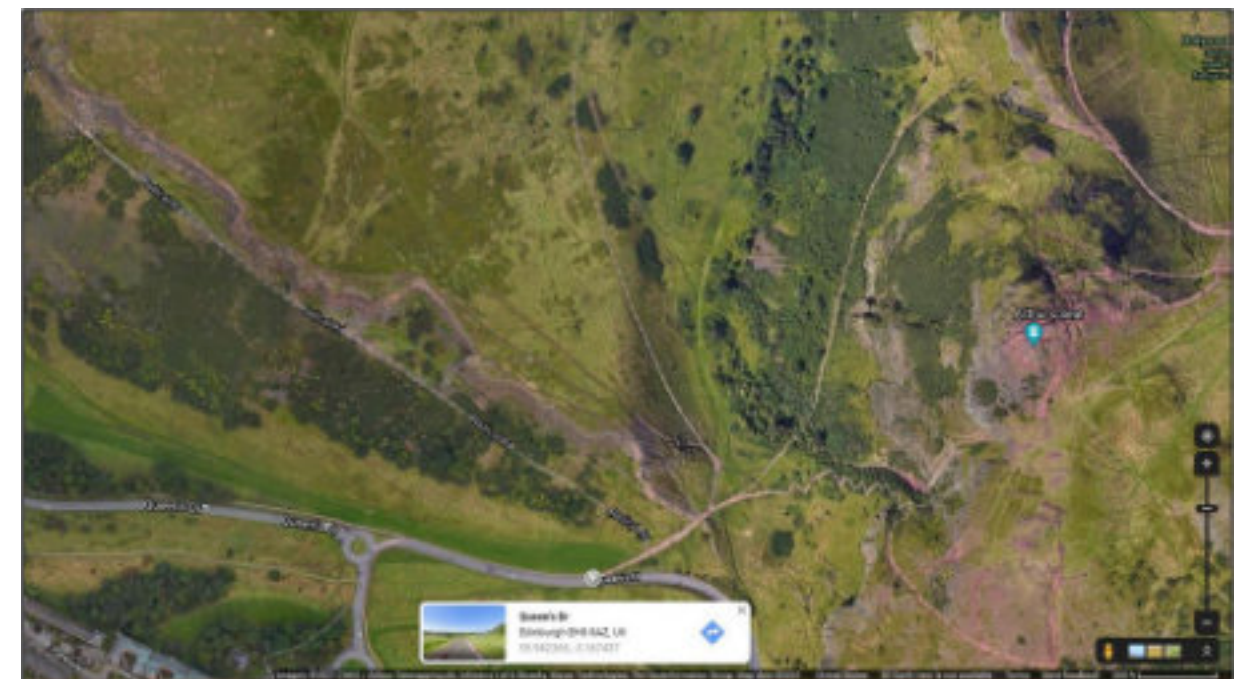


Fig 3. Google Maps image of Salisbury Crags and Street View (and latitude-longitude) at the Arthur's Seat trail head. Imagery ©2021 CNES/Airbus, Getmapping plc, Infoterra Ltd & Bluesky, Maxar Technologies, The Information Group. Map data ©2021 Google.



Fig 4. Street View west from Arthur's Seat trail head. Outcrops are Salisbury Crags. Street View ©2021 Google.



Fig 6. Distance along trail to Arthur's Seat. Imagery ©2021 CNES/Airbus, Getmapping plc, Infoterra Ltd & Bluesky, Maxar Technologies, The Information Group. Map data ©2021 Google.



Fig 5. Click on a point and right-click "Measure Distance" to determine the distance along the trail to Arthur's Seat. Imagery ©2021 CNES/Airbus, Getmapping plc, Infoterra Ltd & Bluesky, Maxar Technologies, The Information Group. Map data ©2021 Google.

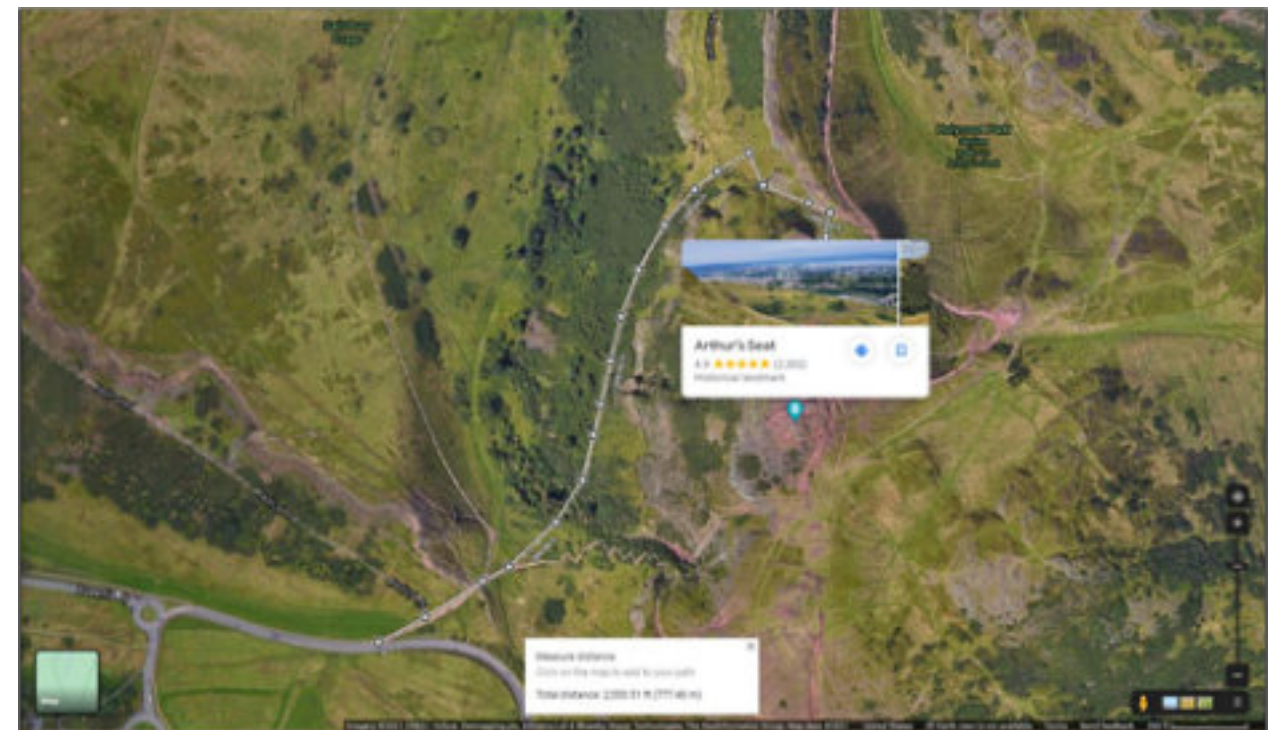


Fig 7. Pulling up field photographs linked to Arthur's Seat. Imagery ©2021 CNES/Airbus, Getmapping plc, Infoterra Ltd & Bluesky, Maxar Technologies, The Information Group. Map data ©2021 Google.



Fig 8. Street View west from Arthur's Seat. This is a rare case where Street View is along a trail. Street View ©2021 Google.

Google Earth, a (so far) free download for individual users, has many of these abilities and more (<https://www.google.com/earth/>). In addition to the vertical view at multiple scales, you can create an oblique view at any inclination or azimuth and zoom in or pan out to change scales. You can change the date of the imagery, or apply shadows to approximate different times of day.



Fig 9. Google Earth oblique view south along the Atacama Fault (arrows) east of Antofagasta, Chile. Imagery ©2020 Maxar Technologies, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO, Landsat/Copernicus. Map data ©2021 Google.



Fig 10. Google Maps vertical image showing access to where the Atacama Fault zone (arrows) crosses highway B-400 (star) east of Antofagasta, Chile. Imagery ©2020 Maxar Technologies, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO, Landsat/Copernicus. Map data ©2021 Google.



Fig 11. Access (blue) to Valle de la Luna from San Pedro de Atacama, Chile. Imagery ©2019 DigitalGlobe, CNES/Airbus. Map data ©2019 Google.

### Geologic Mapping

The ability to map structures including folds, faults, and fractures, is improved immensely by access to Google imagery. Low relief recent fault scarps are evident on the imagery from the Atacama Desert, Chile.

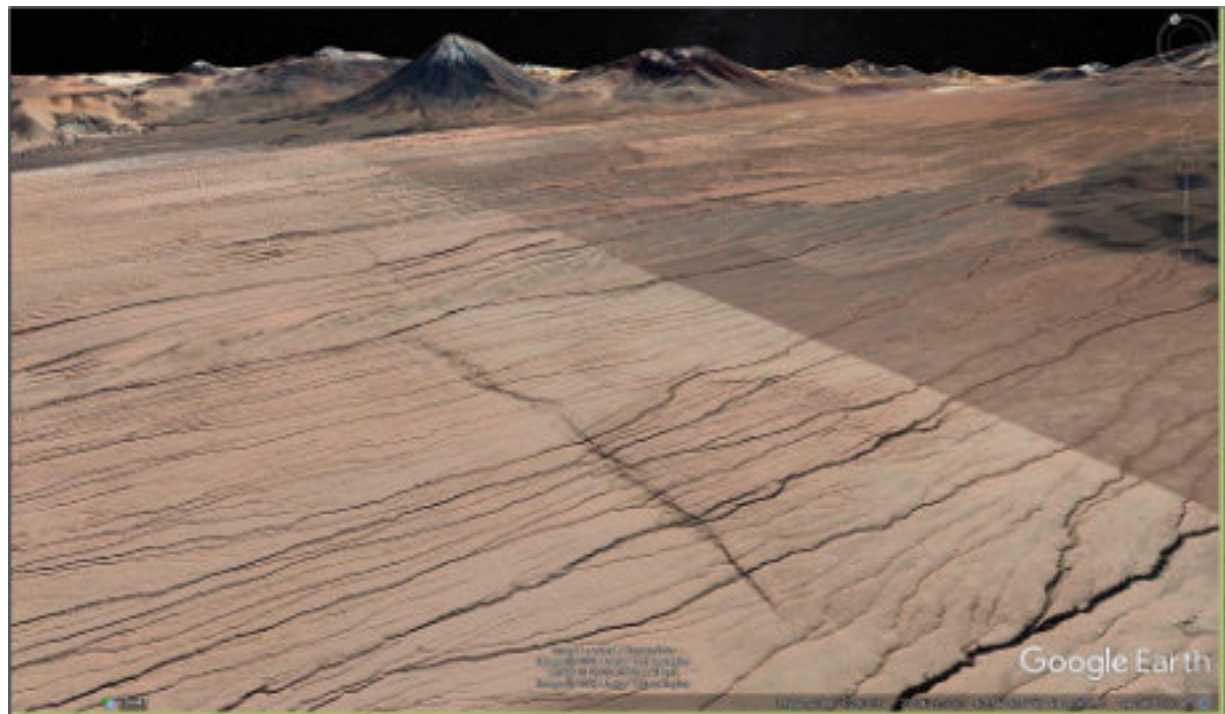


Fig 12. Google Earth oblique view north of recent normal fault scarp southeast of San Pedro de Atacama, Chile. Imagery ©2020 Landsat/Copernicus, Maxar Technologies, CNES/Airbus. Map data ©2020 Google.

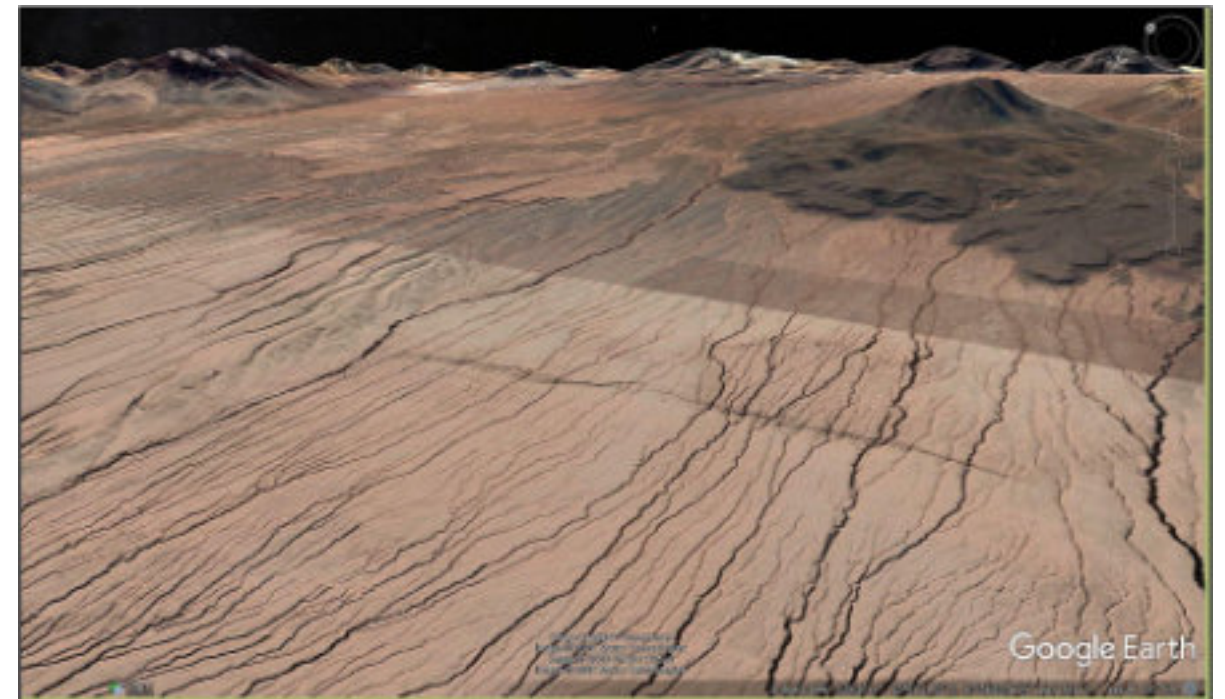


Fig 13. Google Earth oblique view northeast of fault scarp near San Pedro de Atacama. Imagery ©2020 Landsat/Copernicus, Maxar Technologies, CNES/Airbus. Map data ©2020 Google.

Jointing-influenced stream drainages are evident on this image from the Atacama Desert.



Fig 14. Fracture-controlled drainages east of Toconau, Chile. Imagery ©2020 CNES/Airbus. Map data ©2020 Google.

The ability to resolve dips, and thus determine thrust location and direction (and correct existing maps), is evident on the Google imagery below. Some existing maps show this as the southern extension of east-directed thrusting.



Fig 15. Discordant dips indicate the trace of the Capachica Thrust, northwest Lake Titicaca, Peru. Access along R-119 is shown (blue). Google Maps vertical image. Imagery ©2019 CNES/Airbus, Maxar Technologies, Landsat/Copernicus, U.S. Geological Survey. Map data ©2019 Google.



Fig 16. Google Earth oblique view south over the Capachica Thrust near Uquisilla, Peru. Imagery ©2019 CNES/Airbus, Maxar Technologies, Landsat/Copernicus, U.S. Geological Survey. Map data ©2019 Google.

It is not always entirely clear from vertical imagery what direction units are dipping, and sometimes dips appear to be contrary to mapped structure. For example, geologic maps show that the Vinicunca structure is a syncline (youngest units in the center). The ability to rotate an oblique view helps determine the inclination of strata, and these images clearly show the dips on the north flank are outward from the structure, suggesting it is an anticline. What's going on?

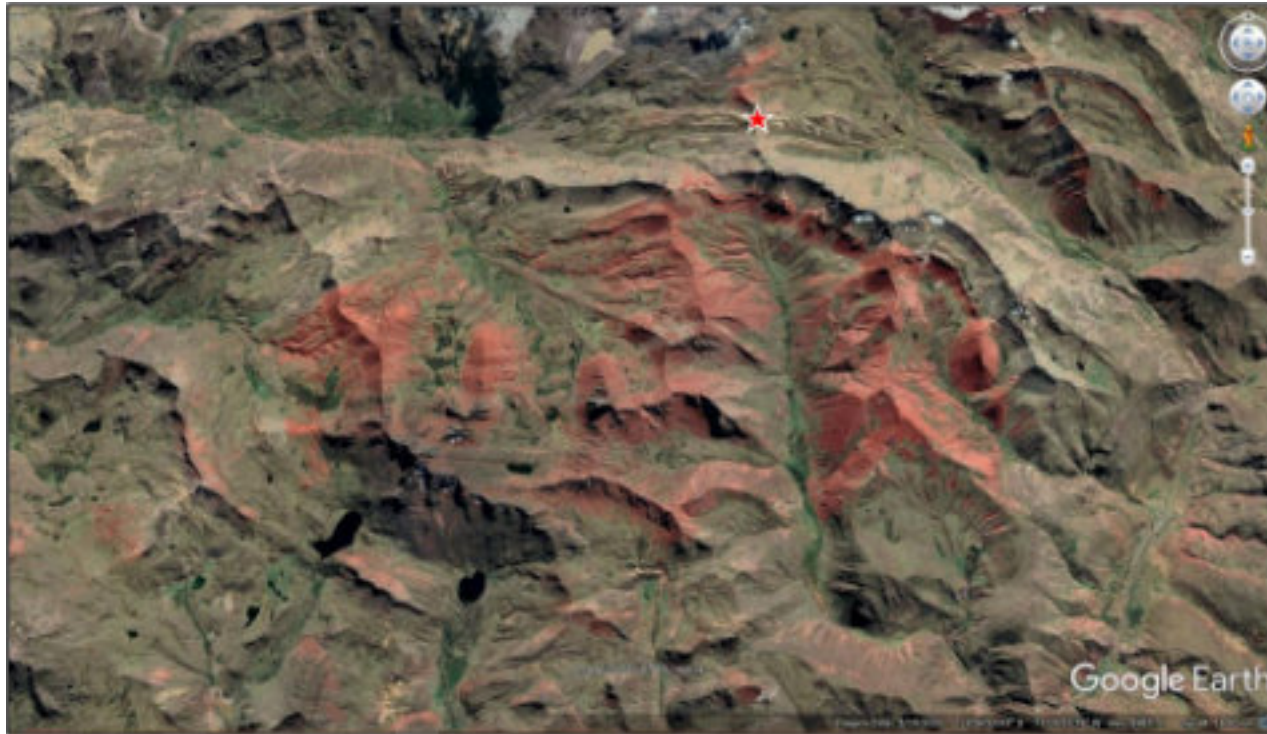


Fig 17. Is the area of red rock in this image an anticline or syncline? Rotating the view to determine dips may provide an answer. Vinicunca/Rainbow Mountain, Peru (star). Google Earth vertical image. Imagery ©2021 CNES/Airbus. Map data ©2021 Google.

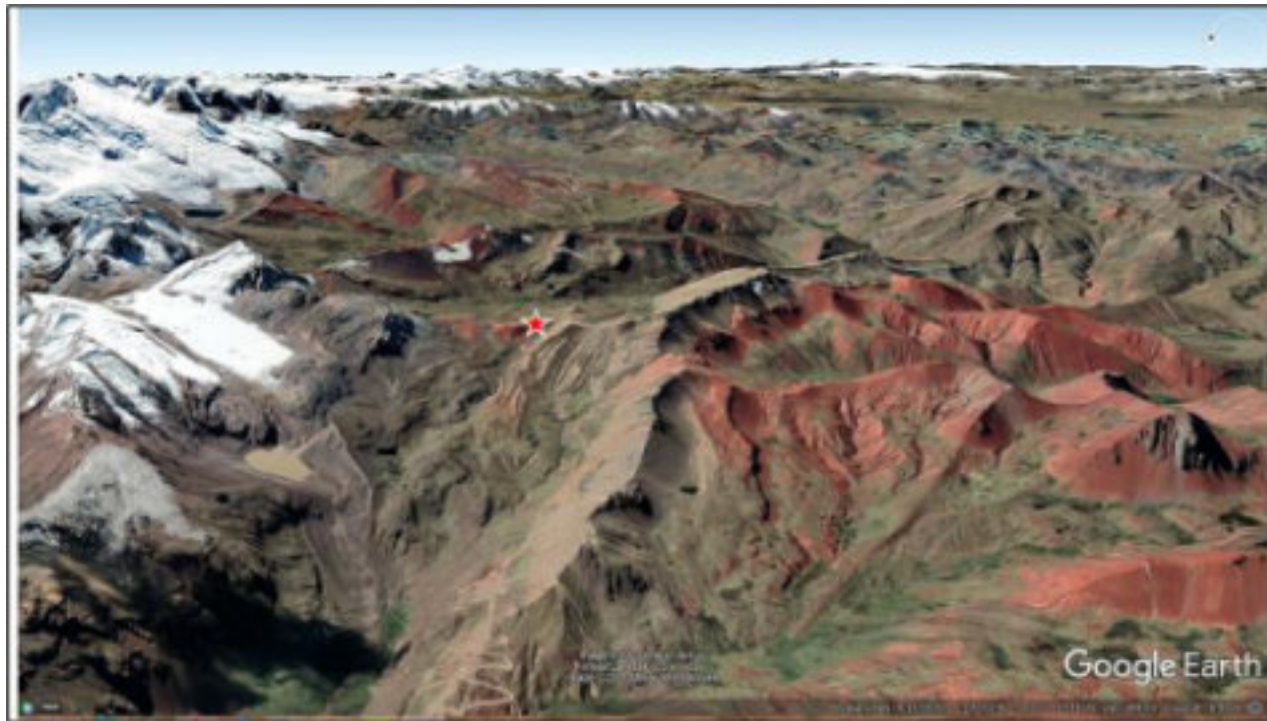


Fig 18. Google Earth oblique view east along the north flank of the structure. Google Earth vertical image. Imagery ©2021 CNES/Airbus. Map data ©2021 Google.

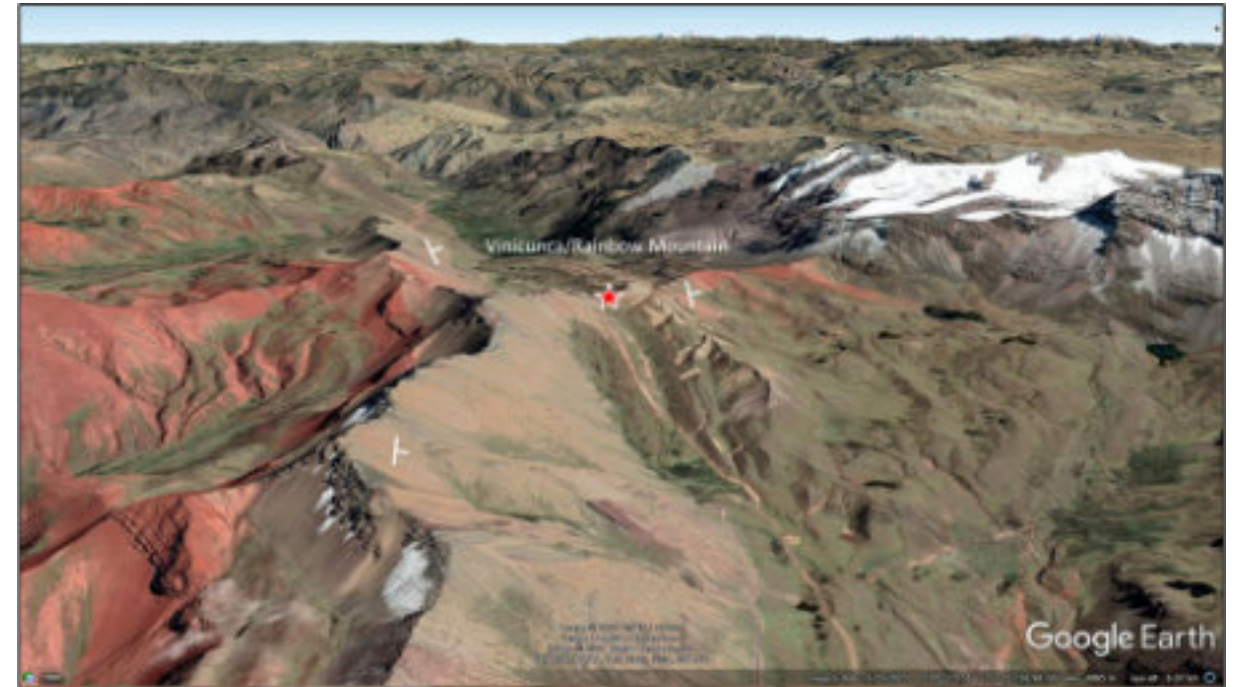


Fig 19. Google Earth oblique view west along the north flank of the structure. Dips are clearly to the north. Combining this information with stratigraphy shown on geologic maps provides one answer: the syncline is overturned to the south such that dips along the north flank are inclined to the north. Google Earth vertical image. Imagery ©2021 CNES/Airbus. Map data ©2021 Google.

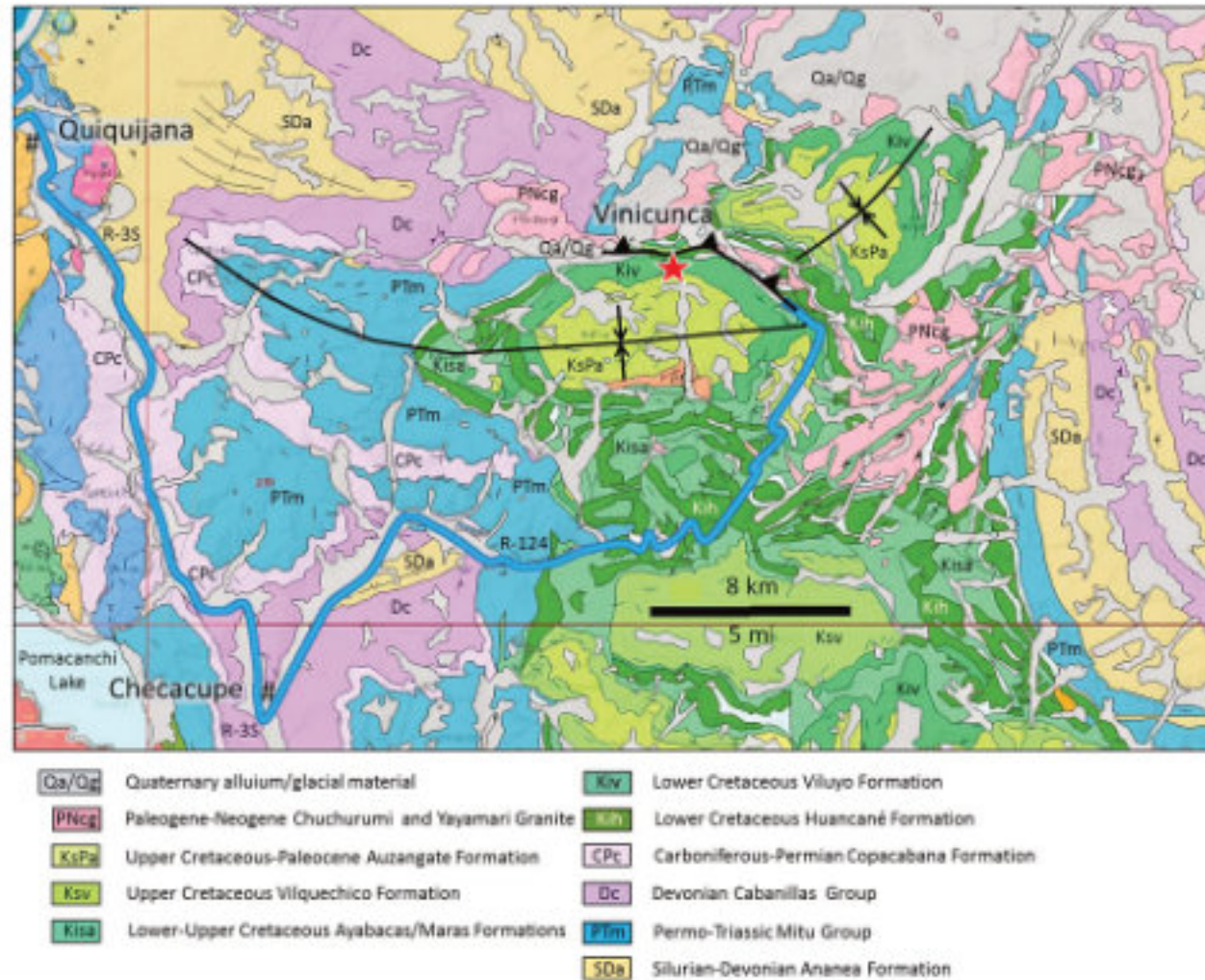


Fig 20. A portion of the geologic map of the Ocongate Quadrangle, Peru. The large structure is mapped as a syncline. Dip on imagery suggest it is verging to the south and that the north flank is overturned. The dip of units at Vinicunca (star) also suggest a south-directed thrust fault along the contact. © INGEMMET, 2017.

In another example west of Juliaca, Peru, complex subthrust deformation defined by low-relief ridges can be mapped based on oblique views of the dipping strata.

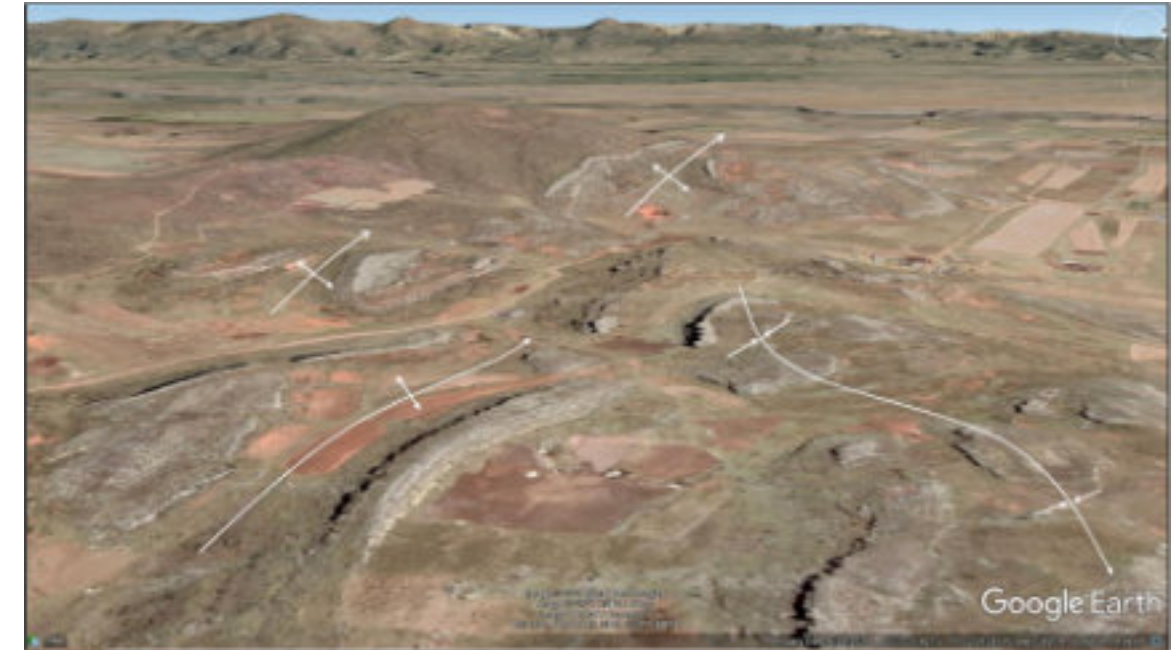


Fig 21. Folding west of Juliaca, Peru. Low-relief ridges are Lower Cretaceous Ayabacas Formation limestone. Google Earth oblique view west. Imagery ©2021 Maxar Technologies, CNES/Airbus, Landsat/Copernicus. Data ©2021 SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO, Google.

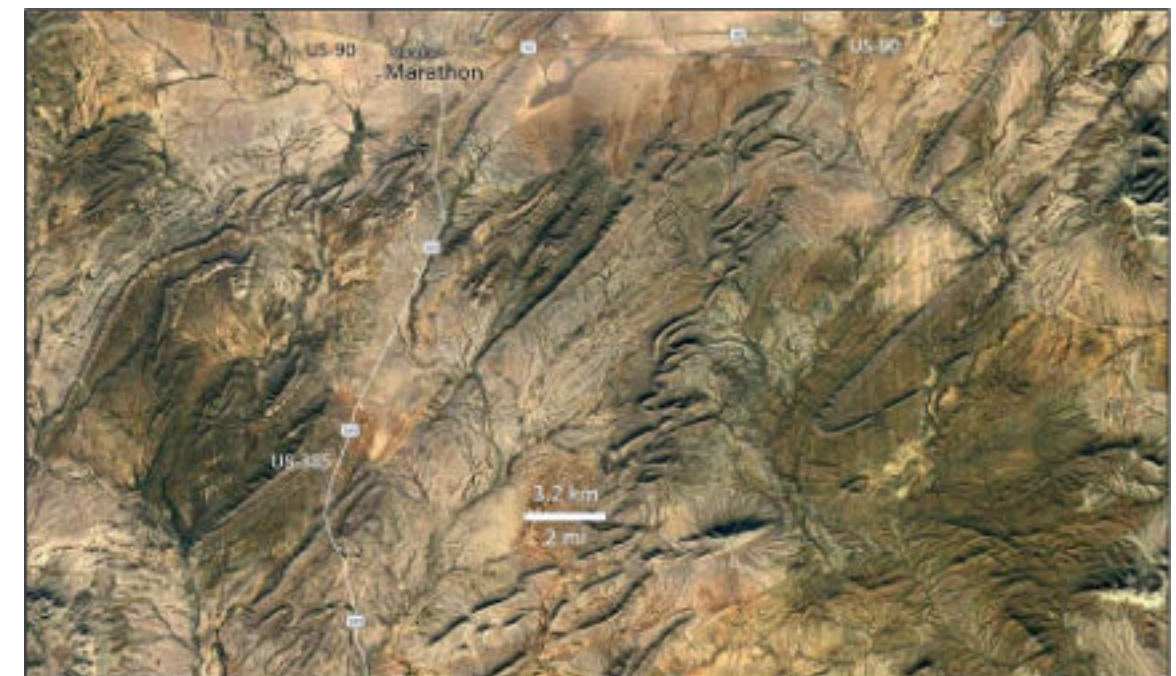


Fig 22. Google Earth vertical image of the Marathon Uplift, west Texas. Intense folding and thrusting associated with the Ouachita-Marathon Orogeny fold-thrust belt is exposed here. Imagery ©2021 TerraMetrics. Data ©2021 INEGI, Google.



Fig 23. Google Earth vertical image used to map glacial striations (arrows), Grand Teton National Park, Wyoming. Imagery © 2018 Google; Imagery © 2018 Landsat/Copernicus.



Fig 24. Google Earth oblique view south at Gros Ventre slide east of Jackson, Wyoming. Data © 2018 Google; Imagery © 2018 Landsat/Copernicus.

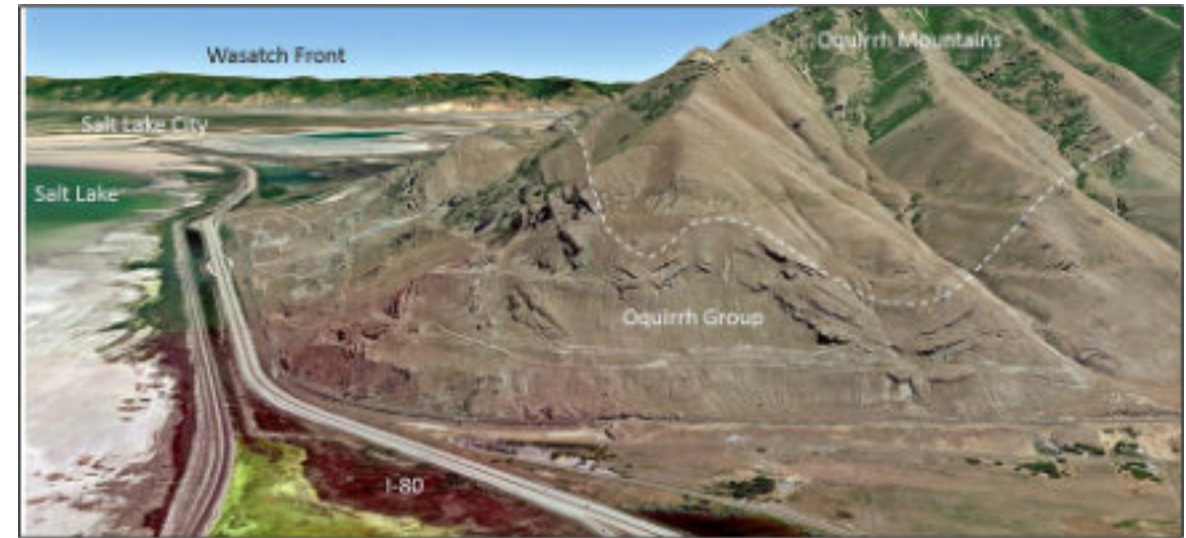


Fig 25. Folding in the northern Oquirrh Mountains west of Salt Lake, Utah, seen only because of the oblique view east. Google Earth. Data © 2018 Google; Imagery © 2018 Landsat/Copernicus.

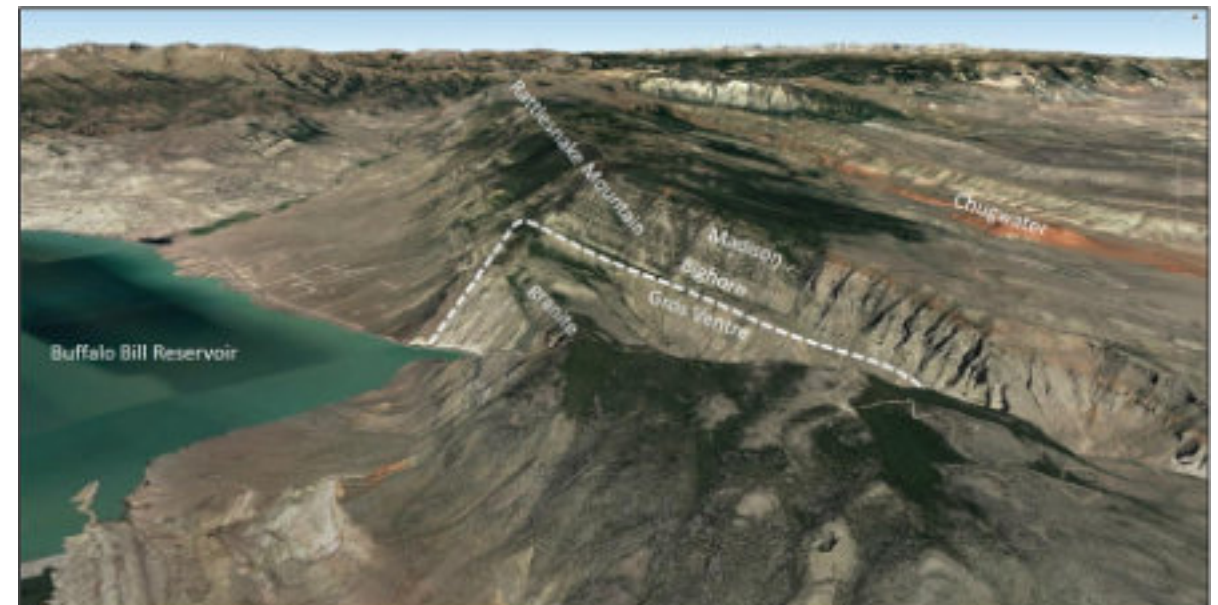


Fig 26. Rattlesnake Mountain Anticline west of Cody, Wyoming, seen on a Google Earth oblique view north. Data © 2018 Google; Imagery © 2018 Landsat/Copernicus; Imagery © 2019 Maxar Technologies.

### Mapping Change

Multitemporal imagery is useful for mapping geologic changes, in particular the results of floods, landslides, earthquakes, volcanic eruptions, tsunamis, and other catastrophic events.



Fig 27. Google Earth vertical image of the Oso slide area, Washington, 7/14/2013 (before the slide). Image © 2021 Landsat/Copernicus. © 2021 Google.



Fig 28. Google Earth vertical image of the Oso slide area, Washington, on 3/31/2014 (after the slide). Image © 2021 Landsat/Copernicus. © 2021 Google.



Fig 29. Banda Aceh on 6/22/2004 before the December 2004 tsunami. Google Earth vertical image. © 2021 Landsat/Copernicus, Maxar Technologies. © 2021 Google.

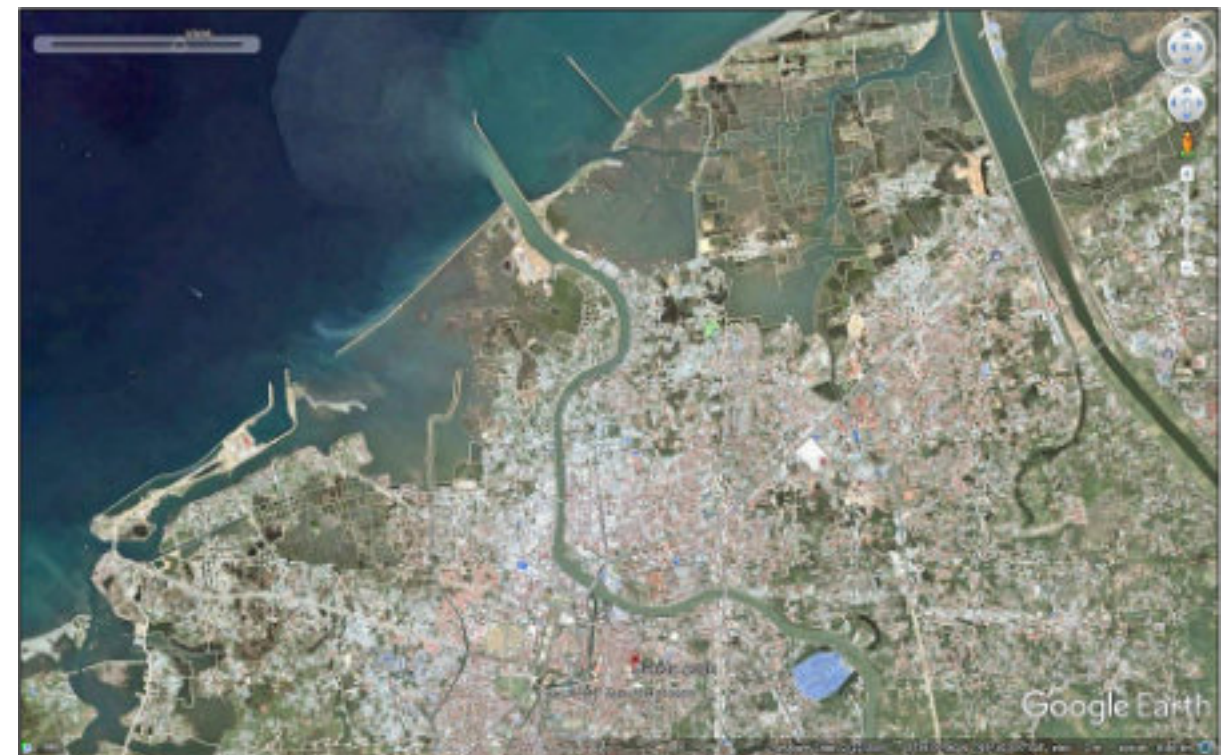


Fig 30. Banda Aceh on 2/22/2009, after the December 2004 tsunami. Google Earth vertical image. © 2021 Maxar Technologies. © 2021 Google.

### Low-Relief Features and Sun Shading

Low-relief features, especially structures, can be enhanced by applying the variable shadows feature in Google Earth.



Fig 31. Valle de Marte anticline, Google Earth oblique view north, 0325 hours. © 2021 Landsat/Copernicus, Maxar Technologies, U.S. Dept of State Geographer, CNES/Airbus. © 2021 Google.



Fig 32. Valle de Marte Anticline, Google Earth oblique view north, 1202 hours. © 2021 Landsat/Copernicus, Maxar Technologies, U.S. Dept of State Geographer, CNES/Airbus. © 2021 Google.

### Street View for Outcrops and Landscape Features

Street View can be used to confirm outcrops, map structures, find contacts, determine the dip of units, view landscapes, and find highway signs and parking areas.



Fig 33. Street View north at anticline-syncline pair exposed in a roadcut, US-48 at the Grant County line, Virginia. © 2019 Google Street View.



Fig 34. Volcan Licabur and highway sign, Atacama Desert, Chile. Street View north. © 2020 Google Street View.



Fig 35. Wave-cut terrace as seen from north of Ballantrae, Scotland. Google Street View north. © 2021 Google Street View.



Fig 36. Three Sisters in Glen Coe, Scotland. Street View south showing parking area and tourist display. © 2020 Google Street View.

#### Illustrating concepts

Imagery provides an excellent base for illustrating concepts or other not-easily described features. For example, the oblique image of Calgary, Alberta, provides a base to show the extent of the Laurentide Ice Sheet acting to dam the Bow River and forming glacial Lake Calgary.

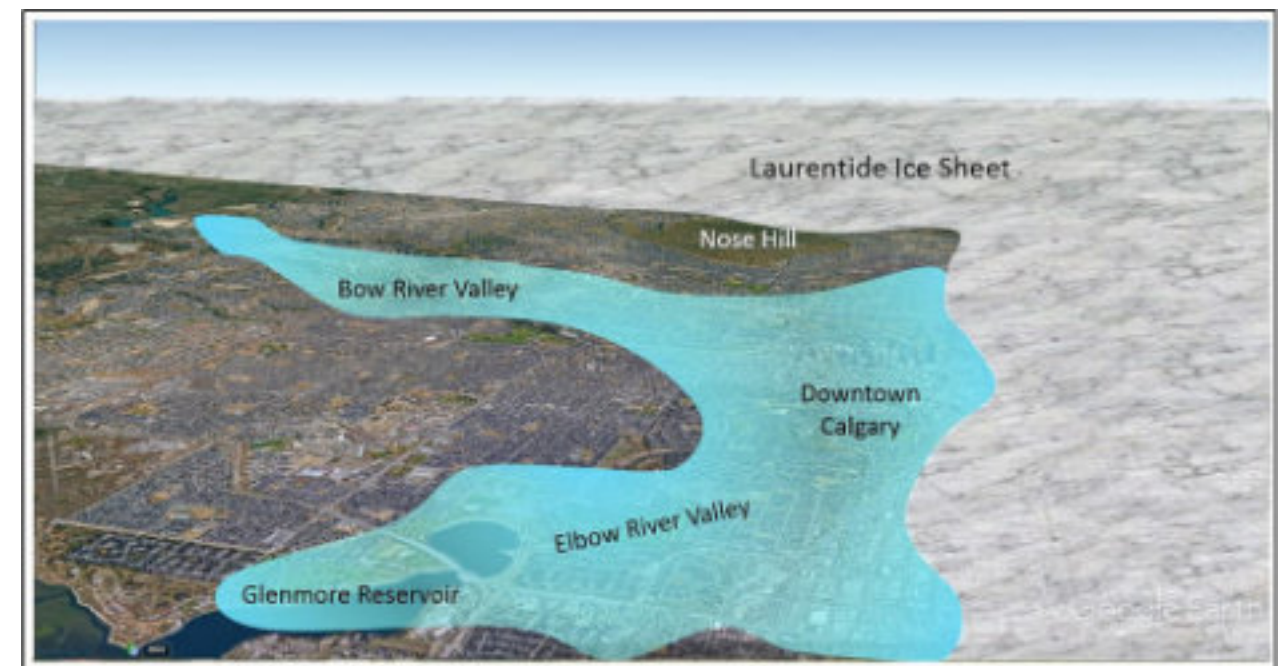


Fig 37. Google Earth oblique view north used as a base to illustrate the position of the Laurentide Ice Sheet and the extent of glacial Lake Calgary, Alberta. Imagery is used as a base for graphics applied using Powerpoint. © 2021 CNES/Airbus. © 2021 Google.

The Point Reyes peninsula is a sliver of terrain that has been moved between 160 and 800 km (100 to 500 mi) north along the San Andreas transform fault. The abrupt break in topography, and the elongation of Tomales Bay, illustrate clearly the trace of the fault.



Fig 38. Illustration of the Point Reyes peninsula as an exotic block moved north along the San Andreas Fault north of San Francisco, California. Google Earth oblique view north. © 2021 Landsat/Copernicus. © 2021 Google.

### Modern Analogs

A picture is worth a thousand words. Imagery of present-day geologic settings can be used to illustrate geologic environments in the distant past.

Rifting is a common setting, for example, in the early stages of oceanic opening. Hydrocarbon provinces such as the North Sea and Red Sea have large resources. Examining modern analogs can provide insights to ancient structural and depositional systems and processes.

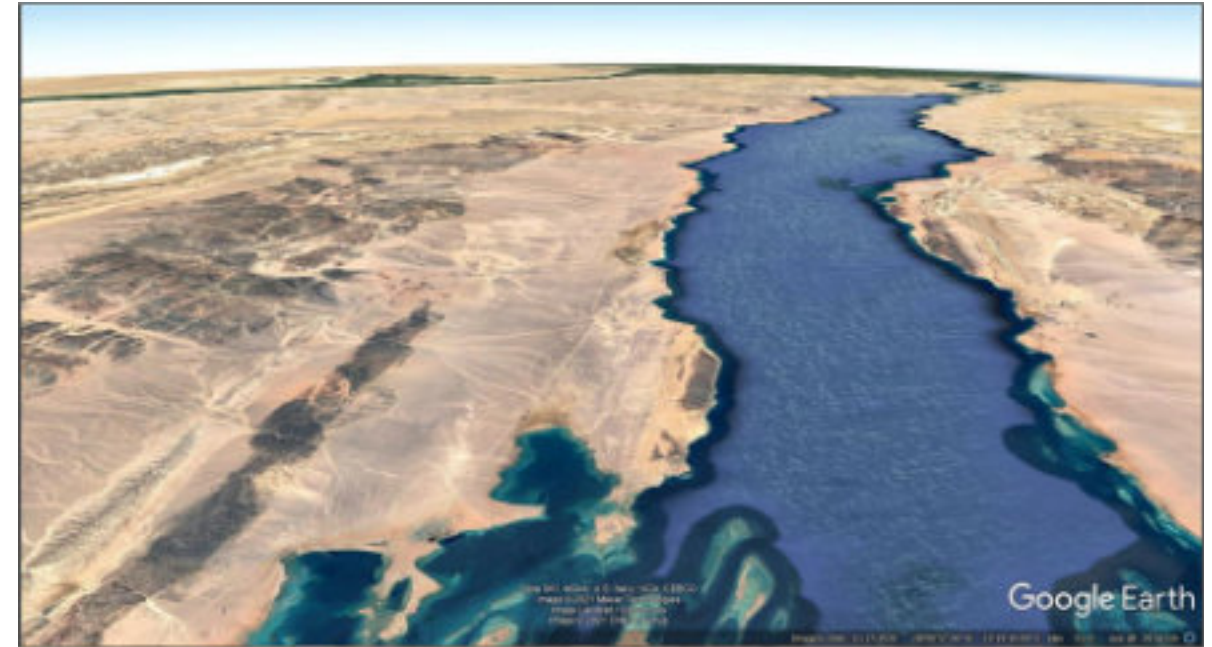


Fig 39. Present-day rifting across the Red Sea, Egypt. Precambrian uplifted blocks (dark) stand in stark contrast to down-dropped blocks (light). Google Earth oblique view north. Data © 2021 SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO. Image © 2021 Landsat/Copernicus, Maxar Technologies, CNES/Airbus, Google.

Platform carbonates were common in the geologic past, from the Tuxpan platform in Mexico to the Permian Basin in Texas and the Williston Basin-Western Canada Sedimentary Basin and elsewhere.



Fig 40. Present-day carbonate banks, Bahamas. Google Earth vertical view. This is a good analog for past carbonate platforms such as the Tuxpan Platform, Mexico, home of the famous Faja de Oro/Golden Lane hydrocarbon trend. Data © 2021 LDEO-Columbia, NSF, NOAA, SIO, U.S. Navy, NGA, GEBCO. Image © 2021 Landsat/Copernicus.

Sand seas formed in regional arid environments that provided depositional environments conducive to preserving porous sandstones such as the prolific Jurassic Navajo and Nugget sandstones from Arizona to Wyoming.



Fig 41. Present-day sand sea, Rub al Khali, Yemen. Google Earth oblique view north. This is analogous to the Jurassic sand seas of North America. Image © 2021 Landsat/Copernicus, Maxar Technologies, CNES/Airbus. Data © 2021 SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO, Google.

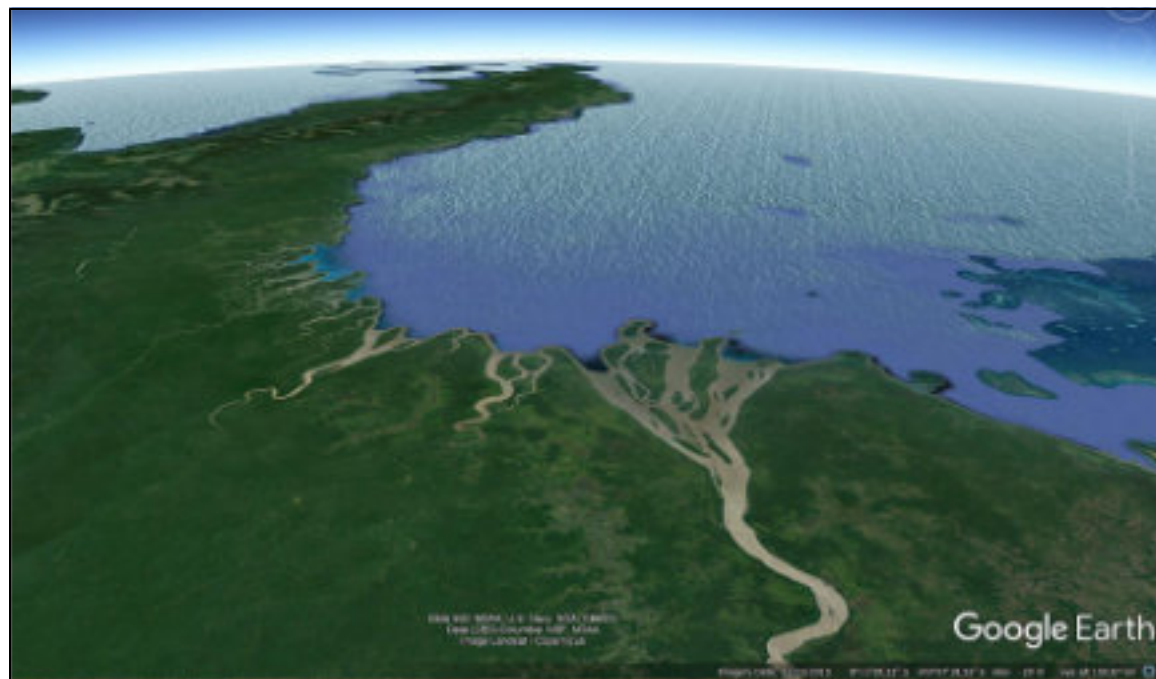


Fig 42. Google Earth oblique view east over the Fly River delta, Papua-New Guinea. This has been used as a depositional analog for the Cretaceous Shannon Sandstone reservoirs in Wyoming. Image © 2021 Landsat/Copernicus. Data © 2021 SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO, LDEO-Columbia, NSF, Google.

### Processing imagery

In addition to applying 3D topography and oblique views in Google Earth, simple enhancements are available using Photoshop. The most commonly used include “Auto Sharpen” to enhance structures and bedding, “Adjust Lighting” to improve contrast and bring out details in very light or very dark areas, and “Adjust Color” to intensify (saturate) colors.



Fig 43. Imagery taken directly from Google Maps. Image © 2021 CNES/Airbus, Landsat/Copernicus, Maxar Technologies. Data © 2021 Google.



Fig 44. Imagery enhanced using Photoshop to increase contrast and sharpen edges, thus making low-relief structures visible. Vertical imagery, Cordillera de la Sal, Atacama Desert, Chile. Image © 2021 CNES/Airbus, Landsat/Copernicus, Maxar Technologies. Data © 2021 Google.



Fig 45. Golconda Thrust, central Nevada. Unprocessed Google Maps vertical image with annotation added. Imagery © 2019 Google; Imagery © 2019 Landsat/Copernicus; Maxar Technologies.

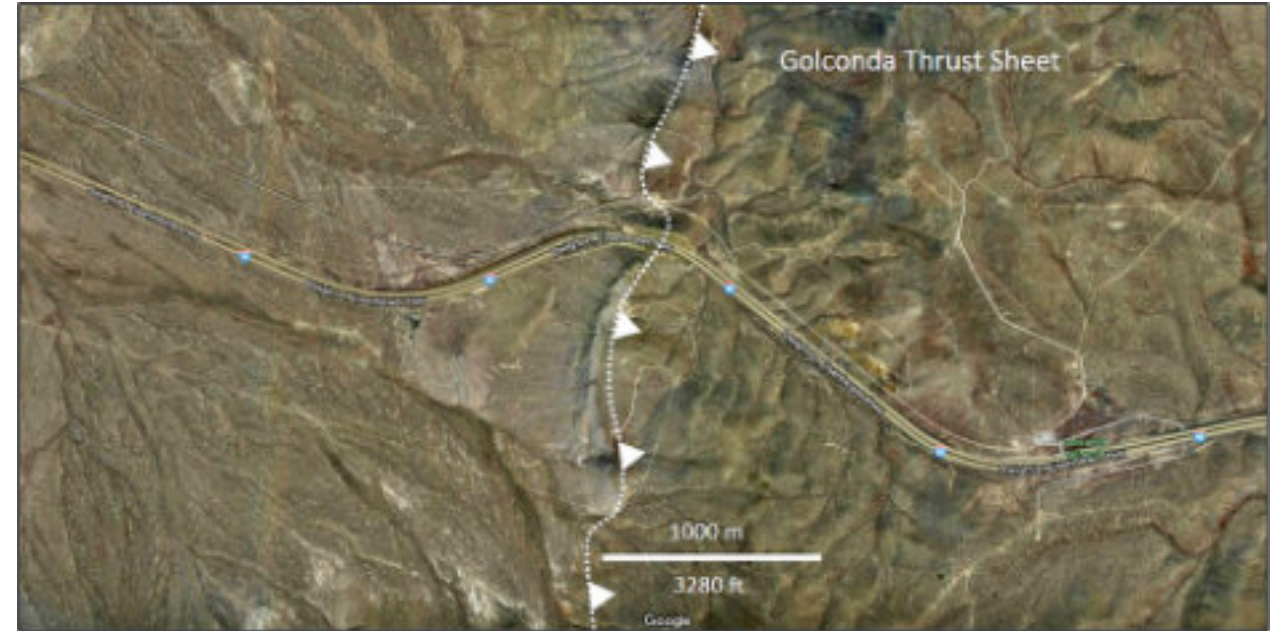


Fig 46. Golconda Thrust, central Nevada. Unprocessed Google Maps vertical image. Photoshop-enhanced image created using “Adjust Lighting,” and “Adjust Color” features. Imagery © 2019 Google; Imagery © 2019 Landsat/Copernicus; Maxar Technologies.

#### Measuring Distance, Area, and Establishing Scale (Photogrammetrics)

Google Maps automatically calculates the distance between points along various alternate routes. The “Measure Distance” feature allows you to trace a path and determine distance along that path.

Google Earth has yet more functions. The “Ruler” function allows you to measure distance along a line or path, and determine area and circumference of features of interest.

Google Maps always provides a scale at the bottom of an image. As you zoom in or out the scale changes accordingly. Google Earth does not provide a scale, but you can create one using the Ruler feature.



Fig 47. Dumbarton Rock, Glasgow, Scotland. Measuring length of the rock. Image © 2021 Getmapping plc. Data © 2021 Google.



Fig 49. Dumbarton Rock, Glasgow, Scotland. Measuring area and circumference of the rock. Image © 2021 Getmapping plc. Data © 2021 Google.



Fig 48. Dumbarton Rock, Glasgow, Scotland. Measuring distance along a track to the desired outcrop. Image © 2021 Getmapping plc. Data © 2021 Google.

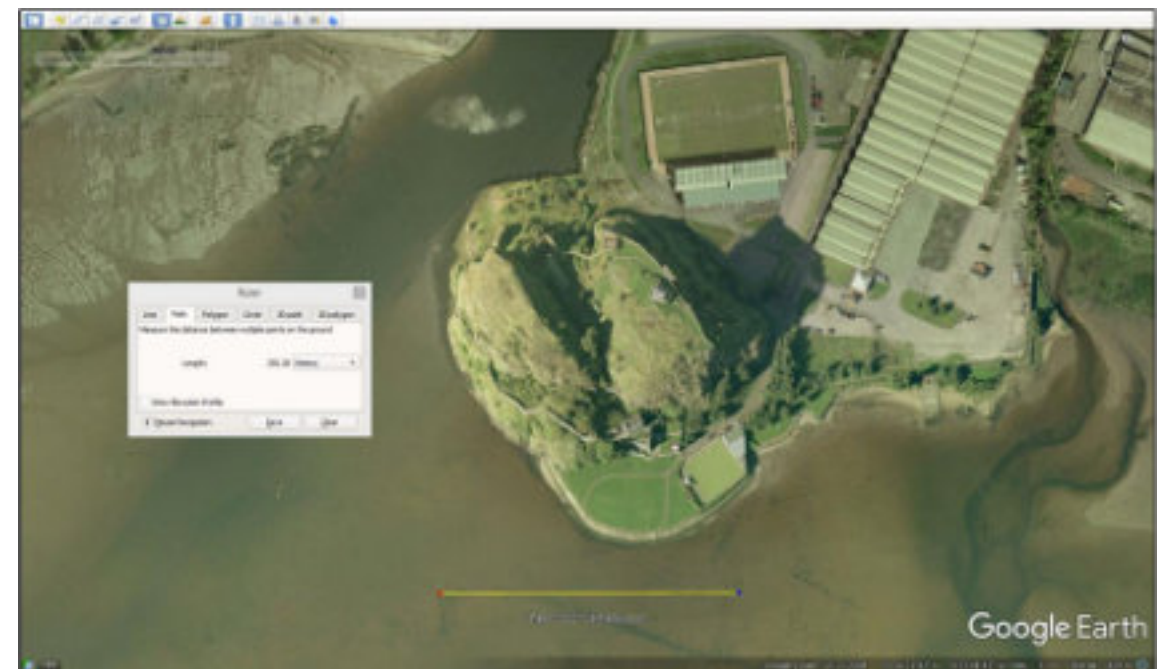


Fig 50. Using the Ruler feature to create a 250 m scale (yellow line), Google Earth. Image © 2021 Getmapping plc. Data © 2021 Google.

### Copyright Considerations

All Google Maps and Google Earth products are copyrighted. If you use a Google product in your publication or web site, you need to review their Terms of Use and Attribution Guidelines (<https://about.google/brand-resource-center/products-and-services/geo-guidelines/#required-attribution>, <https://support.google.com/legal/answer/4558836?hl=en>).

You generally do not need to submit a request to use Google Maps products for the purposes covered in these guidelines. As long as you are following Google's Terms of Service and these guidelines, as well as attributing properly, you can use the products for your project. But read the guidelines to make sure your use is permitted. For commercial uses, where map products are used to generate revenue, you are asked to use Google Maps Platform instead.

Your use of Google content may be acceptable under principles of "fair use," a concept under copyright law that generally permits use of a copyrighted product in certain ways without obtaining a license from the copyright holder. Google cannot tell you if your use would be fair use: you should probably get legal advice.

You are allowed to annotate Google maps with additional information – like points, lines, or labels. While annotations are ok, you cannot significantly alter how Google Maps, Google Earth, Earth Studio, or Street View appear online. For example, you are not allowed to make any changes to the colors of the product interface or remove attribution.

You may print Google Maps content for non-commercial or personal use (for example, a map with directions). In all uses where you distribute printed material that includes content, be sure to read the general guidelines, especially with regard to fair use and attribution.

Where use is not covered by fair use rules, you can still use Google content without submitting a request as long as you follow their guidelines. If you simply need to embed a Google map on your website, you do not need permission. You are also welcome to link to Google Maps with text or a button on your website, such as "View on Google Maps" or "Open with Google Maps."

Google Earth can be used for purposes such as research, education, film and non-profit use without requesting permission. All content created from Google Earth or Earth Studio must be properly attributed. Google Earth content cannot be used for commercial or promotional purposes. As long as you follow their guidelines, you do not need to submit a request.

Google Earth may not be embedded online or in apps. However, you may export and use a handful of static images, with proper attribution, for non-commercial purposes such as news, blogs, educational, recreational, or instructional use.

All uses of Google Maps, Google Earth, and Street View content must provide attribution to Google and, if applicable, to their data providers. Some of the data and images on these platforms come from providers other than Google. If using such imagery, the text of your attribution must say the name "Google" and the relevant data provider(s), such as "Map data: Google, Maxar Technologies".

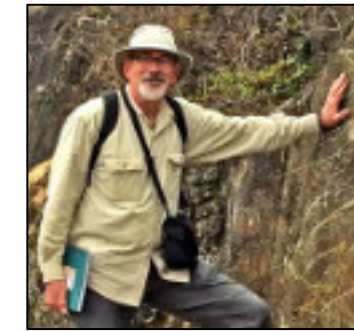
### Conclusions

Google mapping platforms have eliminated the need for many time-consuming and costly remote sensing applications. Using Google's products that are essentially free to anyone with a basic pc or tablet and internet access, you can zoom, pan, rotate, tilt, and 'fly' over terrain in real time. This allows the user to determine access to outcrops, view remote areas, map the geology, illustrate geologic concepts, and clarify ancient depositional and tectonic settings using modern landscapes as analogs. Distances can be measured, map scales determined, and areas and circumferences can be calculated nearly instantaneously. This technology represents a tremendous leap forward for the geological community.

### References

Prost, G.L. 2014. Remote Sensing for Geoscientists, 3<sup>rd</sup> edition. CRC Press, Boca Raton, London, New York. 674 p.

### Gary L. Prost (Ph.D.) Consulting Geologist



**Gary L. Prost** obtained his BSc in geology from Northern Arizona University and an MSc and PhD in geology at Colorado School of Mines. Over the past 45 years, he has worked for Norandex (mineral exploration), Shell (petroleum exploration), the U.S. Geological Survey (geologic mapping, coal), the Superior Oil Company (mineral and oil exploration), Amoco Production Company (oil exploration, remote sensing, and structural geology), Gulf Canada (international new ventures), and ConocoPhillips Canada (Arctic exploration, gas field development, oil sands development). He spent 20 years working as a satellite image analyst searching for hydrocarbons and minerals in over 30 countries. He has been involved in 2 field discoveries as well as oil and gas field development. His most recent work is leading field trips and educating the public on topics of geological interest. He is the principal geologist for G.L. Prost GeoConsulting of El Cerrito, California. He has published eight books: Remote Sensing for Geoscientists: Image Analysis and Integration (fourth edition, Taylor & Francis, 2025); Rocks and Riches - Exploring California's Stunning Geology; the geological tours of the world series South America's Natural Wonders (Taylor & Francis, 2024); The United Kingdom's Natural Wonders (Taylor & Francis, 2023); and North America's Natural Wonders (2 volumes; Taylor & Francis, 2020); The Geology Companion: Essentials for Understanding the Earth (Taylor & Francis, 2018); and the English-Spanish and Spanish-English Glossary of Geoscience Terms (Taylor & Francis, 1997). He is currently working on Geologic Tours of the World – Western Europe's Natural Wonders, and North Africa-Middle East's Natural Wonders.

<https://garyprostgeology.com/publications>

<https://www.researchgate.net/profile/Gary-Prost>

<https://www.linkedin.com/in/gary-prost-64287a16>

## Aplicación de las técnicas de filtrado e interpolación de Kalman a la incertidumbre estructurada del karst

**Leslie F. MOLERO-LEÓN**  
INVERSIONES GAMMA, S.A.,  
Apartado 6246, CP 10600, Habana 6, La Habana, Cuba;  
especialistaprincipal@gmail.com; ORCID 0000-0001-9667-2258

### RESUMEN

Se describe con un ejemplo en el acuífero cársico de Vento (Cuba) la estructura del Método de Filtrado e Innovación de Kalman para el procesamiento riguroso de las observaciones del régimen de las aguas subterráneas considerando las no linealidades del karst midiendo y elevando la ganancia de información en los sistemas acuíferos.

Palabras clave: aguas subterráneas, Filtro de Kalman, Interpolación de Kalman, Karst

### ABSTRACT

This paper describes, using the Vento karst aquifer (Cuba) as a case study, the structure of the Kalman Filtering and Innovation Method for the rigorous processing of groundwater regime observations. The method addresses the nonlinearities inherent to karst systems, thereby measuring and enhancing the information yield from aquifer monitoring data.

Key words: ground waters, Kalman Filtering, Kalman Interpolation, Karst

### INTRODUCCIÓN

La incertidumbre estructurada se refiere a los errores sistemáticos en un modelo que surgen de una representación incorrecta o simplificada de la estructura física y los procesos dominantes del sistema real. A diferencia del ruido blanco aleatorio, esta incertidumbre tiene un patrón espacial y temporal coherente derivado del desconocimiento de la arquitectura interna del sistema.

En el karst, la incertidumbre estructurada se manifiesta en tres direcciones fundamentales; a saber: a) La Arquitectura de la Heterogeneidad; esto es el detalle de su estructura tectonofacial y el modo en que condiciona así como dónde y de qué manera se distribuyen exactamente los conductos cársicos principales, su conectividad, la geometría o su densidad, por lo que un modelo que los omita, soslaye o los ubique incorrectamente tendrá un error que no es aleatorio, sino que está estructurado por la falta de esos elementos y la debilidad del conocimiento; b) La jerarquización del espacio y los dominios de flujo relacionados y la dualidad extrema de los procesos de flujo de fluidos, en tanto la simplificación del flujo a sólo difuso (o sólo conducto) introduce un sesgo sistemático. Las respuestas rápidas a la precipitación no serán capturadas por un modelo puramente difuso, generando un error con un patrón temporal predecible y c) La Distribución Espacial de Parámetros, ya que al asignar una conductividad hidráulica homogénea o suavizada a un medio que es intrínsecamente discreto y canalizado, heterogéneo y con anisotropía tridimensional progresiva genera errores que se propagan de forma coherente en el espacio y el tiempo.

En esencia, la "incertidumbre estructurada del karst" es la distancia entre la complejidad real del sistema y la simplificación inherente al modelo conceptual y numérico debido a que, en muchos casos, las herramientas conducen no solo al desconocimiento del valor exacto de un determinado parámetro, sino que se desconoce incluso la estructura correcta que tal parámetro debería representar.

El karst se extiende por al menos el 15% de la superficie del planeta (Figura 1) y los acuíferos cársicos constituyen la base del abastecimiento de agua para todos los usos en innumerables países y en los entornos geológicos, geomorfológicos, climáticos y socioeconómicos más variados (Gutiérrez y Valero-Garcés, 2022; Bonacci y Andric, 2023). La tendencia global se centra en la integración de modelos numéricos avanzados, métodos geoestadísticos y técnicas de machine learning para cuantificar y reducir la incertidumbre (Chen, Hartman y Wagener, 2021; Hao et al., 2022; Sorg, Künschy Schirmer, 2020; Wunsch, Liesch, y Broda, 2022; Zang, He y Wuang, 2021; Doummar y Gurdak, 2020; Hao, Cao y Zhang, 2023). La literatura se ha movido de tratar la incertidumbre como meramente paramétrica a reconocerla como estructural (Molerio, 2002; Butscher y Huggenberger, 2008; Fischer, Rinder y Birkm 2020; Chen y Goldscheider, 2014).



Figura 1. Distribución mundial de las áreas cársicas (Fuente: [https://www.whymap.org/whymap/EN/Maps\\_Data/Wokam/whymap\\_ed2017\\_map\\_g.html?sessionId=E8B603EE04DBD2BB6C77D561FC7075A0.internet971?nn=9930710/](https://www.whymap.org/whymap/EN/Maps_Data/Wokam/whymap_ed2017_map_g.html?sessionId=E8B603EE04DBD2BB6C77D561FC7075A0.internet971?nn=9930710/) Descargado Noviembre 30/2025

El antecedente directo básico se deriva de los trabajos de Mangin, fundamentales en la hidrogeología kárstica, y su enfoque en el análisis multivariado y no paramétrico de datos hidrológicos (especialmente series de tiempo de caudal y precipitación) fue revolucionario para la caracterización de estos sistemas complejos. La metodología de Mangin permitió, por primera vez, caracterizar cuantitativamente la estructura dual (conductos/matriz) y el funcionamiento de un acuífero cársico utilizando únicamente datos de entrada y salida (precipitación y caudal del manantial), sin necesidad de una costosa y a menudo casi imposible caracterización directa del interior del sistema cársico.

Su trabajo sentó las bases para la mayoría de los métodos de análisis de recesión y series temporales que se usan hoy en día en hidrogeología kárstica, siendo un referente obligatorio para cualquier estudio hidrodinámico serio en este tipo de medios (Mangin, 1970, 1975, 1981, 1984, 1994; Mangin y Pulido, 1983; Padilla y Mangin, 1995; Milanovic, 2000). Su enfoque no era "multivariado" en el sentido de analizar muchas variables estáticas, sino en el análisis de series temporales multivariadas (principalmente precipitación y caudal).

Las técnicas no paramétricas que empleó (ya que no asumen una distribución de probabilidad específica para los datos) fueron: la Función de Autocorrelación (ACF), para analizar la "memoria" del acuífero, donde una caída brusca indica un componente de flujo rápido (conductos) y una caída suave/larga un componente de flujo lento y una gran capacidad de regulación (matriz, microfisuras); la Función de Correlación Cruzada (CCF) entre la precipitación (entrada) y el caudal (salida), que permite definir el retraso (Lag) de la Correlación Máxima; esto es, el tiempo de respuesta del sistema y la Forma de la CCF, que proporciona información sobre la estructura interna y los procesos de transformación de la lluvia en escorrentía; y, finalmente, el Análisis Espectral para identificar componentes periódicos (ciclos diarios, estacionales, etc.) en la señal del caudal.

Con el 65% del territorio carsificados y más del 80% de los recursos en aguas subterráneas distribuidos en estas regiones, para Cuba no es trivial aproximarse a la solución de la incertidumbre del conocimiento de los sistemas acuíferos cársicos para lograr la sostenibilidad de su aprovechamiento.

En los últimos años se han desarrollado en Cuba algunos trabajos en este sentido donde el enfoque ha estado muy ligado a la caracterización de sus principales cuencas cársicas y a la aplicación de técnicas isotópicas y geomatemáticas y la reducción de incertidumbre (Molerio y Torres, 2002; Molerio, 2023; Molerio, Alonso y Sardiñas, 2024). Méndez (2024), Méndez et al. (2018, 2024) introduce un concepto que maneja la incertidumbre en la disponibilidad de agua en tiempo real frente a la demanda, en un acuífero altamente heterogéneo. Una técnica específica de optimización para el caso de reducción de una red de monitoreo de aguas subterráneas, como el Observador de Luenberger, fue abordada por el autor en un artículo anterior en esta misma publicación (Molerio, 2025b).

Las referencias anteriores reflejan la evolución desde una descripción cualitativa de la incertidumbre hacia su cuantificación explícita utilizando herramientas matemáticas y computacionales avanzadas, una dirección en la que la investigación cubana también se está moviendo.

#### LOS APORTES DE KALMAN

La obra del investigador húngaro Rudolf E. Kalman (1939-2016; Figura 2) representa una revolución en la teoría de sistemas y control, marcando la transición de los métodos clásicos en el dominio de la frecuencia (como la Transformada de Laplace) hacia los métodos modernos en el dominio del estado y el tiempo discreto.

Su trabajo más célebre es, sin duda, el Filtro de Kalman (Kalman, 1960, 1974; Kalman y Bucy, 1963; Kalman, Ho y Narendra, 1963), un algoritmo matemático óptimo para estimar el estado interno de un sistema dinámico a partir de mediciones parciales y con ruido, para lo que utiliza el modelo del sistema para predecir el estado futuro y su incertidumbre y, al recibir una nueva medición (con algún tipo de ruido), combina de manera óptima la predicción con la medición, ponderando la confianza en cada una, para obtener la mejor estimación posible del estado actual. Es un proceso recursivo, computacionalmente eficiente y óptimo (minimiza el error cuadrático medio) para sistemas lineales con ruido gaussiano (Anderson y Moore, 1979; Kallath, 1980; Gelhar, 1973; Gelb, 1974; Bryson y Ho, 1975; Liu y Gupta, 2007; Evensen, 2009; Zhou, Gómez-Hernández y Hendricks, 2014; Chen et al, 2018; entre otros).



Figura 2. Rudolf E. Kalman en 2014 impartiendo la conferencia "The lesson of the last 100 years: Accomplishments of control theory and related fields since the beginning of World War One" (Fuente: <https://prattichizzoblog.wordpress.com/2014/07/03/videoconference-of-prof-rouldolf-kalman-june-11-2014-unibo/>)

Kalman introdujo dos conceptos fundamentales y elegantes que responden a preguntas básicas pero profundas sobre cualquier sistema: a) Controlabilidad y b) Observabilidad, dos pilares teóricos para el análisis y diseño de cualquier sistema de control moderno.

La obra de Kalman no fue inmediatamente aceptada. Su formulación abstracta y matemática chocó con la ingeniería más práctica de la época. Sin embargo, cambió el enfoque de "controlar la salida" a estimar y controlar el estado completo del sistema. Su trabajo puede sintetizarse como la matematización y fundamentación rigurosa de la teoría de sistemas dinámicos. Proporcionó las herramientas para "ver" (a través de la observabilidad y el filtrado) y "controlar" (a través de la controlabilidad) el interior de un sistema, incluso cuando las observaciones son imperfectas. Transformó problemas de ingeniería en problemas de estimación estadística, sentando las bases para gran parte de la tecnología inteligente y autónoma del mundo moderno y demostró, una vez más, cómo una teoría matemática abstracta puede tener las aplicaciones prácticas más profundas e imprevistas (Evensen, 2009).

En conclusión, la evolución desde el Kalman lineal hasta el Kalman por conjuntos (EnKF) ha permitido por primera vez abordar cuantitativamente la "incertidumbre estructurada" del karst. Estas técnicas no producen un modelo "verdadero", sino un sistema de inferencia autorregulable que aprende de los datos, ofreciendo la representación más fiel posible de un sistema que, de otro modo, permanecería en gran medida oculto. En medios heterogéneos y anisotrópicos, son importantes las contribuciones del propio Evensen (2009, de Chen, Gómez-Hernández y Xu (2018) y de Fischer, Rinder y Birk (2020).

#### FILTRADO E INTERPOLACIÓN DE KALMAN

El **Filtrado de Kalman** es un algoritmo recursivo de procesamiento de datos que proporciona una estimación óptima del estado presente de un sistema dinámico, utilizando un modelo de su evolución temporal y una serie de mediciones con ruido y secuenciales obtenidas hasta el instante actual.

En esencia, es un proceso en dos etapas que se repite con cada nueva medición; a saber 1) Predicción (Step de Predicción), que utiliza el modelo dinámico del sistema para predecir el estado actual y su incertidumbre (covarianza) basándose en el estado anterior y 2) Actualización (Step de Corrección o Actualización), donde incorpora la nueva medición real para corregir la predicción, ponderando de manera óptima la confianza entre la predicción del modelo y la medición ruidosa.

El resultado es una estimación del estado actual que es más precisa que la obtenida usando solo el modelo o solo la medición. En el contexto de aguas subterráneas se utiliza para estimar, en tiempo real, el estado del acuífero (niveles piezométricos, concentraciones de contaminantes) en todos los puntos de una malla, utilizando datos en continuo de una red de monitoreo (Figura 3).

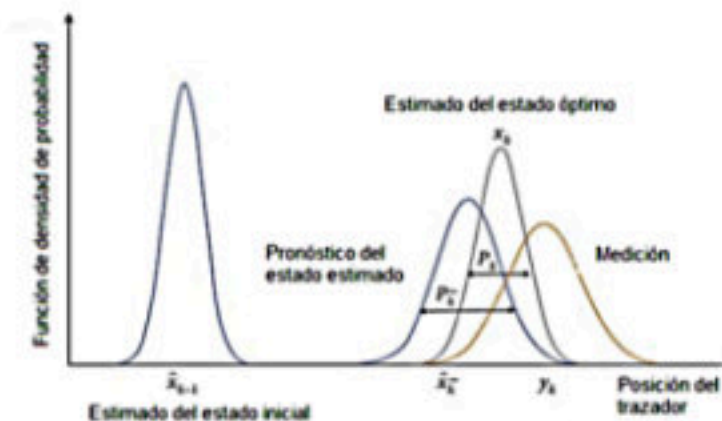


Figura 3. Estimación de la posición de un trazador aplicando el Filtro de Kalman (Fuente: Urrea y Agramonte, 2021)

La **Interpolación de Kalman** (comúnmente conocida como *Suavizado de Kalman* o *Kalman Smoother*) es una extensión del Filtro de Kalman que proporciona la estimación óptima del estado pasado de un sistema dinámico, utilizando toda la información disponible, es decir, todas las mediciones pasadas, presentes y futuras dentro de un período de tiempo específico. A diferencia del filtro, que solo mira hacia atrás hasta el presente, el interpolador procesa los datos en "lote" o realiza una pasada hacia atrás después de que el filtro ha procesado todos los datos hacia adelante. Esto le permite "suavizar" las estimaciones, eliminando el retraso inherente del filtro y reduciendo la incertidumbre.

En el contexto de aguas subterráneas es la herramienta ideal para el análisis post-eventos y la calibración de modelos. Por ejemplo, después de una sequía o una inundación, se puede utilizar el interpolador con todos los datos recogidos durante el evento para reconstruir con la máxima precisión posible la evolución histórica de los niveles de agua en el acuífero, identificando dinámicas que no eran evidentes en tiempo real. Mientras el Filtro de Kalman es la herramienta para la operación en tiempo real, el Interpolador de Kalman es la herramienta para el análisis científico y la reconstrucción más precisa del pasado. Las diferencias entre uno y otro se resumen en la Tabla 1.

#### FUNDAMENTOS MATEMÁTICOS

El núcleo de la teoría de Kalman es la fusión óptima entre la incertidumbre del modelo y el ruido de las observaciones, bajo el supuesto de sistemas lineales y errores gaussianos. Para un sistema dinámico se define un vector de estado  $x_k$  que contiene todas las variables a estimar (ej., niveles piezométricos en los nodos de una malla, concentraciones de iones). El sistema evoluciona en el tiempo según:

$$x_k = F_k \cdot x_{k-1} + B_k \cdot u_k + w_k$$

Donde,  $F_k$ : Matriz de transición de estado. En hidrogeología, esta es la discretización de las EDPs de flujo (Ley de Darcy) y transporte (Advección-Dispersión-Reacción);  $u_k$ : Entradas conocidas (recarga, extracción);  $B_k$ : Matriz de control que aplica las entradas al estado y  $w_k$ : Ruido del proceso (error del modelo)  $\sim N(0, Q_k)$ .

Tabla 1. Resumen Conceptual y Diferencias fundamentales entre el filtro y la Interpolación de Kalman (Fuente: Elaboración propia)

CARACTERÍSTICA	FILTRADO DE KALMAN	INTERPOLACIÓN DE KALMAN
Objetivo	Estimar el estado actual (en tiempo real).	Estimar un estado pasado (en post-proceso).
Conjunto de Datos	Usa mediciones hasta el presente.	Usa todo el conjunto de datos (pasado, presente y futuro).
Incertidumbre	Mayor incertidumbre, ya que se basa solo en datos pasados.	Menor incertidumbre, ya que la información futura ayuda a refinar la estimación pasada.
Aplicación Principal	Monitoreo y control en tiempo real.	Reconstrucción histórica, calibración de modelos y análisis.

Las mediciones (niveles en pozos, análisis químicos) se relacionan con el estado  $z - k = H_k \cdot x_k + v_k$ , donde,  $H_k$ : Matriz de observación. Es una matriz muy "dispersa" que simplemente "selecciona" los elementos del vector de estado  $x_k$  que coinciden con la ubicación de un sensor y  $v_k$ : Ruido de la medición (error instrumental)  $\sim N(0, R_k)$ .

Para la Estimación en Tiempo Real, el Ciclo del Filtro de Kalman (FK) es un proceso recursivo de dos pasos por cada nueva medición (Figura 4); a saber:

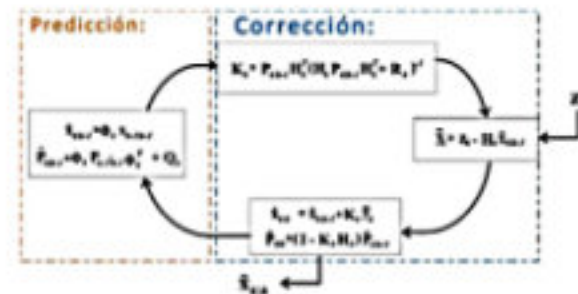


Figura 4. Algoritmo recursivo de Filtro de Kalman (Fuente <https://www.sbg-systems.com/es/glossary/rts-rauch-tung-striebe/>; Descargado Noviembre 28, 2025)

Para la Predicción de estado,

$$x_{k|k-1} = F_k \cdot x_{k-1|k-1} + B_k \cdot u_k$$

Para la Predicción de Incertidumbre,

$$P_{k|k-1} = F_k \cdot P_{k-1|k-1} \cdot F_k^T + Q_k$$

Para la Actualización (Cálculo de la Ganancia de Kalman)

$$K_k = P_{k|k-1} \cdot H_k^T \cdot (H_k \cdot P_{k|k-1} \cdot H_k^T + R_k)^{-1}$$

Para la Corrección del estado con la medición,

$$x_{k|k} = x_{k|k-1} + K_k \cdot (z_k - H_k \cdot x_{k|k-1})$$

Para la Actualización de la incertidumbre,

$$P_{k|k} = (I - K_k \cdot H_k) \cdot P_{k|k-1}$$

La Ganancia de Kalman ( $K_k$ ) es óptima y determina cuánto peso dar a la nueva medición versus la predicción del modelo. Si las mediciones son muy ruidosas ( $R_k$  grande),  $K_k$  es pequeña y se confía más en el modelo.

El Suavizado de Kalman (KS) para la Reconstrucción Histórica Óptima se define de manera tal que mientras el FK solo usa datos pasados y presentes, el KS (como el algoritmo de Rauch-Tung-Striebel<sup>1</sup>; Figura 5) procesa todo el conjunto de datos (pasado, presente y futuro) en una pasada adicional hacia atrás. Esto proporciona la estimación óptima del estado  $x_{k|N}$  para cada instante  $k$ , dado un conjunto completo de  $N$  observaciones. El resultado es una serie temporal "suavizada" con la menor incertidumbre posible, ideal para el análisis científico.

#### EL PROBLEMA DE LA NO LINEALIDAD DEL KARST Y EL FILTRO DE KALMAN POR CONJUNTOS

El Filtro de Kalman (FK) estándar falla en el karst debido a su fuerte no linealidad de estos sistemas. Diferentes aproximaciones se han intentado para reducir la incertidumbre provocadas precisamente por el desconocimiento detallado de los procesos que, en tiempo y espacio, producen la no linealidad.

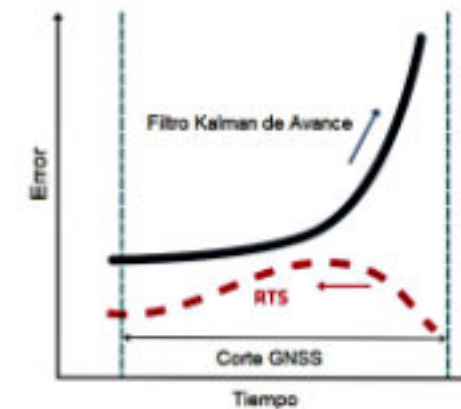


Figura 5. Expresión gráfica del Suavizador RTS (Fuente <https://www.sbg-systems.com/es/glossary/rts-rauch-tung-striebe/>)

Entre ellas, el Filtro de Kalman Extendido (EKF) resultó una de las primeras soluciones, mediante la linealización del modelo no lineal alrededor del estado actual estimado (usando el Jacobiano). La aproximación funciona para no linealidades suaves, pero es inestable para sistemas altamente no lineales como el karst y computacionalmente costoso. El Filtro de Kalman por Conjuntos (EnKF), en lugar de una sola estimación del estado, utiliza un conjunto (Ensemble) de realizaciones (decenas a cientos) del modelo de manera que la predicción y actualización se realizan sobre todo el conjunto. Entre sus ventajas están las siguientes; a) No requiere linealización, ya que maneja naturalmente la no linealidad y proporciona una estimación realista de la incertidumbre; b) La ganancia de Kalman se calcula a partir de las estadísticas de covarianza del conjunto. Cuando llega una medición, cada miembro del conjunto se corrige de manera ligeramente diferente, haciendo que el ensamble en su conjunto converja hacia el estado verdadero del sistema.

Más recientemente se han desarrollado un grupo de Técnicas Híbridas y de Machine Learning. La Integración con Modelos Constitutivos Mejorados: acopla el EnKF con modelos que representen explícitamente la dualidad conducto-matriz; la Asimilación de Datos Remotos incorpora datos de GRACE (gravedad) o InSAR (deformación del terreno) para restringir los cambios en el almacenamiento y el Kalman con Redes Neuronales aplica técnicas de IA para aprender la dinámica no lineal del sistema y reemplazar o complementar la matriz  $F_k$ .

<sup>1</sup> El suavizador RTS (Rauch-Tung-Striebel) es un algoritmo matemático utilizado para mejorar la precisión de la estimación del estado en sistemas dinámicos. Pertenece a la familia de los algoritmos de suavizado y amplía las capacidades del filtro de Kalman, que estima el estado de un sistema en tiempo real. Mientras que el filtro de Kalman procesa los datos secuencialmente y estima el estado actual basándose únicamente en las mediciones pasadas y presentes, el suavizador RTS va un paso más allá al utilizar tanto las mediciones pasadas como las futuras para refinar las estimaciones del estado de forma retrospectiva. Este proceso da como resultado estimaciones del estado significativamente más precisas, especialmente en aplicaciones que implican el post-procesamiento de datos.

El EnKF, en particular, no busca encontrar el "modelo verdadero" (una tarea imposible en el karst), sino convertir el modelo en un sistema adaptativo que infiera estados y corrija su comportamiento de forma autónoma, aprendiendo de los datos, mediante los siguientes mecanismos.

- a) Estimación Conjunta de Estados y Parámetros, de manera que el EnKF puede ampliar el vector de estado (x) para que incluya no sólo las variables dinámicas (nivel, concentración), sino también los parámetros del modelo (ej., Conductividad Hidráulica K, porosidad n) tal que,
- $$x = [h_1, h_2, \dots, h_n, K_1, K_2, \dots, K_n, n_1, n_2, \dots, n_n]$$

Donde, h<sub>i</sub>: Carga hidráulica en la celda i, K<sub>i</sub>: Conductividad hidráulica en la celda i.

- b) Proceso de Autorregulación, con las siguientes fases:
- Inicialización: Se parte de un ensamble de modelos, cada uno con una realización diferente de los campos de K (por ejemplo, algunas con conductos aleatorios, otras más homogéneas).
  - Ciclo de Asimilación: Cuando se asimila una medición de nivel en un pozo (z<sub>k</sub>), el EnKF calcula la covarianza cruzada entre los niveles en todas las celdas y la conductividad en todas las celdas.
  - Inferencia Estructural: Si existe una fuerte covarianza entre un alto valor de K en una zona no monitorizada y un alto nivel en el pozo de observación, el algoritmo inferirá que es probable que exista un conducto de alta permeabilidad en esa zona y actualizará (aumentará) el valor de K en los miembros del ensamble que no lo tenían.
  - Resultado: El ensamble de modelos "aprende" colectivamente la estructura probable del acuífero. Los miembros del ensamble que tenían una estructura más cercana a la realidad serán corregidos menos y tendrán más peso en la estimación final. El modelo se autorregula ajustando sus propios parámetros para reproducir las observaciones.
  - Actualización Espacialmente Coherente a través de la Covarianza del Ensamble, aquí la matriz de covarianza del conjunto P no es sólo un número, sino un mapa de relaciones espaciales. Así, cuando se mide un pico de contaminante en un pozo, por ejemplo, el EnKF no sólo corrige la concentración en ese punto, sino que analiza la covarianza espacial de la concentración en el conjunto. Si los miembros del ensamble que muestran ese pico también muestran una pluma alargada en una dirección específica (por ejemplo, a lo largo de un valle cárstico inferido), la corrección se propagará a lo largo de esa misma dirección para todos los miembros, lo que permite inferir la dirección de flujo preferente y la conectividad de forma dinámica, sin tener que especificarla a priori en el modelo.
- c) Aprendizaje Continuo y Propagación de la Incertidumbre, debido a que el EnKF es un proceso secuencial; por ello, en cada ciclo, la incertidumbre (representada por la dispersión del conjunto) se reduce donde hay datos, pero también se propaga espacial y temporalmente según la dinámica del modelo.
- d) Autorregulación de la Confianza. Si la dispersión del conjunto (incertidumbre) es grande, la Ganancia de Kalman será alta y el modelo confiará más en los datos. Si el modelo es consistente con los datos, la dispersión será pequeña y el modelo tendrá más confianza en sí mismo.
- e) Detección de Errores Conceptuales. Si tras múltiples ciclos de asimilación la dispersión del conjunto no se reduce, o los residuos (innovación) son sistemáticamente altos, es una señal fuerte de que el modelo conceptual es erróneo (ej., falta una fuente de contaminación, o la estructura de conductos es radicalmente incorrecta). El sistema indica automáticamente, la necesidad de una revisión del modelo conceptual.

#### APLICACIONES A LA OPTIMIZACIÓN DE REDES DE MONITOREO DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

La aplicación del Filtrado e Interpolación de Kalman a la optimización de redes de monitoreo de aguas subterráneas representa un cambio de paradigma, pasando de un diseño estático a uno dinámico y adaptativo.

El Filtro de Kalman (y sus variantes) no optimiza la red directamente en el sentido clásico (e.g., elegir ubicaciones). En su lugar, optimiza la información que se extrae de una red existente o potencial en el sentido que el actúa como un "limpiador" de datos en tiempo real. Separa la señal verdadera del acuífero del ruido, proporcionando una serie temporal de estados (niveles) estimados mucho más suave y confiable para el análisis. Un Filtro de Kalman Suavizado (que usa datos pasados y futuros) puede reprocesar datos históricos para obtener la mejor estimación posible del estado del acuífero en el pasado, esencial para la calibración de modelos, habida cuenta que las mediciones de nivel piezométrico son ruidosas (fluctuaciones por efectos de marea barométrica, perturbaciones locales, error del sensor, imprecisiones del observador).

En el caso de los mapas de hidroisohipsas tradicionales no debe perderse de vista que, además de sus imprecisiones en el karst, son instantáneas estáticas (snap-shots) basadas en interpolación puramente espacial en un momento dado y que reúnen mediciones realizadas en distintas fechas de un mismo período y, por ende, no capturan la dinámica entre tiempos de muestreo. En este caso, el filtro asimila las mediciones puntuales en un modelo dinámico del acuífero. El resultado no es una interpolación simple, sino una reconstrucción del estado completo del sistema (niveles en toda la malla) en cada paso de tiempo. Esto genera una imagen de los niveles piezométricos que es físicamente consistente con la dinámica de flujo, llenando los vacíos entre pozos de una manera mucho más inteligente que un interpolador puramente geométrico.

Particularmente significativo es el hecho de que al analizar la incertidumbre (covarianza) del error de estimación que produce el filtro, se identifica el crecimiento de esta incertidumbre entre mediciones. Esto permite diseñar frecuencias de muestreo variables: mayor frecuencia cuando la incertidumbre crece rápidamente (ej., durante la recarga), y menor frecuencia cuando el sistema es estable.

En medios heterogéneos y anisotrópicos (como el karst) el filtro es simultáneamente más valioso y más complejo. La heterogeneidad extrema; esto es, los cuatro espacios del universo cárstico y sus respectivos dominios de flujo (Molerio, 1985) y la anisotropía significan que la correlación espacial entre los niveles de dos pozos no es una función simple de la distancia. Dos pozos cercanos pueden estar en unidades hidrogeológicas diferentes y tener comportamientos distintos. En este caso, fallan hasta los métodos de interpolación geoestadística clásica (Kriging), que se basan en un variograma que supone homogeneidad estadística en estos medios.

Kalman supera esta situación al reemplazar o complementar el variograma con un modelo físico de flujo. Un adecuado modelo conceptual de flujo (aunque sea una aproximación) define físicamente cómo debe propagarse una perturbación de presión a través de un medio heterogéneo. El filtro utiliza este modelo para definir la correlación espacial de manera dinámica y físicamente consistente.

En este caso, por ejemplo, si un pozo muestra un rápido descenso, el modelo Kalman no distribuirá ese descenso uniformemente en todas direcciones. Lo propagará preferentemente a lo largo de la dirección de alta conductividad (ej., la dirección de un conducto cárstico principal) que está definida en el modelo. En su forma más avanzada (usando un Filtro de Kalman de Conjuntos - EnKF), el proceso no solo estima los estados (niveles), sino que puede actualizar en tiempo real los parámetros del modelo (como la conductividad hidráulica en diferentes celdas). Esto permite un aprendizaje de la heterogeneidad del medio a medida que llegan nuevos datos, refinando continuamente la imagen del subsuelo. Como complemento, la evolución de la covarianza del error de estimación puede revelar patrones (Figura 6). Si los niveles de dos pozos que el modelo considera inconexos están fuertemente correlacionados por el filtro, es una evidencia robusta de que existe una conexión hidráulica no modelada entre ellos (ej., un conducto no cartografiado).

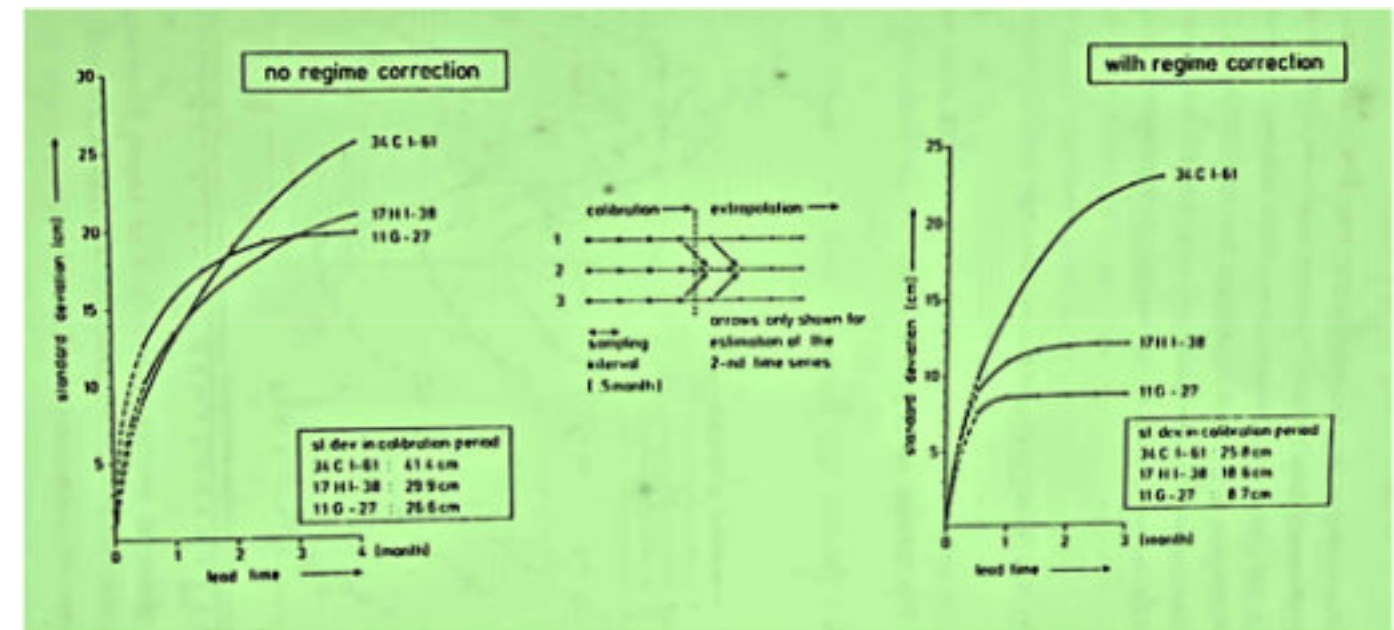


Figura 6. Ejemplo de extrapolación de errores para determinados esquemas de predicción en tres acuíferos con y sin corrección del régimen (Fuente: Brower, 1983)

Los inconvenientes que se presentan en este caso son los siguientes; a) la Complejidad Computacional ya que, para mallas finas, la operación con matrices de covarianza de gran tamaño es costosa. El EnKF resuelve esto usando un conjunto de realizaciones del modelo, siendo mucho más eficiente para sistemas de alta dimensión; la Dependencia del Modelo Conceptual, ya que si el modelo físico subyacente es conceptualmente erróneo, las estimaciones de Kalman, aunque sean suaves y elegantes, serán incorrectas; y c) Sintonización, puesto que el rendimiento del filtro depende críticamente de la correcta especificación de las covarianzas del error del modelo (magnitud de la confianza en el modelo) y del error de medición (magnitud de la confianza en el valor de la medición). Esta sintonización no es trivial.

El Filtro de Kalman transforma una red de monitoreo de aguas subterráneas de un sistema de recolección de datos puntuales a un sistema de estimación del estado espacialmente distribuido y en tiempo real.

En medios heterogéneos, su principal ventaja es que sustituye el supuesto de homogeneidad estadística (del Kriging) por las leyes de la física del flujo subterráneo para guiar la interpolación y el filtrado. No es una solución mágica, pero es la herramienta más poderosa disponible para integrar datos dispersos y ruidosos en una imagen coherente y dinámica de un acuífero complejo, permitiendo una gestión y un diseño de red verdaderamente optimizados.

Para una red de observación de los niveles piezométricos, se definen: el Vector de Estado ( $x_k$ ); esto es los niveles de agua en cada celda de la malla del modelo numérico; la Matriz de Transición ( $F_k$ ), derivada de un modelo de flujo subterráneo que, en el caso del FK estándar, el sistema debe ser lineal o linealizado; y la Asimilación de Datos, de manera que los niveles medidos en los pozos ( $z_k$ ) se utilicen para corregir continuamente el campo de carga hidráulica en toda la malla (Figura 7). En el karst esto es fundamental para a) Inferir la conectividad hidráulica, aprovechando que un pulso de recarga medido en un pozo puede ser asimilado para corregir los niveles en zonas no monitoreadas, revelando la existencia de conductos preferenciales y b) Mejorar la calibración en tiempo real, ya que el FK ajusta automáticamente los estados (niveles) para que coincidan con las observaciones, compensando los errores en los parámetros del modelo (como la conductividad hidráulica).

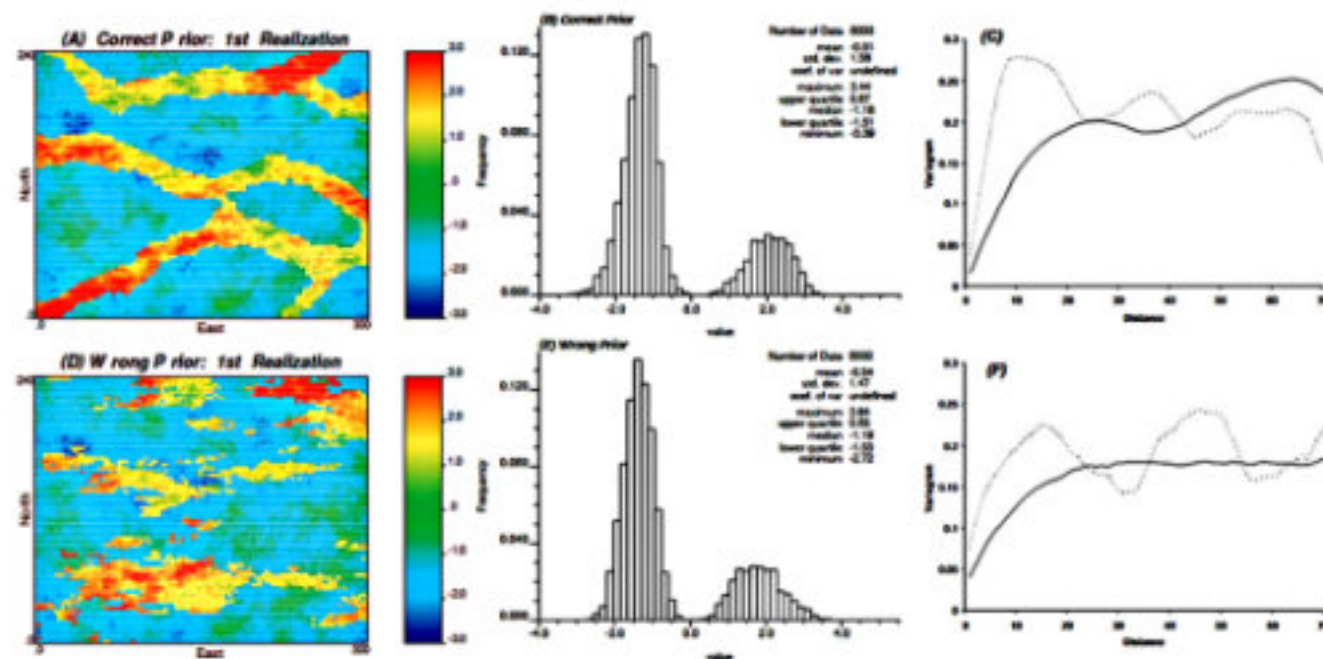


Figura 7. Distribución espacial de InK, histograma y variograma de la primera realización del modelo previo correcto; (D–F) muestran las mismas características de la primera realización del modelo previo incorrecto. En (C) y (F), la línea continua y la línea punteada corresponden al variograma de facies experimental en las direcciones X e Y, respectivamente. (Fuente: Li et al, 2013)

Para una red diseñada para la vigilancia de la composición química y calidad del agua, entonces, el Vector de Estado ( $x_k$ ) serían las concentraciones de solutos ( $Cl^-$ ,  $NO_3^-$ , etc.) en cada celda; la Matriz de Transición ( $F_k$ ) estaría derivada de un modelo de transporte de solutos y debe hacerse notar que esto es notablemente más complejo debido a la no linealidad de los procesos de reacción química, pero es un recurso muy potente para el Pronóstico de la Intrusión marina, en tanto permite asimilar mediciones de conductividad o cloruros para predecir el avance del frente salino con mayor

precisión y para dar Seguimiento de Plumas de Contaminación y así corregir la posición estimada de una pluma de contaminantes en tiempo real, lo que es esencial para una gestión proactiva.

#### APLICACIÓN DEL FILTRADO Y SUAVIZADO DE KALMAN EN LA HIDROGEOLOGÍA DEL KARST

En los acuíferos cársicos, con su dualidad de flujo rápido en conductos y lento en la matriz, su heterogeneidad extrema y anisotropía marcada, la caracterización directa es imposible, y los modelos deterministas fallan en capturar la complejidad del sistema. Es aquí donde las técnicas de asimilación de datos, encabezadas por la familia de algoritmos de Kalman, emergen como un recurso para integrar observaciones dispersas y con ruido con modelos conceptuales imperfectos, para obtener una imagen cuantitativa y dinámica del sistema.

Los autores mencionados anteriormente consideran muy efectivo aplicar el EnKF para tener una única y mejor estimación del estado del sistema como un solo mapa de niveles piezométricos, ya que el EnKF mantiene y evoluciona todo un conjunto (o "población") de posibles estados (miembros del conjunto). En el Kalman clásico el estado se representa por un único vector de estado, como un mapa de niveles piezométricos mientras en el Filtro por Conjuntos, se representa el estado por un conjunto N de vectores.

La incertidumbre, por su parte, se mide por una matriz de covarianza en el clásico y por la desviación estándar, más cómoda de manejar: pero la propagación de la incertidumbre se acerca más a la realidad en el EnKF ya que se sigue un modelo no lineal completo y evita los errores de linealización del EKF. La matriz de covarianza de un modelo numérico de aguas subterráneas con 1,000,000 de nodos es imposible de manejar directamente. El EnKF aproxima esta matriz de manera inteligente a través de la estadística del conjunto (con solo 100-200 miembros). Proporciona no solo una "mejor estimación", sino un rango de certidumbre. Se puede decir: "el nivel en este punto es 45.5 m, con un 95% de probabilidad de estar entre 44.8 m y 46.2 m".

Esta técnica de asimilación de datos mantiene y actualiza múltiples realizaciones posibles (un conjunto) de un sistema para estimar su estado de manera óptima, manejando de forma robusta la no linealidad y cuantificando explícitamente la incertidumbre, lo que lo hace particularmente poderoso para sistemas complejos, heterogéneos y no lineales como los acuíferos cársicos.

#### COMENTARIOS SOBRE UN CASO REAL: EL SISTEMA ACUÍFERO DEL POLJE VENTO<sup>2</sup>

La cuenca de Vento es un sistema cársico del tipo polje estructural bien definido (Molerio, 2024a). Es un sistema regional de flujo instalado sobre un polje modelado en el Plioceno-Cuaternario sobre rocas esencialmente miocénicas falladas longitudinalmente y sobre la que se ha instalado el río Almendares y muchos de sus tributarios.

El sistema hidrogeológico Vento es una de las unidades geomorfológicas e hidrológicas del karst más importante de Cuba, al constituir la principal fuente de abastecimiento de agua potable a la capital cubana gracias a sus abundantes reservas de aguas subterráneas. Sus captaciones en los manantiales de Vento han sostenido a la ciudad desde hace más de un siglo. Constituye una unidad de drenaje mixto (superficial-subterráneo) que contiene la red hidrográfica del río Almendares y cuenta con abundantes recursos hídricos subterráneos de 278 Hm<sup>3</sup>/año, con un suministro de hasta 8.8 m<sup>3</sup>/s (Molerio, Pin, Guerra, 2007).

De acuerdo con las características de su funcionamiento hidrológico y su posición en las unidades del relieve cársico del occidente cubano, fue definida como un polje (Molerio, 1975; Molerio, Pin, Guerra, 2007) que forma parte de una sucesión de estructuras de dicho tipo que se extienden de oeste a este desde el valle del Ariguanabo en Artemisa hasta el valle del río San Juan en Matanzas, representando una fase evolutiva de inundación estacional o efímera, en la que se conservan abundantes cuerpos lacustres pequeños (Molerio, 2024a).

La unidad hidrológica, con un área de 476 km<sup>2</sup>, está limitada al norte por la divisoria superficial Santa María del Rosario-San Francisco de Paula, al sur con el flanco norte de las Alturas de Bejucal y Lomas de Camoa, al este con las Escaleras de Jaruco y Lomas de San Rafael y por el oeste con el límite oriental de la cuenca Ariguanabo; y en ella se asientan importantes sectores urbanos e industriales de las provincias de La Habana y Mayabeque principalmente, con una relativamente importante densidad poblacional. Forma parte, en su tercio medio y superior, de una estructura longitudinal desarrollada en las llanuras carsificadas del eje insular de Cuba, sustentadas sobre rocas carbonatadas y carbonatado-

<sup>2</sup> La actualización geólogo geomorfológica ha sido preparada en colaboración con Raydel Alonso Montero (INVERSIONES GAMMA, S.A.)

terráneas de la cobertura oligomiocénica de las formaciones geológicas acuíferas Jaruco, Colón, Cojímar y Güines, con base impermeable en las formaciones paleógenas del grupo Nazareno y Universidad.

El patrón de conducción subterránea está desarrollado fundamentalmente en un conjunto de fracturas neotectónicas (fallas y diaclasas) de disposición predominante NE-SW a ENE-WSW, que posibilitan el flujo general desde las depresiones de recarga al este y oeste de la unidad hasta su descarga en superficie a través de los manantiales de Vento y favorecen la conexión subterránea con el sistema acuífero adyacente de Ariguanabo, otro polje que aún no sobrepasa la etapa de evolución lacustre y de donde recibe no pocos aportes subterráneos.

La descarga más importante de todo el sistema acuífero se encuentra al norte, formando los Manantiales de Vento, con un caudal medio hiperanual del orden de los 2 m<sup>3</sup>/s. No obstante, se reconoció, en 1989 una descarga subterránea importante hacia el Sureste inducida artificialmente por el bombeo del campo de pozos del Gato, en la vecina cuenca Jaruco-Aguacate, otro polje situado hacia el Este (Molerio, 2008).

De acuerdo con su comportamiento hidrodinámico la región constituye un holokarst bien evolucionado y las aguas subterráneas se organizan con recorridos diferenciados que muestran muy variables tiempo de residencia y, sobre todo en estiaje, ciertos sectores del acuífero exhiben aguas con poco más de 100 años de tiempo de tránsito (Molerio, Pin y Guerra, 2007; Molerio, 2004b).

La red de monitoreo piezométrico (Figura 8) fue optimizada (Portuondo, March y Guerra, 1997) aplicando las técnicas geomatemáticas ya mencionadas (Molerio y Torres, 2002) y algunos resultados de esa aplicación fueron resumidos por Peralta et al. (2004) y Molerio, Pin y Guerra (2007) lo que condujo a una distribución espacial más acertada de las estaciones de monitoreo del régimen y a una discretización temporal y frecuencial del muestreo más económica sin pérdida apreciable de informatividad y a un mejoramiento de la capacidad de estimar, con la precisión que emana del óptimo de frecuencia de monitoreo, los volúmenes disponibles de agua subterránea en función del estado general de la cuenca en los puntos y áreas representativas del funcionamiento hidrogeológico de la región (Figuras 9 y 10).

Con estas técnicas se identificaron tres aparatos cársicos o zonas hidrogeológicas que son, la zona norte, el centro este y el centro oeste, cada una con comportamientos hidrodinámicos y morfoestructurales bien definidas. En este sentido, la superficie cársica denudativa se corresponde con la zona de máxima circulación de las aguas subterráneas, el relieve de articulación con el máximo gradiente hidráulico y el glacis cársico con la zona de descarga hacia la taza de Vento.

El proceso EnKF para un acuífero cársico con los 15 pozos de la red puede resumirse del modo siguiente, tomando en cuenta que se trata de un ciclo iterativo de aprendizaje bayesiano. La formulación parte de múltiples hipótesis (conjuntos, ensembles) sobre la estructura dual del karst y, a medida que asimila datos en tiempo real, mejora colectivamente esas hipótesis, reduciendo la incertidumbre no solo sobre los niveles de agua, sino sobre la propia arquitectura interna del acuífero (parámetros); en consecuencia, convierte datos puntuales en una comprensión espacialmente distribuida de sistemas heterogéneos (Evensen 2009).

El modo más simple de aproximación al modelo conceptual es suponer una estructura de Doble Porosidad, más sencillo que el de espacios múltiples de Molerio (1985), donde la matriz (flujo difuso) y los conductos (flujo de conducción) son dos dominios superpuestos que intercambian masa.

Otra alternativa sería definir un Modelo Híbrido Discreto/Continuo, donde los conductos principales se modelan explícitamente como elementos 1D (tuberías) embebidos en un medio poroso 3D (la matriz). Una tercera alternativa puede ser un Modelo Equivalente Complejo, definido como único medio continuo 3D con una distribución de conductividad hidráulica extremadamente heterogénea (varios órdenes de magnitud) para emular el comportamiento dual.

Para la Creación del Ensemble Inicial se crean N realizaciones del modelo (N típicamente entre 50 y 200) para obtener un conjunto de N "universos paralelos" plausibles del acuífero cársico, todos consistentes con el conocimiento previo (geológico, estructural).

Cada realización  $i$  tiene:

- Estados Iniciales ( $x_i^a(t=0)$ ), definidos en el dominio como campo de niveles piezométricos iniciales para cada celda que se perturba alrededor de una condición inicial estimada.
- Parámetros ( $\theta_i$ ): en los que cada realización debe tener una representación diferente de la heterogeneidad. Así se genera un campo aleatorio de conductividad hidráulica ( $K$ ) para la matriz, con una estructura espacial dada, donde adicionalmente, se define de forma estocástica la ubicación, geometría y conductividad de los conductos

cársicos. Esto puede hacerse con algoritmos de simulación geométrica (e.g., objetos aleatorios) o asignando valores extremadamente altos de  $K$  en ciertas celdas. También se pueden incluir parámetros de intercambio matriz-conducto, porosidad efectiva, etc.

- Forcing o Forzantes que son necesarios definir de manera que cada realización puede tener pequeñas perturbaciones en la recarga o condiciones de contorno para representar su incertidumbre.

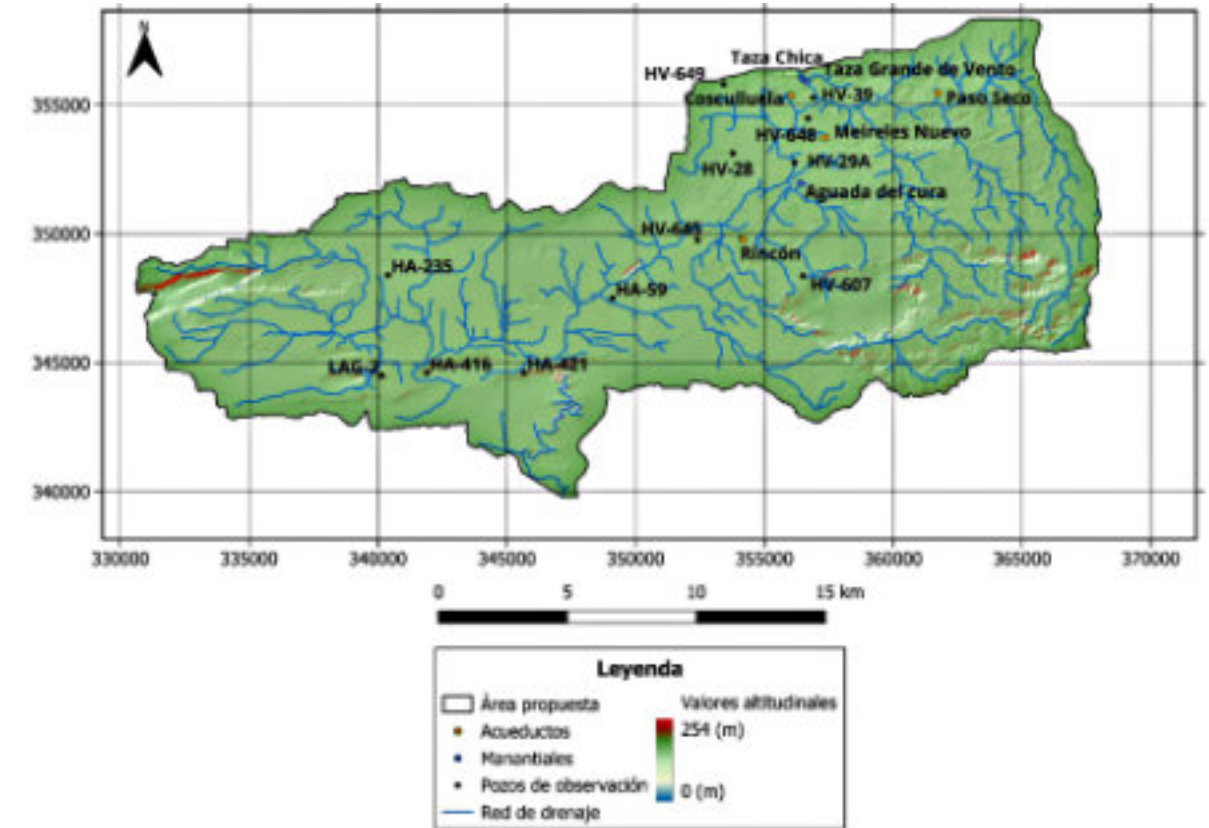


Figura 8. Red de monitoreo piezométrico del sistema tradicionalmente conocido como Cuenca de Vento (Fuente: Liuva María Alfonso y Harald Soriano para este artículo)

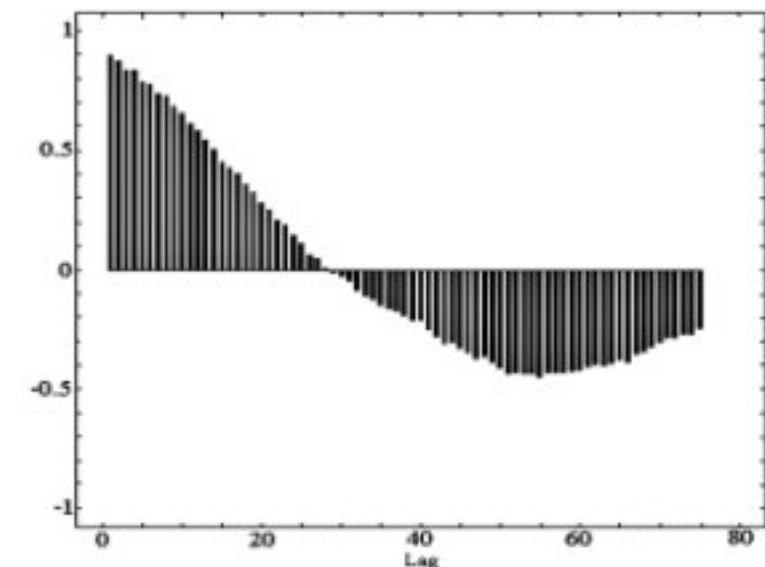


Figura 9. Autocorrelograma de la estación HV-29 (Fuente: Molerio, Pin y Guerra, 2007)

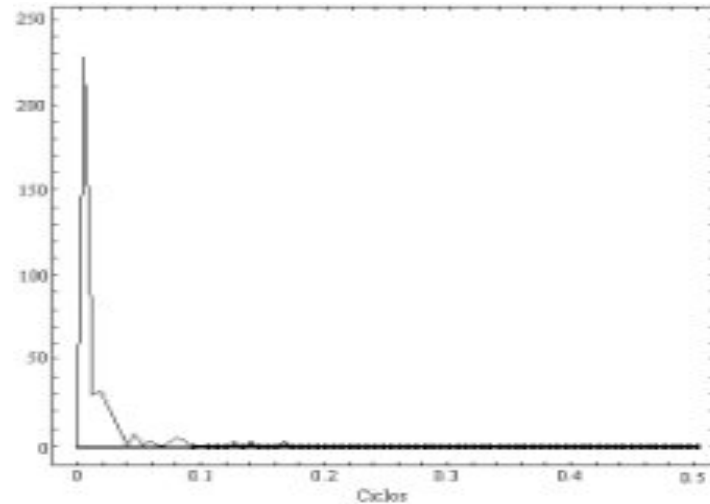


Figura 10. Espectro de varianza del nivel piezométrico de la Estación HV-19 (Fuente: Molerio, Pin y Guerra, 2007)

El Ciclo Secuencial de Asimilación (para cada paso de tiempo  $t$ ) consiste de tres etapas; a saber:

1. Predicción del Ensemble (Modelo hacia adelante) donde cada una de las  $N$  realizaciones del modelo se ejecuta (o "avanza") desde el tiempo  $t-1$  hasta el tiempo  $t$ . Ello produce un ensemble de pronósticos para los estados (niveles en todas las celdas) en el tiempo  $t$ , denotado  $X^a(t) = [x_1^a(t), x_2^a(t), \dots, x_N^a(t)]$ . Aquí el modelo físico (con su dualidad) es el que gobierna esta evolución. Si un conducto está presente en una realización, el flujo rápido aparecerá naturalmente en su pronóstico.
2. La Generación de Observaciones Perturbadas, basadas en las mediciones reales de niveles en los 15 pozos. Siendo  $y_{obs}(t)$  el vector de  $m=15$  mediciones.
3. Para mantener la consistencia estadística del EnKF, se crea un conjunto o ensemble de observaciones perturbadas:  $Y_j(t) = y_{obs}(t) + \epsilon_j$ , donde  $\epsilon_j$  es una muestra del error de medición (ruido, supuesto normalmente distribuido). Se hace para  $j=1, \dots, N$ .
4. El EnKF actualiza tanto los estados como los parámetros de cada realización bajo la siguiente ecuación  $x_i^a(t) = x_i^f(t) + K * [Y_i(t) - H(x_i^f(t))]$ ; donde  $x_i^a(t)$ : Estado analizado (actualizado) de la realización  $i$ ;  $K$ : Matriz de Ganancia de Kalman que se calcula a partir de las estadísticas del ensemble:  $K = P^f * H^T * (H * P^f * H^T + R)^{-1}$ ;  $P^f$ : Matriz de covarianza del error del pronóstico del ensemble. Representa cómo los errores en el modelo se correlacionan espacialmente. En el karst, esta covarianza reflejará la anisotropía y conectividad de los conductos;  $H$ : Operador de observación. Simplemente "extrae" los valores pronosticados por el modelo en las ubicaciones de los 15 pozos y  $R$ : Matriz de covarianza del error de medición (diagonal si los errores son independientes),  $[Y_i(t) - H(x_i^f(t))]$ .
5. La Innovación. Es la diferencia entre la observación perturbada y el valor pronosticado por el modelo para los pozos. Es el "error" que hay que corregir.

La ganancia  $K$  determina cómo se distribuye la corrección desde los 15 puntos de observación hacia el resto del dominio (incluyendo zonas sin pozos). Si el ensemble muestra que dos pozos están fuertemente correlacionados (alta covarianza en  $P^f$ ) —por ejemplo, porque varias realizaciones los conectan mediante un mismo conducto—, y la corrección en uno afectará fuertemente al otro, actualizando implícitamente la robustez (y certidumbre) del modelo respecto a la existencia y propiedad de ese conducto.

La asimilación de datos misma realiza una interpolación óptima y con una base física robusta. El "interpolador de Kalman" es un proceso emergente donde la información de los 15 pozos se propaga de manera no uniforme a través del dominio, siguiendo los patrones de conectividad hidráulica (flujo rápido en conductos, flujo lento en matriz) que la matriz de covarianza del ensemble  $P^f$  ha aprendido de las realizaciones del modelo cársico. Es, por tanto, una herramienta adecuada para llenar los vacíos entre pozos en un medio donde la distancia euclidiana es un mal predictor de la conexión hidráulica.

La ecuación del proceso es  $P^f * H^T * (H * P^f * H^T + R)^{-1}$ , donde  $P^f$  - Matriz de Covarianza del Error del Pronóstico del Ensemble, que se calcula estadísticamente a partir de las  $N$  realizaciones del ensemble.;  $P^f[i, j]$  indica cómo están correlacionados los errores entre la variable del modelo en la ubicación  $i$  (ej., nivel en una celda específica) y en la ubicación  $j$  (ej., nivel en otra celda o en un pozo).

Recordar que en el Karst:  $P^f$  no es isotrópica, por lo que si dos celdas están conectadas por un conducto de flujo rápido (aunque estén geoméricamente lejos), sus covarianzas serán altas. Si están en bloques hidráulicamente aislados, serán bajas o nulas. El ensemble "aprende" y refleja estas conexiones hidráulicas;  $H$ , es el Operador de Observación; esto es un "selector" que convierte el estado del modelo completo (niveles en todas las celdas) en un vector de lo que el modelo predice en los 15 puntos de observación.  $H^T$  hace lo inverso: "inyecta" una corrección puntual en el dominio completo y  $R$ , la Covarianza del Error de Observación, que representa la confianza en las mediciones. Un error grande en  $R$  para un pozo hace que la innovación en ese pozo tenga menos peso en la interpolación.

En el EnKF, para la actualización de parámetros (Inversión en Tiempo Real) los parámetros (campos de  $K$ , ubicación de conductos) se tratan como parte del estado. Se concatenan al vector de estados  $x$ . Así, durante la actualización, la covarianza cruzada entre los niveles en los pozos (observados) y los valores de los parámetros en cada celda (no observados), calculada a partir del ensemble, permite que los datos actualicen directamente los parámetros. De esta manera, si un pozo muestra un ascenso más rápido de lo que pronostican la mayoría de las realizaciones, las realizaciones que tengan un conducto de alta conectividad hacia ese pozo serán movidas por la actualización para que sus niveles suban. Como el parámetro "alta conductividad en esa zona" está ligado al estado "nivel alto", ese parámetro también se verá reforzado en el análisis.

En el caso de redes de redes en acuíferos cársicos, el tamaño del conjunto ( $N$ ) es un recurso que debe definirse muy cuidadosamente. Debido a la extrema no linealidad y heterogeneidad, se necesita un  $N$  grande ( $\geq 100$ ) para representar adecuadamente la distribución de probabilidad. Las covarianzas empíricas del ensemble presentan ruido con  $N$  finito y se deben aplicar técnicas de localización (suprimir correlaciones espurias a larga distancia) y de inflación (aumentar ligeramente la varianza del ensemble para evitar que colapse y pierda diversidad). La localización es crucial para evitar que un pozo actualice incorrectamente zonas hidráulicamente desconectadas.

Otro aspecto sumamente delicado es el tratamiento de los tiempos de residencia en el karst. Particularmente complejo y variado en el caso de la cuenca de Vento como ha sido señalado en diferentes oportunidades (Molerio, 2024b. Ver bibliografía en la referencia).

La respuesta rápida de los conductos aparecerá en pozos conectados y será asimilada casi en tiempo real, en tanto la respuesta lenta de la matriz se verá en la tendencia de fondo y en pozos no conectados a la red de conductos. El EnKF actualizará los parámetros de la matriz (porosidad,  $K$  baja) para ajustar estas tendencias a más largo plazo.

## CONCLUSIONES

Trabajar con redes de monitoreo del régimen de las aguas subterráneas optimizadas es el único recurso para garantizar que se dispone de información real para la gestión del acuífero al menor costo posible y garantizando la mayor informatividad (o ganancia de información). En acuíferos cársicos, debido a la heterogeneidad y anisotropía en el dominio de flujo, esa necesidad se acrecienta y, en Cuba particularmente, es crítica.

El procesamiento de la data de campo, obtenida en distintas fechas (supuestamente garantizando una simultaneidad de los factores de control en cierto momento del muestreo), con distintos equipos, pocos de ellos de registro continuo, tomadas por diferentes personas e instrumentos es, todo el tiempo, una fuente permanente de incertidumbre que no se filtra antes de procesar, generalizar y diseminar la información. El proceso de optimización de las redes de monitoreo del país, iniciado a fines de los años 90 pasados, logró algunos avances pero quedó trunco y las nuevas redes en operación no lo continuaron o sustituyeron por otros los resultados anteriores.

Asimismo, las técnicas de procesamiento y pronóstico están basadas en métodos que nada tiene que ver con las características del karst y asumen unas condiciones de contorno que, o no han sido comprobadas o no se ajustan al modelo conceptual real del sistema acuífero. La discriminación (regionalización) de sistemas de flujo locales no suele tomarse en cuenta y se asume que el comportamiento de todo el acuífero, algunos de varios centenares de kilómetros cuadrados de superficie pueden ser caracterizados en su totalidad por unas pocas estaciones.

## AGRADECIMIENTOS

El autor expresa su agradecimiento a los colegas que han acompañado estos estudios desde las primeras etapas de la aplicación de los métodos de optimización de la red de monitoreo de las aguas subterráneas en el Centro de Hidrología y Calidad de las Aguas del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos y en diferentes proyectos de diseño y optimización de redes de monitoreo de aguas subterráneas en Cuba y otros países: Liuva María Alfonso, Raydel Alonso, Margarita

Ampuero, Bárbara Ballagas, Juan C. Batista, Yamilé Bustamante, Francisco Cutié, Andrés Díaz Arenas, Ernesto Flores, Alberto E. García, Jorge L. Gelabert, Mario Guerra, Joaquín Gutiérrez, Cecilia March, Flor Jiménez, Irene Jiménez del Sol, Agnía León, Manuel Núñez, Yoemí Portuondo, Alina Quintana, Ernesto Rocamora, Katia del Rosario, Harald Soriano, Regla Toujague, Julio C. Torres y Gladis Yera. Un reconocimiento especial a los colegas del Instituto de Investigaciones Aplicadas y en Sistemas de la Universidad Nacional Autónoma de México, Ismael Herrera y Susana Gómez; Martín Díaz, del Instituto Mexicano del Petróleo; Alberto Enrique García Rivero (Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú); William Back, del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), Laszlo Kiraly, del Centro de Hidrogeología y Geotermia (Universidad de Neuchatel, Suiza), Didier Louvat, del Instituto de Radioprotección y de Seguridad Nuclear (IRSN, Francia), Alain Mangin, del Laboratorio Subterráneo de Les Moulis (CNRS, Francia) y Ana, mi compañera.

#### BIBLIOGRAFÍA

Anderson, B. D. O., & Moore, J. B. (1979). Optimal filtering. Prentice-Hall.

Asch, M., Bocquet, M., & Nodet, M. (2016). Data assimilation: Methods, algorithms, and applications. Society for Industrial and Applied Mathematics.

Bonacci, O., & Andrić, I. (2023). Karst water resources in a changing world: Review of solutions and perspectives for sustainable management. *Water*, 15(2), 342. <https://doi.org/10.3390/w15020342>

Brouwer, G. K. (1983). Reduction of a groundwater level network. In Proceedings of the International Symposium on Methods and Instrumentation for the Investigation of Groundwater Systems (pp. 101–117). TNO.

Bryson, A. E., & Ho, Y. C. (1975). Applied optimal control: Optimization, estimation, and control. Hemisphere Publishing.  
Butscher, C., & Huggenberger, P. (2008). Intrinsic vulnerability assessment in karst areas: A numerical modeling approach. *Water Resources Research*, 44(3). <https://doi.org/10.1029/2007WR006277>

Chen, Z., & Goldscheider, N. (2014). Modeling spatially and temporally varied hydraulic behavior of a folded karst system with dominant conduit drainage at catchment scale, Hochifen-Gottesacker, Alps. *Hydrogeology Journal*, 22(6), 1387–1401. <https://doi.org/10.1007/s10040-014-1143-z>

Chen, Z., Gómez-Hernández, J. J., Xu, T., & Zanini, A. (2018). Experimental assessment of the performance of the ensemble Kalman filter for aquifer characterization and prediction. *Water Resources Research*, 54(2), 1029–1054. <https://doi.org/10.1002/2017WR021278>

Chen, Z., Hartmann, A., & Wagener, T. (2021). Assessing the predictive uncertainty of a multi-model ensemble for karst groundwater simulation using Bayesian model averaging. *Water Resources Research*, 57(8), e2020WR029333. <https://doi.org/10.1029/2020WR029333>

Doummar, J., & Gurdak, J. J. (2020). Uncertainty in model-based groundwater vulnerability assessments: A review of approaches and challenges. *Environmental Modelling & Software*, 134, 104836. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104836>

Evensen, G. (2009). Data assimilation: The ensemble Kalman filter. Springer.

Fischer, P., Rinder, T., & Birk, S. (2020). Data assimilation in karst hydrology: A review. *Hydrogeology Journal*, 28(8), 2961–2987. <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02225-8>

Gelb, A. (Ed.). (1974). Applied optimal estimation. The MIT Press.

Gelhar, L. W. (1993). Stochastic subsurface hydrology. Prentice Hall.

Gutiérrez, F., & Valero-Garcés, B. (2022). The role of evaporite karst in groundwater resources and contamination: A review with case studies from Spain. *Earth-Science Reviews*, 229\*, 104027. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.104027>

Hao, Y., Cao, M., & Zhang, Z. (2023). A new framework for quantifying the structural uncertainty of karst aquifer models using time-series analysis and graph theory. *Journal of Hydrology*, 617, 129057. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.129057>

Hao, Y., Zhang, Y., Chui, T. F. M., & Li, P. (2022). A review of integrated surface water and groundwater modeling in karst environments: Current status and future directions. *Earth-Science Reviews*, 234\*, 104203. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.104203>

Kailath, T. (1980). Linear systems. Prentice-Hall.

Kalman, R. E. (1974). Algebraic aspects of the generalized inverse of a rectangular matrix. *Proceedings of the IEEE*, 62(7), 414–425.

Kalman, R. E., & Bucy, R. S. (1961). New results in linear filtering and prediction theory. *Journal of Basic Engineering*, 83(1), 95–108. <https://doi.org/10.1115/1.3658902>

Kalman, R. E., Ho, B. L., & Narendra, K. S. (1963). Controllability of linear dynamical systems. *Contributions to Differential Equations*, 1(2), 189–213.

Li, L., Zhou, H., Hendricks Franssen, H. J., & Gómez-Hernández, J. J. (2013). Groundwater flow inverse modeling in non-multi-Gaussian media: Performance assessment of the normal-score Ensemble Kalman Filter. *Water Resources Research*, 49(1), 150–164. <https://doi.org/10.1029/2011WR011352>

Liu, Y., & Gupta, H. V. (2007). Uncertainty in hydrologic modeling: Toward an integrated data assimilation framework. *Water Resources Research*, 43(7). <https://doi.org/10.1029/2006WR005756>

Mangin, A. (1970). Étude des débits classés de quelques sources karstiques du Jura et du Bas-Dauphiné. *Annales de Spéléologie*, 25(2), 283–355.

Mangin, A. (1975). Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. *Annales de Spéléologie*, 29(3), 283–332; 29(4), 495–601; 30(1), 21–124.

Mangin, A. (1981). Utilisation des analyses corrélatoire et spectrale dans l'approche des systèmes hydrologiques. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Série II*, 293(2), 401–404.

Mangin, A. (1984). Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques à partir des analyses corrélatoire et spectrale. *Journal of Hydrology*, 67(1-4), 25–43. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(84\)90230-0](https://doi.org/10.1016/0022-1694(84)90230-0)

Mangin, A. (1994). Karst hydrogeology. En J. Gibert, D. L. Danielopol, & J. A. Stanford (Eds.), *Groundwater ecology* (pp. 43–67). Academic Press.

Mangin, A., & Pulido-Bosch, A. (1983). Aplicación de los métodos de correlación y espectral al estudio de acuíferos cársicos. *Tecnología del Agua*, 3(9), 53–65

Méndez, O. (2024). Gestión de la sequía operacional en captaciones de agua subterránea. Caso de estudio: Cuenca Vento [Tesis doctoral no publicada, Universidad de La Habana].

Méndez Valdés, O., Rivera, E., Llanusa Ruíz, H., & Hernández, A. (2018). Enfrentamiento a la sequía operacional en la empresa Aguas de La Habana. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 39(2), 112–123.

Méndez Valdés, O., Socorro Llanes, R., Llanusa Ruíz, H., & Valdés Salomón, D. E. (2022). Evaluación de la disponibilidad de agua en la cuenca Vento aplicando minería de datos. *Geociencias*, 41(4), 975–990. <https://doi.org/10.5016/geociencias.v41i4.16123>

Milanovic, P. (2000). Geological engineering in karst. Zebra Publishing.

Molerio León, L. F. (1975). Esquema Geoespeleológico Preliminar de Cuba (Memoria Explicativa del Mapa de las Regiones Cársicas de Cuba a escala 1:1 000 000). Sociedad Espeleológica de Cuba. <https://www.researchgate.net/publication/366817881>

Molerio León, L. F. (1985). Dominios de Flujo y Jerarquización del Espacio en Acuíferos Cársicos. En A. Núñez Jiménez (Ed.), Medio siglo explorando a Cuba. Historia documentada de la Sociedad Espeleológica de Cuba, Tomo II (p. 322). Imprenta Central de las FAR. <https://www.researchgate.net/publication/344398777>

Molerio-León, L. F. (2002). Técnicas Geomatemáticas en Hidrogeología: Aplicaciones en Cuba. En D. M. Arellano, M. A. Gómez-Martín & I. Antigüedad (Eds.), Investigaciones Hidrogeológicas en Cuba (pp. 25-42). Universidad del País Vasco.

Molerio León, L. F. (2008). Una Revisión del Uso de Tritio Cosmogénico en el fechado de aguas subterráneas y su aplicación en el Acuífero Cársico de la Cuenca de Vento, Cuba. Boletín de la Sociedad Venezolana de Espeleología, 42, 20-32.

Molerio-León, L. F. (2023). Hidrogeología de las regiones cársicas de Cuba: Marco conceptual. Gota a Gota, 28, 35-54.

Molerio-León, L. F. (2023). Fuentes de incertidumbre de flujos de Radón 222 en campos petrolíferos cársicos costeros del Trópico Húmedo: La experiencia cubana. Argentina Subterránea, 23(53), 45-68. <http://www.fade.org.ar/Bibliografía.html>

Molerio León, L. F. (2024a). Hidrología del cinturón de poljes Ariguanabo-Cañas-¿San Juan? (Cuba) y el problema de la gestión ordenada de sus recursos hídricos. Mundo Subterráneo, 10, 10-49.

Molerio León, L. F. (2024b). Recarga natural y balance de tritio en las aguas subterráneas del Polje Vento, Cuba Occidental. Gota a Gota, 32, 15-24.

Molerio León, L. F. (2025a). Agenda 2030 y gestión de recursos hídricos subterráneos bajo incertidumbre geológica: Caso Cuba. Revista Bimestre Cubana, 141(62-63), 121-136. <https://www.researchgate.net/publication/394466154>

Molerio León, L. F. (2025b). La Teoría del Observador de Luenberger en el monitoreo de aguas subterráneas en el karst. Maya. : Revista de Geociencias (en prensa).

Molerio León, L. F., Alonso Montero, R., & Sardiñas Gómez, A. M. (2024). Problemas hidrogeológicos de la gestión eficiente de los recursos hídricos del Polje Ariguanabo, Cuba. Maya: Revista de Geociencias, Suplemento Septiembre, 24-84.

Molerio León, L. F., Pin, M., & Guerra, M. G. (2007). Diseño de la Red de Monitoreo de Tritio en las Aguas Subterráneas de la Cuenca de Vento, Habana, Cuba. Mapping, Revista Internac. Ciencias de la Tierra, 32 (Octubre-Noviembre).

Molerio León, L. F., & Sardiñas Gómez, A. M. (2024). Fuentes de incertidumbre en la evaluación de los recursos de agua subterránea en el karst cubano. Maya: Revista de Geociencias, Suplemento Abril, 33-54. <https://www.researchgate.net/publication/380375516>

Molerio-León, L. F., & Torres Rodríguez, J. C. (2002). Métodos Geomatemáticos de diseño y optimización de redes de monitoreo de aguas subterráneas. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, 23(2), 38-45.

Padilla, A., & Mangin, A. (1995). Comparative study of the hydrodynamics of various karst aquifers by means of the analysis of the recession curves of their springs. En B. F. Beck (Ed.), Karst Geohazards: Engineering and Environmental Problems in Karst Terrane (pp. 305-310). A.A. Balkema.

Peralta Vital, J. L., Molerio, L. F., Gil, R., Pin, M., & Leyva, D. (2005). Empleo de herramientas geomatemáticas para el diseño de una red de monitoreo radiométrico en el modelaje hidrodinámico de un recurso hídrico complejo. Contribución a la Educación y la Protección Ambiental, 6, 29G-39G.

Portuondo López, Y., March, C., & Guerra, M. G. (1997). Optimización de la Red de Niveles de Agua Subterránea de la Cuenca de Vento, Ciudad de La Habana [Informe inédito]. Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos.

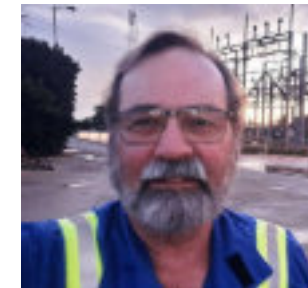
Sorg, F., Künsch, H. R., & Schirmer, M. (2020). A stochastic conceptual model for karst systems with double permeability: Application to the Miland test site, Switzerland. Journal of Hydrology, 591, 125497. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125497>

Urrea, C., & Agramonte, R. (2021). Kalman filter: Historical overview and review of its use in robotics 60 years after its creation. Journal of Sensors, 2021, Article ID 9674015. <https://doi.org/10.1155/2021/9674015>

Wunsch, A., Liesch, T., & Broda, S. (2022). Deep learning for karst spring discharge forecasting under data-scarce conditions: A case study from the Swiss Jura mountains. Hydrology and Earth System Sciences, 26(8), 2041-2056. <https://doi.org/10.5194/hess-26-2041-2022>

Zhang, Z., Li, Y., He, Z., & Wang, W. (2021). Characterization of karst aquifer heterogeneity using combined electrical resistivity tomography and support vector machine analysis. Journal of Hydrology, 603, 127133. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127133>

Zhou, Q., Gómez-Hernández, J. J., & Hendricks Franssen, H.-J. (2014). Data assimilation methods in hydrogeology: A review. Hydrology and Earth System Sciences, 18(4), 1285-1303. <https://doi.org/10.5194/hess-18-1285-2014>



LESLIE F. MOLERIO LEÓN. Geólogo de Yacimientos Minerales e Hidrogeólogo-Hidrotécnico, cubano, MSc. en Hidrología Isotópica con pre, posgrados y docencia en universidades y centros de Investigación europeos y latinoamericanos. Ex-Director del Servicio Hidrogeológico de la República de Cuba y del Centro de Hidrología y Calidad de las Aguas (Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos), Consultor Ambiental, Especialista Principal en Proyectos e Ingeniería (INVERSIONES GAMMA, S.A.), Especialista en Obras Subterráneas y Auditor Ambiental titulado. Experto para agencias de Naciones Unidas, del sistema interamericano y consultoras internacionales de varios países. Con 59 años de vida laboral activa, ha participado en unos 490 proyectos de su especialidad en 50 países. Autor o coautor de unos 370 artículos científicos y de 19 libros de su especialidad. Es Miembro de la Academia de Ciencias de Nueva York y Embajador de su Bicentenario, y de 34 sociedades científicas internacionales, cubanas y extranjeras, así como de varias comisiones de instituciones internacionales.

## Dolinización y regionalización de la recarga natural en el karst

Leslie F. MOLERO-LEÓN<sup>1</sup>  
Raydel ALONSO MONTERO<sup>1</sup>  
Mario G. GUERRA OLIVA<sup>2</sup>  
Manuel NÚÑEZ LAFITTE<sup>2†</sup>

### RESUMEN

*Este artículo aborda la dolinización como indicador clave de la recarga natural en sistemas cársicos, proponiendo métodos cuantitativos como la Densidad Superficial del Karst (Dk) y el Índice Evolutivo ( $\alpha$ ) para evaluar su desarrollo. Se enfatiza la transición desde enfoques cualitativos hacia modelos predictivos basados en cartografía automatizada y análisis morfométrico, con aplicaciones en hidrogeología e ingeniería civil en regiones cársicas.*

Palabras clave: Cartogramas de infiltración, Densidad de dolinas, Dolinización, Karst cuantitativo Recarga natural

### ABSTRACT

*This article addresses dolinization as a key indicator of natural recharge in karst systems, proposing quantitative methods such as Surface Karst Density (Dk) and the Evolutionary Index ( $\alpha$ ) to assess its development. It emphasizes the transition from qualitative approaches to predictive models based on automated cartography and morphometric analysis, with applications in hydrogeology and civil engineering in karst regions.*

Key words: Doline densit, Dolinization, Infiltration cartograms, Natural recharge, Quantitative karst

### Introducción

La evolución de la investigación del karst ha demostrado la necesidad de sustituir los métodos cualitativos tradicionales por índices cuantitativos que reflejen las condiciones físicas del macizo y contribuyan al desarrollo de una metodología para los casos en que se precise de una argumentación adecuada y sólidamente fundamentada de proyectos de construcción civil, hidráulica o aprovechamiento de las aguas subterráneas. Pero más aún, para sustentar el propio desarrollo del conocimiento. “*Todo lo que no pueda expresarse con números no es ciencia*” afirmó radicalmente Lord Kelvin.

La cuantificación y matematización de los procesos de carsificación y cavernamiento (espeleogénesis), y de las geociencias en general, constituye una transición epistemológica fundamental de lo cualitativo-descriptivo a lo predictivo-cuantitativo, siendo imprescindible tanto para el avance científico como para la gestión práctica.

Científicamente, permite trascender las meras descripciones morfológicas e hipótesis genéticas narrativas, para formular modelos conceptuales rigurosos y falsables (Popper) que identifiquen las variables de control (por ejemplo,  $pCO_2$ , gradiente hidráulico, cinética de disolución) y sus interacciones. Esta matematización, mediante ecuaciones de flujo (Darcy-Richards-Forcheimer), transporte reactivo (ecuaciones de advección-dispersión-reacción) y modelos de evolución de conductos, revela la dinámica no lineal y los umbrales de los sistemas cársicos, explicando por qué morfologías aparentemente similares surgen bajo condiciones distintas: la convergencia de formas que mencionaba Eraso hace más de 50 años (Eraso, 1975, 1982; Molerio, 1976, Machado, 2013, por citar algunos).

<sup>1</sup> INVERSIONES GAMMA, S.A., Apartado 6246, CP 10600, Habana 6, La Habana, Cuba. E-mail [especialistaprincipal@gmail.com](mailto:especialistaprincipal@gmail.com); [raydelalonsomontero@gmail.com](mailto:raydelalonsomontero@gmail.com)

<sup>2</sup> Instituto de Geofísica y Astronomía, Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente E-mail: [mguerra@iga.cu](mailto:mguerra@iga.cu)

En la práctica, es la base para herramientas predictivas esenciales: la aproximación sistémica, que privilegia el análisis de la respuesta integral del acuífero utilizando el análisis de correlación y espectro de varianza, el análisis de curvas de recesión de caudales y niveles, ensayos con trazadores y el balance hídrico; así como modelos numéricos que simulan la respuesta de manantiales a la contaminación, la vulnerabilidad intrínseca de acuíferos (como los métodos indexados), la evolución de la estabilidad de cavidades ante la variabilidad de cargas estáticas y dinámicas, el cambio climático o la planificación de obras de infraestructura en terrenos cársicos.

Sin esta cuantificación, la gestión del agua y del territorio en el karst se reduce a una extrapolación anecdótica y arriesgada, mientras que con ella se fundamenta una toma de decisiones robusta, basada en escenarios y en la comprensión de la incertidumbre estructurada inherente a estos medios heterogéneos.

Este estudio se basó originalmente (Molerio, 1970) en asumir, de acuerdo con las ideas de Cvijic (1893, 1918, 1924), de que una evidencia mensurable de la intensidad del desarrollo de la carsificación se expresaría en el dominio de los procesos de dolinización en un territorio determinado. De igual modo, serían, por excelencia, la expresión en el relieve de la recarga natural del acuífero. Constituyen puntos de infiltración inequívocos ya que no puede llegar al acuífero más caudal que la que permitan estos sitios de recarga. Más aun, la evolución de los sistemas cársicos es autoacelerado por su retroalimentación positiva: la tasa de recarga gobierna la tasa de crecimiento por disolución de los conductos y, de igual modo, el crecimiento de los conductos aumenta la tasa de descarga (Kastning, 1999). Son las formas que diagnostican la existencia del relieve cársico (Ford y Williams, 2007).

Con ello en mente, a fines de los años 1960 aplicamos algunos métodos en el estudio del desarrollo del karst en la zona de aereación (no saturada o vadosa) de la parte alta de la cuenca del río Mayabeque, Catalina de Güines, provincia de La Habana, Cuba, para contribuir a fundamentar algunos proyectos de desarrollo de infraestructura hidráulica (Complejo Hidráulico Pedroso-Mampostón, Diques de Contención del ICA, del Central Amistad con Los Pueblos y Catalina, las estaciones de bombeo de Catalina y los canales Pedroso – Mampostón y Pedroso-Güira).

Esos primeros resultados fueron presentados en 1970 al Simposio XXX Aniversario de la Sociedad Espeleológica de Cuba y la Primera Reunión Nacional de Normas y Metodologías para los Estudios Hidrogeológicos, celebrada en mayo de 1973 recomendó, a la recién creada Comisión Nacional de Hidráulica del Carso, presidida por el Prof. Diosdado Pérez Franco, aplicar la metodología Documentación del Exocarso que incluía este método, entonces en sus primeras etapas de desarrollo.

En aquellas aproximaciones iniciales, sobre la base de una discretización del espacio definida por un mallado regular como fue el cuadrículado del sistema de coordenadas Lambert de las Hojas del Mapa 1:50000 de Cuba (Fig. 1) se procedió al conteo de las dolinas dentro de esos límites. Se definía así un valor de densidad unitaria (Dolinas/km<sup>2</sup>), la Densidad Superficial del Karst (Dk) como distinción y cuantificación inicial del desarrollo espacial diferenciado de la carsificación. Indicaba también la intensidad de los procesos de corrosión acelerada (Gams, 1965a, 1965b, 1965c, 1978, 1994, 2000) y, asimismo, permitía cartografiar la distribución -en el dominio de flujo- de las zonas de mayor recarga natural, que, en el caso de las áreas de embalse, contribuía a delimitar las zonas de pérdidas por infiltración y, eventualmente, de subsidencia (Fig. 2).

El refinamiento adicional, a partir de identificar las que denominamos, “Fases de Profundización” de las dolinas, un indicador de su grado evolutivo; esto es, de su actividad hidrológica, permitía la diferenciación relativa de procesos particulares de carsificación y espeleogénesis (Tabla 1).



Fig. 1. Campo de dolinas lacustres de Cuatro Caminos



Fig. 2. Corrección de la estabilidad en una dolina subsidente (Foto del coautor Molerio-León)

El mallado reticular facilitaba el trazado de isolíneas de igual densidad de dolinas y la zonación de los estados evolutivos, contribuyendo a señalar la dirección del desarrollo de los procesos de dolinización y sus asociados (la dirección del crecimiento de la entropía en el sistema).

Utilizando el centro geométrico de los retículos 1:50000 como centroide del sistema, se disponía, de hecho, de una red regular de interpolación. Asumiendo que se trataba o podría tratarse del centro de gravedad de Áreas Elementales Representativas facilitaba tanto la interpolación como la promediación estadística de las propiedades física del sistema con la restricción, por supuesto, que el resultado sería fuertemente dependiente de la escala de medición.

Años más tarde, a principios de 1980, nuestro grupo de trabajo apoyó la fundamentación de decenas de cierres de presas propuestas en el Esquema de Aprovechamiento de los Recursos Hídricos y Agropecuarios de Cuba, sustentando geomorfológicamente la viabilidad de los embalses propuestos indicando las áreas de pérdidas por infiltración en los vasos de las presas consideradas (Guerra y Camacho, 1988).

Tabla 1. Fases de profundización de las dolinas (Molerio, 1970, 1973).

Fase	Descripción	Grado de actividad hidrológica
I	La depresión no presenta ponores. El lapiés se encuentra aflorando sin cobertura de suelo. No acumula agua pluvial excepto en momentos de fuertes precipitaciones	1+
II	La depresión presenta ponores y se mantienen las anteriores características	2+
TRANSICIÓN		
II-III	Ponores unidos por coalescencia y se mantienen las anteriores características	2-3+
III	Varios niveles de ponores escalonados, generalmente formando cavidades y cuevas horizontales o verticales en el fondo de la depresión. Los sedimentos terrígeno (terra rossa y similares e incluso de arrastre ocupan el piso de las cavidades forman pequeñas acumulaciones alrededor del lapiés	3+
IV	Los sedimentos terrígenos sellan los ponores. El agua de lluvia se acumula generando un tipo de depresión (dolina) lacustre por entarquinamiento y no asociada a la elevación del nivel freático. Se presentan procesos de decalcificación y solifluxión.	4-

Si bien mucha información en los cierres y áreas de embalse fue definida por métodos morfométricos sobre las bases cartográficas y geológicas, precisar las áreas de infiltración requirió refinar algunos métodos habida cuenta que aquellos derivados de Horton – Strahler no ofrecían plena garantía de precisión, sobre todo en el karst.

Se definió un índice de trabajo, el Rf, frecuencia de drenaje aplicando un sistema booleano de ceros y unos, en la que la ausencia de drenaje de cualquier tipo, marcada por un valor 0, implicaría cualitativamente un predominio de la infiltración (o evapotranspiración). sobre el escurrimiento y, en cualquier caso, una zona de pérdida o fuga de agua (Fig. 3).

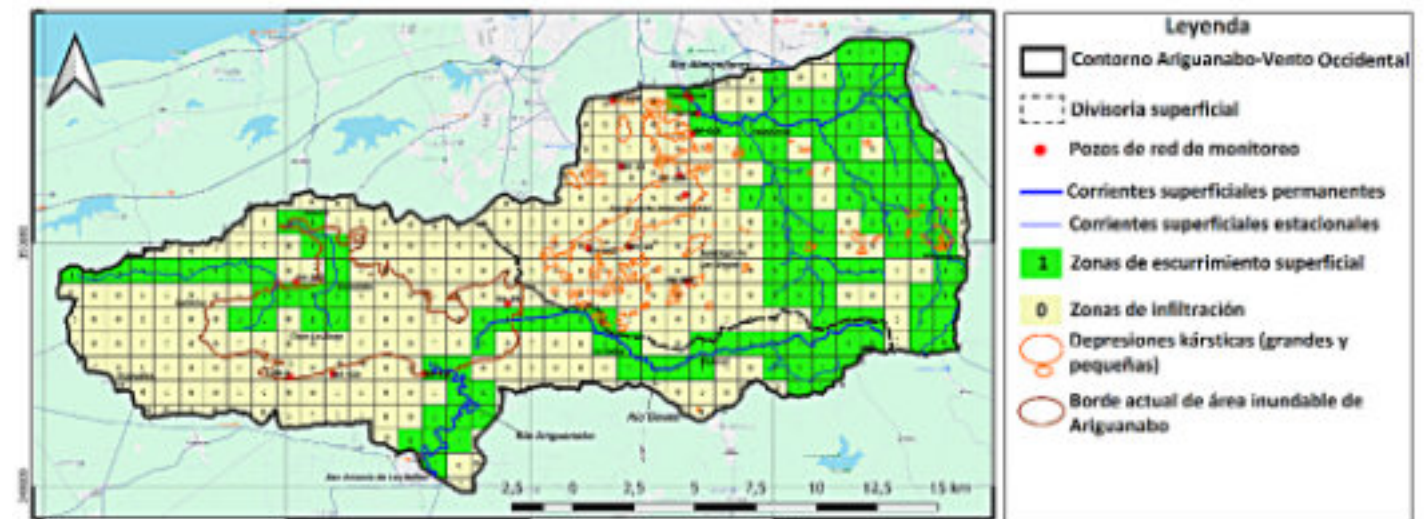


Fig. 3. Cartograma booleano del sistema acuífero del Polje Ariguanabo.

La presencia ausencia de drenaje superficial en la cuadrícula fue también la base de una mapificación booleana (presencia-ausencia) donde los ceros indicaban el predominio de la infiltración (valores cero en la celda) sobre el escurrimiento superficial (valores 1).

Llevada al karst, o siempre se adoptaría como una zona de pérdida por infiltración o, del lado positivo, de recarga natural del acuífero. Decenas de kilómetros cuadrados de áreas de embalse fueron así categorizadas con una altísima certidumbre de las zonas de pérdidas, comprobadas la inmensa mayoría sobre el terreno, en sucesivas campañas de campo acompañadas de técnicas complementarias de exploración hidrogeológica, espeleológica y de hidrología isotópica. Su expresión gráfica, mediante un cartograma<sup>3</sup> resultaba muy cómoda para los proyectistas. Precisiones mayores se ajustaban perfectamente refinando la red.

El primer intento de automatización del proceso fue iniciado por los coautores Guerra y Núñez sobre la base del sistema cubano TeleMap<sup>4</sup>, desarrollado por GEOCUBA en los años 80 pasados (Guerra, 1987).

La generalización del método requirió, posteriormente, de una fundamentación teórica y, el propio desarrollo de recursos tecnológicos de cartografía automatizada permitió abandonar el conteo manual por inspección directa, revisión cartográfica, procesamiento aerofotográfico o de imágenes aeroespaciales y presentar el producto de una forma más precisa, amigable y elegante.

La aproximación a la solución del problema original –definición de las zonas de pérdidas de agua de escorrentía– se ha emprendido más recientemente aplicando técnicas de interpolación no regular y ajustando el dominio a los límites de sistemas de flujo locales, con límites naturales y no arbitrarios.

Este artículo, basado en aquella primera aproximación de 1970 resume algunas de las experiencias de aplicación del método en la investigación ingeniero geológica de obras hidráulicas y civiles en el karst y de estudios hidrogeológicos encaminados a la estimación de balance hídrico y recarga artificial.

#### TIPOLOGÍA DE LAS DOLINAS

“La zona superficial del aparato cárstico o zona de absorción posee formas muy características, que se denominan formas de absorción [que] corresponden a dos tipos distintos: formas cerradas, en las cuales la absorción se realiza lentamente y formas abiertas en las que el agua puede penetrar en masa...” (Llopis, 1982). Entre las formas cerradas las dolinas y, entre las abiertas, las simas, sumideros, cuevas...según el mismo autor.

Las dolinas representan, morfológica e hidrológicamente el enlace entre el drenaje superficial y el subterráneo (Fig. 4). “Dolina”<sup>5</sup> es un término eslavo para nombrar las depresiones del terreno que fue aprovechado por Cvijic (1894, 1895) para designar todas las depresiones circulares en las regiones cársicas: “utilizamos el termino dolina para englobar todas las depresiones con forma de embudo que confieren a las regiones cársicas su característico paisaje”.

Según el propio Llopis las dolinas serían “el resultado de la infiltración del agua por las intersecciones de dos diaclasas y por las fisuras menores [que crean] una zona de máxima disolución y en consecuencia se producirá allí una mayor emigración de caliza disuelta hacia abajo, y la consiguiente pérdida de volumen del conjunto. Estos fenómenos tienen por núcleo la...intersección de diaclasas y van disminuyendo concéntricamente a partir de este punto hasta anularse”. Muy oportunamente diferenciaba dos regiones en una dolina; de hecho, dos dominios de flujo; la **externa o embudo**, por donde se recogen las aguas de precipitación y de escurrimiento, principal elemento colector que en ocasiones sirve también de depósito, y la **chimenea o tubo de absorción**, asiento del fenómeno de disolución y región por la cual el agua se infiltra.

<sup>3</sup> Un cartograma es un mapa o diagrama que muestra datos cuantitativos asociados a sus respectivas áreas mediante la modificación o deformación de la forma de esas áreas, dando lugar a diversos tamaños.

<sup>4</sup> TeleMap: Software para las Geociencias es un potente software que integra Fotogrametría, Cartografía digital, Sensores Remotos y un sistema de Información Geográfica desarrollado por GEOCUBA desde 1990

<sup>5</sup> Que se ha generalizado en lengua hispana. Es un término poco reconocido, sin embargo, en la literatura anglosajona, que prefiere utilizar “sinkhole” literalmente sumidero y menos frecuentemente “swallow hole”.



Fig. 4. Típica dolina corrosiva (Foto del coautor Molerio-León)

La dolina –seguimos a Llopis– “representa una zona óptima de absorción, puesto que no solamente absorbe las aguas pluviales que vierten directamente sobre ella, sino también las resultantes del escurrimiento de las vertientes (overland flow) sobre las que pueden desarrollarse talwegs transitorios que favorecen la conducción de las aguas de escurrimiento hacia la dolina, que funciona como nivel de base de dichas aguas de escurrimiento”.

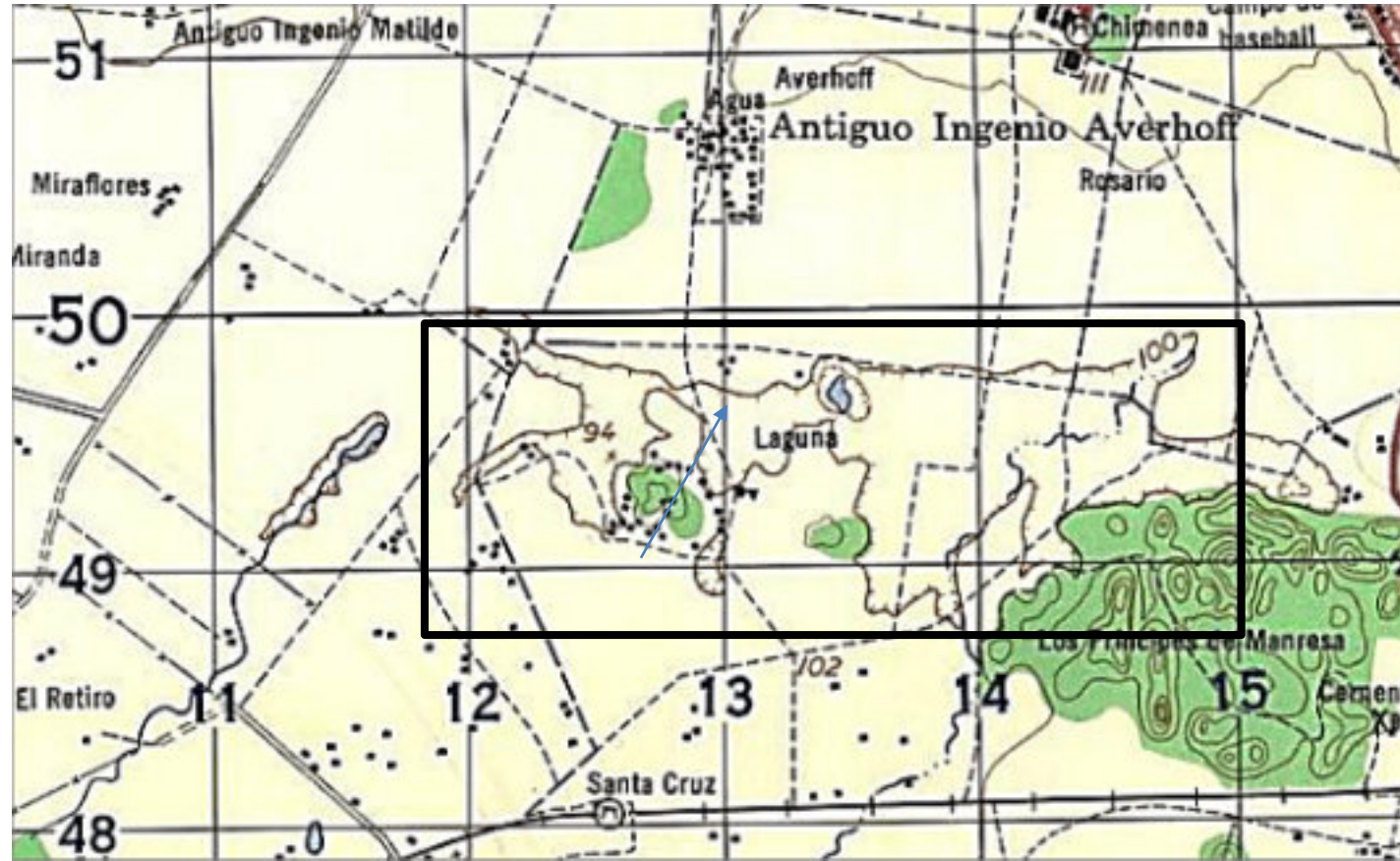
Molerio (2013) tipificó las formas de absorción, en las que se incluyen las dolinas del modo que se resume en la Tabla 2.

Tabla 2. Tipología de las dolinas (Molerio, 2013)

TIPO	SUBTIPO	DEFINICIÓN/ORIGEN
Dolinas	De hundimiento	Debidas a clastificación de bóvedas de cavidades subyacentes o por procesos mixtos de corrosión subaérea y erosión inversa.
	Corrosivas	Debidas a procesos predominantemente de corrosión cársica.
	Sufosivas	Formadas por asentamiento progresivo o brusco de su fondo debido a procesos de sufusión.
	De contacto (marginales)	Desarrollados en el contacto entre rocas carsificables y no carsificables por procesos de disolución y de erosión predominantemente diferencial.
	Lacustres	Formadas por erosión lateral y flujo helicoidal en sistemas lacustres, afloramiento de las aguas subterráneas o por escorrentía superficial
	Mixtas (poligénicas)	Combinación de las anteriores.

Todas constituyen definitivamente puntos de recarga natural del acuífero, pero pueden presentar diferentes variedades morfológicas e hidrológicas. Llopis no incluyó el lapiés entre sus formas de absorción, que Cvijic lo consideró una de las formas más típicas del karst (“que ocurre en todas las regiones, en cualquier altitud y en diferentes climas”; Herak, 1976), pero tiene el mérito de haber asociado las morfologías acompañantes del ciclo hidrológico de karst generadas por la fase terrestre de su movimiento superficial-subterránea-superficial.

Tal es el caso de aquellas dolinas abiertas que captan corrientes fluviales (Fig. 5), aquellas que drenan el acuífero superficialmente y constituyen puntos de emisión (Fig. 6) y las que forman lagos, que dejan de ser puntos de infiltración cuando el humedal se debe al entarquinamiento de la depresión (Fig. 7). Excepto en este caso, el tipo genético de dolina es totalmente indiferente respecto a la capacidad de infiltrar las aguas superficiales.



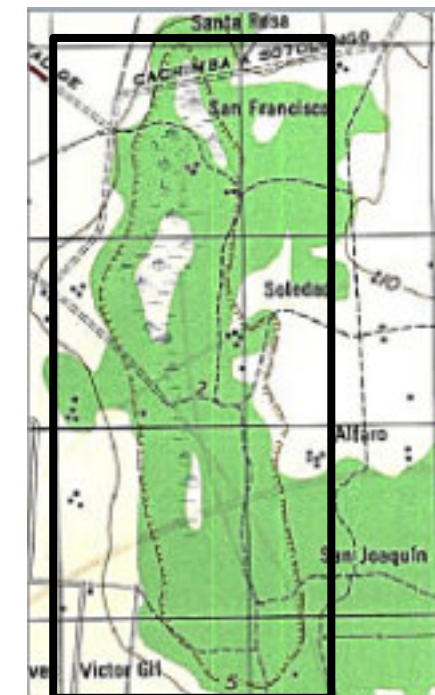
**Fig. 5. La Gran Dolina de Aguacate, Complejo de dolinas unidas por coalescencia en uno de cuyos sectores desemboca el arroyo Pata de Gallina.**

Los sumideros (ponores) en general, tanto los que captan corrientes fluviales (Fig. 8) como los que no (Fig. 9), se consideran puntos de absorción *-abiertos*, en la terminología de Llopis- en la metodología que describimos en este artículo, con independencia que presenten o no una dolina de acceso, que en este caso se sustituye por la sección terminal de un valle ciego. Aquellas corrientes superficiales con recorridos parcial o totalmente subterráneos que no alimentan al acuífero, sino que circulan por la zona no saturada no se consideran puntos de recarga natural a los fines de este artículo, pero sí de pérdidas laterales para obras de regulación artificial del escurrimiento.

Sauro (2005) ha simplificado el problema proponiendo tres tipos de dolinas corrosivas. En la Fig. 10, (A) Es una dolina de recarga puntual, la depresión, marcadamente asimétrica, está conectada por un sumidero principal, alimentado principalmente por aguas superficiales y subterráneas. (B) En la dolina de descenso, la depresión resulta de la concentración de la disolución dentro de la zona de infiltración de agua de la roca mediante la convergencia centrípeta del agua, principalmente subterránea, contenida en el epikarst (es decir, la zona superior de la roca soluble presenta una mayor porosidad secundaria). (C) En la dolina de inicio, la depresión también se origina por una convergencia centrípeta de agua, pero esta ocurre dentro de una estructura hidrogeológica preexistente y se desencadena por un cambio en la conductividad hidráulica del macizo rocoso, influenciado por factores litológicos y estructurales.



**Fig. 6. Campo de dolinas lacustres emisivas en la cuenca inferior del río Guara**



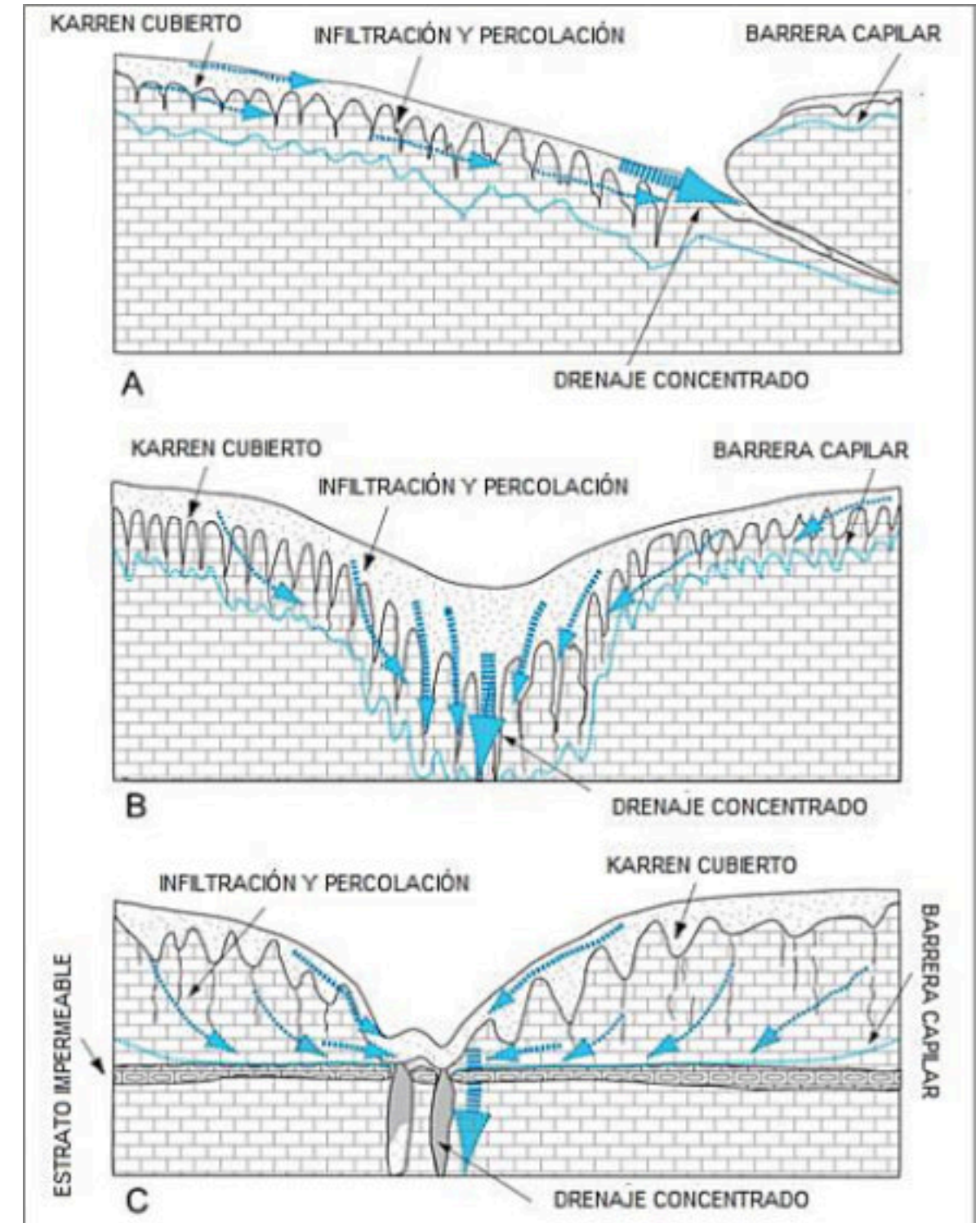
**Fig. 7. Dolina de Tamaulipas. Con sus bordes en cota +5, una perforación geológica en su perímetro mostró una columna litológica de 75 metros de material terrígeno sin cortar todo su espesor. Otra, en su perímetro más meridional, se detuvo los 65 metros sin rebasar la misma litología.**



**Fig. 8.** Sumidero el río San Antonio. Drenando por el sur la laguna del Polje Ariguanabo, luego e un recorrido de 13 km es completamente absorbida por este punto y, en un recorrido subterráneo parcialmente comprobado por la exploración espeleológica, aporta sus caudales al acuífero de la cuenca Sur (Foto del coautor Molerio-León).



**Fig. 9.** Ponor descubierto por desplome parcial del techo de una galería subterránea (Foto del cautor Molerio-León)



**Fig. 10.** Tipos principales de dolinas de disolución (Sauro, 2005)

Más importante es el mecanismo mediante el cual ingresan las aguas al acuífero, si es por recarga difusa o, como ocurre las más de las veces, mediante ponores o directamente a través de cuevas y, en este caso, es más trascendente si el conducto al que se accede conecta o no con el acuífero subyacente (Fig. 11).



**Fig. 11. Cueva Fructuoso, Sector Kárstico Jobal-Gegira, Gibara, Cuba (Foto (José Corella Varona))**

El modo en que se cierra esta componente de la fase terrestre del ciclo hidrológico en el karst requiere siempre de documentación particular. Muchos conductos desaguados en la zona no saturada, que ya abandonaron las épocas de circulación activa, funcionan como colectoras conductoras de flujo hipodérmico que circula sobre el nivel freático, captan las aguas de infiltración y, en ocasiones, las coleccionan y trasladan por la zona no saturada hacia otros sitios del acuífero y no necesariamente continúan su movimiento vertical hacia el manto freático (Fig. 12).

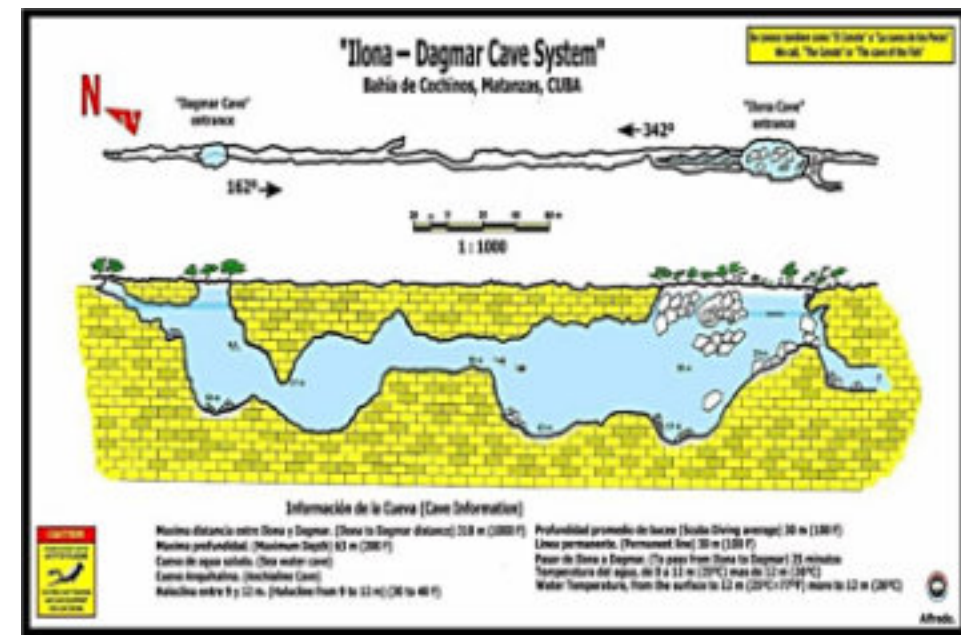


**Fig. 12. Campo de Dolinas de Puerta de La Güira (cada cuadrícula equivale a 1 km<sup>2</sup>). La Laguna García, en el extremo derecho es una dolina merofosilizada por sedimentos de tipo terra-rossa. La dolina La Pastora es el sumidero de un sistema de conductos predominantemente horizontales (Cueva Montalvo) que funciona como cauce hipodérmico al captar las aguas de escorrentía y de desbordamiento de Laguna García y conduce aguas subterráneamente hasta el nivel freático a unos 500 metros al sureste del sumidero.**

Numerosas dolinas de hundimiento, sufosivas en abundantes casos, conducen a acuíferos someros y constituyen puntos de recarga puntual del acuífero sin solución de continuidad. Algunas de ellas muestran cierto espesor de zona no saturada y epikarst descubierto por el que también ingresa cierta recarga difusa (Fig. 13), en tanto otras de tipo lacustre exhiben en superficie (Fig. 14) o a muy poca profundidad espejos de agua abiertos del manto freático (por lo que también constituyen superficies de evaporación libre). Estas últimas son los conocidos cenotes, (Fig. 15), casimbas o ciertos blue-holes de Bahamas. Desaguadas, se conocen casos notables en Cuba, como el Hoyo de Morlote Fig. 16) o en Venezuela, la Sima de Sarisariñama (Fig. 17).



**Fig. 13 Planta y perfil de Cueva Saturno, que muestra un cierto espesor de epikarst y zona no saturada por la que ocurre recarga difusa y la dolina abierta a la que directamente se accede al nivel de las aguas subterráneas contribuyendo a la infiltración y recarga natural del acuífero de manera directa (Cortesía de Alfredo Contreras)**



**Fig. 14. Casimba en el karst de la Ciénaga de Zapata que muestra la posición del nivel de las aguas subterráneas aflorando en superficie (cortesía de Alfredo Contreras)**



Fig. 15 Dolina de acceso y lago freático en un sector del sistema Sac-Actun, México (Foto cortesía de Germán Yáñez)



Fig. 16. Sima de Morlote, Parque Nacional Desembarco del Granma, Cuba (Foto cortesía de Raudel de Llano y Yamilé Luguera -en la foto-)



Fig. 17. Simas de Sarisariñama, Venezuela, (Foto cortesía de Charles Brewer-Carías)

Expresiones morfológicas de la recarga natural a través de dolinas o conductos verticales directos son los llamados “sótanos” en México (Fig. 18), “furnias” en Cuba, simas, en la literatura especializada o avens, avencs, torcas en Francia y España. El complejo de simas verticales del valle glacial de Ortobalagan, en Abjasia, donde se encuentra Krubera, la cueva más profunda del mundo (Fig. 19), es un ejemplo de valle ciego que conecta en la profundidad varios sistemas de cuevas verticales en los que las dolinas de acceso no existen (Fig. 20). La singular hidrodinámica de este proceso de ingreso al acuífero tanto como caída libre o por flujo siguiendo las paredes, ha sido estudiada por Brucker y White (1972) y más recientemente –en Cuba- por Molerio (2020).

Fig. 18. Corte del Sótano de Las Golondrinas, San Luis Potosí, México (Cortesía de Mónica Ponce)

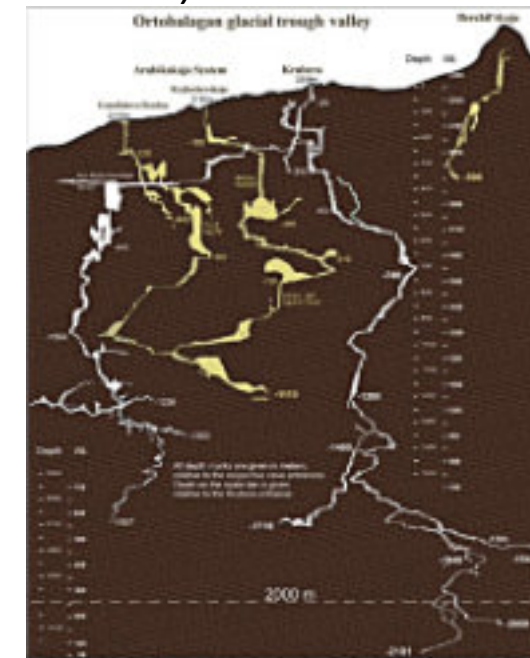


Fig. 19. Sección vertical del complejo de simas del valle glacial de Ortobalagan, Abjasia (Archivo del coautor Molerio-León)



Fig. 20. Grieta de acceso a la sima de Krubera, Abjasia (Archivo del coautor Molerio-León)



**INFLUENCIA DE LOS CAMBIOS FACIALES**

Una diferenciación importante se deriva del patrón litológico en el que se excava la dolina. Ello influye tanto en su origen y su morfología, como el modo en que se integra al ciclo hidrológico. Ese hecho fue notado por Grund (1914) en una época muy temprana: *“así como podemos distinguir rocas duras y suaves en lo que respecta a su resistencia a la erosión, las calizas y dolomitas se comportan diferente respecto a la corrosión, ya que la caliza puede ser fácil o difícil de disolver, dependiendo de la pureza de las rocas”*.

En efecto, las variaciones faciales son trascendentales en el desarrollo de la carsificación (Choquette y Pray, 1970; Lucia, 1995, Bauer et al., 2002; Klimchouk, 2015; Ronchi y Crupi, 2019; Goldscheider, 2020). Fundamental para la gestión de los recursos hídricos es no perder de vista que la variedad de facies y transiciones faciales (verticales y horizontales) de las rocas carbonatadas que forman los acuíferos y la estructura tectónica diferenciada de los sistemas acuíferos (Fig. 21) son los responsables de la heterogeneidad y anisotropía de las propiedades físicas de estos materiales y que afectan, de distinta manera la recarga, movimiento y extracción de las aguas así como controlan los procesos de adquisición de la composición química e isotópicas de las aguas (incluida la calidad de las mismas).

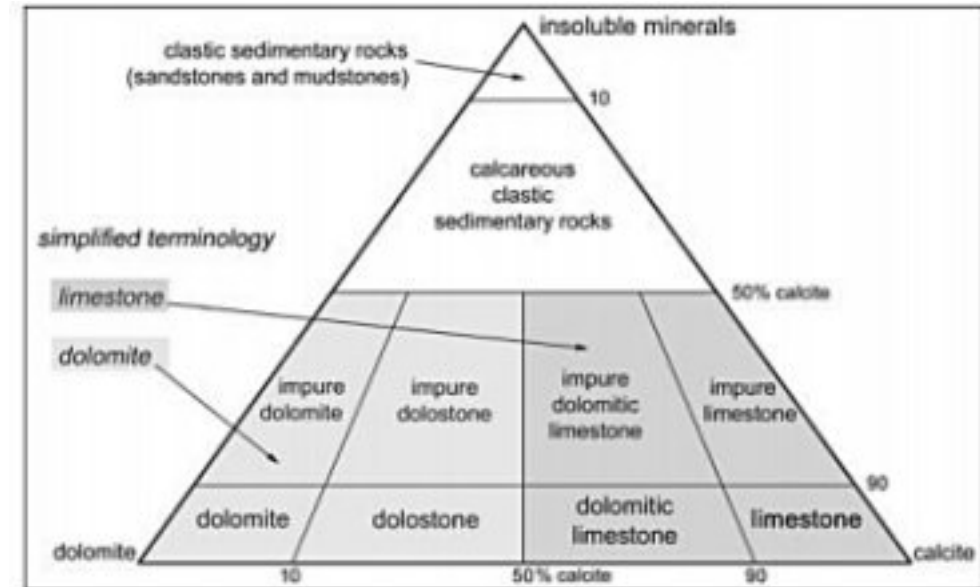
Los cambios faciales (litofacies) horizontales y verticales en las rocas carbonatadas ejercen un control fundamental sobre la estructura y las propiedades hidrogeológicas de los acuíferos cársicos. Su influencia se manifiesta de la siguiente manera:

Los cambios faciales verticales, asociados a la estratificación controlan la disolución preferencial, ya que las facies más puras (calizas cristalinas) son más solubles, mientras que las interestratificaciones de margas o lutitas actúan como barreras impermeables, dirigiendo el flujo horizontal y favoreciendo la formación de niveles freáticos locales o conductos subhorizontales. La anisotropía vertical, alternancia de capas porosas/ fracturadas con otras menos permeables, genera acuíferos estratificados o multicapa, con flujos preferenciales a lo largo de las capas más competentes, en tanto las facies superficiales más fracturadas o meteorizadas condicionan la infiltración y la formación de la zona de alteración superficial (epikarst).

Los cambios faciales horizontales (variación lateral) contribuyen definitivamente a la heterogeneidad en la permeabilidad, ya que transiciones laterales modifican la porosidad primaria (interpartícula, intrafósil) y la conectividad de fracturas, creando compartimentos hidrogeológicos. Asimismo, las facies elongadas (como barras o canales) pueden imponer direcciones preferentes de flujo subterráneo y alinear la red de conductos cársicos. Las facies con mayor porosidad primaria (ej.: calizas bioclásticas) favorecen la recarga difusa, mientras que las facies masivas y fracturadas promueven la recarga concentrada a través de dolinas o sumideros.

La interacción entre facies y fracturas define si el sistema acuífero tiende a ser difuso (dominado por matriz porosa), dominado por conductos discretos o de doble o múltiple porosidad o permeabilidad. Aquellos sistemas acuíferos en facies homogéneas suelen tener respuestas más atenuadas a la precipitación, mientras que en facies heterogéneas la respuesta es más rápida y pulsada. Las facies altamente conductoras favorecen la propagación rápida de contaminantes o de cualquier otro proceso de transporte de masas, mientras que las facies margosas pueden actuar como barreras naturales.

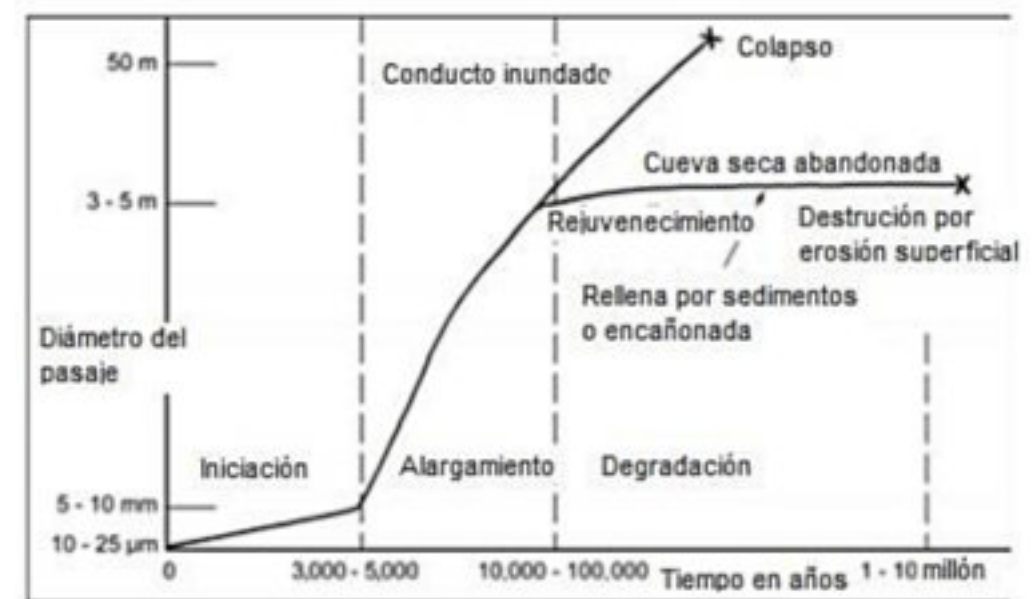
La arquitectura facial (vertical y horizontal) de los carbonatos es un control primario sobre la anisotropía, la conectividad hidráulica y la dinámica de flujo en acuíferos cársicos. Bulla (1954a, 1954b) y Jakucs (1977) han insistido sobre *“las peculiares diferencias en la escultura del relieve debida a las diferencias en la constitución petrográfica bajo las mismas condiciones de denudación en el mismo período de tiempo”*. Bulla definió como *“petromorfología la ciencia de las facies del relieve basadas en las diferencias del material petrográfico y litológico de las rocas que forman la superficie del planeta”*.



**Fig. 21. Variación general de tipos de calizas y dolomías según su pureza (Waltham, et al., 2005)**

La Fig. 22 muestra un esquema de evolución temporal propuesto por White (1988), desde una grieta estrecha hasta una cavidad y su eventual destrucción por colapso o aplanamiento de superficie del terreno. Para efectos de geotecnia y construcción Waltham et al., 2005 propusieron seis tipos de dolinas (Fig. 23) que en esta contribución muestran las distintas maneras y morfologías asociadas a la componente de absorción e ingreso al acuífero de las aguas de infiltración.

Los cambios faciales juegan un papel esencial en la conformación de los sistemas menores de flujo, dominados por una estructura del campo de propiedades físicas que regula su propio desarrollo del dominio de flujo. En Cuba, es la causa fundamental de la diferenciación entre los sistemas de flujo a cualquier escala y de la incertidumbre geológica en la gestión de las aguas subterráneas en el karst (Molerio, 2024a, 2024b; Molerio, Alonso y Sardiñas, 2024).



**Fig. 22. Desarrollo lineal del espacio carsificado desde una grieta a una caverna colapsada (White, 1988)**

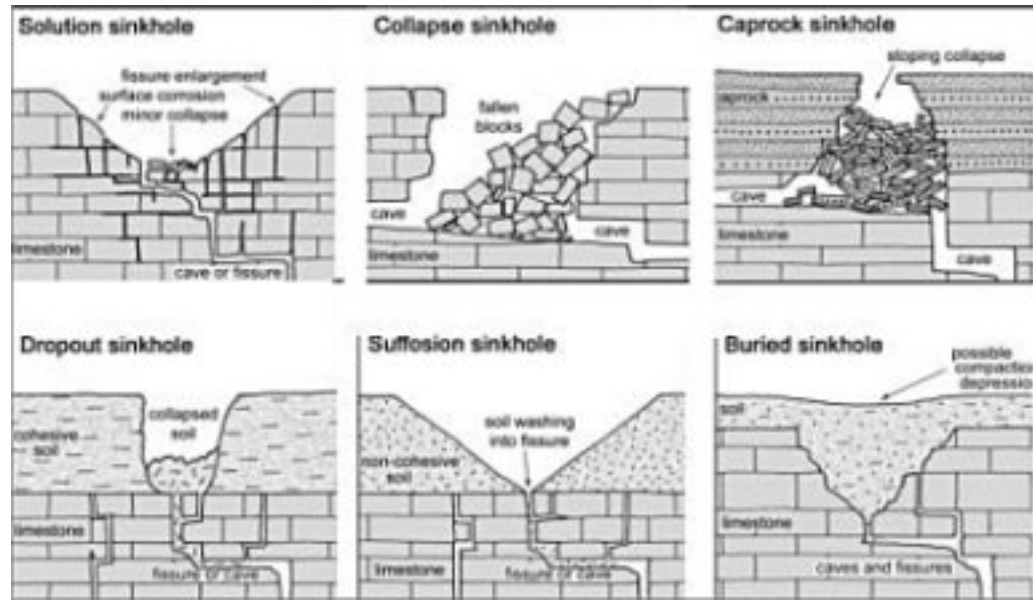


Fig. 23. Tipos de dolinas y secciones típicas en las que hemos mantenido la terminología original del autor (Waltham et al., 2005)

#### CONCEPTO DE ÁREA ELEMENTAL REPRESENTATIVA

El Área Elemental Representativa (AER), Volumen Elemental Representativo (VER), Longitud Elemental Representativa (LER) conocido por el término en inglés Representative Elementary Volume (REV), es un concepto teórico y operacional fundamental en la mecánica de medios continuos aplicada a medios porosos y fracturados (Bear, 1972; Freeze y Cherry, 1979; Kunze y Nielsen, 1982; Molerio, 1985; de Marsily, 1986; Dagan, 1989; Bear y Buchlin, 1991; 1992a; Gelhar, 1993; Renard y de Marsily, 1997; Sauter y Liedl, 2000; Neuman, 2005; Sánchez-Vila et al., 2006).

Se define como el volumen, área o longitud mínimo de material heterogéneo a partir del cual una propiedad física macroscópica (como porosidad, conductividad hidráulica, contenido de humedad) puede ser considerada representativa del conjunto y puede ser tratada como un valor constante en las ecuaciones de flujo, permitiendo así la transición de una descripción microscópica discreta a una descripción macroscópica continuo.

Para una propiedad  $P$  (como la porosidad  $n$ ) en un punto  $(x,y,z)$  del espacio, se define un volumen  $V$  centrado en ese punto. Al calcular el valor promedio de  $P$  sobre  $V$ , se observa que:

1. Cuando  $V$  es muy pequeño ( $\rightarrow 0$ ),  $P(V)$  fluctúa fuertemente dependiendo de si  $V$  incluye un grano de roca, un poro o una fractura.
2. A medida que  $V$  aumenta, las fluctuaciones de  $P(V)$  se amortiguan.
3. Existe un rango de tamaños de  $V$  para el cual  $P(V)$  permanece **prácticamente constante**. Este es el rango de la **escala del REV**.
4. Si  $V$  continúa aumentando (más allá de la heterogeneidad local),  $P(V)$  puede volver a cambiar debido a tendencias o heterogeneidades a gran escala, como cuando tienen lugar cambio de facies

Gráficamente, la propiedad  $P$  en función del volumen  $V$  muestra una meseta. El REV es cualquier volumen dentro de esa meseta Fig. 24.

En un medio cársico con multiplicidad de espacios (Molrio, 1985; su aproximación más simple es el modelo de doble porosidad o doble permeabilidad; esto es matriz + conductos/conexiones preferenciales), el concepto de REV es especialmente importante ya que para la matriz microporosa, puede existir un REV relativamente pequeño y para las redes de conductos a diferente escala el espaciamiento entre ellos puede ser tan grande, que un REV que los incluya de manera representativa puede exceder el tamaño práctico de la escala de interés del modelo (ej., el volumen de toda la cuenca).

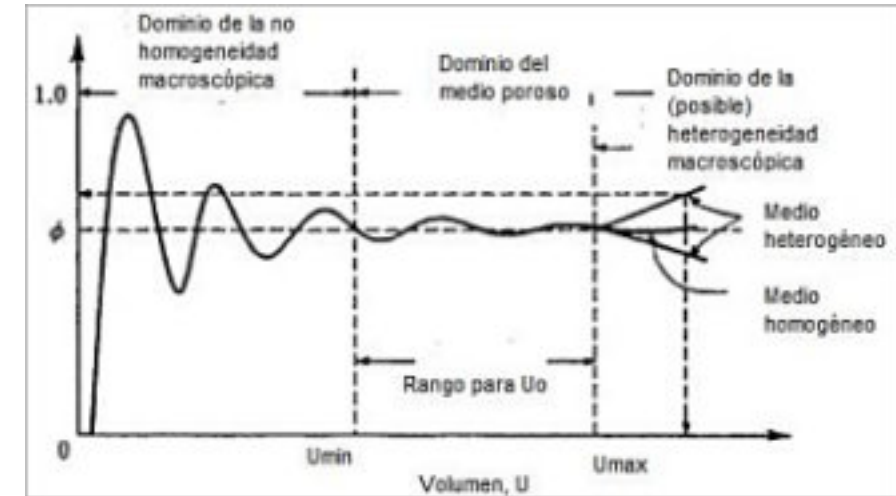


Fig. 24. Ejemplo de variación de la porosidad en la vecindad de un punto como función del volumen promedio (tomado de Bear y Buchlin, 1991)

En muchos casos, a escala de cuenca, la red de conductos no puede ser homogeneizada y debe tratarse como elementos discretos tales como aquellos de flujo en conductos; por tanto, a veces es cómodo aplicar el REV al continuo de la matriz y la red de fracturas finas.

Un volumen (VER o REV), longitud (REL) o área (AER) elemental representativo se define, entonces, como aquel volumen, longitud o área en las que un ligero incremento o disminución de sus límites no causa una variación apreciable en el valor o magnitud de una propiedad o grupo de ellas. En medios anisotrópicos es necesario incluir que tal incremento o disminución tampoco debe provocar una sensible alteración en la dirección de tal propiedad o grupo de ellas.

#### PROMEDIACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS

Promediar estadísticamente una propiedad física, como la conductividad hidráulica  $K$ , o la porosidad  $n$ , en un medio heterogéneo y anisotrópico como el karst no es un mero artificio matemático, sino una necesidad física y metodológica para reducir la incertidumbre y aproximarse a un modelo realista.

Las razones para ello pueden enunciarse del modo siguiente:

1. Imposibilidad de obtener una caracterización determinística completa del medio cársico, ya que es físicamente y económicamente inviable medir la conductividad hidráulica en cada punto de un acuífero cársico. El muestreo es siempre discreto, escaso y sesgado. El promedio estadístico, junto con una medida de su varianza (incertidumbre), permite extrapolar información desde puntos de medición a volúmenes no muestreados de manera rigurosa.
2. Legitimidad física del promedio (Escala del Volumen Elemental Representativo -REV): Al trabajar a una escala espacial igual o mayor que el REV para la matriz, la propiedad  $K$  adquiere un significado físico como propiedad efectiva del medio continuo equivalente. Este valor promedio ( $K_{\text{efectiva}}$ ) es el que permite aplicar la ley de Darcy a escala macroscópica. Ignorar este promedio obligaría a modelar cada grano, poro y microfractura, lo que es computacionalmente imposible.
3. Reducción de la incertidumbre predictiva, puesto que un modelo que utiliza un único valor de  $K$  medido localmente (determinístico puntual) producirá predicciones con una incertidumbre enorme y probablemente erróneas, porque no representa la heterogeneidad. Un enfoque estadístico que define una distribución espacial de  $K$  (geoestadística) y deriva un valor efectivo (promedio ponderado por el flujo) permite a) Cuantificar la

incertidumbre al generar múltiples realizaciones equiprobables del campo de K y observar el rango de respuestas del modelo (análisis de sensibilidad estocástico) y b) Obtener predicciones más robustas en tanto el valor efectivo está calibrado para reproducir el comportamiento hidrodinámico integrado del sistema (como la recarga en el sistema o la descarga total de un manantial), que es lo que generalmente interesa a escala de cuenca.

- Manejo de la anisotropía, ya que el karst es intrínsecamente anisotrópico (la K es mayor en la dirección de los estratos, fracturas o conductos principales). El promedio estadístico no debe ser un simple promedio aritmético. Se usan promedios ponderados (armónico para flujo en serie, geométrico para distribuciones log-normal, aritmético para flujo en paralelo) para calcular tensores de conductividad hidráulica efectiva que capturen direccionalidad. Esto acerca el modelo a la realidad física de las vías preferenciales del flujo cársico de los fluidos.

Para obtener las ecuaciones de conservación y de movimiento por aproximación a un medio continuo (saturado) es necesario introducir un cierto espacio elemental representativo en términos de volumen o longitud o de área (Bear et al., 1968) para el cual las propiedades puedan definirse como continuas.

Tanto el REL como el REV son términos en los que se permite una cierta vaguedad como recurso numérico para obviar el efecto de escala en la deformación de los resultados. La siguiente fundamentación ha sido tomada de este último trabajo, y ofrece la posibilidad de evaluar propiedades continuas en muestras representativas que exhiban continuidad de centro a centro de gravedad de las componentes del sistema.

Partiendo de que la Ley de Darcy establece que,

$$\bar{v} = -K \text{grad } h$$

siendo  $v$  la velocidad media,  $K$  el tensor de conductividad hidráulica y  $\text{grad } h$  la diferencia de potenciales, es necesario definir en  $V$  las siguientes componentes:

- la velocidad baricéntrica,  $V^*$ ;
- la velocidad volumétrica

$$v = v^* + \left( \frac{D_s}{\rho} \right) \text{grad } \rho$$

- la velocidad de cualquier componente  $\alpha$   $v_\alpha$

La ecuación local de continuidad se deriva a partir de,

$$\int_V \left( \frac{\partial \rho}{\partial t} dU \right) = - \int_V \rho v^* dS = - \int_V (\rho v - D_s \text{grad } \rho) dS$$

en la que  $U$  es un dominio finito del espacio y  $S$  la superficie límite.

Expresando  $\rho$  y  $V_s$  en cualquier punto de la sección del circuito como una suma de promedios sobre el área  $\omega$ , siendo  $V_s$  la proyección de  $V$  en la dirección del eje del circuito, resulta:

$$v_s = \langle v_s \rangle + v_s$$

$$v_s = \frac{\int \rho v_s d\omega}{\int d\omega}$$

En el límite de una película de canal y promediando sobre la sección del circuito, la Ecuación Local de Continuidad adopta la forma:

$$\frac{\partial \langle \rho \rangle}{\partial t} = \left\langle \frac{\partial (\rho v_s)}{\partial s} + \frac{\partial (D_s \partial \rho)}{\partial s} \right\rangle$$

o,

$$\frac{\partial \langle \rho \rangle}{\partial t} = \left\langle \frac{\partial (\rho v_s)}{\partial s} \right\rangle$$

En la que  $ds$  es el elemento de longitud a lo largo del eje del canal.

Entonces,

$$l_s = \frac{\langle v \rangle}{\langle v_s \rangle}$$

y,

$$\frac{\partial}{\partial s} ( ) = \frac{\partial}{\partial \xi_i} ( ) \frac{d \xi_i}{d \sigma} \frac{d \sigma}{ds}$$

para,

$$\frac{d \sigma}{ds} = \sec \theta$$

siendo  $\xi_i(\sigma)$ , las coordenadas cartesianas de un punto a lo largo de una línea de corriente y  $d\sigma$ , un elemento de longitud a lo largo de una línea de corriente en un sistema fijo de coordenadas  $\xi_i = (1,2,3)$  sistema en el cual (5) o (6) pueden plantearse como:

$$\left\langle \frac{\partial v}{\partial t} \right\rangle = \left\langle \frac{\partial}{\partial \xi_i} \left[ D_s \sec^2 \theta \cdot T_{ij} \frac{\partial \rho}{\partial \xi_j} - \frac{\partial}{\partial \xi_i} (\rho v_i) \right] \right\rangle = \left\langle \frac{\partial}{\partial \xi_i} \left[ D_s T_{ij}^* \frac{\partial \rho}{\partial \xi_j} \right] - \frac{\partial}{\partial \xi_i} (\rho v_i) \right\rangle$$

Para

$$T_{ij}^* = T_{ij} \sec^2 \theta$$

$$T_{ij} = \left( \frac{d \xi_i}{d \sigma} \right) \left( \frac{d \xi_j}{d \sigma} \right)$$

Para la ecuación de movimiento se aplica el Teorema del Momento a un volumen elemental de líquido:

$$U_0 = \iiint_{\omega} d\omega dl$$

y,

$$\frac{d}{dt} \int_{\omega} \rho v^* dU = \sum F$$

o también,

$$\int_{U_0} \frac{\partial(\rho v^*)}{\partial t} dU = - \int_{s=f(U_0)} \rho v^* ds + \int_{U_0} I dU$$

en la que  $\mathcal{F}$  es la resultante de todas las fuerzas que actúan sobre el fluido en  $U$  (gravedad, presión, viscosidad);  $I$  es la producción de momento en  $U_0$ , de manera que resulta,

$$\sum F = \int_{U_0} I dU = -1z \int_{U_0} \rho g U - \int_{s=f(U_0)} \rho l s + \int_{U_0} R dU$$

donde  $R$  representa la fuerza debida a la viscosidad y  $1z$  un vector unitario dirigido verticalmente hacia arriba. En régimen lineal,  $R$  se expresa como:

$$R = -\frac{l v^*}{B}$$

Siendo  $\mu$  la viscosidad dinámica y  $B$  la conductividad del canal. Para un canal elemental de longitud  $\Delta s$ , resulta que en el caso  $\lim \Delta s \rightarrow 0$ ,

$$\left\langle v_i^* + \frac{B l}{\mu} \frac{\partial v_i^*}{\partial t} \right\rangle = \left\langle \frac{B T_{ij}}{\mu} \left( \frac{\partial p}{\partial \xi_j} + \rho g \frac{\partial z}{\partial \xi_j} \right) \right\rangle$$

Y el promedio  $\alpha$  se expresa como:

$$\alpha(P) = \frac{1}{n \Delta U_0(P) \int_{\Delta U_0} a dU_0}$$

por lo que, con el mismo razonamiento, el valor promedio, estadísticamente continuo de cualquier variable del campo como, por ejemplo, la conductividad hidráulica  $K$ , puede expresarse como:

$$K(P) = \frac{1}{n \Delta L(P) \int_{\Delta L} K dL_0}$$

De este modo, las propiedades microscópicas que pueden promediarse continuamente en volúmenes, longitudes o áreas hasta convertirse en propiedades macroscópicas en función de la variación del límite del dominio sin perder su identidad física, aunque varíe su magnitud, constituyen componentes no aleatorias de caracterización del dominio en las que prevalece la componente de tendencia como indicador del cambio de límite del dominio.

La variación en magnitud con este cambio es una de las consecuencias más importantes del efecto del factor de escala sobre la estructura del campo de propiedades físicas en el caso de los acuíferos cársicos.

La ecuación de flujo en el continuum de las grietas puede escribirse:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left( T \frac{\partial h}{\partial x_i} \right) = S \frac{\partial h}{\partial t} - \Gamma - q$$

Para  $i=1,2$ , en la que  $h$  es la carga hidráulica en la grieta;  $T$ , es la transmisividad de la grieta;  $S$ , el coeficiente de almacenamiento de la formación;  $\Gamma$ , es el término de transferencia del fluido y  $q$  es el volumen de fluido que integra o abandona el sistema.

Sin embargo, como  $T = KH$ , siendo  $H$  el espesor del acuífero, y al tratarse de medios anisotrópicos,  $K$  y por ello  $T$ , no son magnitudes escalares, sino tensores simétricos de segundo orden (Liakopoulos, 1961),  $K$  o  $T$  representan el valor de nueve componentes en el espacio, es decir, que se descomponen en:

KXX	TXX
KXY	TXY
KXZ	TXZ
KYY	TYY
KYX	TYX
KYZ	TYZ
KZZ	TZZ
KZX	TZX
KZY	TZY

De las cuales pueden anularse tres en virtud de que,

$$\begin{aligned} KXY &= KYX \\ KZY &= KYZ \\ KXZ &= KZX \end{aligned}$$

y lo mismo ocurre con  $T$ . Por este motivo, el término:

$$\left( T \frac{\partial h}{\partial x_i} \right)$$

puede escribirse:

$$K_x H \frac{\partial h}{\partial x} \quad K_y H \frac{\partial h}{\partial y} \quad K_z H \frac{\partial h}{\partial z}$$

o, de otro modo, teniendo en cuenta que  $K_{ij} = K_{ji}$ ,

$$\frac{v_x}{J_x} H_x \frac{\partial h}{\partial x} \quad \frac{v_y}{J_y} H_y \frac{\partial h}{\partial y} \quad \frac{v_z}{J_z} H_z \frac{\partial h}{\partial z}$$

en que los valores de velocidad en (19) representan realmente,

$$\begin{aligned} v_1 &= K_{11} J_1 + K_{21} J_2 + K_{31} J_3 \\ v_2 &= K_{12} J_1 + K_{22} J_2 + K_{32} J_3 \\ v_3 &= K_{13} J_1 + K_{23} J_2 + K_{33} J_3 \end{aligned}$$

Para flujo bidimensional,

$$\begin{aligned} K_{11} &= K_x \cos^2 \alpha + K_y \sin^2 \alpha \\ K_{22} &= K_y \sin^2 \alpha + K_x \cos^2 \alpha \\ K_{21} &= K_{12} = -\frac{1}{2} (K_x - K_y) \sin^2 \alpha \end{aligned}$$

En los que  $J = \text{grad } h$  y  $\alpha$  es un ángulo positivo con direcciones preferenciales  $x, y$ .

En este primer análisis, el término  $-q$  puede despreciarse y suponerse que la conservación se alcanza con el balance en el término  $\Gamma$ . La ecuación de conservación se puede plantear de esta forma:

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho_f \phi_f dV = \int_V \frac{\partial}{\partial t} (\rho_f \phi_f) dV + \int_S n \rho_f \phi_f \langle v_f \rangle dS = 0$$

la que  $\rho_f$  y  $\phi_f$  son la densidad y la porosidad del fluido, por lo que el producto  $\rho_f \phi_f$  es la masa de fluido por unidad de volumen del medio poroso;  $\langle v_f \rangle$ , es la velocidad espacialmente promediada del fluido;  $n$ , un vector normal de superficie unitaria;  $V$ , el volumen del medio, y  $S$ , la superficie límite.

La velocidad del fluido respecto al sólido  $\langle v_{fs} \rangle$  equivale a:

$$\langle v_{fs} \rangle = \langle v_f \rangle - \langle v_s \rangle$$

en la que  $\langle v_s \rangle$  es la velocidad del sólido respecto a la fase sólida. Sustituyendo adecuadamente y aplicando el teorema de divergencia, los mencionados autores obtuvieron la siguiente ecuación de continuidad que consideran equivalente a la obtenida por Cooper (según Scheidegger, 1960):

$$\left( \frac{\partial}{\partial t} \right) (\rho_f \phi_f) + \nabla \cdot (\rho_f \phi_f \langle v_s \rangle) + \nabla \cdot (\rho_f \phi_f \langle v_{fs} \rangle) = 0$$

$$\left( \frac{d}{dt} \right) (\rho_f \phi_f) + \rho_f \phi_f \nabla \cdot \langle v_s \rangle + \nabla \cdot (\rho_f \phi_f \langle v_{fs} \rangle) = 0$$

Donde,

$$\left( \frac{d}{dt} \right) = \left( \frac{\partial}{\partial t} \right) + \langle v_s \rangle \cdot \nabla$$

### EL DRENAJE SUPERFICIAL EN EL KARST

La ausencia de drenaje superficial y el predominio del subterráneo son características típicas del karst definidas históricamente. Una síntesis geomorfológica e hidrológicas del concepto tradicional del karst que le hacen un entorno singular, son las siguientes:

- Ausencia de valles verdaderos, los que están sustituidos por otras formas negativas de relieve, que reciben nombres particulares: dolinas, poljes, uvalas, entre otros
- Red de drenaje superficial que, aunque de variables dimensiones, por lo general está mal desarrollada, distorsionada a trechos y donde la mayor parte de los ríos tienen cursos parcial o totalmente subterráneos
- Red de drenaje subterránea de compleja configuración, regida por leyes hidrodinámicas particulares, o con acuíferos muy típicos, en ocasiones extensos y profundos, pero otras veces discontinuos, con singulares condiciones de alimentación, movimiento y descarga
- Sedimentos autóctonos de cobertura muy permeables, de variable potencia y, en ocasiones, inexistentes, aflorando la roca desnuda
- Desarrollo subterráneo de una amplia red de canales y conductos intercomunicados, con longitudes desde pocos centímetros hasta centenares de kilómetros (Fig 25)

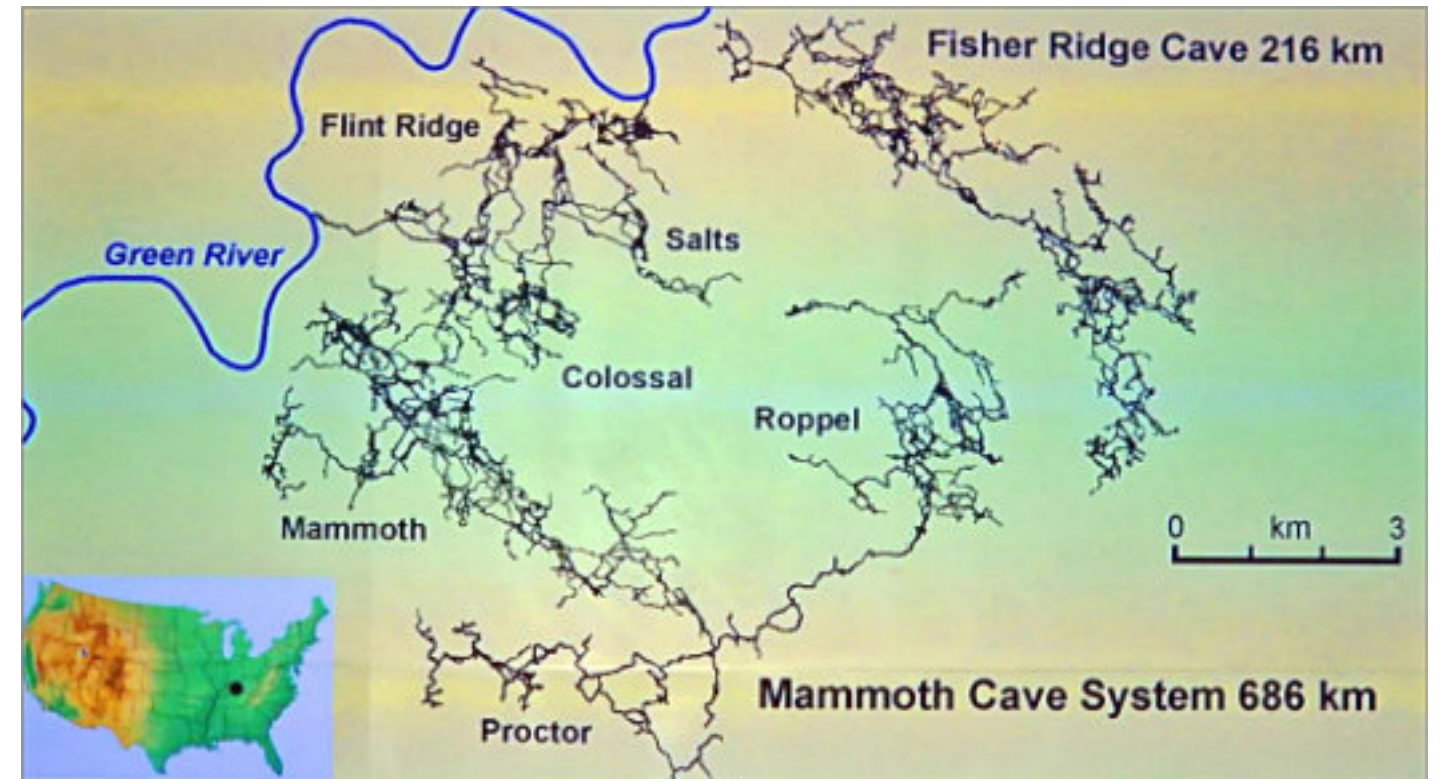


Fig. 25. El Sistema Cavernario Mammoth Cave (686 km de galerías) y el de Fisher Ridge (216 km) en Kentucky, Estados Unidos, forman la red subterránea explorada directamente más grande del mundo. Sus puntos más cercanos -aun sin conectar- están separados apenas 700 metros. (Archivo del coautor Molerio-León)

El modelo conceptual del karst descrito por Molerio (1985), lo define como un ente físico, un medio acuífero peculiar cuyo espacio está caracterizado por las siguientes propiedades:

- Es un sistema termodinámico abierto, es decir, en interacción con el medio exterior;
- Las variables del campo de propiedades físicas exhiben anisotropía tridimensional progresiva;
- El espacio que constituye el medio acuífero se presenta rigurosamente jerarquizado;
- La existencia de dominios de flujo inherentes a cada espacio;
- Un campo de propiedades físicas que se define y estructura para cada espacio;
- La fuerte influencia del efecto del factor de escala sobre el campo de propiedades físicas;
- La elevada dependencia respecto al tiempo de las propiedades físicas;
- La formación y desarrollo de estructuras auto reguladas de disipación de energía;
- Un cierto valor de inercia del sistema (memoria), esto es, la modulación de las respuestas a los estímulos inducidos natural o artificialmente, que dependen, sobre todo, de su estado inicial, y, finalmente,
- La irreversibilidad del proceso de carsificación, es decir, su evolución unidireccional.

En el karst, la pendiente no es el factor determinante para que aparezca escorrentía superficial. Identificar un valor de pendiente umbral es menos útil que evaluar la capacidad de infiltración integral del sistema (epikarst + suelo + fracturas) en relación con el régimen de lluvias. La "ausencia de drenaje superficial" es, en realidad, una tendencia dominante que se rompe episódicamente bajo condiciones específicas de lluvia extrema o en zonas localmente impermeables. La literatura moderna se centra en cuantificar estos umbrales dinámicos mediante modelación y monitoreo de alta resolución.

La generación de escorrentía superficial (*overland flow*) o de cauces efímeros/perennes en el karst es el resultado de la competencia entre la tasa de infiltración potencial del terreno (I) y la intensidad de la lluvia (R). La pendiente influye, pero no determina por sí sola el resultado ya que no existe un valor de pendiente universal o umbral mínimo absoluto.

Los procesos de formación del escurrimiento superficial en áreas cársicas son sumamente complejos y han sido motivo de detallados estudios desde la época de Cvijic y Martel a fines del siglo XIX y el primer cuarto del siglo XX (Cvijic, 1893, 1918; Martel (1900, 1901, 1908, 1928a, 1928b, 1928c; Horton, 1933; Jennings, 1971; Sweeting, 1972; Kirkby, 1978; Williams, 1983; White, 1988; Bonacci, 2001, 2004; Kiraly, 2003; Perrin et al., 2003; Klimchouk, 2004; Ford y Williams, 2007; Gunn, 2007; Goldscheider y Drew, 2007; Hartmann et al., 2012, 2014; Gutiérrez et al., 2014; Doctor, 2015; Chen et al. 2017; Zhang et al., 2021).

En un karst bien desarrollado (alta permeabilidad) la capacidad de infiltración (I) es tan alta que incluso en pendientes pronunciadas, la lluvia común (R) se infiltra antes de generar escurrimiento. La pendiente puede ser alta, pero el drenaje es subterráneo.

El "umbral" se cruza cuando  $R > I$ , lo que puede ocurrir en los siguientes casos:

- Eventos de lluvia muy intensos (tormentas convectivas).
- Zonas con infiltración reducida, donde el epikarst está colmatado por arcillas residuales (terra rossa), o donde hay un manto de suelo delgado o ausente.
- Depresiones cerradas (dolinas) mal drenadas que se inundan temporalmente, generando flujo superficial interno hasta los sumideros (acompañado de ascenso del nivel de las aguas subterráneas y desborde del acuífero (convirtiendo las dolinas en puntos de emisión).

Sin embargo, en contextos comparativos, pendientes muy bajas (< 1-2%) en áreas cársicas con algún grado de colmatación pueden favorecer la inundación temporal y el flujo superficial difuso antes de la infiltración, especialmente si el nivel freático es alto.

Otros factores de control independientes de la pendiente son los siguientes:

1. Permeabilidad y conductividad hidráulica del epikarst y la superficie en términos de las siguientes componentes:
  - a) Grado de fracturación y carsificación, donde una red densa de fracturas y micro-conductos aumenta enormemente;
  - b) Espesor y características del suelo/terra rossa puesto que un manto arcilloso reduce I drásticamente y favorece la escorrentía y
  - c) Desarrollo de karren (Lapiés; "diente de perro" en Cuba) cuyas superficies rocosas expuestas y muy rugosas tienen una alta capacidad de almacenamiento superficial e infiltración, retrasando o evitando la escorrentía.
2. Características de la precipitación (R); esto es Intensidad (mm/h) que, con mucho, es el factor hidrometeorológico más crítico. Una lluvia suave se infiltra; una tormenta intensa puede superar I.; la Duración, en tanto lluvias prolongadas pueden saturar el epikarst, reduciendo I con el tiempo y eventualmente generando escorrentía.
3. Condiciones antecedentes de humedad, ya que si el suelo y el epikarst están ya saturados (tras lluvias recientes), I es cercana a cero y cualquier lluvia adicional se convertirá en escorrentía rápidamente, independientemente de la pendiente.
4. Área de contribución en tanto el tamaño de la cuenca o subcuenca; en suma, del dominio de flujo que drena hacia un punto. Una gran dolina puede concentrar suficiente agua como para generar flujo superficial interno, aunque sus laderas sean permeables y la conectividad hidrológica superficial donde debe considerarse que la presencia de depresiones cerradas que desconectan los flujos.
5. El papel de la intervención antrópica es una condición importante de retardo del flujo superficial debido al sellado del suelo (urbanización, caminos), la compactación por agricultura o ganadería y la deforestación, que reduce la evapotranspiración y la capacidad de infiltración del suelo.

#### **DOLINIZACIÓN Y ZONAS SIN DRENAJE FLUVIAL EN EL KARST: MODELO CONCEPTUAL**

En el karst, la ausencia o escasez de drenaje fluvial superficial integrado (ríos con cauces definidos) es una característica diagnóstica del desarrollo del karst (Molerio, 1982, 2019; Williams, 1983; Klimchouk, 2004; Goldscheider y Drew, 2007; Bonacci, 2014; Gutiérrez et al., 2014; Hartmann et al., 2014; Zhang et al., 2021; Otero y Molerio, 2022) e indica

principalmente la alta capacidad de infiltración/recarga, el dominio del drenaje interno y, las más de las veces, un epikarst bien desarrollado, incluso con flujos epidérmicos.

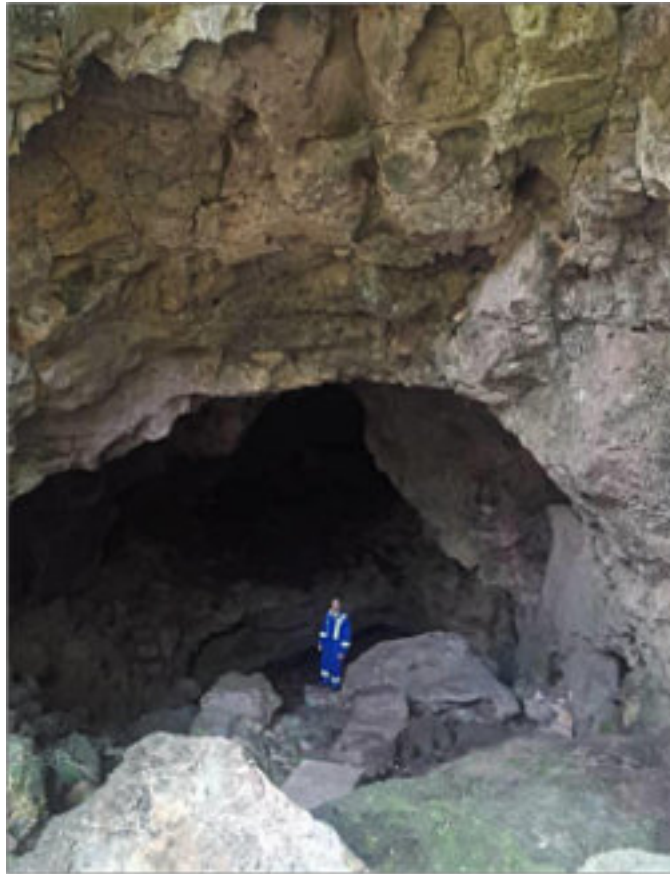
Zonas sin drenaje indican que el sistema cársico es altamente conductor y permeable (Fig 26). La precipitación y el eventual escurrimiento superficial se infiltran rápidamente a través de un complejo sistema de poros, fracturas, dolinas y sumideros (*ponores*), pasando directamente al flujo subterráneo (vadoso y freático; Fig. 27).



**Fig. 26. Llanura de los sumideros en Kentucky (Waltham et al., 2005)**

De igual modo, la ausencia de drenaje fluvial sugiere que los procesos de disolución han creado una red de conductos subterráneos suficientemente eficiente como para capturar y transportar la mayor parte del agua, impidiendo el establecimiento de una red fluvial superficial perenne. En ausencia de cobertura vegetal la zona del epikarst retiene y distribuye el agua antes de que llegue al sistema freático principal, reduciendo aún más el escurrimiento superficial.

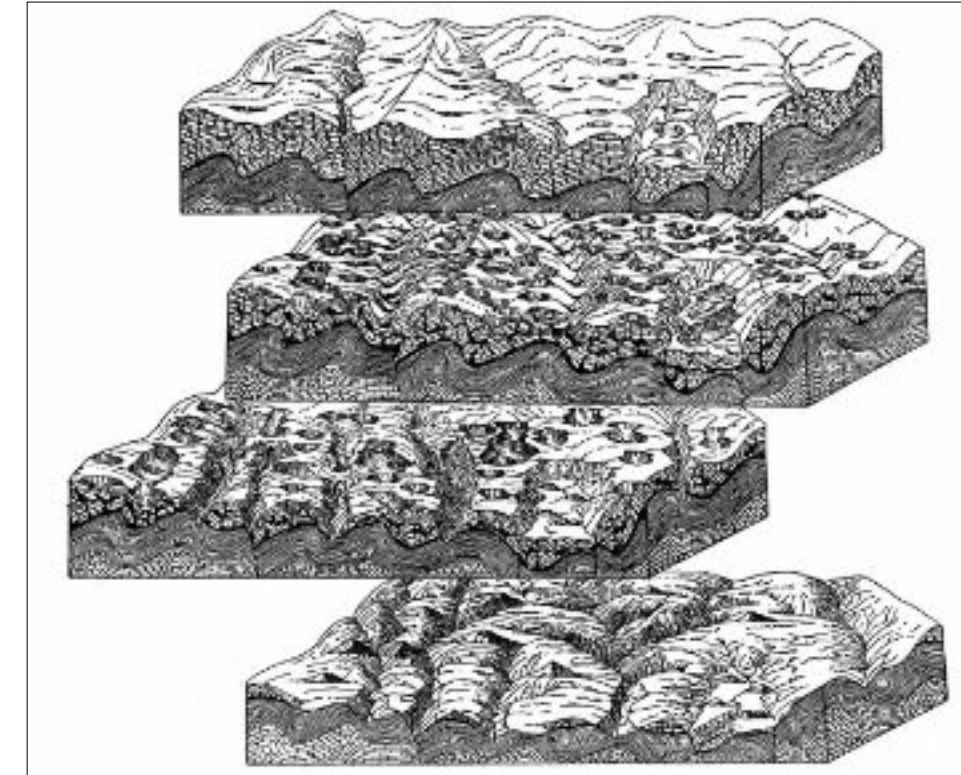
Cuantificando estas relaciones, generalmente una alta densidad de dolinas (cantidad/km<sup>2</sup>) se interpreta como una zona de elevada capacidad de recarga natural, pero con matices importantes.



**Fig. 27. Sumidero al fondo de la dolina de acceso a la Cueva Tarará I, vía de infiltración directa al acuífero de las aguas de lluvia y de escorrentía difusa (Foto del coautor Molerio-León)**

Las dolinas, especialmente las de colapso o disolución, son puntos de captación preferenciales para el agua de lluvia y el escurrimiento superficial. Concentran el flujo de áreas más grandes hacia un punto de infiltración, aumentando local y regionalmente la recarga. Las dolinas de disolución suelen ser más permeables que las de colapso, que pueden tener relleno de arcillas de descalcificación, reduciendo temporalmente la infiltración. Aquellas dolinas colmatadas con sedimentos finos pueden actuar como áreas de retención o incluso de escorrentía, más que de infiltración rápida. La densidad alta debe correlacionarse con otros factores (litología, fracturación, precipitación) para una conclusión robusta. Es un indicador morfológico excelente, pero debe validarse con métodos hidrológicos.

Jovan Cvijić, considerado el padre de la geomorfología cársica moderna, estableció las bases de esta interpretación a finales del siglo XIX y principios del XX. Cvijić (1893, 1918, 1924, 1960) identificó las dolinas como la forma elemental y más importante del relieve cársico (Fig. 28). Las consideró no solo como depresiones, sino como los principales órganos de captación y drenaje del sistema, el lugar donde comienza el viaje del agua hacia el subsuelo. Por tanto, intuitivamente, una mayor densidad de dolinas implicaría una mayor capacidad de drenaje subterráneo y una reducción notable del escurrimiento superficial. Influenciado por la Teoría Cíclica del Relieve de Davis, vio el desarrollo del paisaje cársico como un ciclo evolutivo (juvenil, maduro, senil). En la fase madura, la desaparición de los valles fluviales superficiales y el dominio absoluto del drenaje subterráneo sería la característica principal. Para él, la ausencia de ríos era la prueba definitiva de la "pureza" y madurez del karst (el "karst completo" u holokarst).



**Fig. 28. Evolución de un terreno cársico según Cvijic (1918)**

Para Cvijic, el papel fundamental de las dolinas era su mayor capacidad del terreno para "absorber" agua; los *karren* o *lapiés* eran formas menores de disolución superficial ("microformas"), mientras que las dolinas eran las "macroformas" estructurales que organizaban la hidrología del paisaje a una escala mayor y, por tanto, más importantes para el funcionamiento general del sistema.

A cualquier escala del dominio de flujo la regulación de la infiltración concentrada viene definida por las dolinas, ya que capturan y concentran el flujo desde un área de contribución superficial (a veces de decenas de miles de m<sup>2</sup>) hacia un punto de infiltración. Los campos de *karren*/*lapiés*, en cambio, son más importantes para la recarga difusa y la infiltración a escala local, ya que incrementan enormemente la superficie de contacto y la rugosidad de la roca, facilitando la infiltración *in situ* de la lluvia y favoreciendo la percolación lenta a través de la matriz y fracturas finas. Resultan fundamentales para la recarga del epikarst y la zona vadosa de flujo difuso (Fig. 29).

Las dolinas y los campos de *lapiés* operan de manera diferenciada respecto a la recarga. Las dolinas dominan el proceso a la escala que más impacta la alimentación del acuífero principal, mientras que los *karren* regulan la partición inicial del agua en la superficie y la recarga de los compartimentos más superficiales.

#### **DOLINIZACIÓN Y PROCESOS DE CORROSIÓN ACELERADA**

Gams (1933-2014) trabajó detalladamente el campo de la espeleogénesis y los procesos de disolución. En su concepto de "Corrosión Acelerada" identificó y analizó condiciones específicas que aceleran la disolución de la roca carbonatada de forma anómala, creando formas cársicas específicas y jugando un papel clave en la iniciación de cuevas. Sus principales líneas de investigación sobre este tema fueron las siguientes (véase bibliografía).



Fig. 29. Campo de lapiés libre, principal contribuyente a la recarga difusa en el karst, (Foto José Corella Varona)

**Corrosión acelerada por contacto litológico (corrosión de contacto), que ocurre en el contacto entre calizas (o dolomías) y rocas impermeables no carbonatadas (como margas, flysch, areniscas), se produce una situación hidrogeológica única. El agua que fluye sobre la roca impermeable se enriquece en CO<sub>2</sub> del suelo, pero NO disuelve calcio, manteniendo así su agresividad (capacidad de disolver) intacta.**

Cuando esta agua ácida y "subsaturada virgen" entra en contacto con la caliza, la disolución se produce a un ritmo mucho mayor que en otros puntos. Este fenómeno es crucial para la formación de lapiés, grietas de base (*subcutaneous solution notches*), nichos de contacto y la iniciación de muchas cuevas y dolinas. Gams demostró que este es uno de los mecanismos más eficientes de iniciación de la carsificación y de desarrollo del drenaje subterráneo en los bordes de las cuencas cársicas.

**Corrosión acelerada por Mezcla de Aguas (Mixing Corrosion),** concepto formalizado por Bögli (1964), pero Gams lo aplicó de manera extensiva y demostró su importancia en el campo. Cuando dos aguas, cada una saturada respecto a la calcita, pero con diferentes concentraciones de Ca<sup>2+</sup> y CO<sub>2</sub> (por ejemplo, una de la matriz y otra de un conducto), se mezclan, la solución resultante puede volverse subsaturada y corrosiva de nuevo. Gams estudió este proceso en zonas vadosa y freática, destacando su papel en el ensanchamiento de fracturas y la formación de cuevas laberínticas en niveles freáticos (Fig.30).

**Corrosión acelerada por efectos glaciares y periglaciares,** tema en el que propuso que el agua de deshielo glacial, pobre en iones y a baja temperatura, era muy agresiva. Además, la presión de la sobrecarga glacial podía forzar la circulación de agua en el karst subsuperficial, generando formas de corrosión acelerada bajo el hielo. Esta fue una contribución crucial al estudio del criokarst.

**Corrosión por condensación y corrientes de aire,** procesos menos evidentes, como la corrosión por condensación de vapor de agua en cuevas, puede ser significativa en la morfología de ciertas salas y conductos.

**CUANTIFICACIÓN DE LA DENSIDAD SUPERFICIAL DEL KARST (D<sub>k</sub>)**

Este índice que propusimos en 1970 refleja esencialmente el número de depresiones cársicas (dolinas) por unidad de superficie, independientemente de las características evolutivas de las mismas. De este modo se establece un índice de

carsificación superficial abierta para una superficie determinada que (Fig. 31) retoma el concepto y la expresión de Cramer (1941) y Radionov (1958):

$$D_k = \frac{Nd}{S}$$

Donde,

D<sub>k</sub>, densidad superficial del karst

Nd, número total de depresiones cársicas en el Área Elemental Representativa

S, superficie en km<sup>2</sup> del Área Elemental Representativa o del área unitaria de la malla seleccionada



Fig. 30. La Carraca (Iturralde Vinent, 1969), dolina influente que recibe las aguas del Arroyo Palmillas, que corre de Este a Oeste (dirección de recorrido muy poco común en Cuba). Un sistema de galerías subterráneas, Cueva Afán recibe aguas de mezcla desde el límite impermeable al norte y recibe aguas de escorrentía desde el norte, de los estratos mucho menos permeables que se mezclan con los aportes de las aguas del karst local. Sugiere un ejemplo mixto donde confluye corrosión acelerada por mezcla de aguas y por contacto litológico.

Existen antecedentes importantes de aproximaciones sencillas al análisis cuantitativo de la dolinización, como el debido inicialmente a Cvijic (1893) para el análisis morfométrico de las dolinas, introduciendo como medida la relación profundidad /diámetro y a Lozinski (1907) en la región caliza de Podolia. Cramer (1941) introdujo los parámetros: a) tamaño medio de la población de dolinas; b), densidad de dolinas (cantidad por km<sup>2</sup>) y área total de dolinas por km<sup>2</sup>; equivalente de la disección del karst).

Radionov (1958), siguiendo las ideas de Gvozdetskii<sup>6</sup> (1954) y luego Gvozdetskii (1972, 1976, 1981; Gvozdetskii y Maksimovich, 1969), propuso un método semejante para el estudio superficial del karst mediante el cual, en base al número de depresiones por unidad de superficie clasifica cualitativamente los sistemas cársicos con fines ingeniero geológicos (Muy carsificadas, Medianamente carsificadas... Poco carsificadas). Coleman y Balchin (1959) tomaron los resultados de Cvijic para interpretarlos desde el punto de vista genético-evolutivo, y distinguir las colinas de hundimiento de las corrosivas. Shurinov (1968) incorporó la metodología de Radionov y Gvozdetskii a los estudios geotécnicos en el karst con la intención de caracterizar regionalmente la intensidad de los procesos de carsificación.

Continuando con las aproximaciones morfométricas, Ford (1964) encontró una fuerte modalidad en la profundidad de las dolinas y una fuerte correlación entre la profundidad y el diámetro medio ( $R=0,84$ ,  $\alpha=0,1$  % de confianza) en la Meseta de Craigmore en Nueva Zelanda. En la misma área las dolinas tienden a ser circulares y Williams (1969) encontró una relación longitud promedio/ancho o relación de elongación = 1,32, con una desviación estándar de 0,32.

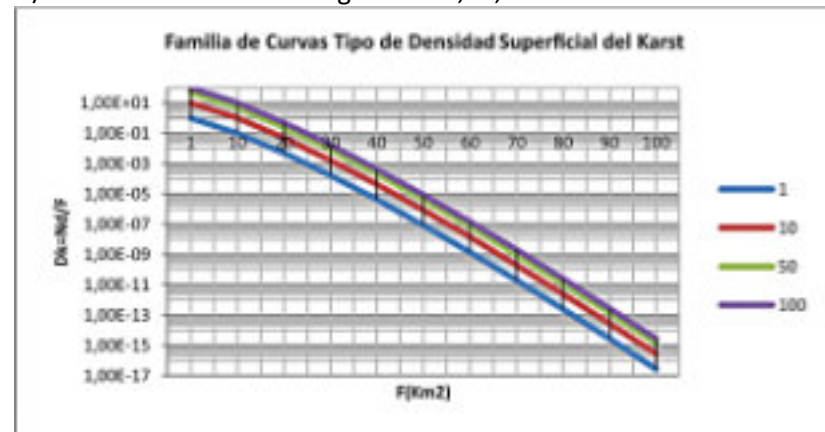


Fig. 31. Curvas de  $D_k$

En Kentucky, La Valle (1967) encontró relaciones significativas asociadas al incremento de la longitud de elongación y de las alineaciones estructurales dependiendo de la pureza de las calizas, asimismo, con el gradiente del drenaje subterráneo expresado como la relación de relieve (= máxima altura sobre la más honda depresión / distancia a la divisoria subterránea).

Para valorar cuantitativamente las condiciones morfoevolutivas y obtener una idea general sobre el estado de actividad hidrológica del sistema se introdujo en nuestra metodología un **Índice Evolutivo**  $\alpha$ , definido mediante la expresión:

$$\alpha = \frac{Da_{I-III} - Dc_{IV}}{Dt}$$

Donde  $Dt$  es la cantidad total de depresiones;  $Da_{I-III}$ , la cantidad de dolinas activas (en fases de profundización de I-III) y  $Dc_{IV}$ , la cantidad de dolinas colmatadas, en Fase de Profundización IV. Cualitativamente, si el Índice es negativo, hay un predominio evidente de los procesos de mero u holofosilización del sistema cársico y, básicamente, de entarquinamiento del campo de dolinas. Para un número positivo, el dominio de actividad hidrológica es evidente y el índice, entre 0 y 1 se acercará más o menos a una gradación de funcionamiento hidrológico según los valores tiendan a cero o a uno.

<sup>6</sup> Nikolai Alexeyevich Gvozdetsky (Гвоздецкий, Николай Алексеевич) (1913-1994) es, sin duda, la figura más prominente de la carsología soviética y uno de los más importantes a nivel mundial del siglo XX. Su trabajo fue extenso y sistemático: creó la primera clasificación unificada y jerárquica de los fenómenos cársicos para el vasto territorio de la URSS, teniendo en cuenta condiciones litológicas, estructurales, climáticas (desde el karst tropical hasta el criokarst) e hidrogeológicas; desarrolló la teoría de la zonificación geográfica del karst, vinculando sus tipos a zonas naturales específicas (tundra, taiga, estepa, montaña, etc.). Sus trabajos sobre las dolinas fueron fundamentales para la evaluación de riesgos (hundimientos) y para la hidrogeología aplicada. Comentarios sobre su obra pueden encontrarse en Klimchouk y Andreychuk, 1996; Mijailov, 2003 y Sauro, 2006;

La Densidad Superficial del Karst normalizada a la relación entre el área total ( $A_t$ ) de sistema representativo y la superficie dolinizada ( $A_d$ ) expresada como  $Dk_n$ , es también una función cómoda y más realista, al incluir la superficie ocupada por los procesos de carsificación en superficie. Se expresa como:

$$Dk_n = 0 < \frac{A_d}{A_t} < 1$$

Que, de igual modo, permiten una expresión semicuantitativa según los valores tiendan a cero o uno. La aproximación a la unidad es el mejor indicador de la recarga natural directa en el sistema y, en el caso originalmente estudiado de evaluación de las áreas de embalse de la cuenca receptora de las pérdidas por filtración en el vaso de la presa.

### ASPECTOS METODOLÓGICOS

En el estudio y análisis del grado de desarrollo y evolución del paisaje kárstico y los sistemas hidrogeológicos a él vinculados resulta de gran utilidad la clasificación, mediante el uso de cartogramas, de la distribución espacial de su comportamiento hidrológico (relación escurrimiento superficial/infiltración) y la densidad superficial del karst, entre otros elementos índices referidos; así como la representación de la disposición, frecuencia y orientaciones principales de los elementos geoestructurales que constituyen las vías preferenciales de conducción subterránea y establecimiento de los patrones de sistemas de flujo locales y regionales.

Para llevar a cabo la obtención y aplicación de dichos indicadores, resulta necesario el empleo individual y conjugadamente de los siguientes métodos:

- Delimitación de los contornos de las unidades hidrológicas y la obtención de modelos digitales del terreno mediante el uso de softwares geoinformáticos automatizados (QGIS y SAGA).
- Levantamiento automatizado de la red de drenaje superficial y su corrección y clasificación mediante inspección de imágenes satelitales y mapas topográficos.
- Identificación y delimitación de las zonas cársicas y no cársicas a partir del uso y observación de mapas geológicos e imágenes satelitales del área.
- Levantamiento mediante teledetección y por métodos automatizados del complejo de formas de absorción cársicas del relieve.
- Levantamiento y cartografía por métodos geomorfológicos de los morfoalineamientos de fracturas mediante la identificación de sectores lineales del relieve (escarpas tectónicas transregionales, regionales y locales, alineamientos de formas cársicas, sectores alineados de valles y cauces de ríos, entre otros)
- Procesamiento estadístico automatizado y creación de diagramas de rosas de frecuencias de fracturas y cartogramas contentivos de información clasificada.
- Análisis de las relaciones entre el complejo de formas cársicas de absorción, los morfoalineamientos del relieve, las zonas de descarga y el comportamiento hidrológico regional en los sistemas.

Los materiales fundamentales necesarios utilizados para la aplicación de los métodos anteriormente mencionados fueron los siguientes:

- Software QGIS con los complementos: Caja de herramientas, GRASS, SAGA.
- Softwares de análisis estadístico automatizado y creación de diagramas de rosas de frecuencias principales de valores numéricos (Georose, Georient).
- MDT (Modelo Digital del Terreno) del área ajustado al contorno de los territorios de las unidades hidrológicas superficiales que contienen los sistemas acuíferos de interés, con resolución espacial 25x25 (25 m por píxel), obtenido de la base del MDT nacional de GEOCUBA.
- Capa shape de corrientes fluviales (permanentes/temporales).
- Capa shape y en formato TIFF de las depresiones endorreicas y otras formas de absorción cársicas del relieve.
- Capa shape de morfoalineamientos de fracturas (fallas y diaclasas) según indicadores geomorfológicos.
- Mapas topográficos en formato físico y digital (a escalas 1:50 000 o más detalladas)

- Imágenes satelitales procedentes de la plataforma Google Earth.

La secuencia general de operaciones de esta metodología, el procedimiento detallado y los pasos a seguir desde la fase de preparación de datos hasta la obtención de los cartogramas y mapas temáticos son descritos a continuación es como sigue:

- Confección del cartograma booleano
- Identificación y cartografía de los sistemas de flujo
- Cálculo de la Densidad superficial del karst (Kk)
- Identificación del Índice Evolutivo de las dolinas
- Cálculo de  $Dk_n$  normalizado
- Trazado de isolíneas de Dk
- Determinación de las zonas de máximo potencial de infiltración efectiva

### 1) Creación de cartograma booleano

Para la clasificación del comportamiento hidrológico del territorio de los sistemas cársicos por unidad de área se procedió a la aplicación del **índice Rf (frecuencia de drenaje)** mediante la creación de un cartograma booleano de ceros y uno para diferenciar dentro de cada cuadrícula del mallado en la que fue dividido el territorio, las zonas con predominio del escurrimiento superficial (ríos permanentes, arroyos intermitentes y corrientes efímeras) y las zonas con predominio de infiltración sin drenaje superficial (zonas de recarga).

El procedimiento recomendado para la conformación del cartograma mediante métodos automatizados en el Software SIG QGIS es el siguiente:

#### Crear mallado de cuadrícula de 1 km<sup>2</sup>

En la barra superior de la interfaz de la ventana de QGIS:

*Procesos* → *Caja de herramientas* → *Buscar "Crear cuadrícula"*

Seleccionar

- Tipo de Cuadrícula: *Rectángulo*
- Extensión de la cuadrícula: Usar capa shape de contorno del área
- Espaciado horizontal y vertical: *1000 m (1 km)*

#### Recortar cuadrícula de 1 km<sup>2</sup> al área del contorno del territorio

*Procesos* → *Caja de herramientas* → *Cortar vectorial por capa de máscara*

Seleccionar

- Capa de entrada: *cuadrícula creada*
- Capa de máscara: *capa shape de contorno del área*

La capa de salida será el mallado por unidad de área de 1 km<sup>2</sup> ajustado al contorno de trabajo como base del cartograma.

#### Levantamiento de la red de drenaje

En la extensión SAGA:

*Geoprocessing* → *Terrain Analysis* → *Preprocessing* → *Sink Removal*

Seleccionar

- Grid System: Seleccionar la extensión mostrada
- DEM: MDT del área previamente ajustado

Se obtendrá un MDT sin depresiones necesario para el correcto procesamiento de los algoritmos del SAGA en el levantamiento de la red hídrica a partir de las irregularidades topográficas continuas sobre áreas originalmente deprimidas. A continuación:

*Geoprocessing* → *Terrain Analysis* → *Channels* → *Channels Network and Drainage Basins*

Seleccionar

- Grid System: Seleccionar la extensión mostrada
- Elevation: MDT sin depresiones

Dejar el resto por defecto. Se obtendrá una capa shape con la red de drenaje del área de estudio (Channels), que luego de ser exportada, deberá comprobarse mediante su superposición sobre imágenes satelitales e inspección de mapas topográficos, para diferenciar las corrientes superficiales verdaderas (permanentes y estacionales) de aquellas forzadas por el algoritmo del SAGA sobre las áreas deprimidas endorreicas del relieve que fueron suprimidas en el preprocesamiento, y que no se desarrollan realmente en el terreno.

#### Levantamiento de las áreas de depresiones cársicas endorreicas grandes y pequeñas (dolinas)

En la extensión SAGA, luego de cargar nuevamente el MDT original sin preprocesar:

*Geoprocessing* → *Terrain Analysis* → *Basic Terrain Analysis*

Seleccionar

- Grid System: Seleccionar la extensión mostrada
- DEM: MDT del área

Se obtendrá entre los resultados una capa ráster denominada "Closed Depressions", con su clasificación en valores de profundización (disección vertical erosivo-kárstica) en metros, que luego de ser exportada deberá corregirse mediante superposición e inspección sobre modelos sombreados de relieve y mediante teledetección sobre imágenes satelitales, para diferenciar las depresiones reales del karst (que constituyen formas de recarga subterránea) de aquellas correspondientes a depresiones topográficas y otras formas no asociadas al karst.

Para ello debe vectorizarse la capa ráster obtenida mediante el algoritmo de QGIS:

*Ráster* → *Conversión* → *Poligonizar (ráster a vectorial)*,

Y luego manualmente, sobre la capa vectorizada, suprimir aquellas depresiones no asociadas al karst. A continuación, disolver los campos de la tabla de atributos de la capa resultante mediante el procesamiento:

*Vectorial* → *Herramientas de geoproc.* → *Disolver*

En caso de indicar error, seleccionar

Advanced Parameters → Invalid featuring filters → Do not Filtering (Better performance)

Se obtendrá una capa shape con los polígonos de superficie de las depresiones cársicas con sus campos de la tabla de atributos disueltos. Posteriormente cortar por capa de máscara la capa "Closed Depressions" con la capa shape vectorizada y corregida manualmente mediante el algoritmo:

Ráster → Extracción → Cortar ráster por capa de máscara

Se obtiene así una capa ráster en formato TIFF y una capa vectorial ajustadas a las depresiones reales cársicas de recarga que servirán más adelante para la determinación de la Disección Horizontal kárstica (DHK) y la Densidad Superficial del Karst (D).

### Intersección con la cuadrícula

Extracción de puntos de la red de drenaje

En la barra superior de la interfaz de la ventana de QGIS:

Procesos → Caja de herramientas → Extraer vértices

Seleccionar capa shape de corrientes de drenaje (Channels)

Contar corrientes por cuadrícula

Procesos → Caja de herramientas → Contar puntos en un polígono

Seleccionar

- Polígonos: capa shape de contorno del área
- Puntos: capa shape de vértices (puntos) extraídos de la red de drenaje

Dejar el resto por defecto. Se obtendrá una capa que contendrá la cuadrícula anteriormente creada con un nuevo campo denominado NUMPOINTS (ver en la tabla de atributos) con el conteo de segmentos de drenaje a partir de puntos por cuadrícula. Como en este caso solo es de interés discriminar las cuadrículas por presencia/ausencia de segmentos de corriente de drenaje, todas aquellas resultantes con valor distinto de cero serán reclasificadas con valor 1 (presencia de drenaje superficial), mientras que las resultantes con valor 0 serán las correspondientes a los sectores de predominio de infiltración y por tanto, de recarga subterránea. Dicha reclasificación puede realizarse manualmente una a una o mediante el siguiente paso automatizado:

Abrir tabla de atributo (con la capa shape en modo editable) y de ahí abrir calculadora de campos y crear un campo nuevo.

Seleccionar

- Tipo de campo de salida: *Texto (cadena)*
- Longitud del campo de salida: 20

Introducir expresión:

Case

When "NUMPOINTS" > 0 THEN 1

When "NUMPOINTS" = 0 THEN 0  
END

Representación

Posteriormente, en las propiedades de la capa, aplicar una simbología conveniente mediante una clasificación categorizada según el valor de los campos obtenidos (de cuadrículas con 0 y 1) y la representación de las etiquetas correspondientes (valores en el centro de cada cuadrícula), a lo cual se recomienda superponer la capa de corrientes superficiales y las depresiones cársicas.

De esa manera se obtendrá una representación simple que permite distinguir las áreas con predominio de drenaje superficial (1) por la presencia de corrientes fluviales (permanentes y estacionales) de aquellas con predominio de infiltración (0) y funcionamiento como zonas de recarga (de pérdida en el caso de las obras de regulación artificial del escurrimiento superficial), fundamentalmente en aquellos sectores donde están presentes las depresiones (dolinas) endorreicas. En el caso de que en el territorio se distribuyan superficies importantes constituidas por rocas no carsificable, conviene diferenciarlas de las zonas cársicas para no asociarles por error (debido al procesamiento), datos correspondientes a las zonas de absorción del sustrato carbonatado (Fig. 32).

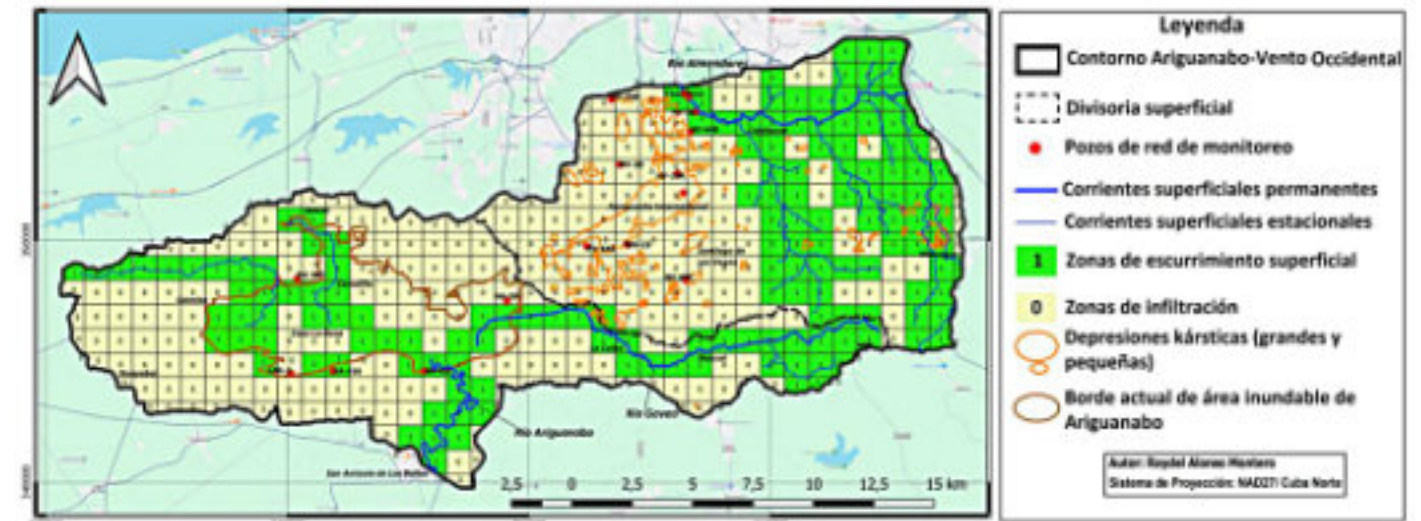


Fig. 32. Cartograma booleano del sistema acuífero del Polje Ariguanabo.

### 2) Identificación y cartografía de los sistemas de flujo

Sobre la base del MDT del área de trabajo o del contorno correspondiente sobre una imagen satelital, y mediante la superposición de las capas shapes del campo de morfoalineamientos de fracturas (identificadas y levantadas por métodos geomorfológicos) y de la capa de dolinas obtenida, así como del resto de elementos del nivel geomorfológico del complejo de formas de absorción cársicas (poljes, valles ciegos, campos de lapiés, cúpulas mogóticas) se procede a la determinación de los sistemas de flujos de las unidades regionales y locales del relieve kárstico del territorio.

#### Determinación del centroide de la zona principal de recarga subterránea

El procedimiento a seguir parte de la determinación del centroide de la zona principal de absorción natural que constituye una singularidad hidrodinámica, ya que ocupa un área significativa y de comprobada relevancia como punto de infiltración, y además es el más alejado de la zona de descarga o surgencia. Por ejemplo, esta zona es, en el caso del sistema acuífero que drena superficialmente en los manantiales de Bello (provincia de Matanzas), la gran dolina situada al sur del poblado de Aguacate (provincia de Mayabeque), a 20 km de distancia en línea recta hacia el oeste.

En la barra superior de la interfaz de la ventana de QGIS:

Procesos → Caja de herramientas → Geometría vectorial → Centroides

Seleccionar

- Capa de entrada: capa de dolina principal de recarga

**Determinación de las frecuencias principales de dirección de fracturas y creación de diagramas de rosas.**

El segundo paso consiste en la determinación de la frecuencia de orientación del campo de fracturas, mediante el procesamiento estadístico automatizado para el campo general de fallas y diaclasas identificadas por métodos geomorfológicos, lo cual permitirá reconocer los patrones direccionales predominantes y su organización en sistemas principales expresados en grados de azimut. Para ello, en la tabla de atributos de la capa de fracturas, mediante la activación de la calculadora de campos se creará un campo nuevo con un nombre adecuado (Azimuth por ejemplo). A continuación, seleccionar:

- Tipo de campo de salida: *Número decimal (real)*
- Longitud del campo de salida: 3
- Precisión: 1
- Introducir expresión:

`degrees(azimuth(start_point($geometry),end_point($geometry)))`

Se obtendrá un nuevo campo con los valores en grados de azimut de cada una de las fracturas, cuyo campo deberá ser exportado en formato .xlsx para su salida como base de datos que será procesada posteriormente para la creación del diagrama de rosas correspondiente, la que puede ser llevada a cabo por medio del uso de programas automatizados como el Georose, Georient, entre otros. Las orientaciones de los sistemas principales resultantes del campo de fracturas posibilitan el reconocimiento de las direcciones preferenciales potenciales del flujo subterráneo y su modo de organización (Fig. 33).

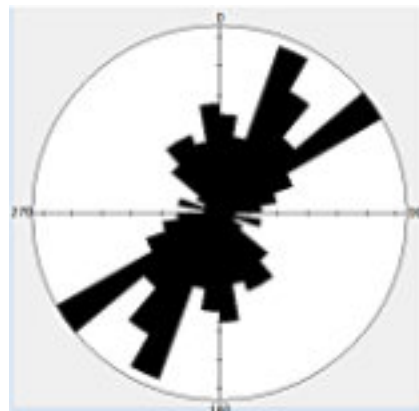


Fig. 33. Diagrama de rosa de dirección de fracturas de la unidad hidrogeológica Aguacate-San Juan que muestra una frecuencia principal correspondiente al sistema NE 50°-60°.

**Superposición de la rosa diagrama sobre el centroide y trazado de los vectores de flujo**

Situando el centro de la rosa diagrama sobre el centroide de la zona principal de recarga, se procederá a la creación de las líneas principales de flujo mediante el trazado sobre la prolongación imaginaria de la línea del sistema principal hasta

su intersección con la fractura más cercana, de forma tal que dicha intersección marca el camino a lo largo de la grieta para el trazado de una nueva línea que también será intersectada por otra fractura y así, sucesivamente, los trazados de las líneas y sus intersecciones con las fracturas, marcarán el camino más probable de la dirección del sistema de flujo hasta llegar a la zona de descarga identificada y comprobada del sistema acuífero.

El recorrido se acomoda a dicho camino siguiendo varias leyes hidrodinámicas fundamentales, siendo una de ellas la del trabajo mínimo a lo largo de zonas de debilidad estructural que representan las fracturas, muchas de las cuales forman redes de cavernas si confluyen los planos de máxima concentración de fluido y de solvente siguiendo la dirección de máximo gradiente hidráulico que es la de mayor crecimiento de la entropía del sistema.

**Representación**

La representación de las líneas de flujo resultantes, superpuestas sobre el fondo del MDT con las fracturas y formas cársticas del relieve de la zona de absorción, serán acompañadas de las hidroisohipsas del sistema acuífero (líneas equipotenciales de carga hidráulica de la superficie freática), para el posterior análisis y cálculo del tensor de conductividad hidráulica (K) y determinación de las direcciones principales de anisotropía (Fig. 34).

**3) Densidad superficial del karst (Dk)**

A partir de la base del cartograma booleano de clasificación del índice Rf (*frecuencia de drenaje*) y de las depresiones endorreicas de recarga subterránea (dolinas en sus variadas dimensiones y profundidades sin diferenciar) anteriormente obtenidas, se procede a la determinación y representación cartográfica de la **Densidad Superficial del Karst (Dk)**, índice definido por el número de depresiones cársticas por unidad de superficie. El procedimiento recomendado para la determinación y representación de la densidad superficial kárstica mediante métodos automatizados en el Software SIG QGIS es el siguiente:

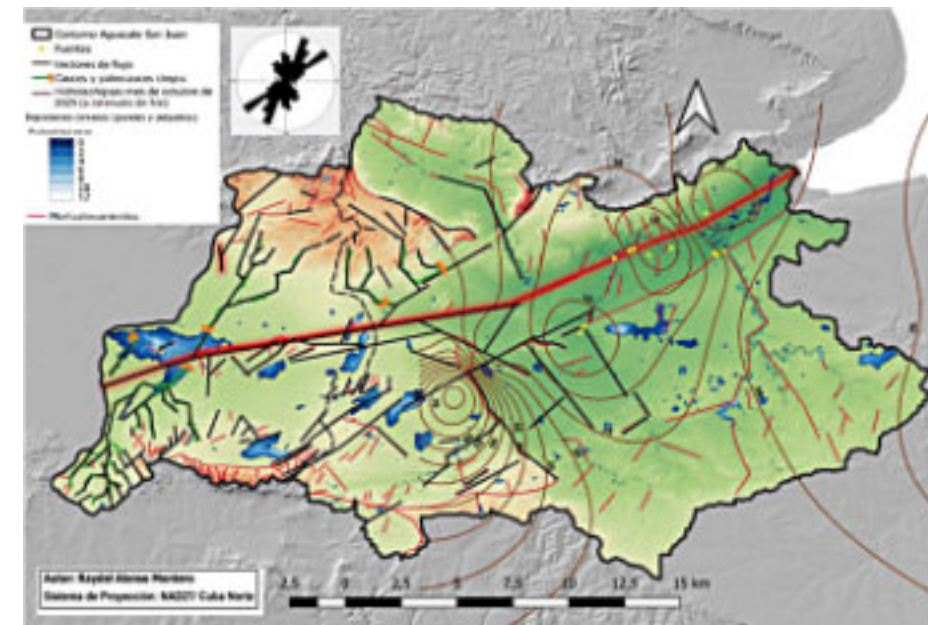


Fig. 34. Líneas de flujo e hidroisohipsas del sistema Aguacate-San Juan.

**Intersectar superficies de dolinas con áreas de cuadrículas**

En la barra superior de la interfaz de la ventana de QGIS:

Vectorial → Herramientas de geoprocreso → Intersección

Seleccionar

- Capa de entrada: cartograma obtenido
- Capa de superposición: capa shape de depresiones vectorizadas

Se obtendrá una capa shape de la superficie dolinizada ajustada a las áreas de cuadrículas o fragmentos de ellas que ocupan sobre el cartograma.

#### Extraer centroides de superficies de dolinas intersectadas

En la barra superior de la interfaz de la ventana de QGIS:

Procesos → Caja de herramientas → Geometría vectorial → Centroides

Seleccionar

- Capa de entrada: capa de dolinas intersectada con cuadrículas
- Marcar la opción: Create centroid for each part

Se obtendrá como resultado una capa de puntos de los centroides de cada superficie de dolina por unidad de área del mallado del cartograma.

#### Contar puntos de centroides por unidad de área del cartograma

En la barra superior de la interfaz de la ventana de QGIS:

Procesos → Caja de herramientas → Contar puntos en polígono

Seleccionar

- Polígonos: cartograma
- Puntos: capa de puntos de centroides de dolinas

Se obtiene como resultado una capa denominada "Número", que posee un campo en su tabla de atributos denominada "Numpoints", cuya representación mediante el etiquetado en las propiedades de la capa, permite visualizar el número de dolinas y/o fragmentos de ellas (en el caso de depresiones grandes) por unidad de área.

#### Interpolación de puntos de conteo de dolinas por cuadrícula

Procesos → Caja de herramientas → Interpolation → Interpolación (IDW)

Seleccionar

- Capa Vector: capa Número
- Atributo de Interpolación: Numpoints
- Coeficiente P de distancia: 2.5
- Extensión: capa de cartograma
- Tamaño del ráster de salida: 25

Posteriormente cortar por capa de máscara y ajustar al contorno del área de trabajo. De esta manera se obtiene una capa ráster con valores interpolados de la densidad de dolinas por unidad de área del mallado, la cual puede ser representada mediante una gama de colores apropiada que permita distinguir las zonas de mayor concentración y por tanto, donde la carsificación ha desarrollado un mayor número de formas cerradas de absorción.

#### 4) Obtención de isolíneas de Densidad Superficial Kárstica

En la barra superior de la interfaz de la ventana de QGIS:  
Ráster → Extracción → Curvas de Nivel

Seleccionar

Capa de entrada: capa ráster obtenida  
Intervalo entre curvas de nivel: 1

De esta manera, se obtendrán las curvas equipotenciales de densidad de dolinas por unidad de área, las cuales pueden ser superpuestas sobre el cartograma booleano de frecuencia de infiltración y analizar la relación espacial entre las zonas con predominio de procesos de infiltración y el mayor número de depresiones endorreicas con potencial de recarga.

#### 5) Disección Horizontal Kárstica (DHK)

Como una variante que puede complementar el índice anteriormente mencionado, resulta útil la determinación de la **Disección Horizontal Kárstica (DHK)**, definida por el área de depresiones cársicas por unidad de superficie, la cual puede servir de base a la posterior determinación de la Densidad Superficial Kárstica normalizada a la relación  $A_t/A_d$  (área total del sistema representativo/área dolinizada). El procedimiento recomendado para la representación del campo de **Disección Horizontal Kárstica** mediante métodos automatizados en el Software SIG QGIS es el siguiente

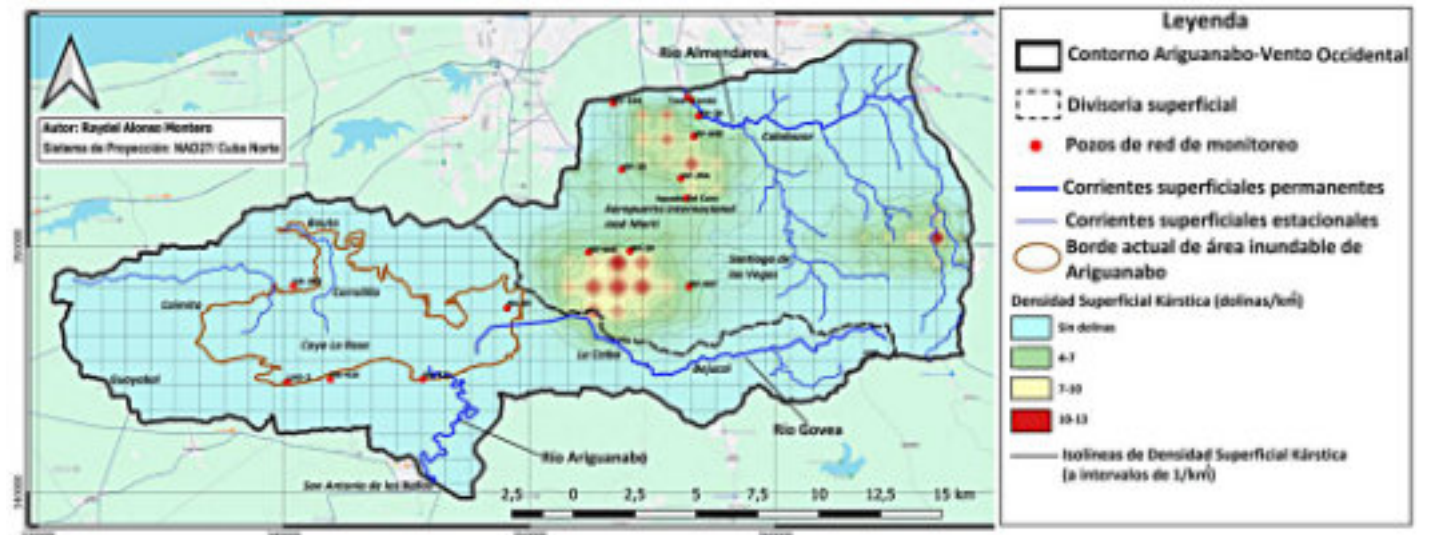


Fig. 35. Densidad superficial kárstica en el polje Ariguanabo

#### Cálculo de superficies de dolinas por áreas de cuadrículas intersectadas.

Abrir tabla de atributos de la capa resultante de la intersección (en modo editable) y en la calculadora de campos crear un campo nuevo con un nombre adecuado (área\_km<sup>2</sup> por ejemplo). A continuación:

Seleccionar

- Tipo de campo de salida: Número decimal (real)
- Longitud del campo de salida: 10
- Precisión: 2
- row\_number: Geometría → Área / 1 000 000

Se obtendrá un nuevo campo con el área de depresiones endorreicas dentro de cada unidad de cuadrícula intersectada.

## Representación

Finalmente, sobre la base del cartograma booleano de representación del índice  $R_f$  (*frecuencia de drenaje*), superponer la capa de depresiones cársticas endorreicas categorizadas por el área que ocupan por unidad de cuadrículas del mallado del cartograma, lo cual permitirá diferenciar mediante su representación con una gama de colores apropiada, las zonas de mayor superficie de áreas dolinizadas, siendo conveniente además la determinación de la relación de la superficie total dolinizada (sumatoria de áreas de dolinas) con respecto a la superficie total del área carsificada.

### 4) Cálculo de $Dk_n$ normalizado

Se expresa como la relación entre el área total ( $A_t$ ) de sistema representativo y la superficie dolinizada ( $A_d$ ):

#### 4) Cálculo de $Dk_n$ normalizado

Se expresa como la relación entre el área total ( $A_t$ ) de sistema representativo y la superficie dolinizada ( $A_d$ ):

$$Dk_n = 0 < \frac{A_d}{A_t} < 1$$

#### 6) Identificación del índice evolutivo de las dolinas ( $\alpha$ )

Quedó definido anteriormente mediante la expresión:

$$\alpha = \frac{Da_{I-III} - Dc_{IV}}{Dt}$$

Donde  $Dt$  es la cantidad total de depresiones;  $Da_{I-III}$ , la cantidad de dolinas activas (en fases de profundización de I-III) y  $Dc_{IV}$ , la cantidad de dolinas colmatadas, en Fase de Profundización IV.

El estado evolutivo de una dolina no es una mera clasificación descriptiva; es el indicador dinámico más importante de su función y eficiencia hidrológica actual. La "Fase de Profundización" (Tabla 1) traduce el estado morfogenético en un parámetro operativo para la evaluación cuantitativa y exhibe las siguientes implicaciones hidrológicas de cada fase (cuantitativas y cualitativas)

- Fase I (Lapiés aflorante, sin ponores):
  - Cualitativo: Infiltración difusa y lenta. El agua percola a través de la micro-fracturación y porosidad de la roca expuesta (lapiés).
  - Cuantitativo: Coeficiente de infiltración ( $C_d$ ) bajo a medio (0.2-0.5). Contribuye principalmente a la recarga del epikarst y la zona vadosa difusa. Tiempo de respuesta lento al evento de lluvia.
- Fase II (Con ponores identificables):
  - Cualitativo: Aparece la infiltración concentrada. Los ponores capturan el escurrimiento interno de la dolina.
  - Cuantitativo:  $C_d$  medio a alto (0.5-0.8). Se inicia la conexión eficiente con el sistema de conductos. La recarga se acelera y localiza. El Índice  $R_f$  para esta área se acerca a 0.
- Fase III (Ponores múltiples, cuevas, sedimentación incipiente):
  - Cualitativo: Máxima eficiencia hidrológica. La dolina es un embudo perfecto que conecta la superficie con la red de conductos freáticos o vadosos.
  - Cuantitativo:  $C_d$  muy alto (0.8-0.95+). Casi toda el agua que llega al fondo se filtra rápidamente. Representa el estado de "dolina activa" por excelencia para la recarga. Es la fase objetivo para correlacionar con alta recarga natural.
- Fase IV (Colmatada/Sellada):

- Cualitativo: Cambio de función radical. Deja de ser un órgano de infiltración para convertirse en una zona de almacenamiento superficial temporal o de escorrentía. Puede generar flujo superficial interno o, si se desborda, alimentar escorrentía aguas abajo.
- Cuantitativo:  $C_d$  muy bajo o negativo (0-0.2, o incluso negativo si genera evaporación extra). Su presencia en un campo de dolinas reduce la capacidad de infiltración agregada del sistema, a pesar de que siga contando para la densidad bruta ( $Dk$ ).

El Índice Evolutivo ( $\alpha$ ) resulta un sintetizador cuantitativo del sistema. La fórmula propuesta es un indicador de salud hidrológica del paisaje kárstico a escala de cuenca o sector, que puede resumirse del modo siguiente:

- $\alpha \rightarrow +1$ : Predominio abrumador de dolinas activas. El sistema tiene una alta capacidad de recarga y autopurificación (flujos rápidos) y se espera un alto porcentaje de infiltración de la lluvia.
- $\alpha \rightarrow 0$ : Equilibrio inestable. Similar número de dolinas activas y colmatadas. El sistema es hidrológicamente "inmaduro" o en degradación. La infiltración es parcheada y depende de la distribución espacial.
- $\alpha \rightarrow -1$ : Predominio de dolinas colmatadas. El sistema es "fossilizado" hidrológicamente. La escorrentía superficial puede dominar. Bajo porcentaje de infiltración directa, alta dependencia de la recarga difusa a través de la matriz.

Del mismo modo puede presumirse un modelo jerárquico para caracterizar la relación cuantitativa con la capacidad de infiltración. Así, para estimar la infiltración, se debe ponderar la contribución de cada dolina según su fase. De esta manera se llega a establecer la Capacidad de Infiltración Agregada (CIA) de un campo de dolinas:

$$CIA = \sum_{i=1}^n A_{c,i} \cdot C_{d,i}$$

Donde,

$A_{c,i}$  = Área de captación topográfica de la dolina  $i$ .

$C_{d,i}$  = Coeficiente de infiltración específico para su Fase (I, II, III, IV).

Dado que es impráctico medir cada  $A_{c,i}$ , se puede simplificar usando un Modelo Simplificado de Recarga por Dolinización (MSRD) que puede expresarse como:

$$MSRD \approx P \cdot A_t \cdot Dk_n [(F_I \cdot 0,35) + (F_{II} \cdot 0,65) + (F_{III} \cdot 0,9) - (F_{IV} \cdot 0,1)]$$

Donde:

$P$  = Precipitación.

$A_t$  = Área total.

$Dk_n$  = Densidad normalizada (fracción de área dolinizada).

$F_{I,II,III,IV}$  = Fracción de dolinas en cada Fase (ej., si el 50% están en Fase III,  $F_{III}=0$ ).

Los coeficientes (0.35, 0.65, 0.9, -0.1) son valores hipotéticos de calibración que deben ajustarse con estudios locales (medición de recarga real con trazadores o balance).

El estado evolutivo es el factor corrector esencial que transforma un simple conteo de dolinas ( $Dk$ ) en una herramienta predictiva útil ( $Dk_n$ ,  $\alpha$ , IIP). Sin considerar el estado evolutivo, se puede sobrestimar gravemente la infiltración en un karst maduro pero colmatado, o subestimarla en un karst joven pero muy activo.

La cartografía de las Fases de Profundización es, por tanto, tan crucial como el mapeo de las dolinas mismas. Es el paso que permite pasar de la geografía estática a la hidrogeología dinámica.

**7) Determinación de las zonas de máximo potencial de infiltración efectiva**

Una mayor densidad de dolinas activas y sumideros abiertos indica una mayor capacidad de infiltración concentrada y, por ende, una mayor recarga potencial al acuífero, pero no todas las dolinas contribuyen igual, ya que ello depende de su estado evolutivo (Fase de Profundización).

Así pueden considerarse estas relaciones

- Fases I-III (Activas): Con lapiés y ponores abiertos → Infiltración alta y rápida.
- Fase IV (Colmatada): Sellada por sedimentos → Infiltración nula o muy baja; puede generar escorrentía o almacenamiento superficial.
- Tipo de Drenaje Superficial (Índice Rf): Las zonas con valor Rf = 0 (ausencia de drenaje integrado) se correlacionan espacialmente con altas densidades de dolinas activas, indicando dominio absoluto de la infiltración sobre la escorrentía.

Partiendo de los índices del artículo ( $Dk$ ,  $Dk_n$ ,  $\alpha$ ), se puede construir el siguiente modelo conceptual cuantitativo:

- Densidad Normalizada ( $Dk_n$ ) como proxy del área de infiltración directa: Ya se definió:

$$Dk_n = \frac{A_d}{A_t}$$

Donde  $A_d$  es el área superficial "dolinizada" (área de influencia de las depresiones) y  $A_t$  área total y  $Dk_n$  representa la fracción del área donde la infiltración es el proceso dominante. Un  $Dk_n=0.25$  sugiere que el 25% del terreno está dedicado a la captación e infiltración concentrada.

- Índice de Infiltración Potencial (IIP) –combina densidad y estado evolutivo para refinar la estimación:

$$IIP = Dk_n \left( \frac{N_{I-III}}{N_t} \right)$$

Donde:

- $N_{I-III}$  = Número de dolinas en Fases activas (I a III).
- $N_t$  = Número total de dolinas.
- $N_{I-III}/N_t$  = Proporción de dolinas hidrológicamente activas.
- $f$  = Factor de eficiencia del sumidero (ej., 1 para sumidero abierto directo a conducto; 0.5 para dolina con infiltración difusa). Requiere calibración local.

El IIP sería un índice adimensional (0 a 1) que cuantifica la capacidad intrínseca del área para infiltrar agua.

La aproximación al Porcentaje de Lluvia Infiltrada (Balance Hídrico Simplificado) es la parte más compleja y requiere datos climáticos e hidrológicos. La relación no es lineal, pero puede establecerse un marco metodológico.

- Enfoque Cartográfico-Métrico mediante el Cartograma de Infiltración/Escurrimiento (Índice Rf), en cuyo caso, las zonas clasificadas como "infiltración" ( $Rf=0$ ) tienen una Tasa de Infiltración Potencial (TIP) ~ 100% de la lluvia caída, salvo en eventos extremos que superen la capacidad. Si en una cuenca el cartograma indica que el 60% del área es de dominio de infiltración ( $Rf=0$ ), se puede hacer una primera aproximación gruesa: El 60% de la precipitación total tiene alta probabilidad de infiltrarse, mientras que el 40% restante (zonas de  $Rf=1$ , con drenaje) está más sujeto a escorrentía.
- Enfoque Semi-Cuantitativo Integrado, que permite construir una ecuación conceptual de partición lluvia para una cuenca kárstica del tipo siguiente:

$$I_{total} = (P \cdot A_c \cdot C_i) + (P \cdot A_d \cdot C_d)$$

$I_{total}$  = Infiltración total [ $L^3$ ].

$P$  = Precipitación [ $L$ ].

- $A_c$  = Área de infiltración difusa (campos de lapiés, suelos) [ $L^2$ ].
- $C_i$  = Coeficiente de infiltración para área difusa (0.2-0.5).
- $A_d$  = Área de infiltración concentrada (área de drenaje interno de las dolinas, aproximada por  $Dk_n \cdot A_t$  [ $L^2$ ].
- $C_d$  = Coeficiente de infiltración para dolinas. Para dolinas activas con sumideros, puede ser >0.9 (infiltran casi toda el agua que reciben). Para una dolina colmatada (Fase IV), puede ser ~0.1.

Estimación de  $C_d$  (vínculo densidad y tipología):

1. Método de Balance de Dolina Individual (ideal): Medir/estimar el área de captación topográfica de una dolina y monitorear el volumen que se infiltra por sus sumideros en un evento.  $C_d = V_{infiltrado} / (P \cdot A_{captacion})$
2. Método Regional por Correlación Hidrológica:
  - o Medir la descarga de manantiales cársticos en respuesta a la lluvia.
  - o A través de modelos de lluvia-recarga, calibrar un coeficiente de recarga efectivo ( $C_r$ ) para la cuenca.
  - o Establecer una relación estadística (ej., regresión) entre  $C_r$  y los índices  $Dk_n$  o IIP para cuencas similares. Por ejemplo, se podría encontrar que:

$$C_r \% \approx 10 + (50 \cdot IIP)$$

Como ejemplo, si  $IIP = 0.6$ , la recarga sería ~40% de la lluvia. Por supuesto que sería siempre deseable, una campaña de investigación específica.

Los índices  $Dk_n$  y especialmente el propuesto IIP son proxies cuantitativos sólidos de la capacidad de infiltración concentrada de un área kárstica y representan una relación directa cuantificable.

Porcentaje de Lluvia: Para estimar el porcentaje de lluvia que se infiltra, el camino más robusto es:

1. Paso 1: Calcular  $Dk_n$  e IIP del área.
2. Paso 2: Medir o obtener de literatura un coeficiente de recarga regional ( $C_r$ ) para una cuenca análoga mediante métodos hidrológicos (balance, recesión de manantiales, trazadores).
3. Paso 3: Establecer, aunque sea de forma heurística, que un incremento del 0.1 en el IIP se traduce en un incremento de X% en el coeficiente de recarga, basado en la correlación geológica y climática.

Una aproximación en términos de porcentaje de lluvia caída, sería:

$$\%_{recarga} = f(Dk_n, \text{estado evolutivo } (\alpha), I_{kluvia}, \text{Condiciones antecedentes})$$

La herramienta fundamental es el cartograma de infiltración/escurrimiento ( $Rf$ ), que ya delimita las áreas donde la infiltración es el proceso dominante. Combinando este cartograma con datos de lluvia, se puede hacer un balance hídrico espacialmente distribuido que asigne diferentes porcentajes de infiltración a cada zona ( $Rf=0$  vs.  $Rf=1$ ), siendo las zonas de  $Rf=0$  y alta  $Dk_n$ , las que contribuyen con el mayor porcentaje de infiltración efectiva al acuífero.

Para una aproximación más realista en porcentaje de lluvia, la ecuación debe incorporar obligatoriamente un factor de ponderación basado en el índice  $\alpha$  o en la distribución de Fases. Una propuesta final podría ser:

$$\%_{infiltración} \approx (\%_{Area\ Rf=0}) \cdot (K_1 + K_2 \cdot \alpha)$$

Donde  $K_1$  y  $K_2$  son constantes de calibración regional. Por ejemplo, si el 70% del área es de dominio de infiltración ( $Rf=0$ ) y  $\alpha = 0.6$  (predominio activo), el porcentaje de lluvia que se infiltra podría ser del 70% \* (0.4 + 0.5\*0.6) = 49%, asumiendo

unos  $K_1$  y  $K_2$  genéricos. La validación de estos parámetros se logra con estudios de balance hídrico o trazadores en cuencas piloto.

**COMENTARIOS SOBRE ALGUNOS RESULTADOS**

Como ejemplo, para el área de embalse del Conjunto Hidráulico Ejército Rebelde, se obtuvo un valor de  $Dk_n = 0,269$ . Para la zona carbonatada terrígena en el área de embalse de la Derivadora Pedroso,  $Dk_n = 0,024$ . Para la cuenca del Arroyo El Americano, en la cuenca superior del Mayabeque,  $Dk_n = 0,146$ . Que, expresado en porcentaje indica la proporción de área que contribuye a la infiltración directa y a la modulación del escurrimiento superficial en el sistema cársico.

Para todo el sistema cársico Aguacate – San Juan (Fig. 36), en una evaluación en progreso, se encontró un valor de  $Dk_n = 0,047$ . En el sistema Ariguanabo, el valor más alto obtenido ha sido de  $Dk_n = 14$ ; esto es, 14 dolinas por kilómetro cuadrado. A escala del sistema hidrogeológico, en un área de 367  $km^2$  se identificaron 364 dolinas, para una  $Dk$  de 0,99, valor muy alto, casi una dolina por kilómetro cuadrado. Este valor debe ser realmente más alto, por la cantidad de dolinas registradas que fueron colmatadas para la urbanización del territorio alrededor del aeropuerto Internacional José Martí y las ciudades de Santiago de las Vegas, Rincón, Rancho Boyeros y sus alrededores.

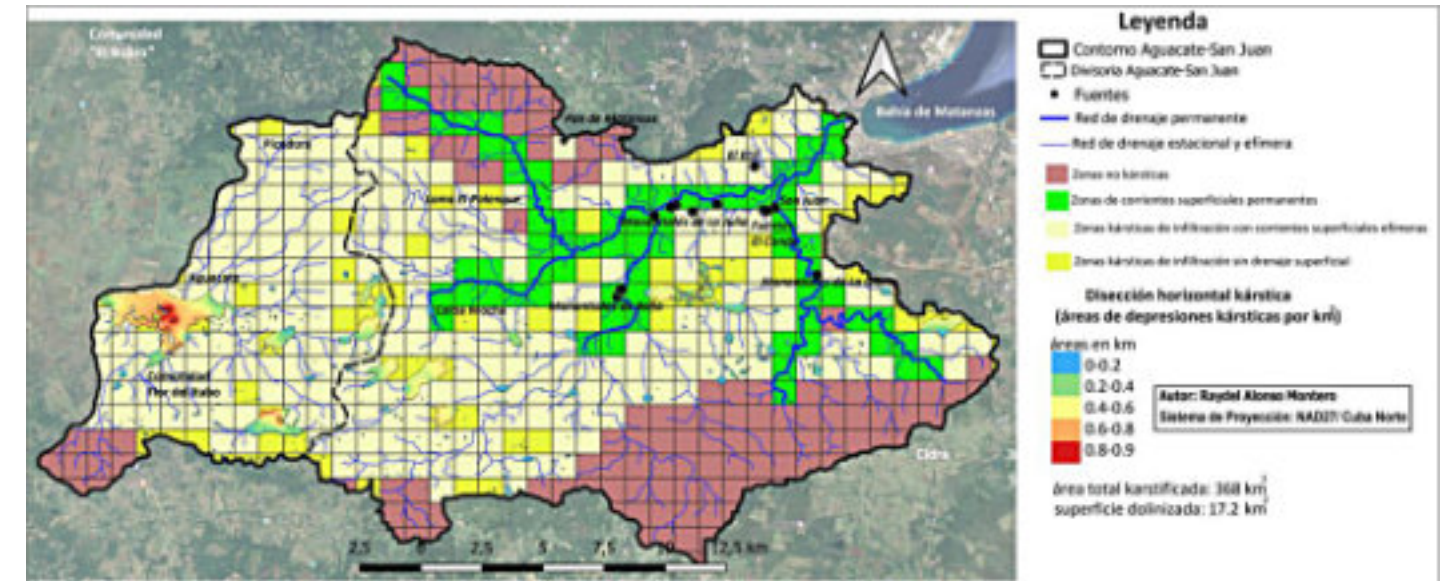
La dolinización es también una medida básica de la Disección cársica, un parámetro geomorfológico cuantitativo que expresa el grado en que un paisaje cársico ha sido subdividido o segmentado por la acción combinada de la disolución y la erosión, generando un relieve accidentado y compartimentado. Es, por tanto, la medida de la intensidad con que las formas cársicas negativas (dolinas, uvalas, poljes, valles ciegos, cañones) han disectado, cortado y fragmentado una superficie topográfica inicialmente más o menos plana o suavemente ondulada.

El método propuesto trata de reducir la opinión subjetiva de descriptores cualitativos ( o al menos fundamentarla cuantitativamente en busca de la universalidad de criterios y facilitar el estudio comparativo del karst sobre bases comunes), como "karst poco disectado" (mesetas suaves con dolinas aisladas), "karst moderadamente disectado" (colinas bien definidas separadas por depresiones) o "karst intensamente disectado" o "de lapiaces" (relieve muy abrupto y caótico, a menudo con laderas rocosas expuestas - *Schichttreppenkarst* en la terminología centroeuropea).

Sin embargo y no solamente con fines ingenieros o investigaciones aplicadas, sino por la necesidad de organizar el conocimiento sobre bases medibles, la necesidad de una métrica que caracterice procesos y fenómenos es imprescindible,

En este artículo se ha insistido en uno de esos aspectos desarrollando una caracterización basada en la densidad de dolinas; esto es la cantidad de dolinas por unidad de área ( $km^2$ ), que es el indicador más directo, acompañada de otras métricas relacionadas con el proceso de dolinización.

En este sentido, la profundidad relativa del relieve; esto es la diferencia de altura promedio entre divisorias (interdolinas) y fondos de dolinas (Fig. 37) y la disección cársica, devienen indicadores ya que, en muchos casos en el karst, las "líneas de drenaje" pueden ser el perímetro de dolinas o ejes de depresiones alargadas.



**Fig. 36. Disección horizontal cársica del sistema Aguacate-San Juan**



**Fig. 37 Campo de interdolinas poco profundas en la llanura Sur de La Habana-Matanzas**

En ciertos casos, por ejemplo, de las dolinas profundas de la Sierra de los Órganos, ciertas divisorias subterráneas del drenaje se establecen a lo largo del fondo de dolinas (Fig. 38). Un caso singular es la divisoria entre las Sierras del Pesquero y Mesa, por el Hoyo de Marruco, sustentado por la aplicación de la Ecuación de Rorabaugh para determinar la distancia semirradial a las divisorias subterráneas según los parámetros del campo de propiedades físicas derivados del análisis hidrodinámico de la recesión del Manantial de Mal Paso (Fig. 39), surgencia única de la Sierra del Pesquero (Molerio, 1980, 1992b, 2022).



**Fig. 38. Dolinización extrema en la cima e los mogotes (kegelkarst) de un sector de la Sierra de los Órganos, en el Occidente de Cuba**



**Fig. 39. Trop plein del Manantial de Mal Paso, Sierra del Pesquero (Foto Ana Margarita Sardiñas)**

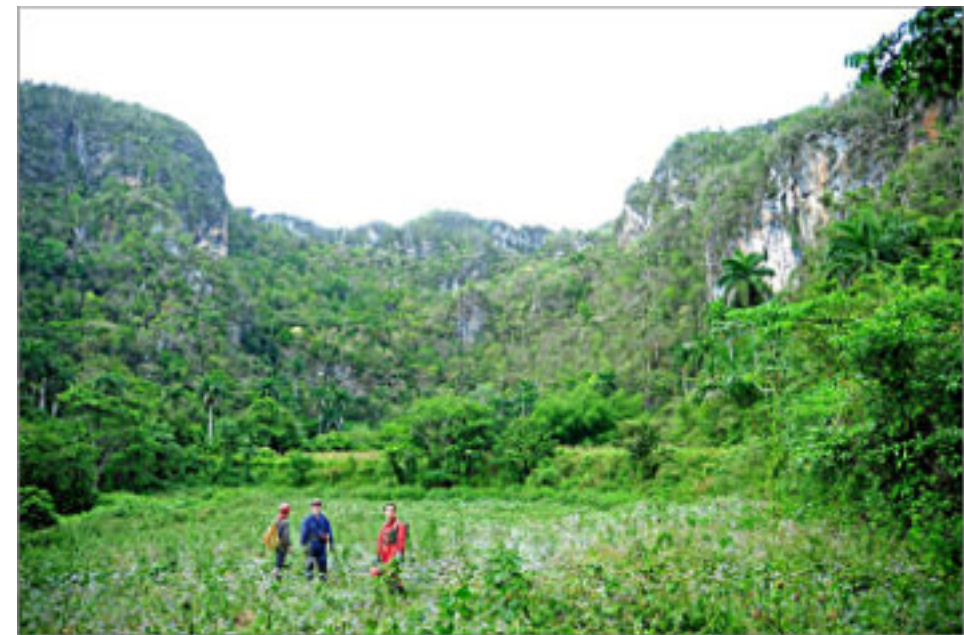
La relación comprobada (Molerio, 1982; Díaz Guanche et al., 2022) entre las cotas de superficie y las de fondo de las depresiones, es un indicador de la regularidad de los procesos que controlan la disección cársica y las fases de profundización de las dolinas (Figs. 40 y 41)

Una aproximación atractiva, aun no ensayada, parece ser la Rugosidad del Terreno (Topographic Roughness Index), calculado a partir de MDTs (Modelos Digitales del Terreno).

La Fig. 42 muestra el cartograma de disección cársica del sistema Aguacate San Juan.

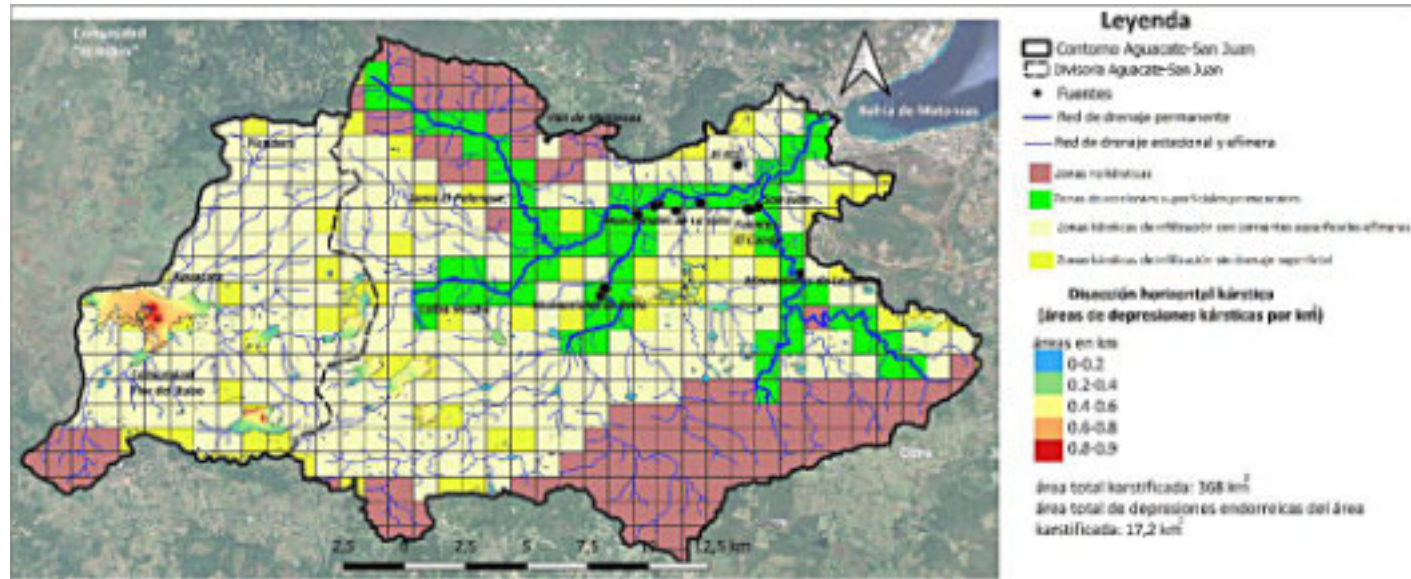


**Fig. 40. Fondo de poljes y campos de dolinas escalonadas en la cima del kegelkarst (sensu Lehmann; mogotes en la terminología cubana) de la parte occidental de la Sierra de los Órganos (Archivo del coautor Molerio-León)**

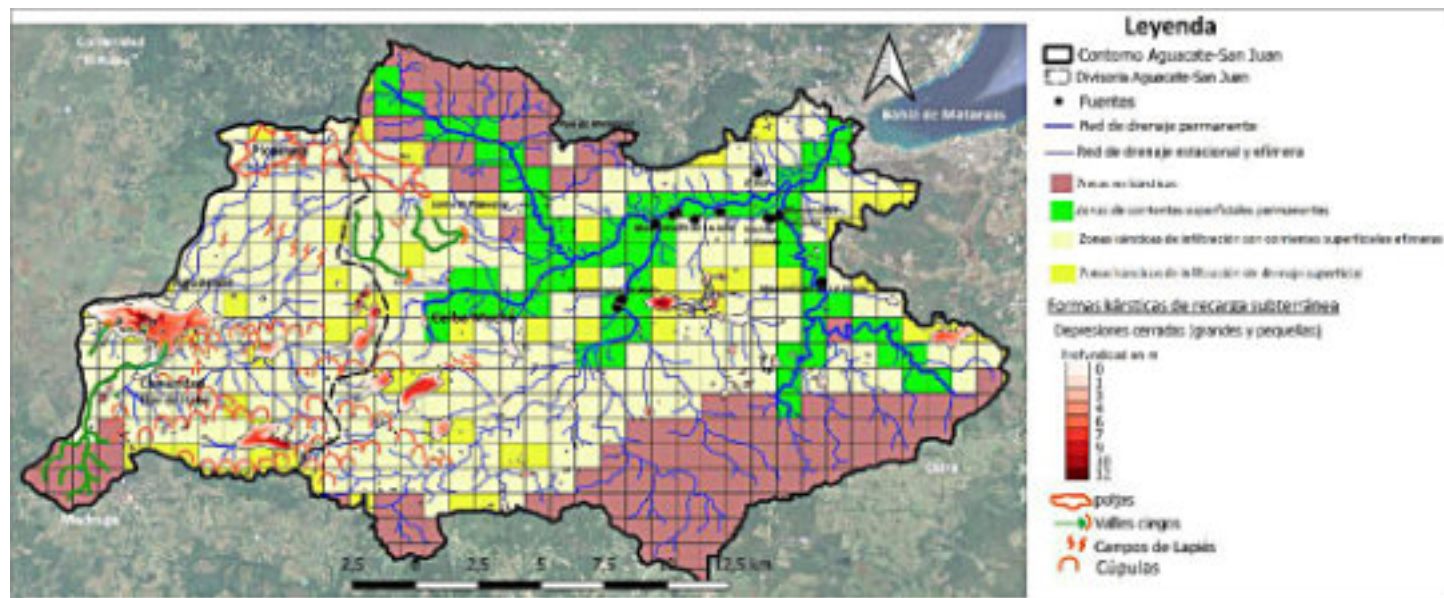


**Fig. 41. Dolina en la Sierra de San Carlos, Pinar del Río, Cuba (Foto Vladimir Otero)**

La Baja Disección corresponde a un karst inicial. El flujo subterráneo puede ser más difuso, los acuíferos menos integrados y la topografía menos controladora de los flujos. La Alta Disección indica un karst más evolucionado, lo que en la literatura Davisiana sería considerado un maduro o senil. Este nivel implica una mayor integración del sistema de conductos subterráneos, una captación de recarga más eficiente a través de múltiples dolinas, y una relación más directa entre la topografía de superficie y la red de drenaje subterránea (Fig. 43). El paisaje está más compartimentado en unidades hidrológicas individuales (microcuencas de dolina).



**Fig. 42. Disección cársica en el Sistema Aguacate San Juan**



**Fig. 43. Cartograma de Densidad del karst/Escorrimento/Infiltración del sistema Aguacate-San Juan**

Una disección muy alta (con lapiaces extensos) suele indicar karst en rocas puras y masivas (calizas, dolomías), mientras que una disección más suave (dolinas redondeadas) puede deberse a rocas menos puras o con mayor cubierta residual (terra rossa).

Una inspección simple del cartograma muestra claramente las zonas de mayor recarga natural (zona de pérdidas para el caso de la construcción de obras para la regulación artificial del escurrimiento superficial) pero, por otra parte, limita las zonas adecuadas de preservación de la recarga natural de los acuíferos y sustenta la localización de obras de recarga artificial. Colateralmente pueden indicar zonas de arrastre de suelos y cobertura vegetal hacia sumideros y contribuye a sustentar la base de sistemas de regadío.

La distribución de las zonas de alta infiltración en las proximidades o contiguas a zonas de drenaje superficial, donde  $D_k$  es diferente de cero (o  $D_{k_n}$  tiende a 1) es, por su parte, un indicador de cuán cerca o cuán lejos se encuentran las zonas de alimentación y cómo se organizan las líneas de flujo hacia las zonas de descarga en ríos efluentes.

Un refinamiento utilizado en su momento consistió en la construcción de isopletas de igual  $D_k$ , que permitía, distinguir mejor la configuración de las áreas de mayor dolinización, habida cuenta de las características de la técnica de interpolación seleccionada y eliminaba la rigidez de los cartogramas. Ello permitiría estimar valores en ubicaciones no muestreadas a partir de puntos conocidos, para generar superficies continuas (raster) representadas como isolíneas.

La elección del método depende críticamente de la disposición de la red de muestreo (Mitas y Mitasova, 1999; Li y Hea, 2014; d eSmith et al., 2018). En los trabajos iniciales expresados en cartogramas, se consideró una red regular, donde los puntos están distribuidos en una malla sistemática (la cuadrícula perfecta del sistema de coordenadas de la base cartográfica 1:50000).

En la actualidad se puede trabajar con redes irregulares donde los puntos estén distribuidos de forma no sistemática, aleatoria o adaptativa a la variabilidad del terreno.

Para redes regulares se aplicaron métodos de ajuste de superficies mediante interpolación polinomial, ajustando una función polinómica (de 1º, 2º, o hasta 3er grado) a todos los puntos, ya que es muy eficiente para evaluar tendencias regionales. Genera superficies muy suaves –eliminando a veces variaciones locales importantes que pueden dar lugar a la aparición de oscilaciones no reales (Fenómeno de Runge) en los bordes o en polinomios de grados altos. Esta es una razón para no pasar de 3er grado.

Otra variante más utilizada fue utilizar el Métodos de Vecino Más Cercano (Nearest Neighbour), ya que asigna a cada celda de la grilla de salida el valor del punto muestreado más cercano. Es extremadamente simple y rápido y preserva los valores originales (interpolador exacto<sup>7</sup>). Pero tiene limitaciones al generar superficies escalonadas ("en bloques") con discontinuidades obvias. Las isolíneas resultantes son poligonales y poco realistas para fenómenos naturales continuos.

Para redes irregulares se prefiere la Distancia Inversa Ponderada (IDW - Inverse Distance Weighting), donde el valor interpolado es un promedio ponderado de los puntos circundantes en que el peso disminuye con la distancia (normalmente  $1/d^p$ , donde  $p$  es un factor de potencia). Es un interpolador exacto y su principal inconveniente es que tiende a generar "bull's eyes" (circunferencias concéntricas) alrededor de puntos aislados con valores extremos. No estima por encima del máximo ni por debajo del mínimo observado y, especialmente importante es que la elección del parámetro de potencia es subjetiva, aunque es cómodo utilizar una potencia 2.

Existe una tendencia actual a aplicar la Triangulación con Interpolación Lineal (TIN - Triangulated Irregular Network) cuya malla de triángulos conecta los puntos de muestra (Triangulación de Delaunay) y la interpolación es lineal dentro de cada triángulo. También es un interpolador exacto pero que genera una superficie faceteada (plana por triángulos) donde las isolíneas son poligonales y pueden no ser suaves. Es muy sensible a la ubicación de los puntos.

Debe mencionarse, no obstante, el antecedente clásico de Lustig (1969) que tomó 11 parámetros morfológicos sobre una base regular de 46 cuadrículas a las que aplicó un grupo de muy potentes técnicas analíticas para analizar el relieve de la Provincia Fisiográfica de Basin y Range, en los estados Unidos, abarcando un área entre 800 000 y 900 000 kilómetros cuadrados.

Este trabajo representa un hito metodológico en la geomorfología cuantitativa de finales de los años 60. Lustig aplicó por primera vez el análisis de superficies de tendencia (TSA) a escala provincial completa, un método diseñado para identificar

<sup>7</sup> Un interpolador exacto es un método de interpolación espacial que, cuando se evalúa en la ubicación de un punto de dato conocido, reproduce exactamente el valor observado en ese punto, sin error alguno. Se aplica cuando la precisión de cada medición individual sea incuestionable y esencial para el modelo. Los interpoladores no exactos producen una superficie que no necesariamente pasa por los puntos de los datos originales. La superficie resultante es una aproximación que busca capturar la tendencia general, sacrificando el ajuste exacto en cada punto para lograr mayor suavidad o estabilidad.

patrones de muy largo plazo y gran longitud de onda, utilizando computación emergente para tratar problemas geomorfológicos tradicionalmente cualitativos. El estudio anticipó la revolución cuantitativa en geociencias.

Adicionalmente Lustig aplicó otros tres métodos: contorno manual, la función de entropía relativa y el análisis de Fourier, además del TSA. Elo le permitió identificar: a) Una Tendencia regional de primer grado en el p Plano inclinado ENE (0.4 m/km) que fue interpretado como posible basamento regional inclinado, efecto isostático diferencial y herencia de estructuras pre-extensionales; b) Un componente cuadrático (grado 2) que al explicar ~40% de varianza, reveló una concavidad general N-S y una posible relación con curvatura litosférica o patrones de extensión diferencial y c) Que los residuales positivos correlacionan con rangos montañosos, los negativos con cuencas.

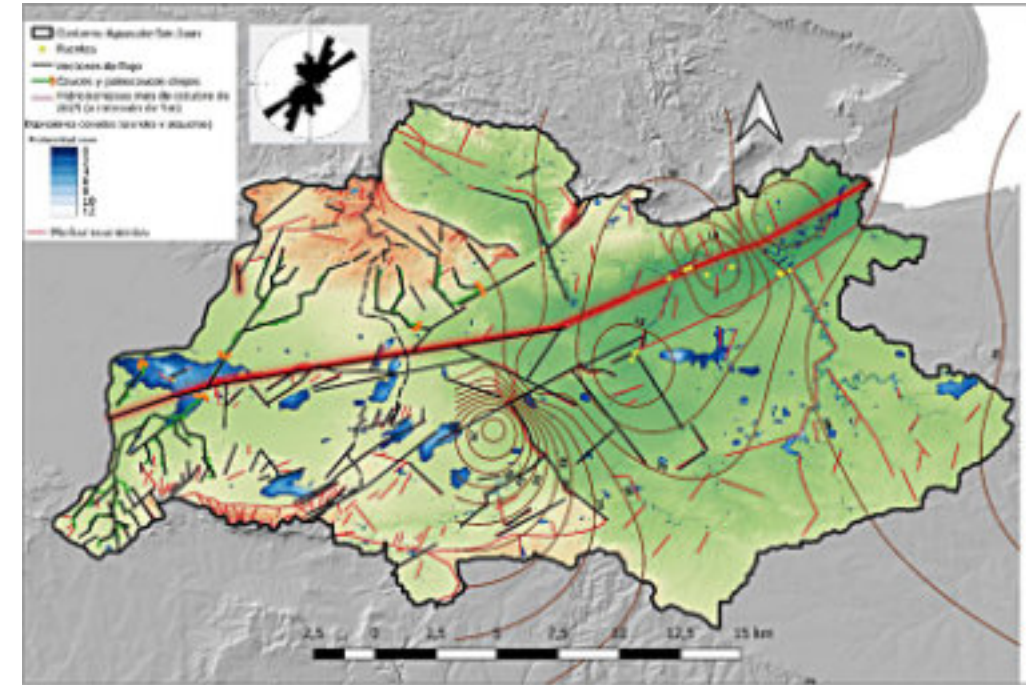
## RECONOCIMIENTOS

Los autores desean expresar su reconocimiento a las siguientes personas por su amable contribución en diferentes fases de estos estudios: Víctor Aguiar, Alfredo Álvarez, Humberto Álvarez, Dionisio Amor, Gabriel Barceló, Juan Bobes, Charles Brewer-Carías, Lorenzo Carvajal, Alfredo Contreras, José Corella Varona, Andrés Díaz Arenas, Carlos Díaz Guanche, José Díaz Machín, Tatiana Delgado, Hermes Farfán, Rafael Feitoo, Ernesto Flores, Arturo González, Guillermo González, Raciél González, Svetanka Guneva, Nikolai Gvozdetski, Manuel Iturralde Vinent, Iliá Levaski, Raudel del Llano, Yamilé Luguera, Antonio Magaz, Vladimir Otero, Armando Portela, Odón Radai, Orlando Rovira, Claudio Scherle, Carlos Seijas, Evelio Suárez, Boris Talikov, Aftandil Tzirekitze, Franco Urbani, Germán Yáñez y, en especial a Ana Margarita Sardiñas.

## CONCLUSIONES

- El karst ofrece la posibilidad única de identificar exactamente los puntos donde las aguas se infiltran y se cierra la fase terrestre del ciclo hidrológico. Con ello, el balance hídrico es determinado por puntos donde la recarga natural se concentra y, a diferencia de otros tipos de acuíferos, la infiltración deja de ser un concepto areal y una componente difusa para integrarse físicamente, en puntos concretos, al balance hídrico del dominio de flujo.
- Cada dolina activa es un punto de recarga concentrada del acuífero que en número y distribución superan con creces -física y económicamente- cualquier costoso proyecto de construcción y mantenimiento de obras de recarga artificial.
- Considerando que la dolinización es el resultado de un proceso natural de evolución hidrológica y geomorfológica del karst, el sellaje, obstrucción, colmatación de las dolinas está cerrando la capacidad de alimentación del acuífero e indirectamente afecta la reposición natural de sus recursos hídricos.
- La dolinización constituye un indicador morfológico directo y cuantificable de la recarga natural en acuíferos cársicos, permitiendo una evaluación espacialmente explícita mediante índices como  $D_k$  y  $\alpha$ .
- La metodología propuesta, basada en cartogramas booleanos y análisis de densidad, facilita la identificación de zonas de infiltración preferencial, con aplicaciones prácticas en la planificación de obras hidráulicas y la gestión de recursos hídricos en terrenos cársicos.
- La integración de herramientas geomáticas (SIG, MDT) y técnicas de interpolación espacial mejora significativamente la precisión en la delimitación de áreas de recarga y pérdida de agua, superando las limitaciones de los métodos cualitativos tradicionales.
- El enfoque cuantitativo presentado contribuye a una gestión más robusta y fundamentada de los acuíferos cársicos, reduciendo la incertidumbre en la evaluación de riesgos geotécnicos y en la planificación territorial sostenible.
- La consideración del estado evolutivo de las dolinas (Fases de Profundización) es esencial para interpretar correctamente su función hidrológica, evitando sobrestimaciones o subestimaciones en los cálculos de recarga.

La Habana, enero 2026



**Fig. 44. Interpolación de la superficie freática en el sistema Aguacate San Juan aplicando IDW**

## BIBLIOGRAFIA

- Bauer, S., Liedl, R., & Sauter, M. (2022). Influence of facies heterogeneity on karst aquifer hydraulics: Insights from numerical modeling and field data. *Hydrogeology Journal*, 30(4), 999-1015. <https://doi.org/10.1007/s10040-022-02466-9>
- Bear, J. (1972). *Dynamics of fluids in porous media*. Dover Publications.
- Bear, J., & Buchlin, J.-M. (Eds.). (1991). *Modelling and applications of transport phenomena in porous media*. Springer.
- Bear, J., Zaslavsky, D., & Irmay, S. (1968). *Physical principles of water percolation and seepage*. UNESCO.
- Bögli, A. (1964). Mischungskorrosion – Ein Beitrag zum Verkarstungsproblem [Mixing corrosion – A contribution to the karstification problem]. *Erdkunde*, 18(2), 83–92.
- Bonacci, O. (2001). Analysis of the water temperature regime of the Danube and its importance for the formation of ice appearance. *Hydrological Sciences Journal*, 46(2), 213–224. <https://doi.org/10.1080/02626660109492814>
- Bonacci, O. (2004). Hydrology of the Dinaric karst. In O. Bonacci (Ed.), *Hydrology and water resources in karst* (pp. 1–30). UNESCO. (IHP-VI, Series on Groundwater No. 2).
- Brucker, R. W., Hess, J. W., & White, W. B. (1972). Role of vertical shafts in the movement of groundwater in carbonate aquifers. *Ground Water*, 10(6), 5–13. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1972.tb02920.x>
- Bulla, B. (1954a). *Altalános természeti földrajz. Tankönyvkiadó* [General physical geography. Textbook Publisher] (Vol. II). Tankönyvkiadó.
- Bulla, B. (1954b). A klimatikus morfológia területi rendszere [The regional system of climatic morphology]. \*Magyar Tudományos Akadémia Társadalom- és Történettudományi Osztály Közleményei, 1-2\*, 1–15.

Chen, Z., Auler, A. S., Bakalowicz, M., Drew, D., Griger, F., Hartmann, J., Jiang, G., Moosdorf, N., Richts, A., Stevanović, Z., Veni, G., & Goldscheider, N. (2017). The World Karst Aquifer Mapping project: Concept, mapping procedure and map of Europe. *Hydrogeology Journal*, 25(3), 771–785. <https://doi.org/10.1007/s10040-016-1519-3>

Choquette, P. W., & Pray, L. C. (1970). Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates. *AAPG Bulletin*, 54(2), 207–250. <https://doi.org/10.1306/5D25C98B-16C1-11D7-8645000102C1865D>

Coleman, A. M., & Balchin, W. G. V. (1959). The origin and development of surface depressions in the Mendip Hills. *Proceedings of the Geologists' Association*, 70(3), 291–309. [https://doi.org/10.1016/S0016-7878\(59\)80014-1](https://doi.org/10.1016/S0016-7878(59)80014-1)

Cramer, H. (1941). Die Systematik der Karstdolinen [The systematics of karst dolines]. *Neues Jahrbuch für Mineralogie, Geologie und Paläontologie, Abhandlungen, Abteilung B*, 85, 293–382.

Cvijić, J. (1893). Das Karstphänomen [The karst phenomenon]. *Geographische Abhandlungen*, 5(3), 218–329.

Cvijić, J. (1895). *Karst* [Karst]. Geografska monografija.

Cvijić, J. (1918). Hydrographie souterraine et évolution morphologique du karst [Underground hydrography and morphological evolution of karst]. *Recueil des Travaux de l'Institut de Géographie Alpine*, 6(4), 375–426. <https://doi.org/10.3406/rga.1918.4727>

Cvijić, J. (1924). The evolution of lapies. *Geographical Review*, 14(1), 26–49. <https://doi.org/10.2307/208005>

Cvijić, J. (1960). *La géographie des terrains calcaires* [The geography of calcareous terrains]. Académie Serbe des Sciences et des Arts. (Monographies, Tome CCCXLI).

Dagan, G. (1989). *Flow and transport in porous formations*. Springer-Verlag.

de Marsily, G. (1986). *Quantitative hydrogeology: Groundwater hydrology for engineers*. Academic Press.

de Smith, M. J., Goodchild, M. F., & Longley, P. A. (2018). *Geospatial analysis: A comprehensive guide to principles, techniques and software tools* (6th ed.). The Winchelsea Press.

Díaz Guanche, C., Farfán González, H., Molerio León, L. F., Rojas Consuegra, R., Pajón Rodríguez, J., Ramírez Hernández, R., & Estévez Cruz, E. (2022). La edad del karst epigenético en la región central de la Sierra de los Órganos, Pinar del Río, Cuba [The age of epigenetic karst in the central region of the Sierra de los Órganos, Pinar del Río, Cuba]. *Boletín Geológico y Minero*, 133(1), 75–87. <https://doi.org/10.21701/bolgeomin/133.1/005>

Doctor, D. H., Alexander, E. C., Jameson, R. A., & Wright, W. J. (2015). Karst hydrology of the *Hastay Hagay* (Kasaan Bay) watershed, Prince of Wales Island, Alaska. *Journal of Cave and Karst Studies*, 77(3), 161–176. <https://doi.org/10.4311/2014ES0112>

Eraso, A. (1960). Geoquímica de las calizas de la Cordillera Cantábrica [Geochemistry of the limestones of the Cantabrian Range]. *Boletín del Instituto de Estudios Asturianos*, 14(40), 177–213.

Eraso, A. (1963). Sobre la influencia de los iones de valencia múltiple en el cavenamiento [On the influence of multiple valence ions on cave development]. *Notas y Comunicaciones del Instituto Geológico y Minero de España*, 71, 63–86.

Eraso, A. (1965). Method for correlating between soluble rocks and water. Its application to certain karst regions in the U.S.S.R. *Transactions of the Institute of Geography of the U.S.S.R.*, 67, 45–58.

Eraso, A. (1975). Nuevo método en la investigación del carso. Los modelos naturales y la convergencia de formas [New method in karst research. Natural models and the convergence of forms]. *Cuadernos de Geografía*, 1, 121–126.

Eraso, A. (1982). Consideraciones sobre el problema de la génesis y evolución del karst [Considerations on the problem of the genesis and evolution of karst]. *Boletín de la Sociedad Española de Espeleología y Ciencias del Karst*, 28, 5–18.

Eraso, A., & Pulido Bosch, A. (1974). Contribución al conocimiento de la espeleogénesis por análisis hidroquímico: El sistema de la Piedra de San Martín (Navarra-Huesca) [Contribution to the knowledge of speleogenesis by hydrochemical analysis: The Piedra de San Martín system (Navarra-Huesca)]. *Munibe*, 26(1-3), 113–124.

Ford, S. C. (1964). *Origin of closed depressions in the central Mendip Hills, Somerset, England* [Abstract]. In *Proceedings of the 20th International Geographical Congress* (p. 105).

Ford, D. C., & Williams, P. W. (2007). *Karst geomorphology and hydrology* (2nd ed.). Wiley.

Freeze, R. A., & Cherry, J. A. (1979). *Groundwater*. Prentice-Hall.

Gams, I. (1965a). Corrosion intensity in the Slovene karst. In *Proceedings of the 4th International Congress of Speleology* (Vol. 3, p. 105). Ljubljana.

Gams, I. (1965b). Aportación a la clasificación de las dolinas [Contribution to the classification of dolines]. *Geografski Zbornik*, 10, 75–93.

Gams, I. (1978). The polje: The problem of its definition. *Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementband*, 28, 170–181.

Gams, I. (1994). Types of the accelerated corrosion on karst. *Acta Carsologica*, 23, 13–24.

Gams, I. (2000). Doline morphogenetical processes from global and local viewpoints. *Acta Carsologica*, 29(2), 123–138.

Gelhar, L. W. (1993). *Stochastic subsurface hydrology*. Prentice Hall.

Goldscheider, N., & Drew, D. (Eds.). (2007). *Methods in karst hydrogeology*. Taylor & Francis. (IAH International Contributions to Hydrogeology, 26).

Goldscheider, N., Chen, Z., & Auler, A. S. (2020). Review: Advances in the hydrogeology of karst aquifers. *Hydrogeology Journal*, 28(5), 1461–1485. <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02193-z>

Grund, A. (1914). Der geographische Zyklus im Karst [The geographical cycle in karst]. *Zeitschrift der Gesellschaft für Erdkunde zu Berlin*, 52, 621–640.

Gvozdetsky, N. A. (1954). *Карст* [Karst]. Geografiz.

Gvozdetsky, N. A. (1972). *Проблемы изучения карста и практика* [Problems of karst study and practice]. Мысль [Mysl'].

Gvozdetsky, N. A. (1976). Problems of theoretical and applied karstology. In *Solutional sculpturing in karst* (R. F. Dublyansky, Ed. & Trans.). *International Geology Review*, 18(1), 106–124. <https://doi.org/10.1080/00206817609471194>

Gvozdetsky, N. A. (1981). Пейзажи карста [Karst landscapes]. In *Структура, динамика и развитие ландшафтов* [Structure, dynamics and development of landscapes] (pp. 134–152). Наука [Nauka].

Gvozdetsky, N. A., & Maksimovich, G. A. (1969). *Основы карстоведения* [Fundamentals of karstology] (2 vols.). Издательство Пермского университета [Perm State University Press].

Guerra Oliva, M. G. (1987). *El desarrollo de las formas superficiales y subterráneas del medio acuífero cársico en la zona no saturada según un Modelo de Interacción entre Medios Continuos Múltiples* [Unpublished manuscript]. Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos.

Guerra Oliva, M., & Camacho, R. (1988). Densidad superficial y tipología del karst de llanura de la C.H.E. Confluencia de los ríos Frío y Cuyaguaje, provincia de Pinar del Río [Surface density and typology of the plain karst of the Confluencia de los ríos Frío y Cuyaguaje Hydraulic Complex, Pinar del Río province]. *Informe del Instituto de Hidroeconomía, La Habana, 18*, 1–45.

Gunn, J. (2007). Contributory area definition for groundwater source protection and hazard mitigation in carbonate aquifers. In R. Parise & J. Gunn (Eds.), *Natural and anthropogenic hazards in karst areas* (pp. 97–109). Geological Society, London, Special Publications, 279. <https://doi.org/10.1144/SP279.10>

Gutiérrez, F., Parise, M., De Waele, J., & Jourde, H. (2014). A review on natural and human-induced geohazards and impacts in karst. *Earth-Science Reviews, 138\**, 61–88. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.08.002>

Hartmann, A., Goldscheider, N., Wagener, T., Lange, J., & Weiler, M. (2014). Karst water resources in a changing world: Review of hydrological modeling approaches. *Reviews of Geophysics, 52*(3), 218–242. <https://doi.org/10.1002/2013RG000443>

Hartmann, A., Lange, J., Vivó Aguado, À., Mized, N., Smiatek, G., & Kunstmann, H. (2012). A multi-model approach for improved simulations of future water availability at a large Eastern Mediterranean karst spring. *Journal of Hydrology, 468–469*, 130–138. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.08.024>

Herak, M. (1976). The Yugoslav contribution to the knowledge of karst hydrology and geomorphology. In V. Yevjevich (Ed.), *Karst hydrology and water resources* (Vol. 1, pp. 1–28). Water Resources Publications.

Horton, R. E. (1933). The role of infiltration in the hydrologic cycle. *Transactions, American Geophysical Union, 14*(1), 446–460. <https://doi.org/10.1029/TR014i001p00446>

Iturralde-Vinet, M. A. (1969). El carso de “La Carraca”, provincia de Matanzas, Cuba [The karst of “La Carraca”, Matanzas province, Cuba]. *Tecnológica, 7*(1), 48–54.

Jakucs, L. (1977). *Morphogenetics of karst regions: Variants of karst evolution*. Akadémiai Kiadó.

Jennings, J. N. (1985). *Karst geomorphology*. Basil Blackwell.

Kastning, E. H. (1999). The surface-subsurface interface and the influence of geologic structure in karst. In A. N. Palmer, M. V. Palmer, & I. D. Sasowsky (Eds.), *Karst modeling* (pp. 43–57). Karst Waters Institute. (Special Publication 5).

Kiraly, L. (2003). Karstification and groundwater flow. *Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers, 1*(3), 1–26.

Kirkby, M. J. (Ed.). (1978). *Hillslope hydrology*. John Wiley & Sons.

Klimchouk, A. (2004). Towards defining, delimiting and classifying epikarst: Its origin, processes and variants of geomorphic evolution. *Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers, 2*(1), 1–13.

Klimchouk, A. B. (2015). The karst paradigm: Changes, trends and perspectives. *Acta Carsologica, 44*(3), 289–313. <https://doi.org/10.3986/ac.v44i3.1960>

Klimchouk, A., & Andreychouk, V. (1996). Karstology in the former Soviet Union: A review. *Environmental Geology, 27*(3), 166–174. <https://doi.org/10.1007/BF01061680>

Kunze, R. J., & Nielsen, D. R. (1982). Finite difference analyses of unsaturated flow in heterogeneous soils. In D. Hillel (Ed.), *Advances in irrigation* (Vol. 1, pp. 43–69). Academic Press.

La Valle, P. (1967). Some aspects of linear karst depression development in south central Kentucky. *Annals of the Association of American Geographers, 57*(1), 49–71. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8306.1967.tb00586.x>

Li, J., & Heap, A. D. (2014). *Spatial interpolation methods: A review for environmental scientists*. Geoscience Australia. (Record 2014/03). <http://pid.geoscience.gov.au/dataset/ga/81622>

Llopis Lladó, N. (1982). *Fundamentos de hidrogeología cársica. Introducción a la geoespeleología* [Fundamentals of karst hydrogeology. Introduction to geospeleology]. Editorial Pueblo y Educación.

Lozinski, W. von. (1907). Die Karsterscheinungen in Galizisch-Podolien [Karst phenomena in Galicia-Podolia]. *Jahrbuch der Kaiserlich-Königlichen Geologischen Reichsanstalt, 57\**, 683–726.

Lucia, F. J. (1995). Rock-fabric/petrophysical classification of carbonate pore space for reservoir characterization. *AAPG Bulletin, 79*(9), 1275–1300. <https://doi.org/10.1306/7834D4A4-1721-11D7-8645000102C1865D>

Lustig, L. K. (1969). Trend-surface analysis of the Basin and Range Province, and some geomorphic implications. *U.S. Geological Survey Professional Paper, 500-D\**, D1–D78.

Machado Alique, M. (2013). *Validación del método de predicción de direcciones principales de drenaje subterráneo en macizos anisótropos en los terrenos volcánicos del Macizo de Anaga, Tenerife* [Tesis doctoral, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas, Universidad Politécnica de Madrid].

Martel, É.-A. (1900). *La spéléologie, ou science des cavernes* [Speleology, or the science of caves]. Imprimerie de Durand.

Martel, É.-A. (1901). *Le gouffre et la rivière souterraine de Padirac (Lot). Historique, description, exploration, aménagement (1889–1900)* [The chasm and underground river of Padirac (Lot). History, description, exploration, development (1889–1900)]. Librairie Ch. Delagrave.

Martel, É.-A. (1908). *L'évolution souterraine* [Underground evolution]. Librairie Félix Alcan.

Martel, É.-A. (1928a). *Le nouveau traité des eaux souterraines* [The new treatise on groundwater]. Octave Doin.

Martel, É.-A. (1928b). *La France ignorée. Sud-Est de la France* [Unknown France. Southeast of France]. Librairie Ch. Delagrave.

Martel, É.-A. (1928c). *Les causes majeurs* [The major causes]. Delagrave.

Mijailov, K. A. (2003). Nikolai Alexeyevich Gvozdetsky (1913–1994). In *Geomorphology: The research and scientists of the Soviet Union* (pp. 145–152). A.A. Balkema.

Mitas, L., & Mitasova, H. (1999). Spatial interpolation. In P. Longley, M. F. Goodchild, D. J. Maguire, & D. W. Rhind (Eds.), *Geographical information systems: Principles, techniques, management and applications* (pp. 481–492). Wiley.

Molerio León, L. F. (1970). La Densidad Superficial del Carso en las Investigaciones Ingeniero-Geológicas [Surface karst density in engineering-geological investigations]. In *Simposio XXX Aniversario de la Sociedad Espeleológica de Cuba* (p. 84). La Habana.

Molerio León, L. F. (1973). *Documentación de campo del exocarso* [Field documentation of exokarst]. Grupo Hidráulico Nacional, División de Investigaciones Sistemáticas, Departamento de Hidrogeología.

Molerio León, L. F. (1976). El Refugio: ¿Cueva cutánea o forma convergente? [El Refugio: Cutaneous cave or convergent form?]. *Archivo del Instituto de Hidroeconomía, La Habana*, 7, 1–15.

Molerio León, L. F. (1980). *El Sistema Cársico de la Sierra del Pesquero, Pinar del Río* [The karst system of the Sierra del Pesquero, Pinar del Río] [Tesis de grado, Instituto Politécnico "Vitalio Acuña"].

Molerio León, L. F. (1982). Contribución al estudio de los procesos de dolinización en el Kegelkarst de Cuba occidental [Contribution to the study of doline formation processes in the western Cuban kegelkarst]. *Boletín del Grupo Espeleológico Martel de Cuba*, 4, 2–12.

Molerio León, L. F. (1985). El Área Elemental Representativa (AER) para la evaluación de las propiedades físicas del carso. Modelo teórico [The Representative Elementary Area (AER) for the evaluation of the physical properties of karst. Theoretical model]. In *Simposio XLV Aniversario de la Sociedad Espeleológica de Cuba* (p. 45). La Habana.

Molerio León, L. F. (1992a). *Procesos de transporte de masa en la zona no saturada de los acuíferos cársicos tropicales* [Mass transport processes in the unsaturated zone of tropical karst aquifers]. Grupo de Trabajo GTICEK, Taller Internacional sobre Cuencas Experimentales en el Karst, Matanzas.

Molerio León, L. F. (1992b). Distribución del cavernamiento en las Sierras del Pesquero, San Carlos, Resolladero y Mesa, Pinar del Río, Cuba [Distribution of cavern development in the Sierras del Pesquero, San Carlos, Resolladero and Mesa, Pinar del Río, Cuba]. In *II Congreso Espeleológico Latinoamericano y del Caribe* (pp. 19–20). Viñales, Cuba.

Molerio León, L. F. (2013). Resumen de la tipología hidrogeológica del karst cubano [Summary of the hydrogeological typology of Cuban karst]. *Aragonito*, 1 (Suplemento del Periódico Digital Espeleológico *El Explorador*), 1–25.

Molerio León, L. F. (2019). Inestabilidad crítica de cavernas (II): Procesos de dolinización [Critical instability of caves (II): Doline formation processes]. *Gota a Gota*, 18, 73–79. <https://drive.google.com/file/d/1T6mEAXu-W5o5jjEwG16HWN2-3VZbsq40/view>

Molerio-León, L. F. (2020). Los sistemas de drenaje de la parte oriental del karst de las Escaleras de Jaruco, Cuba [The drainage systems of the eastern part of the Escaleras de Jaruco karst, Cuba]. *Gota a Gota*, 20, 91–97. [https://drive.google.com/file/d/1S5ENLA18N\\_qeambp3ctPgS7Z1MNMliP4/view](https://drive.google.com/file/d/1S5ENLA18N_qeambp3ctPgS7Z1MNMliP4/view)

Molerio-León, L. F. (2022). Evaluación de los recursos hídricos de Cuba (I). Aguas subterráneas en el karst de montaña: Métodos de cálculo [Evaluation of Cuba's water resources (I). Groundwater in mountain karst: Calculation methods]. *Gota a Gota*, 27, 69–78. <https://www.researchgate.net/publication/367250987>

Molerio León, L. F. (2024a). Agenda 2030 y gestión de recursos hídricos subterráneos bajo incertidumbre geológica: Caso Cuba [Agenda 2030 and groundwater resource management under geological uncertainty: The case of Cuba]. *Revista Bimestre Cubana*, 16, 45–67.

Molerio León, L. F. (2024b). Hidrología del cinturón de poljes Ariguanabo-Cañas-¿San Juan? (Cuba) y el problema de la gestión ordenada de sus recursos hídricos [Hydrology of the Ariguanabo-Cañas-¿San Juan? polje belt (Cuba) and the problem of orderly management of its water resources]. *Mundo Subterráneo*, 10, 10–49. <https://www.researchgate.net/publication/383500868>

Molerio León, L. F., Alonso Montero, R., & Sardiñas Gómez, A. M. (2024). Problemas hidrogeológicos de la gestión eficiente de los recursos hídricos del Polje Ariguanabo, Cuba [Hydrogeological problems of the efficient management of the water resources of the Ariguanabo Polje, Cuba]. *Maya: Revista de Geociencias, Suplemento Septiembre*, 24–84. <https://www.researchgate.net/publication/384437314>

Molerio León, L. F., & Valdés Ramos, J. J. (1975). Problemas y perspectivas de la investigación geoespeleológica en Cuba [Problems and perspectives of geoespeleological research in Cuba]. *Tecnológica*, 13(3), 32–35.

Neuman, S. P. (2005). Trends, prospects and challenges in quantifying flow and transport through fractured rocks. *Hydrogeology Journal*, 13(1), 124–147. <https://doi.org/10.1007/s10040-004-0397-2>

Otero Collazo, V., & Molerio-León, L. F. (2022). Condiciones de estabilidad de la dolina y el Salón de los Dibujos de Cinco Cuevas, Boca de Jaruco [Stability conditions of the doline and the Drawing Hall of Cinco Cuevas, Boca de Jaruco]. *Mundo Subterráneo*, 7, 42–85. <https://sites.google.com/view/mundosubterraneo/p%C3%A1gina-principal>

Perrin, J., Jeannin, P.-Y., & Cornaton, F. (2003). The role of the subcutaneous zone in karst hydrology. *Journal of Hydrology*, 276(1–4), 295–303. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00060-1](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00060-1)

Radionov, A. (1958). *Условия инженерно-геологические работ в карстовых районах* [Engineering-geological conditions of work in karst regions]. Госгеолиздат [Gosgeolizdat].

Renard, P., & de Marsily, G. (1997). Calculating equivalent permeability: A review. *Advances in Water Resources*, 20(5–6), 253–278. [https://doi.org/10.1016/S0309-1708\(96\)00050-4](https://doi.org/10.1016/S0309-1708(96)00050-4)

Ronchi, D., & Crupi, A. (2019). Facies-controlled karstification and groundwater flow in carbonate aquifers: Case studies from southern Italy. *Environmental Earth Sciences*, 78(5), Article 138. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8131-5>

Sánchez-Vila, X., Guadagnini, A., & Carrera, J. (2006). Representative hydraulic conductivities in saturated groundwater flow. *Reviews of Geophysics*, 44(3), RG3002. <https://doi.org/10.1029/2005RG000169>

Sauro, U. (2005). Closed depressions in karst areas. In D. C. Culver & W. B. White (Eds.), *Encyclopedia of caves* (pp. 108–122). Elsevier Academic Press.

Sauro, U. (2006). Contributions to the history of karst geomorphology. *Acta Carsologica*, 35(2), 123–134.

Sauter, M., & Liedl, R. (2000). Modelling karst hydrology: A review. In A. B. Klimchouk, D. C. Ford, A. N. Palmer, & W. Dreybrodt (Eds.), *Speleogenesis: Evolution of karst aquifers* (pp. 928–936). National Speleological Society.

Shurinov, M. V. (1968). *Руководство для инженера-геолога* [Guide for the engineering geologist]. Недра [Nedra].

Sweeting, M. M. (1972). *Karst landforms*. Macmillan.

Waltham, T., Bell, F., & Culshaw, M. (2005). *Sinkholes and subsidence: Karst and cavernous rocks in engineering and construction*. Springer. <https://doi.org/10.1007/b138363>

White, W. B. (1988). *Geomorphology and hydrology of karst terrains*. Oxford University Press.

Williams, P. W. (1969). The geomorphic effects of groundwater. In R. J. Chorley (Ed.), *Water, earth and man* (pp. 269–284). Methuen.

Williams, P. W. (1983). The role of the subcutaneous zone in karst hydrology. *Journal of Hydrology*, 61(1–3), 45–67. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(83\)90234-2](https://doi.org/10.1016/0022-1694(83)90234-2)

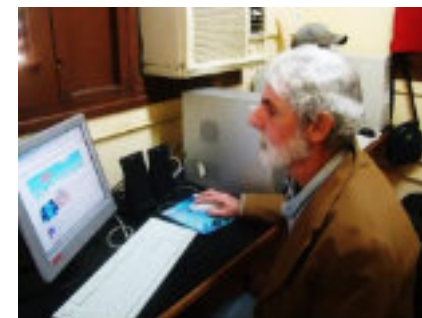
Zhang, Z., Chen, X., Cheng, Q., & Soulsby, C. (2021). Storage dynamics, hydrological connectivity and flux ages in a karst catchment: Conceptual modelling using stable isotopes. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(1), 91–114. <https://doi.org/10.5194/hess-25-91-2021>



**LESLIE F. MOLERIO LEÓN.** Geólogo de Yacimientos Minerales e Hidrogeólogo- Hidrotécnico, cubano, MSc. en Hidrología Isotópica con pre, posgrados y docencia en universidades y centros de Investigación europeos y latinoamericanos. Ex-Director del Servicio Hidrogeológico de la República de Cuba y del Centro de Hidrología y Calidad de las Aguas (Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos), Consultor Ambiental, Especialista Principal en Proyectos e Ingeniería (INVERSIONES GAMMA, S.A.), Especialista en Obras Subterráneas y Auditor Ambiental titulado. Experto para agencias de Naciones Unidas, del sistema interamericano y consultoras internacionales de varios países. Con 59 años de vida laboral activa, ha participado en unos 490 proyectos de su especialidad en 50 países. Autor o coautor de unos 370 artículos científicos y de 19 libros de su especialidad. Es Miembro de la Academia de Ciencias de Nueva York y Embajador de su Bicentenario, y de 34 sociedades científicas internacionales, cubanas y extranjeras, así como de varias comisiones de instituciones internacionales.



**RAYDEL ALONSO MONTERO.** Geógrafo por la Universidad de La Habana. Especialista en INVERSIONES GAMMA, S.A. Ha participado en proyectos relacionados con estudios geoambientales, de ingeniería geológica e hidrogeológica fundamentalmente y de monitoreo ambiental en los yacimientos gasopetrolíferos del Occidente de Cuba y posee entrenamiento de posgrado sobre hidrología de obras hidráulicas. Ha logrado una especialización en el desarrollo de soporte cartográfico automatizado y de campo. Ha publicado artículos científicos referentes a temas geomorfológicos de sectores endorreicos, recursos hídricos y de cosecha de agua en Cuba.



**MARIO G. GUERRA OLIVA,** geólogo especializado en Geomorfología Aplicada en los campos de la Hidrogeomorfología y el Análisis Morfométrico del relieve con cincuenta años de experiencia en esas áreas de actuación, En la actualidad, Especialista del Instituto de Geofísica y Astronomía en la Agencia de Medio Ambiente del Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente de Cuba. Ha conducido decenas de estudios en el campo de la Ingeniería Hidráulica y como experto de agencias del sistema de Naciones Unidas en diferentes países. Es autor o coautor de decenas de artículos sobre su

especialidad. Ha compartido su tiempo como docente de pre y posgrado y como guía o consultante de tesis de grado, maestría y doctorado en el campo de la Hidrología y la Geomorfología aplicada.



**MANUEL NÚÑEZ LAFITTE<sup>†</sup>** (Banes, 1950-La Habana, 2022) geógrafo cubano, especializado en Geomorfología Estructural y Morfometría, desarrolló la mayor parte de su medio siglo de vida profesional entregado a las investigaciones hidráulicas destacando en la evaluación de factibilidad geomorfológica de presas. Incursionó fructíferamente en el campo de la Hidrogeología aplicada en la prospección y desarrollo de pozos no fértiles en rocas de baja permeabilidad y realizó significativos aportes en la teoría hidráulica de filtros de pozos de explotación de las aguas subterráneas. Compartió su tiempo con tareas docentes de pre y posgrado y tutoría de entrenamientos especializados. Participó en numerosos eventos científico técnicos y publicó numerosos artículos sobre estos temas. Es el autor de un libro de Hidrogeología Práctica aun inédito.

**LA TERCERA PARTE DEL GOLFO DE MÉXICO QUE LE PERTENECE A COLOMBIA.  
UN MARAVILLOSO, MÁGICO Y CINEMATográfico VIAJE A TRAVÉS DEL PERIODO JURÁSICO  
POR EDINSON ALVAREZ.**

**IMPORTANTES CONTRIBUCIONES EN GEOCIENCIAS  
PROMETEN REVOLUCIONAR LA EXPLORACIÓN O&G&M. No 5/10.**

**EDINSON D. ALVAREZ S. 1,2**

1 Exploration Geologist, O&G&M Specialist,  
Researcher of tectonic and structurally complex areas.

2 Experto en soluciones geocientíficas a través de estudios integrados O&G&M,  
Con importantes implicaciones económicas.



**Complex Source Theory (Edinson Alvarez 2025):** Mecanismo utilizado por grupos interdisciplinarios de especialistas en cualquier campo de la ciencia, donde se emplean nuevos conceptos, nuevas metodologías, nueva tecnología, nuevo conocimiento, obteniendo nuevos resultados, con el fin de resolver temas complejos. (Imagen Cortesía Pixabay).

**EAST-P Method-Tool (Processing and Seismic Treatment Edinson Alvarez 2025):** Requiere equipo de personal especializado, equipos de cómputo y software avanzado.

**Edinson Geochemical Hydrocarbon Family Classification Maps -Tool (Edinson Alvarez 2025):** Nueva Clasificación de Familias de Hidrocarburos basadas en la huella geoquímica-isotópica-molecular, el rastro de migración desde la fuente, su relación estrecha con la geología, el modelamiento geoquímico de generación expulsión y rutas de migración de hidrocarburos en un contexto regional.

**Estudios Integrados Onshore-Offshore-Tool:** Involucra la participación de más de 20 disciplinas de las geociencias, a fin de encontrar respuestas a problemas complejos de la industria, con Fuertes implicaciones económicas positivas.

**Como citar:** Alvarez Serrato Edinson Darío, 2025. La Tercera Parte Del Golfo De México Que Le Pertenece A Colombia. Un Maravilloso, Mágico Y Cinematográfico Viaje A Través Del Periodo Jurásico Contado Por Edinson Alvarez. Importantes Contribuciones En Geociencias Prometen Revolucionar La Exploración O&G&M. No 5/10.Revista Maya Diciembre 2025. 39 p.  
Citas Artículo 1,2,3,4 al final.

## INTRODUCTION

El presente trabajo tiene como fin aportar al conocimiento Geocientífico de un área importante para la industria O&G&M mundial. La Evolución Jurásica del Golfo de América, Golfo de México, Territorio Colombiano y Venezolano (Esquina Noroccidental de Suramérica-Gondwana). En esta ocasión se desea mostrar con evidencias técnicas y científicas la relación entre tectónica de placas, arcos magmáticos, arcos volcánicos, desarrollo de Zonas de Rift y Zonas de Subducción, combinados para comprender el origen, crecimiento y desarrollo de las cuencas sedimentarias de interés para la industria Minero-Energética mundial.

En esta primera fase, el tema central es la solución a las incertidumbres o preguntas específicas sin respuesta, planteadas por los primeros exploradores españoles en el año de 1525 cuando fundaron la ciudad de Santa Marta y 1538 cuando fundaron la ciudad de Bogotá-Colombia, hace aproximadamente 500 años. Y respuestas a las preguntas de los geocientíficos contemporáneos e investigadores a nivel mundial, hechas durante más de 100 años de historia y desarrollo de la industria petrolera en la Región del Golfo de México. Veremos también las implicaciones del problema en los sistemas petrolíferos, mineros, y sociales de una manera muy general.

Destacando del lado Colombiano a las diferentes empresas, instituciones, entidades y personas que han contribuido al desarrollo del conocimiento en tales tópicos como son el Servicio Geológico Colombiano (SGC), La Empresa Colombiana de Petróleos Ecopetrol, El Instituto de Investigaciones del Petróleo y Energías de Transición – (ICPET), La agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH), las universidades estatales y privadas como la Universidad de Caldas, su Instituto de Investigaciones Estratigráficas IIES, La Universidad Nacional de Colombia (Unal), Universidad Industrial de Santander (UIS), Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), Universidad EAFIT, Universidad de Pamplona, Universidad de los Andes, entre otras...

Destacando el incansable e importante trabajo desarrollado por los Reconocidos y honorables Doctores: James Pindell, Diego Villagómez, Roberto Molina-Garza, Rod Graham and Bodo Weber 2020, A revised synthesis of the rift and drift history of the Gulf of Mexico and surrounding regions in the light of improved age dating of the Middle Jurassic salt. 49 p. <https://doi.org/10.1144/SP504-2020-43>, Libresal público a través de su conferencia de Youtube Cátedra Selecta.- James Pindell-2021.

El Dr. James Pindell ha dedicado toda su vida al estudio, entendimiento y evolución geológica del Golfo de México con su tesis de Maestría Permo-Triassic reconstruction of Western Pangea and the evolution. 1981 y Tesis Doctoral Plate-tectonic evolution of the Gulf of Mexico and Caribbean region 1985. E importantes y suficientes trabajos relacionados posteriores hasta la fecha 2025.

Destacar el Trabajo de los Doctores Restrepo, J.J. & Toussaint, J.F. 2020. Tectonostratigraphic terranes in Colombia: An update. First part: Continental terranes. In: Gómez, J. & Mateus-Zabala, D. (editors), The Geology of Colombia, Volume 1 Proterozoic – Paleozoic. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 35, p. 37–63. Bogotá. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.35.2019.03>, quienes han dedicado toda su vida al estudio de la Geología Colombiana, y su obra sobre terrenos tectonoestratigráficos, en diferentes y renovadas versiones de 1973, 1988, 1993, 1998, 2020, entre otras.

Aprovechamos para aclarar que la forma narrativa utilizada por el autor, es solo con el interés de generar nuevos lectores, audiencia e interesados en la investigación científica relacionada con las Geociencias – ciencias de la tierra. Lo anterior para no confundir alguna actitud arrogante, ya que la forma narrativa corresponde a una estrategia netamente de atracción de audiencia. Todo el respeto y admiración para quienes han hecho sus valiosos aportes a las Geociencias. **La Grandeza y la Gloria es para Dios.**

La forma Narrativa es en Homenaje a uno de los más grandes de la literatura Universal Miguel de Cervantes Saavedra (1547-1616), con su obra Magistral Don Quijote de la Mancha (1605)). Para este caso **llamaremos Gigantes a ( Conceptos, técnicas, tecnologías, metodologías, procedimientos, herramientas, incertidumbres, preguntas no resueltas, etc.)**. Los invitamos a ver el lado positivo de la historia, el cual son los aportes en geociencias para nuestro país Colombia y en esta caso el Impresionante y espectacular Golfo de México.

Daremos un espectacular, fascinante, maravilloso y cinematográfico viaje geológico por el mundo Jurásico Colombo-Mexicano-Americano.

Igualmente hacemos un símil con el Deporte, respecto de los Gigantes que vamos a derribar en la presente edición. Los Records son para batirlos o derribarlos, de igual manera nuestra propuesta en caso de tener debilidades o fracturas, muy probablemente será batida o derribada por una nueva y/o mejor propuesta en el futuro.

## METODOLOGY

Para poder superar los obstáculos y dificultades estructurales, estratigráficas, sedimentológicas, vulcanológicas, geológicas, geofísicas, geocronológicas, geoquímicas, sismológicas, que plantea la complejidad tectónica-estructural del área, se procede a realizar las siguientes actividades:

- Recopilación de información procedente de exploración petrolera, estudios geoquímicos, geofísicos, geológicos, estratigráficos, tectónico-estructurales, sistemas petroleros, vulcanológicos, geocronológicos, y otros estudios del área de interés.

- Como parte de la actividad profesional independiente del Autor, se han realizado varios estudios integrados para abordar el tema de la complejidad tectónica estructural del área de estudio, y sus implicaciones en la actividad exploratoria y de producción de petróleo y gas en Colombia y el Golfo de México. **Para este caso relacionado con la evolución tectonoestratigráfica principalmente en el periodo geológico Jurásico. 145 a 201.3 millones de años. Incluyendo también al triásico superior 201.3 a 237 m.a. (201.3-210 m.a.)**

**RESULTS**

**1. Marco Tectónico General y Terminología.**

Para entender el desarrollo del presente capítulo acudiremos a los siguientes términos (**Figura 1 y 2**):

**Golfo Triásico-Jurásico De Edinson Alvarez:** Masa de Agua Marina amplia rodeada por los siguientes accidentes geográficos dándole su configuración de Golfo: Terrenos Aoxaca y Chortis al Occidente-Noroccidente, México Continental al Norte y Oriente, Colombia Continental Al Oriente-Sur Oriente. (Triásico Superior-Jurásico Inferior) (**Figuras 1 y 3**)

**Bahía Jurásica De Edinson Alvarez:** Masa de Agua Marina estrecha rodeada por los siguientes accidentes geográficos dándole su configuración de Bahía: Terrenos Aoxaca y Chortis al Occidente-Noroccidente, México Continental al Norte y Oriente, Colombia Continental Al Oriente -Sur Oriente. (Jurásico Inferior) (**Figuras 4 y 5**)

**Estrecho Jurásico De Edinson:** Zona de Apertura, fractura rotura, entrada del Océano Pacífico al Golfo de México y Paleocuenca de la Cordillera Oriental de Colombia. (Jurásico Inferior-medio) (**Figuras 2,6,7, 9,10 y 14**)

El Estrecho Jurásico De Edinson, contó con varias aperturas o estrechos nombrados a Continuación:

**Estrecho Jurásico De Edinson (Norte);** Rotura o Estrecho principal Creado en el Jurásico 170-169 ma. Entre el Macizo de Chiapas Mexicano y La Alta Guajira Colombiana (Serranía de Macuira-Cosinas).

**Estrecho Jurásico De JhonEdi (Centro);** Rotura o Estrecho Creado entre La Alta Guajira Colombiana (Serranía de Cosinas-Macuira) y la Sierra Nevada de Santa Marta. (Honor Jhon Edinson Alvarez M. –Hijo)

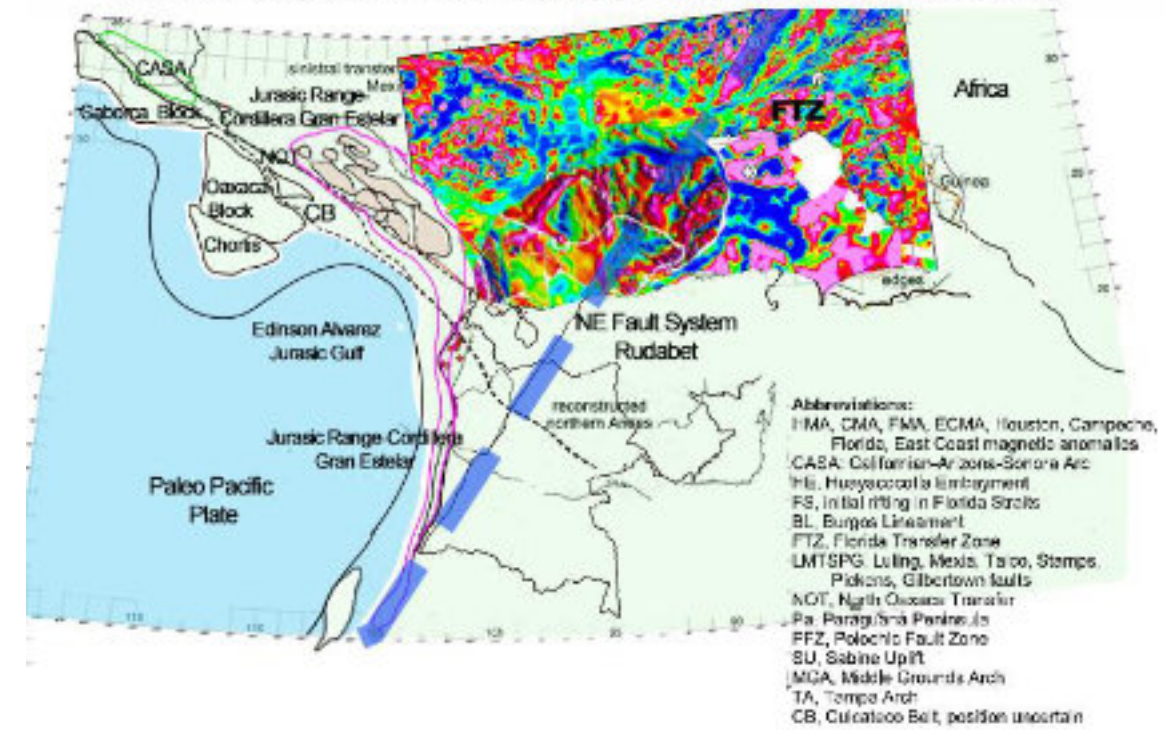
**Estrecho Jurásico De Floris (Sur);** Rotura o Estrecho Creado al Costado occidental de la Sierra Nevada de Santa Marta, controlado por la Falla de Bucaramanga. (**Figura 14**) (Honor Florinda Serrato-Madre)

**Estrecho Jurásico Independiente Milenar:** Rotura o Estrecho Creado al suroccidente de la Cuenca de Cundinamarca (Parte Sur occidental de la paleocuenca de la Cordillera Oriental) controlado por la Falla de Ibagué. (**Figura 14**). (Honor Ana Milena Alvarez Serrato-Hermana).

**Cordillera Jurásica Gran Estelar:** Gran Cordillera Triásica-Jurásica Gran Estelar conformada por la unión de las Paleo Sierra Madre Oriental Mexicana y la Paleo Cordillera Central de Colombia. De basamento cristalino metamórfico precámbrico-paleozoico, intrusivos granitoides y depósitos vulcano sedimentarios fluviales, complejos sedimentarios de arco volcánicos. Paleogeográficamente funciona como respaldo de Talud del gran Golfo de México, respecto de las aguas del océano pacífico. (Honor Amada Esposa Estela Moreno Z.) (**Figuras 1, 3, 4 y 5**).

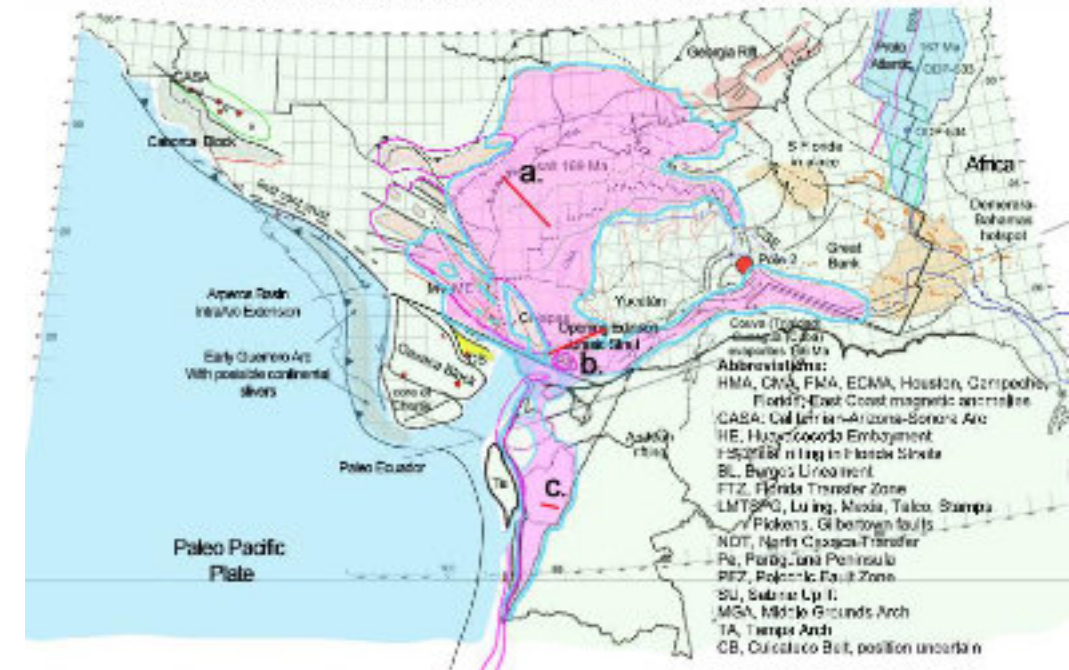
**Gran Sistema de Fallas, Rift, Lineamiento Rudabet (Honor Ruben Dario Alvarez Betancourt-Padre, Figura1 y 3);** Integrado por el Gran sistema de fallas, rift y lineamiento de las Fallas de Guaicáramo-piedemonte (Colombia), Falla de Boconó- piedemonte(Venezuela), lineamiento NE Yucatán, Rift de Georgia y piedemonte de los montes apalaches.

**Fig 1. Mexican Gulf Tectonic Evolution - 210-200 m.a. Late triasic-Early Jurassic**  
Edinson Alvarez -Geoscientist 2025, edinson.alvarez@gmail.com . Modified from Pindell et al 2021.



**Figura 1.** Principales Rasgos Geológicos, morfológicos y tectónico estructurales para Laurentia-Gondwana durante finales del periodo Triásico-Comienzos Jurásico. 200-210 ma.

**Fig 2. Mexican Gulf Tectonic Evolution - 167 m.a. Middle Jurassic**  
Edinson Alvarez -Geoscientist 2025, edinson.alvarez@gmail.com . Modified from Pindell et al 2021.



**Figura 2.** Localización del perfiles Sísmico-Estratigráficos en **a.** Golfo de América, **b.** Golfo de México, **c.** Cundinamarca Basin-Colombia, Color Rosa Corresponde a Depósitos de Sal para el periodo 170 a 166 m.a. aproximadamente,

2. Análisis

Utilizando las herramientas avanzadas de la Teoría de Fuente Compleja TFC, se hizo muy fácil encontrar una respuesta al interrogante planteado por los reconocidos geocientíficos homenajeados en el presente artículo, y que durante décadas ha trasnochado a la comunidad de geólogos, estratígrafos, vulcanólogos, sismólogos, geofísicos, geocientíficos, sector minero energético mundial en general.

Todas las respuestas proceden de la reconstrucción paleogeográfica del Golfo de México basado en el trabajo de los reconocidos Geocientíficos: **James Pindell, Diego Villagómez, Roberto Molina-Garza, Rod Graham and Bodo Weber 2020, A revised synthesis of the rift and drift history of the Gulf of Mexico and surrounding regions in the light of improved age dating of the Middle Jurassic salt. 49 p.** <https://doi.org/10.1144/SP504-2020-43>, Libres al público a través de su conferencia de Youtube **Cátedra Selecta.- James Pindell-2021.**

y de los trabajos de los **Doctores Restrepo, J.J. & Toussaint, J.F. 2020. Tectonostratigraphic terranes in Colombia: An update. First part: Continental terranes.** In: **Gómez, J. & Mateus-Zabala, D. (editors), The Geology of Colombia, Volume 1 Proterozoic – Paleozoic. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 35, p. 37–63. Bogotá.** <https://doi.org/10.32685/pub.esp.35.2019.03>.

Complementado lógicamente con la información de los estudios realizados por importante y reconocidos geocientíficos descritos en la Bibliografía, integrado todo con las herramientas avanzadas de la **Teoría de Fuente Compleja SCT (Edinson Alvarez 2025).** Resultados de la evolución tectónica del Golfo de México, que se pueden observar en las **figuras 3,4,5,6,7,8** para el periodo triásico superior (201.3 a 210 m.a.)–Jurásico. 145 a 201.3 millones de años.

En la siguiente reconstrucción tectónica-paleogeográfica, Colombia se restaura la deformación terciaria (**Similar a Pindell 1985, V. Ramos 2021**). Y el estiramiento de la Cordillera Oriental, compagina con la ubicación de la margen occidental del Arco volcánico superpuesto. Se utilizó la configuración del Bloque Chibcha de **Restrepo, J.J. & Toussaint, J.F. 2020**. Se mantuvieron todos los demás parámetros de la reconstrucción paleogeográfica de **Pindell et al 2020-2021**. Se regeneró y/o configuró el periodo Triásico Superior Basado en **Pindell 1985-1992-1994-Pindell et al 2020-2021**.

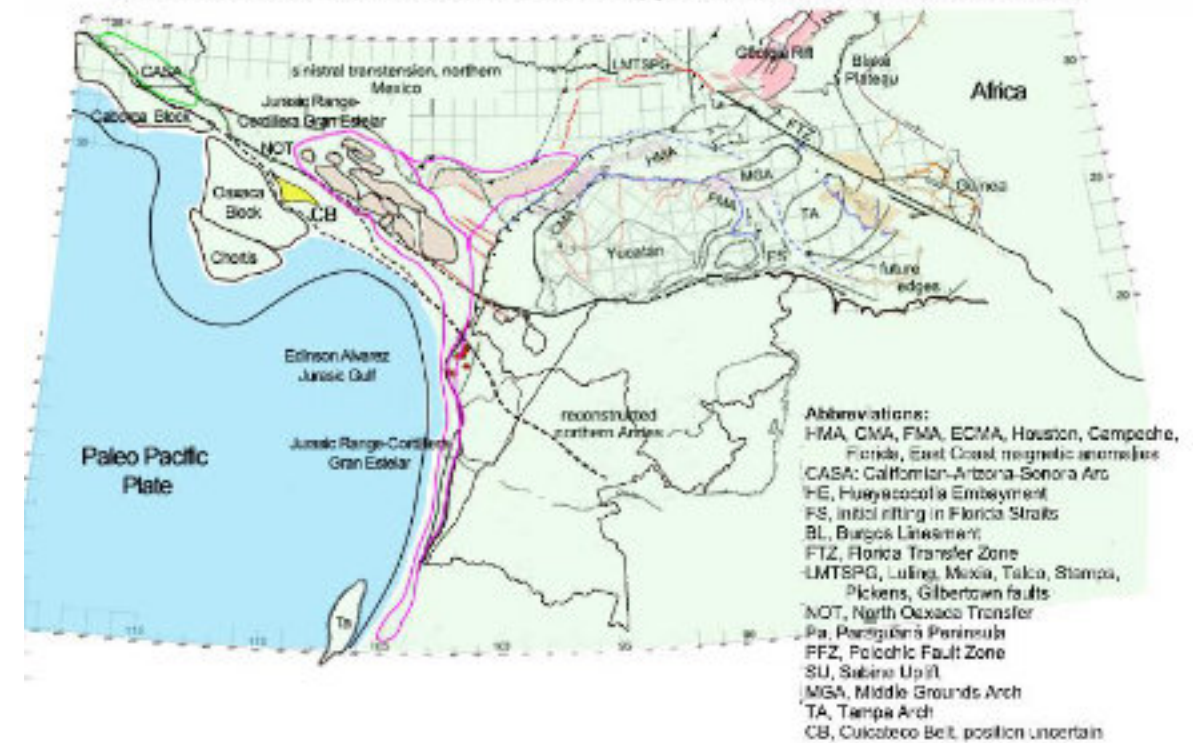
El Polígono de la Sal para Colombia se realizó con base en los trabajos de **Ingeominas 1970-1985 y el Dr. Oswaldo Ordoñez C. 2020**. Aplicándole un estiramiento equivalente hacia el Valle medio del Magdalena. No se grafican sedimentos presal en la presente reconstrucción, como tampoco se debate lo relacionado con el bloque Tahami (Ta)-Colombia (Parte de una próxima edición).

Con Base en el análisis de la Reconstrucción paleogeografica Evolución tectónica del Golfo de México, empezamos a dar respuesta a los diferentes interrogantes planteados en la sección siguiente de Gigantes a Derribar.

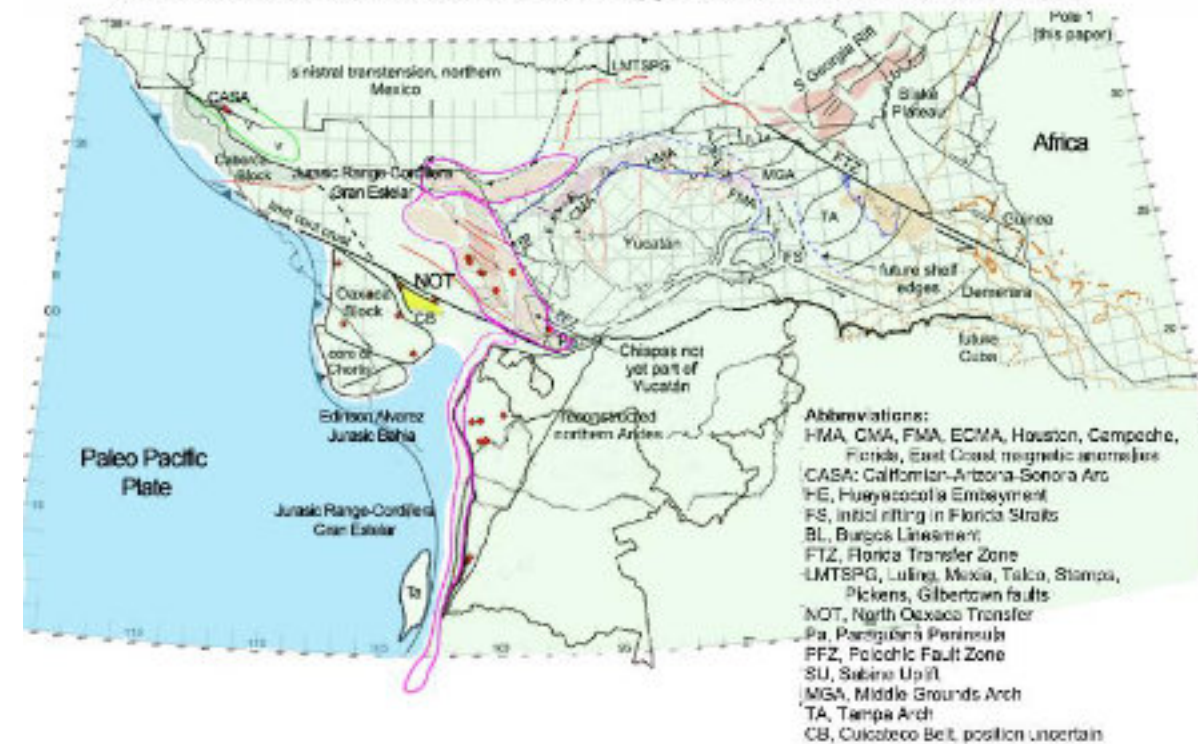
Adicionalmente, uno de los objetivos del presente trabajo es demostrar la relación espacio-temporal de los depósitos sedimentarios del Periodo Jurásico del Golfo de México, con los depósitos sedimentarios del mismo periodo Jurásico para las Cuencas Colombianas, especialmente la paleocuenca jurásica de la cordillera Oriental de Colombia.

**A Continuación figuras 3,4,5,6,7,8, evolución tectónica del Golfo de México para el periodo triásico superior (201.3 a 210 m.a.)–Jurásico. 145 a 201.3 millones de años.**

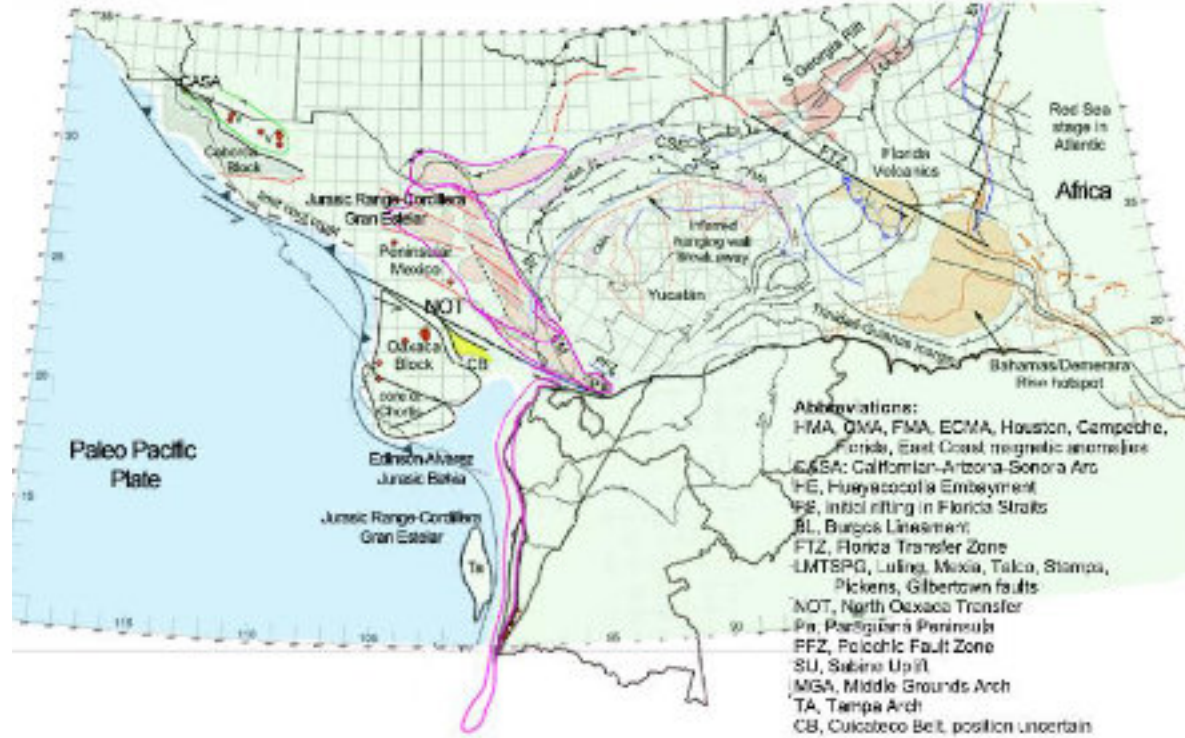
**Fig 3. Mexican Gulf Tectonic Evolution - 210-200 m.a. Late triassic-Early Jurassic**  
Edinson Alvarez -Geoscientist 2025, edinson.alvarez@gmail.com . Modified from Pindell et al 2021.



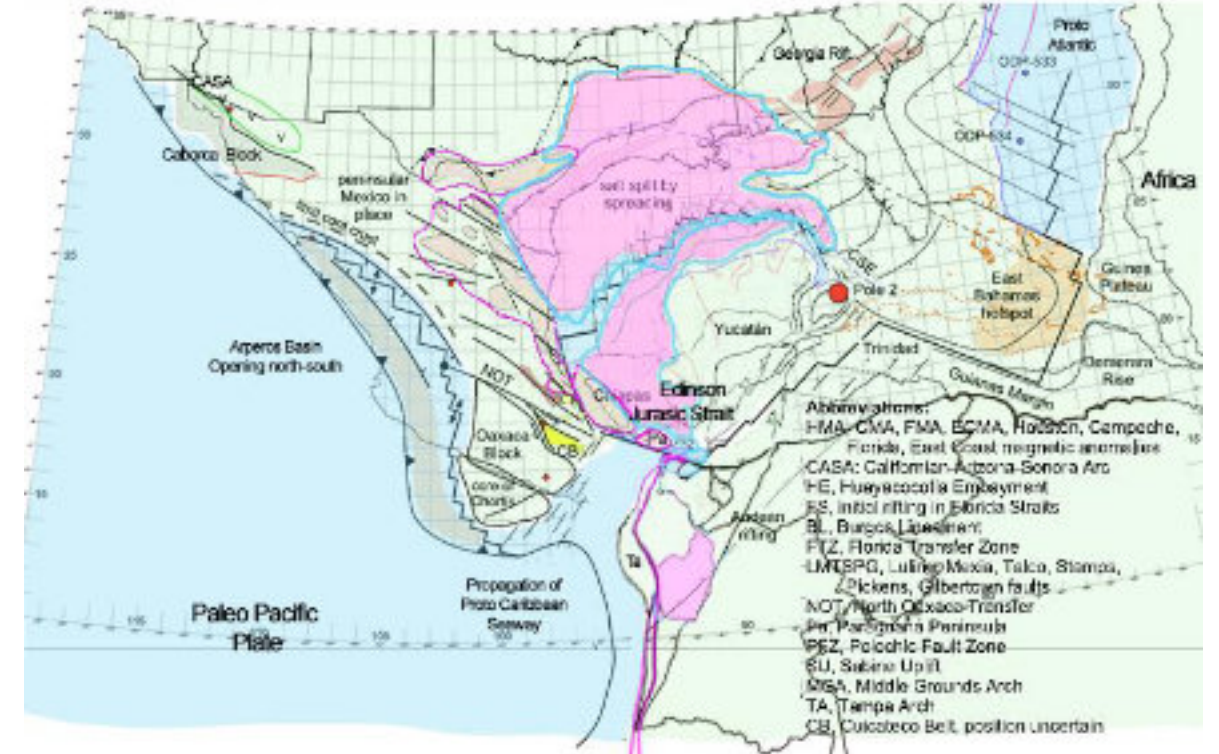
**Fig 4. Mexican Gulf Tectonic Evolution - 195 m.a. Early Jurassic**  
Edinson Alvarez -Geoscientist 2025, edinson.alvarez@gmail.com . Modified from Pindell et al 2021.



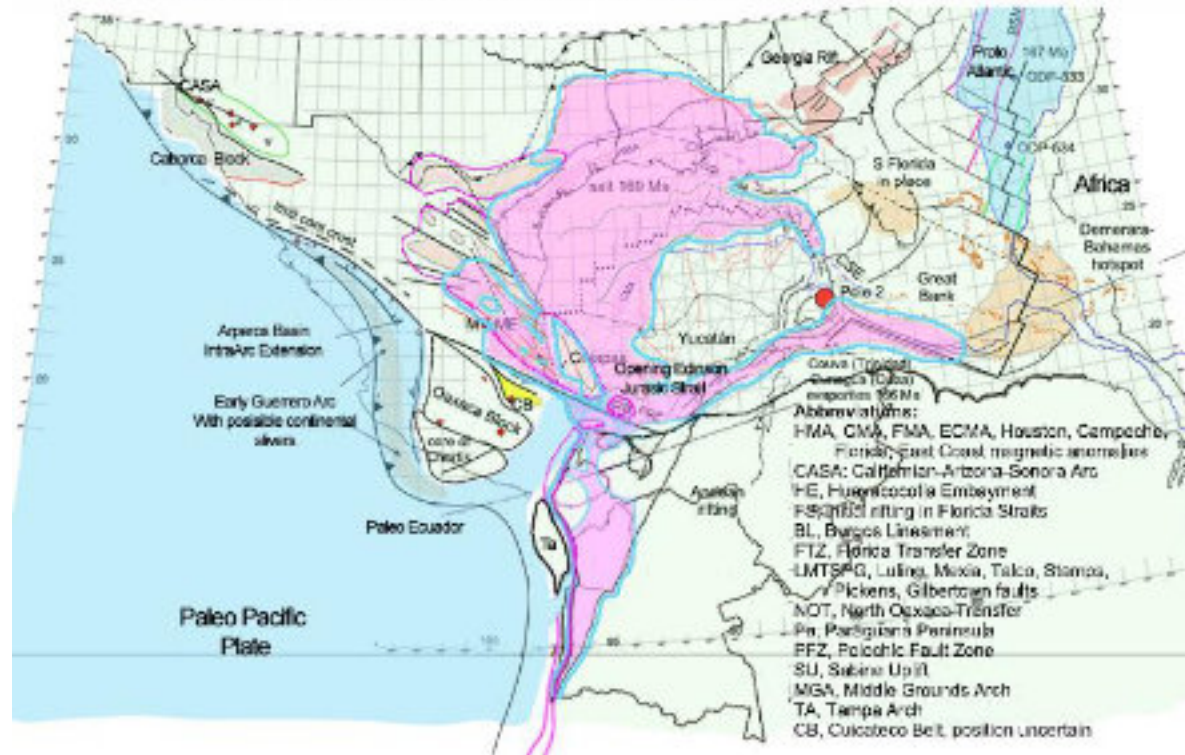
**Fig 5. Mexican Gulf Tectonic Evolution - 177 m.a. Early Jurassic**  
Edinson Alvarez - Geoscientist 2025, edinson.alvarez@gmail.com . Modified from Pindell et al 2021.



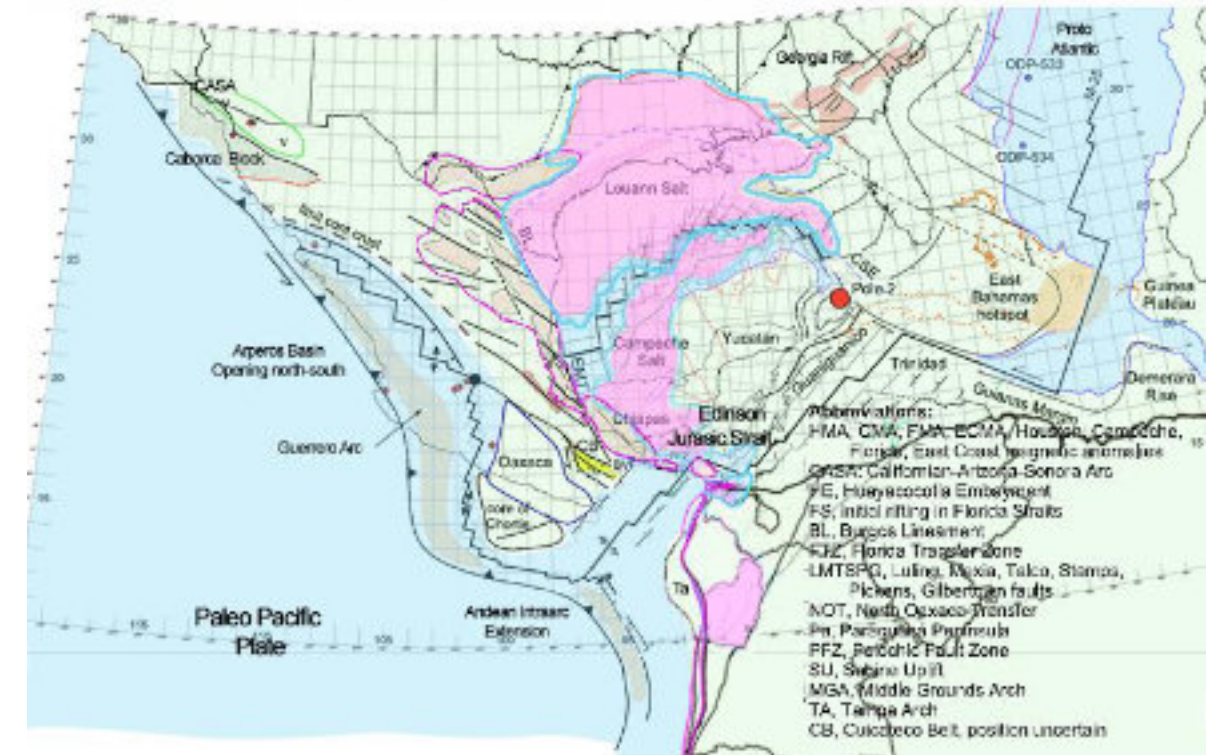
**Fig 7. Mexican Gulf Tectonic Evolution - 159 m.a. Late Jurassic**  
Edinson Alvarez - Geoscientist 2025, edinson.alvarez@gmail.com . Modified from Pindell et al 2021.



**Fig 6. Mexican Gulf Tectonic Evolution - 167 m.a. Middle Jurassic**  
Edinson Alvarez - Geoscientist 2025, edinson.alvarez@gmail.com . Modified from Pindell et al 2021.



**Fig 8. Mexican Gulf Tectonic Evolution - 154 m.a. Late Jurassic**  
Edinson Alvarez - Geoscientist 2025, edinson.alvarez@gmail.com . Modified from Pindell et al 2021.



### 3. Gigantes

A continuación se relacionan los Gigantes que vamos a derribar en el presente capítulo. **Llamaremos Gigantes a ( Conceptos, técnicas, tecnologías, metodologías, procedimientos, herramientas, incertidumbres, preguntas no resueltas, etc.).**

#### 3.1 Gigante No.1 de este capítulo ( Octavo (8) Gigante Derribado de esta serie ), con más de 500 años de historia, lo Resolveremos en las Conclusiones del presente trabajo.

Corresponde a la preguntas que hicieron los Españoles que arribaron a Colombia en 1525 con la Fundación de Santa Marta, y luego su ingreso al Interior del Territorio, fundando la Ciudad de Bogotá en el año 1538.

#### 3.2 Gigante No.2 ( Gigante No. 9 Derribado de esta Serie ) :

**Alarcón CM et al 2020.** (Alarcón CM, Clavijo-Torres J, Mantilla-Figueroa LC, Rodríguez JG. 2020).

de arcos magmáticos marginales (Rodríguez, et al., 2018). Uno de los retos actuales es la reconstrucción de la historia geológica del Jurásico en los Andes del norte, no solo desde el punto de vista geoquímico y geocronológico de las rocas plutónicas y volcánicas, sino porque deben entenderse de forma integral las relaciones del magmatismo con la formación de cuencas y la acumulación de sucesiones sedimentarias. Como lo sugieren Bayona,

#### 3.3 Gigante No.3 ( Gigante No. 10 Derribado de esta Serie ):

**Mildred Del Carmen Zepeda Martínez - Tesis Doctoral UNAM. 2021**

evolución tectónica de México durante el Jurásico siguen siendo ampliamente debatidos. La dificultad en reconstruir con detalle la evolución tectónica del rift en México se debe principalmente a que resulta muy complicado identificar las fallas maestras que acomodaron la extensión continental durante el Jurásico. En efecto, los eventos tectónicos que caracterizan la historia geológica Cretácica

propuesta. Por consiguiente, el problema de traslape cortical sigue sin tener aparentemente una solución satisfactoria y aceptada de manera conjunta por la comunidad científica. A continuación, se

#### 3.4 Gigante No.4 ( Gigante No. 11 Derribado de esta Serie ):

Conferencia de Youtube **Cátedra Selecta.- James Pindell-2021** (James Pindell, Diego Villagómez, Roberto Molina-Garza, Rod Graham and Bodo Weber 2020 ).

Also, how well does a regional extension model for "Peninsular Mexico" fit the basement geology? We mentioned anatexis, mid-crustal unroofing on moderately sinistral NW-SE faults/shear zones prior to deposition, and crustal thinning to about 25 km to provide long-term accommodation for the Mesozoic section. Do these things stand up to more critical examination? Or, do we need to return to the Mojave-Sonora Megashear?

#### 3.5 Gigante No.5 ( Gigante No. 12 Derribado de esta Serie ):

**Filina et al 2022.** (Irina Filina, James Austin, Tony Doré, Elizabeth Johnson, Daniel Minguez, Ian Norton, John Snedden, Robert J. Stern. 2022. )

1) The nature of the Triassic redbed basin preceding GoM opening - whether these units represent a successor basin to the Ouachita-Marathon orogeny or precursor rifting to GoM formation. The issue is tied to the challenge of identifying firm evidence of pre-breakup rifting, which is currently sparse compared to other rifted margins;

#### 3.6 Gigante No.6 ( Gigante No. 13 Derribado de esta Serie ):

**Filina et al 2022.**

2) The timing of salt deposition with respect to the Middle Jurassic seafloor spreading - specifically whether the salt predated, was synchronous with, or just postdated the initial spreading;

subdivision. Where salt exists (Fig. 2a), seismic imaging of underlying (i.e., syn-opening) sequences is difficult. Whether salt was deposited during the last stages of continental rifting, over oceanic crust, and/or concurrent with the first stages of seafloor spreading, remains unclear.

#### 3.7 Gigante No.7 ( Gigante No. 14 Derribado de esta Serie ):

**Filina et al 2022.**

3) Whether GoM opening was facilitated by magma-rich breakup associated with SDRs, or it was mantle poor and resulted in exhumed mantle close to the ocean-continent boundary;

#### 3.8 Gigante No.8 ( Gigante No. 15 Derribado de esta Serie ):

**Filina et al 2022.** (Irina Filina, James Austin, Tony Doré, Elizabeth Johnson, Daniel Minguez, Ian Norton, John Snedden, Robert J. Stern. 2022. )

4) The related issue of continental restoration of pre-GoM crustal blocks. The newly mapped geological structures within and adjacent to the OCT, such as interpreted SDR complexes with adjacent presalt sedimentary basins and outer troughs, in addition to magnetic anomalies may further constrain tectonic reconstruction of the basin.

**3.9 Gigante No.9** ( Gigante No. 16 Derribado de esta Serie ):

Pindell et al 2020.

Two unresolved issues stand out as most significant. One is the tectonic process by which the highs and lows in the top-rift unconformity were created along the west Florida margin, which records ther-

**3.10 Gigante No.10** ( Gigante No. 17 Derribado de esta Serie ):

Pindell et al 2020.(James Pindell, Diego Villagómez, Roberto Molina-Garza, Rod Graham and Bodo Weber 2020).

Florida Peninsular Arch and hence may terminate against a poorly understood 'Florida Transfer Zone' (Erlich and Pindell 2020). The second issue

**3.11 Gigante No.11** ( Gigante No. 18 Derribado de esta Serie ):

En Colombia tradicionalmente el Sector Petrolero y el mundo Geocientífico, ha asumido que la sal corresponde a depositación cretácica inferior.

Juan Camilo Ruiz Amaya. 2021

Se propone un desacople entre la secuencia basal interpretada como Paleozoica y los pliegues observados en superficie, debido a la formación salina del Cretácico Inferior.

**3.12 Gigante No.12** ( Gigante No. 19 Derribado de esta Serie ):

Juan Camilo Ruiz Amaya. 2021

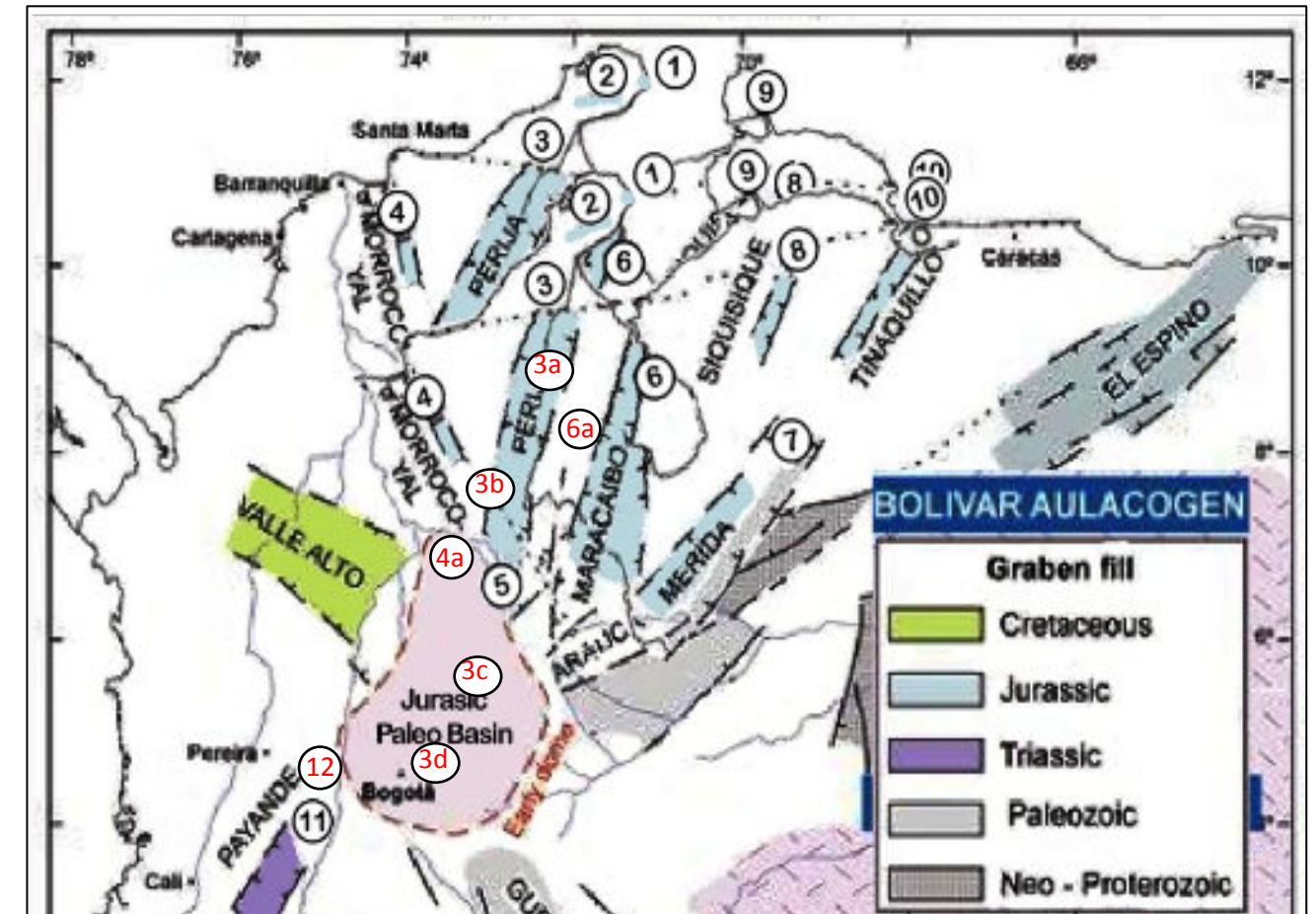
Un problema por resolver...

Hasta la fecha, entre la Sabana de Bogotá y el Páramo de Sumapaz no hay un modelo tectónico actualizado que tenga en cuenta las principales características del estilo estructural y proporcione argumentos para definir el rol de la sal y la cronología del plegamiento.

Respuestas se podrán observar en las Conclusiones Finales del presente estudio.

**4. Relación Espacio Temporal de los Depósitos Sedimentarios Durante el Periodo Jurásico del Golfo de México Respecto de los Depósitos Sedimentarios Jurásicos de las Cuenas Colombianas.**

**4.1 Correlación paleogeográfica**



**Figura 9.** Mapa paleogeográfico Aproximado de Colombia señalando las principales estructuras por edad geológica. Los Números 1 a 4 corresponden a sedimentación marina jurásica, La estación 4 y 5 erosión en la columna estratigráfica en el periodo jurásico inferior y medio. Ver figuras 10, 11,12,13,14,15,16 complementarias.

**Figura 9 y 11.** Modificado de Fabio Cediél, Robert Peter Shaw 2019. (Compiled after Bartok et al. (1985), Sung Hi Choi et al. (2017), Geyer (1973), Cediél (1969), Maze (1984), Mendi et al. (2013), Schubert (1986), Leal-Mejía et al. (2018))

4.2 Correlación Crono Estratigráfica-Sedimentológica

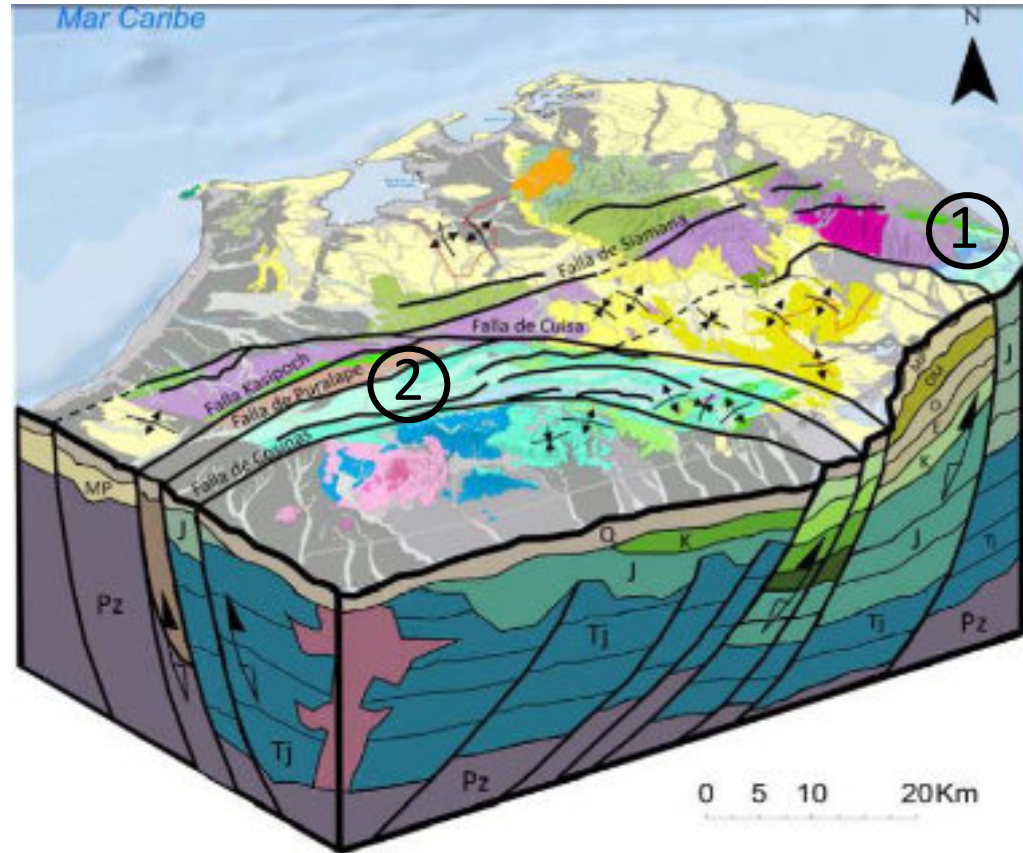


Figura 10. Mapa geológico 3D península de la Guajira Colombia, Mostrando sedimentación marina Jurásica. ANH-UPTC 2024. Y sentido de la deformación-erosión de los depósitos jurásicos.

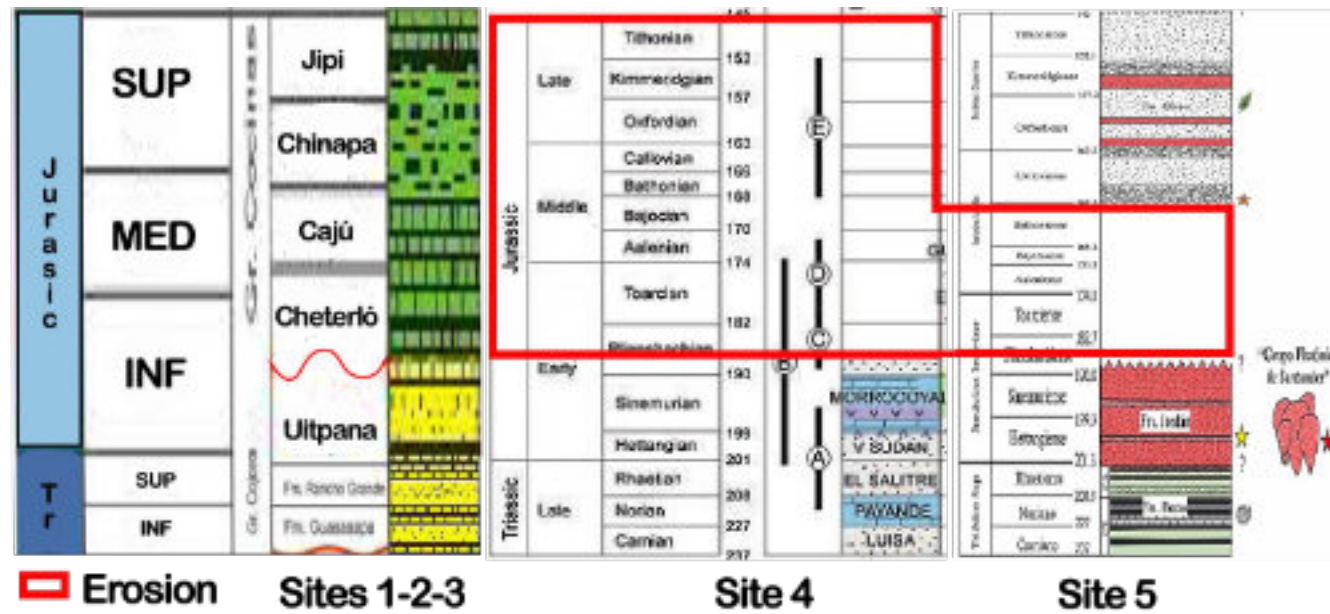


Figura 11. Columnas Estratigráficas del Triásico-Jurásico, estaciones 1-2-3-4-5 Sector Macizo de Santander, Sierra Nevada de Santa Marta-Guajira y Perijá, Colombia. Modificado de AnH-UIS-2008, Fabio Cediél, Robert Peter Shaw 2019, Alarcón CM et al 2020.

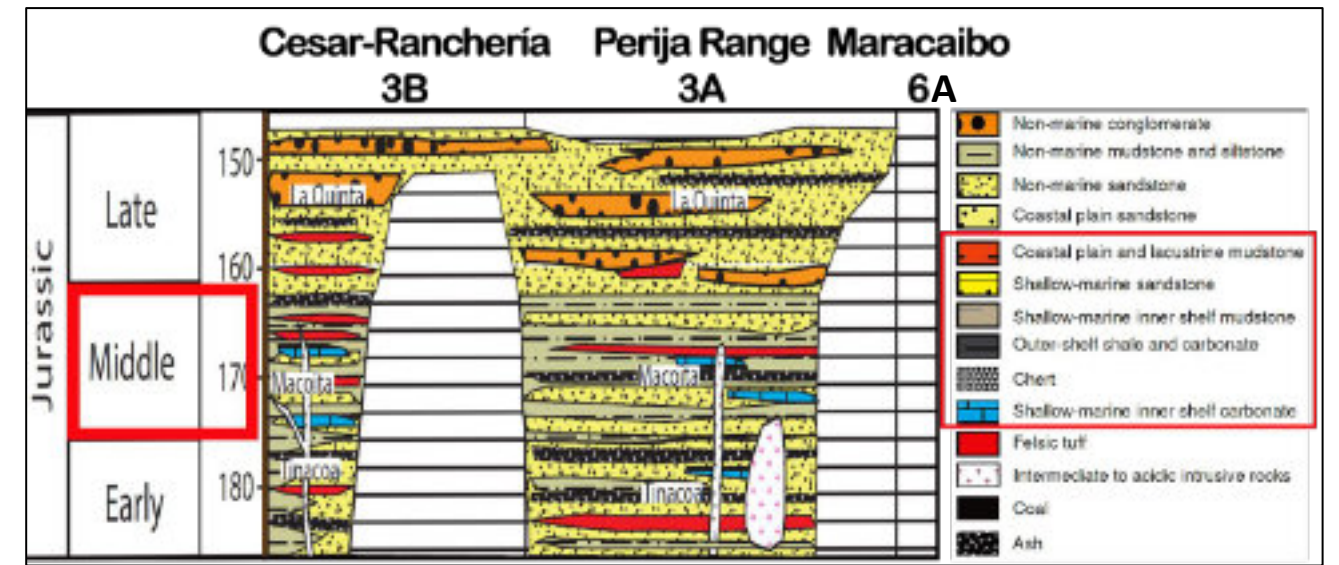


Figura 12. Columnas Estratigráficas del Jurásico, Depositación Marina exclusiva en el Jurásico Medio, tiempo de depositación de la Sal. Estaciones 3A-3B-6A, Localización Figura 9. Sector Serranía de Perijá, Cesar Ranchería y Cuenca de Maracaibo. modificada de Sanchez, Javier and Paul Mann, 2015. Stratigraphic data were compiled from Miller (1962), Forero (1970), Caceres et al. (1980), Kellogg (1984), Maze (1984), Parnaud et al. (1995), Mann et al. (2006), Vence (2008), and Ayala (2009).

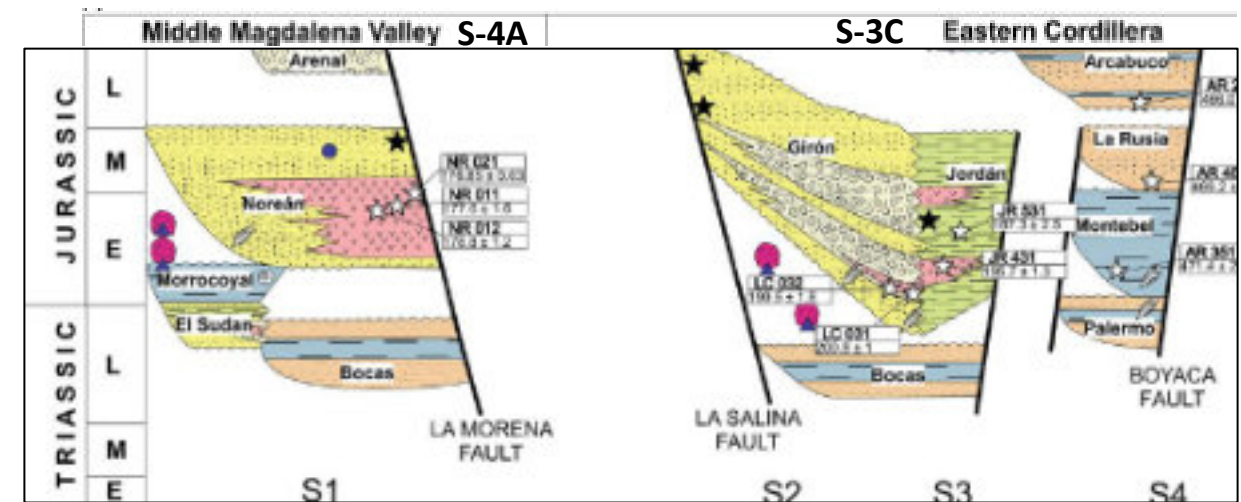
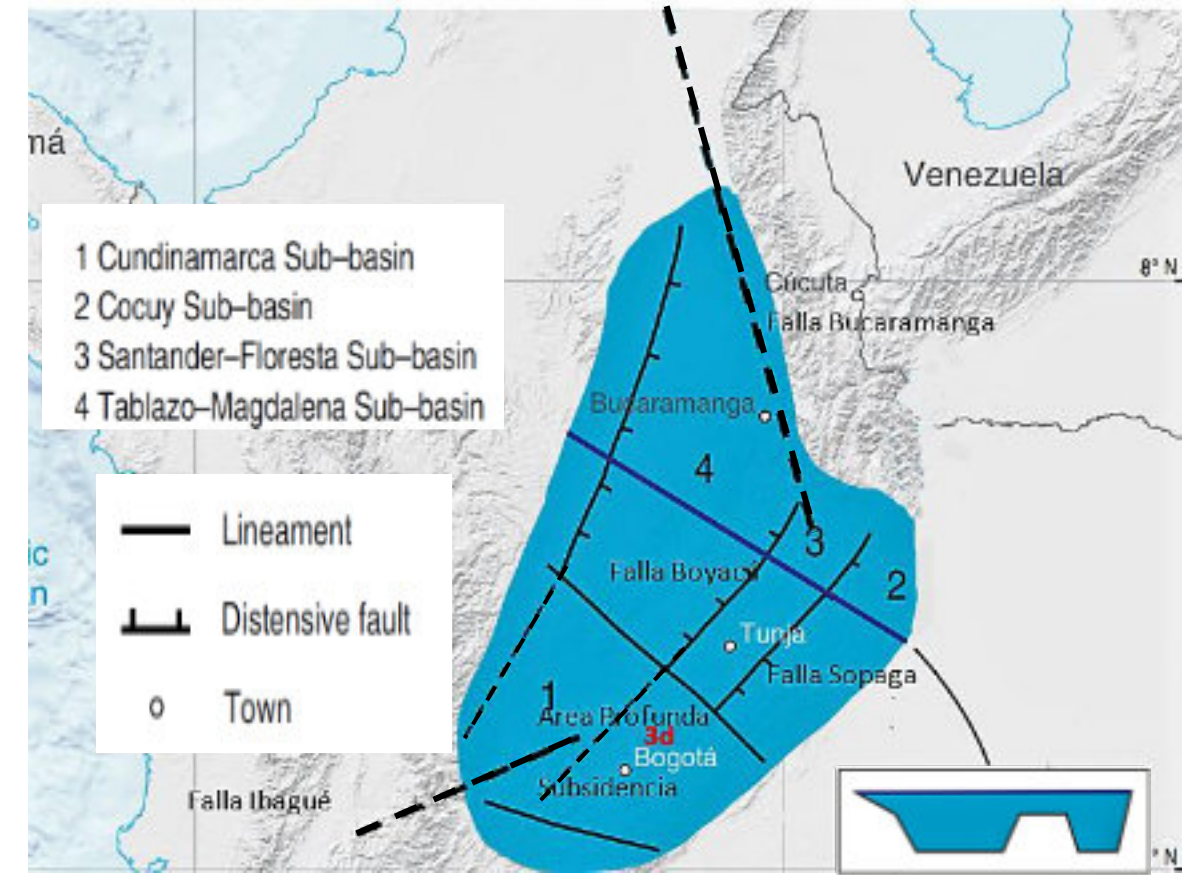


Figura 13. Columnas Estratigráficas del Triásico-Jurásico, estaciones 4A y 3C figura 9. Modificado de Martin Reyes et al 2024 (Data compiled from Renzoni (1962), (1967), Cediél (1968), Cooper et al. (1995), Clavijo (1996), Mojica et al. (1996), Sarmiento (2001), Sarmiento-Rojas et al. (2006), Kammer and Sanchez (2006), Mora et al. (2006, 2009, 2013), Clavijo et al. (2008), Caballero et al. (2013), Horton et al. (2010, 2015), Moreno et al. (2013), Bayona et al. (2020), Rodriguez-Garcia et al. (2020). Zona Axial central paleocuenca Cordillera Oriental de Colombia (Falla de Boyacá-Falla de Soapaga).

Al realizar la restauración tectónica de Colombia para el periodo Jurásico, las estaciones 1,2,3,4,5(Figura 9), Sierra Nevada de Santa Marta, Baja-Alta Guajira y Serranía de Perijá, descienden a la altura del Golfo de Maracaibo, poniendo en contacto directo todas estas estructuras ( Graben de Perijá, Falla de Bucaramanga, mas cerca de la paleocuenca Cordillera Oriental de Colombia ), las cuales son propuestas como corredores por donde entró el mar jurásico del oceano Pacífico a llenar la Paleocuenca de la cordillera Oriental (Figura 9).

Del Análisis de las columnas estratigráficas anteriores (Figuras 9,10,11,12,13). se concluye lo siguiente: Existieron Dos corredores jurásicos de influjo de aguas del Océano Pacífico que desembocaron respectivamente hacia la paleocuenca de la cordillera Oriental en territorio Colombiano:

1. **Corredor Jurásico Inferior:** Correspondientes a los depósitos marinos de las ubicaciones contiguos al occidente de la Sierra Nevada de Santa Marta, Valle Medio del Magdalena (Formación Morrocoyal) y la parte axial de la paleocuenca Cordillera Oriental (Formación Montebel), ubicaciones 4-4a-3c, ( Figura 9,11,13 ). Rematados por una discordancia de finales del Jurásico medio que borró o erosionó la columna estratigráfica correspondiente al jurásico medio. Relacionados estos eventos a levantamiento de bloques asociados a la Falla de Bucaramanga, Falla de Boyacá y Falla de Soapaga, factores que controlaron la depositación jurásica en su área de influencia.
2. **Corredor Jurásico Medio:** Corresponde a los depósitos marinos de la Formación Macoita, Cheterló-Cajú-Chinapa, del jurásico medio ubicados en el corredor Alta Guajira, Baja Guajira, Serranía de Perijá, Cesar Ranchería, extendidos hasta la falla de Bucaramanga y periferia de la paleocuenca de la Cordillera Oriental de Colombia. Ubicaciones 1,2,3,3a,3b Figuras 9,10,11,12.
3. **Las Figuras 9,10,11,12,13.** Muestran claramente un control estructural en la depositación jurásica mediante la disposición de sedimentos sobre horst y graben, contiguos en sentido aproximado noreste-suroeste, donde los altos estructurales se observa no depositación y/o erosión, mientras que en los grabens adyacentes aparece la secuencia de depositación faltante (Figura 12). Observar igualmente que en la Figura 13, un amplio rango de sector aparece como levantado y/o erosionado. Dejando en incertidumbre la existencia o no de depositación del jurásico inferior y medio.
4. La Anterior incertidumbre se resuelve con la depositación de la secuencia en la ubicación 3d Figuras 9, 14 y 16. La existencia de la secuencia estratigráfica (Figura 16C), indica que los corredores jurásicos 1 y 2, estuvieron activos durante el periodo jurásico, alimentando la paleocuenca de la Cordillera Oriental de Colombia, concordante con el sentido estructural del rift (Horst y graben sentido noreste-suroeste, sentido positivo de la pendiente (Mayor Profundidad y subsidencia hacia el área de Bogotá –Cuenca de Cundinamarca). Figuras 9 y 14.
5. Existe la posibilidad de un tercer corredor llamado Estrecho Jurásico Independiente Milenar: Rotura o Estrecho Creado al suroccidente de la Cuenca de Cundinamarca (Parte Sur occidental de la paleocuenca de la Cordillera Oriental) controlado por la Falla de Ibagué. (Figura 14). Que alimentó la paleocuenca jurásica, de la Cordillera Oriental a través del corredor de la Falla de Ibagué, ubicación Figuras 9 y 14. El cual muy probablemente atravesó el arco volcánico, generando el canal para el ingreso de las aguas a la Cuenca. Sin embargo no hay registro sedimentario como tal, en el sector muy probablemente por levantamiento de la Cordillera Central y posterior erosión de la secuencia. (Discusión Complejo Cajamarca próxima edición)



**Figura 14.** Aproximación de Elementos Estructurales de la paleocuenca de la Cordillera Oriental de Colombia. Modificado de Patarroyo, P. 2020, (Sin reconstrucción). Área Azul representa para este caso un esbozo muy general de la paleocuenca. 3d ubicación aproximada que intersecta la línea sísmica de la Figura 2 y 16c.

#### 4.3 Correlación Paleontológica

Los depósitos sedimentarios del periodo jurásico en Colombia conocidos son básicamente continentales – fluvio volcánicos, pobremente datados de la Formación Girón. Sin embargo el estudio presentado por Alarcón Gómez, C. M, et al. Estratos-UIS- 2019. Encuentran un nuevo horizonte fosilífero con la especie de Helechos Phleboteris polypodioides, identificado por Pons (1982) y permitió asumir para la sección encontrada en el Rio Lebrija una edad de Jurásico Tardío. Indicando además una alta distribución geográfica de esta especie sobre la línea ecuatorial. Encontrándose además en países como México, Cuba, Honduras y Egipto para este mismo periodo. Figura 15.

Aunque el análisis paleontológico anterior corresponde al Jurásico Superior, claramente indica o señala la cercanía y similitud de condiciones paleoclimáticas entre el sector Noroccidental de Suramérica con el sector sur de Norteamérica, México-Honduras. Aportando evidencia de cercanía dentro de todo el trabajo de reconstrucción y evolución tectónica del Golfo de México, parte central del presente artículo.

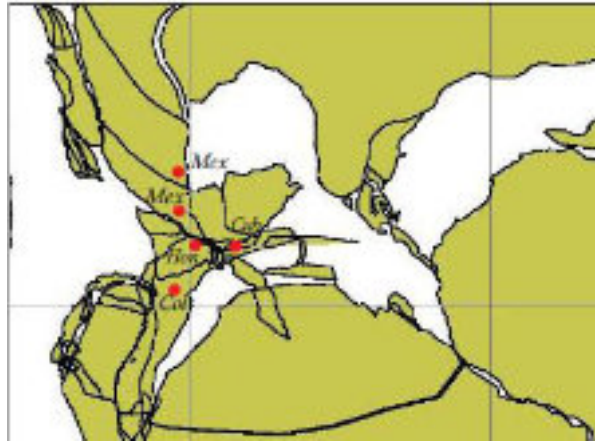


Figura 15. Distribución geográfica del de Helechos Phleboteris polydoides. Modificado de Alarcón Gómez, C. M, et al. Estratos-UIS- 2019.

#### 4.3 Correlación Morfológica, sedimentaria, cronológica y Estructural

Para completar nuestro espectacular, maravilloso y cinematográfico recorrido por el periodo jurásico colombiano, llegamos a la estación 3d figuras 2, 9 y 16.

Aquí se unen todas las piezas, pruebas y evidencias que confirman nuestro maravilloso viaje, desde la reconstrucción y evolución tectónica del Golfo de México desarrollada en las figuras 3 a 8, con la apertura del Estrecho de Edinson y depositación de la Sal en el jurásico medio (Figura 6) tanto en el Golfo de México, como en Colombia; la reconstrucción y evolución paleogeográfica de Colombia para el periodo Jurásico Figura 9, que demuestran la cercanía de las estructuras principales Rift de Perijá y Falla de Bucaramanga a la paleocuenca de la Cordillera Oriental de Colombia. La evidencia de la existencia de depositación marina del jurásico inferior y medio (Tiempo previo y durante la depositación de la Sal) por dichos canales Serranía de Cosinas-Macuire (Alta y baja Guajira), Rift de Perijá, Fallas de Bucaramanga, Boyacá, y Soapaga, ( Figuras 9,10,11,12,13,14 ); Prueba paleontológica adicional de cercanía de los territorios (Figura 15), culminando con el gran evento de depositación de la sal en la cuenca de Cundinamarca (Sur de la paleocuenca jurásica de la cordillera Oriental) Figuras 2, 6, 9, y 16.

Según estudios y modelaciones numéricas, la sal fue depositada rápidamente pudiendo alcanzar 3 km de espesor en un millón de años según Filina et al 2022.

It is believed that the salt was deposited very rapidly, in less than a million years (e.g., Warren, 2006). This estimate is consistent with numerical modeling of salt deposition in the South Atlantic (Montaron and Tapponnier, 2010), and also with estimates from stratigraphy of the Santos Basin, Brazil (Dias, 2005). The hypothesis of rapid deposition also matches modern rates from the few regions of current salt deposition (see Davison et al., 2012) and with the known ~640,000-year duration of up to 3 km thick Messinian salt deposition in the Mediterranean (e.g., Krijgsman et al., 1999). If GoM salt deposition was

Del Análisis correspondiente de los items de la sección 4.0 anterior, podemos concluir, que nos encontramos ante dos nuevos play y/o Sistemas petroleros no explorado en la Cuenca De Cundinamarca, perteneciente a la paleocuenca jurásica de la paleocordillera Oriental de Colombia.

1. **Play Jurásico:** Conformado por la depositación de shales orgánicos del jurásico inferior-Hipotética Formación Zipa de Edinson Alvarez 2025 (Roca Fuente, Correlacionable con la Formación Morrocoyal y la Formación Montebel), interdigitado hacia los bordes de la Cuenca con depósitos vulcanosedimentarios detríticos de ladera, flujos de escombros, turbiditas (Roca Reservorio) y sello de 3 a 4 km de sal depositada durante el jurásico Medio.
2. **Play Cretácico asociado a sello de sal:** Roca Fuente Formación Fómeque, Roca Reservorio Formación Une, Roca Sello Sal alóctona. Igual para las secuencias superiores.

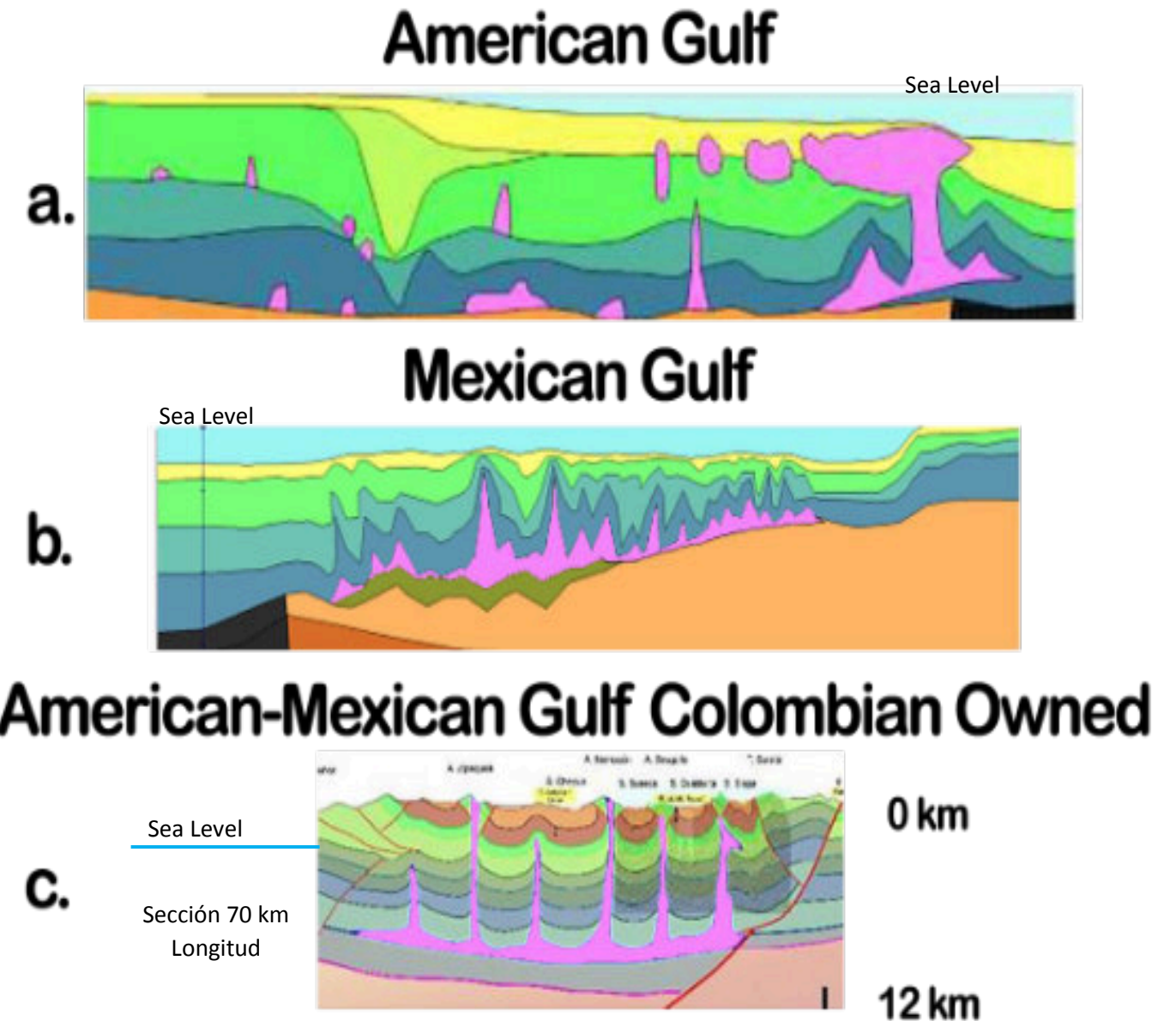


Fig. 16. Comparative Salt Structures, Depth Sediments, and Basins, American Gulf-Mexican Gulf-Cundinamarca Basin (Colombia)

Modificado de Irina Filina and Erin Beutel. 2022. Y ANH-UPTC 2020. Localización Figura 2,14.

La **Figura 16**, es la prueba maestra de las interpretaciones previas realizadas. El Gran Terreno **Chibcha de Restrepo y Toussaint 2020**, constituyen según el presente estudio, el extremo occidental de la gran escarpe estructural de Laurentia (**Figura 1 y 3**). Con cierre al sur por el Gan **Sistema de Fallas–Rift-Lineamiento Rudabet (Honor Ruben Dario Alvarez Betancourt-Padre, Figura1)**. Ocupando cerca de la tercera parte del tamaño de Cuenca, que dio Origen al Golfo de México-Golfo de América (Incluida la Paleocuenca de la Cordillera Oriental de Colombia). para el periodo Jurásico. En el periodo **Bajociano-Bathoniano 170-166 ma, (Jurásico Medio) Figura 6**, se abrió el estrecho de Edinson, comprendido por tres aperturas, **Edinson norte, JhonEdi centro, Floris sur**, por donde fluyó y entro el oceano pacifico a llenar las palocuecas del Golfo de México (Golfo de México-Golfo de América) y paleocuenca de la cordillera oriental de Colombia, depositando la sal existente en la cuenca, clave para el desarrollo y origen de los sistemas petroleros de Clase Mundial del Golfo de México-Golfo de América.

La separacion del continente Suramericano (Colombia-Venezuela, otros) de Laurentia, continuó luego de los anteriores eventos, tomando las cuencas del Golfo de México y de la paleocuenca de la Cordillera Oriental diferentes rumbos, alejandose mutuamente el uno del otro. Seguidamente con la incursión del mar cretácico y la generación de diferentes eventos para cada una de las cuencas. Mientras las cuencas sedimentarias del jurásico al reciente continuan sumergidas bajo el mar en el Golfo de México, la Paleocuenca de la Cordillera Oriental se desarrolló y sufrió eventos de levantameinto eoceno-miocenicos y posteriores, elevando la secuencia sedimentaria 2500 metros sobre el nivel del Mar, como punto de referencia Principal la Ubicación de la Ciudad de Santa Fede Bogotá. **Figura 9, 14 y 16.**

Para continuar realizando la correlación de las cuencas del Golfo de América-Golfo de México y la Paleocuenca de la Cordillera Oriental de Colombia, revisaremos las semejanza de la interpretación de las Secciones Sismicas hechas en los trabajos de **Irina Filina and Erin Beutel. 2022. Y ANH-UPTC 2020. Podemos observar las siguientes aspectos que tienen en comun:**

- 1- Espesor de la Secuencia Sedimentaria 8 a 14 km ( General 10 km ) **Figura 16.**
- 2- Espesor de la secuencia de Sal 3-4 km. (**Figura 6-16**)
- 3- Deformación tectónica de la secuencia de sal (Atravesando casi y en algunos casos toda la secuencia sedimentaria. Para que eso pueda ocurrir no solo se necesita deformación tectónica activa, sino un potente depósito de sal, para este caso cercano 3-4 km ) **Figura 16.**
- 4- Punto paleogeográfico de Origen común. (**Figura 1 y 3**)

**En Colombia tradicionalmente el Sector Petrolero y el mundo Geocientífico, ha asumido que la sal corresponde a depositación cretácica, así aparece en todas las cartas cornoestratigraficas del país a la fecha 2025.** Sin embargo hay varios puntos que no soportan esa tesis y por el contrario contradicen esa teoría, entre ellos estan:

- 1- Siendo el play Cretacico uno de los mas estudiados y perforados en el pais por el interés de sus sistemas petroleros, no hay reporte importante de sal, ni deformación salina de la cuenca de los llanos orientales, catatumbo, valle superior-medio del Magdalena, Cuenca de Maracaibo, donde igualmente se registró la depositación cretácica.
- 2- La paleocuenca jurásica de la Cordillera oriental de Colombia ha sido poco estudiada y casi inexplorada segun reporta **ANH-UPTC 2020.**

**La cuenca Cordillera Oriental es una de las cuencas frontera colombianas que mayor interés exploratorio a generado a lo largo de los últimos 25 años. Este interés condujo al descubrimiento de hidrocarburos en los campos Gibraltar, Bolívar, Corrales y Guando. Sin embargo a pesar de estos campos con producción comercial teniendo en cuenta el tamaño de la cuenca, la cantidad de sísmica disponible y el número de pozos exploratorios se trata de una provincia geológica inexplorada.**

- 3- Los escasos pozos perforados en la cuenca de la Cordillera oriental de Colombia profundizan solo hasta la secuencia cretácica en su gran mayoría, desconociendose el registro jurásico. Principalmente en la cuenca de Cundinamarca.

La existencia del anterior fenómeno sobre la sal Jurásica en Colombia, no solo es anecdótico, sino que tiene un impacto que no ha sido ampliamente relacionado y estudiado sobre **los Sistemas Petroleros, Mineros, y Sociales del área.**

#### **Implicaciones en los Sistemas Petroleros, Mineros, Sociales y Ambientales de la Sal Jurásica en Colombia.**

##### **Implicaciones en los Sistemas Petroleros**

Demostrado en el presente Artículo el Origen de la Sal existente en la Secuencia estratigráfica de la cordillera Oriental de Colombia, se generan los siguientes impactos.

Del Análisis correspondiente de los items de la sección 4.0 anterior, podemos concluir, que nos encontramos ante dos nuevos play y/o Sistema petroleros hipotéticos no explorados en la Cuenca De Cundinamarca, perteneciente a la paleocuenca jurásica de la paleocordillera Oriental de Colombia.

1. **Play Jurásico:** Conformado por la depositación de shales orgánicos del jurásico inferior-**Hipotética Formación Zipa** de Edinson Alvarez 2025 (Roca Fuente, Correlacionable con la Formación Morrocoyal y la Formación Montebel), interdigitado hacia los bordes de la Cuenca con depósitos vulcanosedimentarios detríticos de ladera, flujos de escombros, turbiditas (Roca Reservorio) y sello de 3 a 4 km de sal depositada durante el jurásico Medio.
2. **Play Cretácico asociado a sello de sal:** Roca Fuente Formación Fómeque, Roca Reservorio Formación Une, Roca Sello Sal alóctona. Igual para las secuencias superiores.

##### **Implicaciones en los Sistemas Mineros**

La sal ha sido importante desde la época prehispanica para el desarrollo de las culturas aborígenes y luego la colonia, después de la conquista española. Son pocas las minas de sal que funcionan, la mayoría no son tecnificadas. Abundan los manantiales o manaderos salinos en la cuenca de la cordillera oriental.

Pero el hecho más notorio y de resaltar en el presente artículo lo constituye el Rol de la Sal y su participación en la mezcla de los fluidos hidrotermales que dieron origen a los cinturones esmeraldíferos oriental (edad cretácica) y occidental (edad Oligoceno) de la cordillera oriental de Colombia (Debate edad) (**Andrés M. Ravelo 2020**). Según **Andrés M. Ravelo 2020** (Algunos elementos traza como la relación V/Cr, y elementos como el Fe, Na, Mg, ayudan a diferenciar la belleza, color y brillo de las esmeraldas colombianas. ( El Sodio probablemente aportado por la Sal, entre otros minerales), Diferenciándose las esmeraldas Colombianas de las otras del Mundo. ( **Figura 17.** Fura, Una de las Esmeraldas en bruto más grandes del Mundo-Muzo-Boyacá Colombia. Subcuenca Tablazo **Figura 14** ).



**Figura 17.** Fura, Una de las Esmeraldas en bruto más grandes del Mundo-Muzo-Boyacá Colombia. Tomado de <https://www.las2orillas.co/el-dia-en-que-victor-carranza-encontro-a-fura-una-de-las-esmeraldas-mas-grandes-del-mundo/#>

### Implicaciones en los Sistemas Sociales

El Domo Salino más grande e importante de Colombia, en la ciudad de Zipaquirá Cundinamarca, posee la iglesia subterránea de sal, una de las más importantes del mundo. La cual recibió en el año 2024 más de Setecientos mil turistas. (Figura 18. Nota Periódico el Tiempo 2025, Figura 19, Instalaciones Iglesia de Sal de Zipaquirá). Dinamizando la economía de la Región y el País.



**Figura 18.** Record Turistas Visitan Iglesia de Sal de Zipaquirá.

Nota Periódico el Tiempo 2025. <https://www.eltiempo.com/bogota/mas-de-700-000-turistas-visitaron-la-catedral-de-sal-de-zipaquirá-en-el-2024-3415793>



**Figura 19.** Instalaciones Iglesia de Sal de Zipaquirá. Tomado de <https://www.catedraldesal.gov.co/>.

### DISCUSSION

El presente trabajo destraba varias limitantes existentes en el mundo geocientífico relacionados con la evolución tectónica de una de las principales fuentes petroleras del Mundo, el Golfo de México (Golfo de América-Golfo de México) y paralelamente del sistema petrolero jurásico de las cuencas Colombianas.

Uno de los principales rasgos geológicos lo constituye el descubrimiento del el Gran Sistema de Fallas Rudabet (Honor Ruben Dario Alvarez Betancourt-Padre, Figura1 y 3). El cual controla en su base el gran escarpe estructural continental de Laurentia (Figura 3). Tema que yuda a resolver varias preguntas contemporaneas-actuales, relacionadas como gigantes en el presente estudio, incertidumbres esbozadas por importantes geocientificos de nivel mundial: James Pindell, Diego Villagómez, Roberto Molina-Garza, Rod Graham and Bodo Weber 2020-2021; Mildred Del Carmen Zepeda Martinez - Tesis Doctoral UNAM. 2021; Alarcón CM, Clavijo-Torres J, Mantilla-Figueroa LC, Rodríguez JG.2020; Irina Filina, James Austin, Tony Dor'e, Elizabeth Johnson, Daniel Minguez, Ian Norton, John Snedden, Robert J. Stern. 2022. Rasgo que demuestra que El Gran Terreno Chibcha de Restrepo y Toussaint 2020, constituyen según el presente estudio, el extremo occidental de la gran escarpe estructural de Laurentia (Figura 3). Ocupando cerca de la tercera parte del tamaño de Cuenca, que dio Origen al Golfo de Mexico-Golfo de América (Incluida la Paleocuenca de la Cordillera Oriental de Colombia). para el periodo Jurásico.

Aunque se pueden hacer mejoras, retoques, modificaciones a la propuesta presentada en el presente estudio, lo cierto es que el amarre perfecto obtenido a través del Sistema de Fallas Rudabet (Honor Ruben Dario Alvarez Betancourt-Padre, Figura1 y 3). Es y será el punto de partida o inicio de futuras reconstrucciones de evolución tectónica para adelante o para atrás de este punto de amarre o constrain en el tiempo geológico. El tema que aun merece revisión es determinar si ese punto de amarre corresponde a la edad 200 ma. Del modelo del Dr. Pindell et al 2020-2021, o un poco mas alejado entre 200 y 210 ma. Para ello tener en cuenta las velocidades de viaje de los bloques Chortis-Oaxaca y sus implicaciones en las reconstrucciones hacia el pasado, tema que no alcanza ser objeto de análisis del presente trabajo.

En Colombia tradicionalmente el Sector Petrolero y el mundo Geocientífico, ha asumido que la sal corresponde a depositación cretácica inferior, así aparece en todas las cartas cornoestratigraficas del país a la fecha 2025. Sin embargo hay varios puntos que no soportan esa tesis y por el contrario contradicen esa teoría, entre ellos estan:

- 1- Siendo el play Cretacico uno de los mas estudiados y perforados en el pais por el interés de sus sistemas petroleros, no hay reporte abundante de sal, ni deformación salina de la cuenca de los llanos orientales, catatumbo, valle medio y superior del Magdalena, Cuenca de Maracaibo, donde igualmente se registró la depositación cretácica.
- 2- La paleocuenca jurásica de la Cordillera oriental de Colombia ha sido poco estudiada y casi inexplorada según ANH-UPTC 2020.

- 3- Los escasos pozos perforados en la cuenca de la Cordillera oriental de Colombia profundizan solo hasta la secuencia cretácica en su gran mayoría, desconociéndose el registro jurásico (Especialmente en la Subcuenca de Cundinamarca **(Figura 14)**).
- 4- El análisis de los hechos, indicios, pruebas, registros anteriores nos muestran claramente que Mientras la Transgresión cretácica al continente suramericana ha sido ampliamente estudiada y analizada, nos encontramos que el ingreso del mar o inundación al territorio fue amplia y masiva, es decir había comunicación directa con el mar abierto, por lo tanto se tenían condiciones normales de salinidad no aptas para la depositación de la sal. Mientras que el análisis de los hechos, indicios, pruebas, registros aportados en el presente trabajo, demuestran que durante el periodo Jurásico Medio (**Bajociano-Bathoniano. 166-170 ma**), El Arco Nazas de México estaba en colisión con la esquina Noroccidental de Suramérica (Gondwana), rompiendo la Cordillera Jurásica Gran Estelar, creando el estrecho de Edinson (Norte, centro y sur) ingresando el océano pacífico a inundar el Golfo de México (Golfo de América y Golfo de México), igualmente inundando la paleocuenca de la Cordillera Oriental de Colombia, Demostrado por los corredores marinos del jurásico inferior y medio, definidos a partir de las columnas estratigráficas **1,2,3,3a,3b y 3d; 4, 4a, 3c (posteriormente erosionadas), Figuras 6,9,10,11,12,13,14,15,16**. Generando un flujo de agua de mar restringida, ocasionando baja circulación, y por lo tanto hipersalinidad, que conjugado con la gran extensión de la Cuenca y las altas condiciones atmosféricas de altas temperaturas, favorecieron la rápida depositación de la sal (**Filina et al 2022**), que alcanza un espesor de 3 a 4 km. **Claramente podemos concluir que la sal de la cordillera Oriental de Colombia hace parte del mismo ambiente, tiempo y condiciones a las que se formaron en el Golfo de México, durante el jurásico Medio.**

La integración del conocimiento desarrollado a través de la Teoría de Fuente Compleja SCT, y sus diferentes herramientas avanzadas, nos permite dar luces y respuestas a todos los interrogantes que por más de quinientos años (época Conquista Española) y cien años (época contemporánea), han inquietado a los geocientíficos y exploradores petroleros, sobre la evolución tectónica-sedimentaria-estratigráfica y estructural del Golfo de México (Golfo de América-Golfo de México y la paleo Cordillera Oriental de Colombia). **Figuras 1 al 16. (Igual tratamiento ha sido aplicado para todas las otras cuencas petroleras y mineras de Colombia)**

Las respuestas se vuelven lógicas, sencillas, y toman valor a la luz de la Teoría de Fuente Compleja (SCT) y sus herramientas. Como lo verán en la parte concluyente del presente estudio.

**Si tienes un problema Geocientífico de alta complejidad en su compañía, con importantes implicaciones económicas, la Teoría de Fuente Compleja (SCT) y sus herramientas ha llegado para resolverlo.** Un análisis más detallado y solución de problemas de alta complejidad tectónica, estructural y estratigráfica puede consultarse con el autor de este artículo.

## CONCLUSION

La Teoría de Fuente Compleja SCT y sus herramientas avanzadas, demuestran su valor en el presente informe, contribuyendo al conocimiento y entendimiento de la evolución tectónica del Golfo de México (Golfo de América-Golfo de México y la Paleocuenca de la cordillera Oriental de Colombia), Durante el Periodo Jurásico. Aportando al conocimiento y desarrollo geocientífico, que servirá para garantizar la sostenibilidad energética, económica y social del País.

Hemos probado a través del presente análisis, como los postulados de la SCT, se han ido corroborando y probando con el paso del tiempo, develando el poder predictivo de la misma. Y en el presente artículo en Honor a Miguel de Cervantes Saavedra y su obra, **comprobamos el derribo de Doce (12) Gigantes para el área ( Llamaremos Gigantes a: Conceptos, técnicas, tecnologías, metodologías, procedimientos, herramientas, incertidumbres, preguntas sin respuesta, etc.)**.

**Gigante No.1 de este capítulo ( Octavo (8) Gigante Derribado de esta serie ):**

Corresponde a la pregunta que le hicieron los españoles a los Indígenas Colombianos del Interior (Sabana de Bogotá), sobre el origen de la sal que comercializaban en la región, sin la existencia de un mar cercano. **La Respuesta de los indígenas de la época fue:** ( Proviene De la Madre Tierra, Del Interior de La Tierra). **La Respuesta científica despues de 500 años de historia por parte del Geocientífico Edinson Alvarez, es:** Proviene de la depositación marina del Golfo de México (Incluido Golfo de América, Golfo de México y Paleocuenca de la Cordillera Oriental de Colombia), depositada en el periodo Jurásico Medio (Bajociano-Bathoniano. 166-170 ma).

**Gigante No.2 ( Gigante No. 9 Derribado de esta Serie ) :**

**Alarcón CM et al 2020.** (Alarcón CM, Clavijo-Torres J, Mantilla-Figueroa LC, Rodríguez JG. 2020).

de arcos magmáticos marginales (Rodríguez, et al., 2018). Uno de los retos actuales es la reconstrucción de la historia geológica del Jurásico en los Andes del norte, no solo desde el punto de vista geoquímico y geocronológico de las rocas plutónicas y volcánicas, sino porque deben entenderse de forma integral las relaciones del magmatismo con la formación de cuencas y la acumulación de sucesiones sedimentarias. Como lo sugieren Bayona,

**Respuesta:** Se aclara en Buena parte la relación espacio-temporal de los procesos de subducción, generación de arcos volcánicos-plutónicos, proceso de rift, llenado y depositación de cuencas, siendo el marco general para los demás procesos posteriores y anteriores de la formación y evolución tectono-estratigráfica de Cuencas tanto Mexicanas, Americanas, como Colombianas Durante el Periodo Jurásico y parte del Triásico Superior. ( Para ampliar detalles acerca de los sucesos, eventos e implicaciones en el ciclo exploratorio O&G&M consultar con el autor de este artículo ).

**Gigante No.3** ( Gigante No. 10 Derribado de esta Serie ):

**Mildred Del Carmen Zepeda Martínez - Tesis Doctoral UNAM. 2021**

evolución tectónica de México durante el Jurásico siguen siendo ampliamente debatidos. La dificultad en reconstruir con detalle la evolución tectónica del rift en México se debe principalmente a que resulta muy complicado identificar las fallas maestras que acomodaron la extensión continental durante el Jurásico. En efecto, los eventos tectónicos que caracterizan la historia geológica Cretácica propuesta. Por consiguiente, el problema de traslape cortical sigue sin tener aparentemente una solución satisfactoria y aceptada de manera conjunta por la comunidad científica. A continuación, se

**Respuesta:** Con esta nueva propuesta del **Dr. Edinson Alvarez 2025**, modificado de **. Pindell et al 2020-2021** No solo se soluciona el problema de traslape cortical entre México y Colombia ( Laurentia-Gondwana), **sino que se resuelven una gran cantidad de preguntas relacionadas con la evolución tectónica estructural y estratigráfica del Golfo de México durante el periodo Jurásico.** ( Para ampliar detalles acerca de los sucesos, eventos e implicaciones en el ciclo exploratorio O&G&M consultar con el autor de este artículo).

**Gigante No.4** ( Gigante No. 11 Derribado de esta Serie ):

Conferencia de Youtube **Cátedra Selecta.- James Pindell-2021** (James Pindell, Diego Villagómez, Roberto Molina-Garza, Rod Graham and Bodo Weber 2020 ).

Also, how well does a regional extension model for "Peninsular Mexico" fit the basement geology? We mentioned anatectesis, mid-crustal unroofing on moderately sinistral NW-SE faults/shear zones prior to deposition, and crustal thinning to about 25 km to provide long-term accommodation for the Mesozoic section. Do these things stand up to more critical examination? Or, do we need to return to the Mojave-Sonora Megashear?

**Respuesta:** Respecto a la pregunta del **Dr. Pindell et al 2020-2021.** La Respuesta es adoptar este nuevo modelo con los ajustes correspondientes, los cuales resuelven la mayor cantidad de preguntas que existen en la comunidad geocientífica, como ha quedado demostrando con los soportes del presente estudio de investigación. ( Para ampliar detalles acerca de los sucesos, eventos e implicaciones en el ciclo exploratorio O&G&M consultar con el autor de este artículo ).

**Gigante No.5** ( Gigante No. 12 Derribado de esta Serie ):

**Filina et al 2022.** (Irina Filina, James Austin, Tony Dor'e, Elizabeth Johnson, Daniel Minguez, Ian Norton, John Snedden , Robert J. Stern. 2022. )

1) The nature of the Triassic redbed basin preceding GoM opening - whether these units represent a successor basin to the Ouachita-Marathon orogeny or precursor rifting to GoM formation. The issue is tied to the challenge of identifying firm evidence of pre-breakup rifting, which is currently sparse compared to other rifted margins;

**Respuesta:** Los Depósitos Redbed triásicos están relacionados con los dos eventos citados, Etapas finales de la Orogenia Ouachita-Marathon y la apertura del Golfo de México. ( Para ampliar detalles acerca de los sucesos, eventos e implicaciones en el ciclo exploratorio O&G&M consultar con el autor de este artículo).

**Gigante No.6** ( Gigante No. 13 Derribado de esta Serie ):

**Filina et al 2022.**

2) The timing of salt deposition with respect to the Middle Jurassic seafloor spreading - specifically whether the salt predated, was synchronous with, or just postdated the initial spreading;

subdivision. Where salt exists (Fig. 2a), seismic imaging of underlying (i.e., syn-opening) sequences is difficult. Whether salt was deposited during the last stages of continental rifting, over oceanic crust, and/or concurrent with the first stages of seafloor spreading, remains unclear.

**Respuesta:** La solución a este problema se llama el **EAST-PMethod-Tool (Processing and Seismic Treatment Edinson Alvarez 2025)**, con el cual se han resuelto problemas de tectónica estructural compleja, donde la imagen sísmica es pobre, de regular a mala calidad. Ver Artículo No 2 y 3 de esta serie. ( Para ampliar detalles acerca de los sucesos, eventos e implicaciones en el ciclo exploratorio O&G&M consultar con el autor de este artículo).

**Gigante No.7** ( Gigante No. 14 Derribado de esta Serie ):

**Filina et al 2022.**

3) Whether GoM opening was facilitated by magma-rich breakup associated with SDRs, or it was mantle poor and resulted in exhumed mantle close to the ocean-continent boundary;

**Respuesta:** La fase inicial de apertura del Golfo de México fue tipo Magma-Poor; migrando a evento tipo Magma-Rich, con la generación continua de corteza oceánica, finalizando con la terminación del alimentador mantélico a finales del jurásico-cretácico inferior. (Para ampliar detalles acerca de los sucesos, eventos e implicaciones en el ciclo exploratorio O&G&M consultar con el autor de este artículo).

**Gigante No.8** ( Gigante No. 15 Derribado de esta Serie ):

**Filina et al 2022.**

4) The related issue of continental restoration of pre-GoM crustal blocks. The newly mapped geological structures within and adjacent to the OCT, such as interpreted SDR complexes with adjacent presalt sedimentary basins and outer troughs, in addition to magnetic anomalies may further constrain tectonic reconstruction of the basin.

**Respuesta:** Múltiples Autores y múltiples propuestas para la ubicación de bloques, base para la reconstrucción de la evolución tectónica del Golfo de México han sido publicadas, sin embargo ninguna es definitiva, puesto que no cuenta con los suficientes argumentos para imponerse sobre las demás. En el presente trabajo se ha dado solución al presente problema, que durante más de 100 años ha inquietado a los geocientíficos del mundo que han participado en tan importante desafío. ( Para ampliar detalles acerca de los sucesos, eventos e implicaciones en el ciclo exploratorio O&G&M consultar con el autor de este artículo ).

**Gigante No.9** ( Gigante No. 16 Derribado de esta Serie ):

**Pindell et al 2020.**

Two unresolved issues stand out as most significant. One is the tectonic process by which the highs and lows in the top-rift unconformity were created along the west Florida margin, which records ther-

**Respuesta:** En la reconstrucción tectónica de las Figuras 3,4,5, puede verse el mecanismo que activó el desarrollo de estas estructuras. ( Para ampliar detalles acerca de los sucesos, eventos e implicaciones en el ciclo exploratorio O&G&M consultar con el autor de este artículo ).

**Gigante No.10** ( Gigante No. 17 Derribado de esta Serie ):

**Pindell et al 2020.** (James Pindell, Diego Villagómez, Roberto Molina-Garza, Rod Graham and Bodo Weber 2020)

Florida Peninsular Arch and hence may terminate against a poorly understood 'Florida Transfer Zone' (Erlich and Pindell 2020). The second issue

**Respuesta:** En la reconstrucción tectónica de las Figuras 3,4,5, puede entenderse mejor como funciona Florida Transfer Zone (FTZ), ( Para ampliar detalles acerca de los sucesos, eventos e implicaciones en el ciclo exploratorio O&G&M consultar con el autor de este artículo ).

**Gigante No.11** ( Gigante No. 18 Derribado de esta Serie ):

**Juan Camilo Ruiz Amaya. 2021**

Se propone un desacople entre la secuencia basal interpretada como Paleozoica y los pliegues observados en superficie, debido a la formación salina del Cretácico Inferior.

En Colombia tradicionalmente el Sector Petrolero y el mundo Geocientífico, ha asumido que la sal corresponde a depositación cretácica inferior.

**Respuesta Maestra:** El análisis de los hechos, indicios, pruebas, registros anteriores nos muestran claramente que Mientras la Transgresión cretácica al continente suramericana ha sido ampliamente estudiada y analizada, nos encontramos que el ingreso del mar o inundación al territorio fue amplia y masiva, es decir habia comunicación directa con el mar abierto, por lo tanto se tenían condiciones normales de salinidad no aptas para la depositación de la sal. Mientras que el análisis de de los hechos, indicios, pruebas, registros aportados en el presente trabajo, demuestran que durante el periodo Jurásico Medio (**Bajociano-Bathoniano. 166-170 ma**), El Arco Nazas de México estaba en colisión con la esquina Noroccidental de Suramerica (Gondwana), rompiendo la Cordillera Jurásica Gran Estelar, creando el **estrecho de Edinson** (Norte, centro y sur) ingresando el océano pacífico a inundar el Golfo de México (Golfo de América y Golfo de México), igualmente inundando la paleocuenca de la Cordillera Oriental de Colombia, Demostrado por los corredores marinos del jurásico inferior y medio, definidos a partir de las columnas estratigráficas **1,2,3,3a,3b y 3d; 4, 4a, 3c, 3d ( 4,4a,3c posteriormente erosionadas), Figuras 6,9,10,11,12,13,14,15,16.** Generando un flujo de agua de mar restringida, ocasionando baja circulación, y por lo tanto hipersalinidad, que conjugado con la gran extensión de la Cuenca y las altas condiciones atmosféricas de altas temperaturas, favorecieron la rápida depositación de la sal (**Filina et al 2022**), que alcanzó un espesor de 3 a 4 km. **Claramente podemos concluir que la sal de la cordillera Oriental de Colombia hace parte del mismo ambiente, tiempo y condiciones a las que se formaron en el Golfo de México, durante el jurásico Medio.** ( Para ampliar detalles acerca de los sucesos, eventos e implicaciones en el ciclo exploratorio O&G&M consultar con el autor de este artículo ).

**Gigante No.12** ( Gigante No. 19 Derribado de esta Serie ):

**Juan Camilo Ruiz Amaya. 2021**

**Un problema por resolver...**

Hasta la fecha, entre la Sabana de Bogotá y el Páramo de Sumapaz no hay un modelo tectónico actualizado que tenga en cuenta las principales características del estilo estructural y proporcione argumentos para definir el rol de la sal y la cronología del plegamiento.

**Respuesta;** El presente Estudio sienta las bases para comprender el área de Sumapaz y Sabana de Bogotá, claves para la reconstrucción del modelo tectónico del área. ( Para ampliar detalles acerca de los sucesos, eventos e implicaciones en el ciclo exploratorio O&G&M consultar con el autor de este artículo ).

Todo lo anterior integrado sirve para ser aplicado a las siguientes Cuencas con problemas, reportadas por Dra. **Filina et al 2022.**

Furthermore, there are many other sediment-filled extensional basins around the world that need to be better understood, such as the Caspian Sea, the Black Sea, the Aleutian Basin, the Baltic Sea, and the Sea of Japan. The approach of combining the perspectives of both in-

La existencia del anterior fenómeno no solo es anecdótico, sino que tiene un impacto que no ha sido ampliamente relacionado y estudiado sobre **los Sistemas Petroleros, Mineros, y Sociales del área.**

**Implicaciones en los Sistemas Petroleros**

Del Análisis correspondiente de los items de la sección 4.0 anterior, podemos concluir, que nos encontramos ante dos nuevos play y/o Sistemas petroleros hipotéticos no explorados en la Cuenca De Cundinamarca, perteneciente a la paleocuenca jurásica de la Cordillera Oriental de Colombia.

1. **Play Jurásico:** Conformado por la depositación de shales orgánicos del jurásico inferior-**Hipotética Formación Zipa** de Edinson Alvarez 2025 (Roca Fuente, Correlacionable con la Formación Morrocoyal y la Formación Montebel), interdigitado hacia los bordes de la Cuenca con depósitos vulcanosedimentarios detríticos de ladera, flujos de escombros, turbiditas (Roca Reservorio) y sello de 3 a 4 km de sal depositada durante el jurásico Medio.
2. **Play Cretácico asociado a sello de sal:** Roca Fuente Formación Fómeque, Roca Reservorio Formación Une, Roca Sello Sal alóctona. Igual para las secuencias superiores.

**Implicaciones en los Sistemas Mineros**

La sal ha sido importante desde la época prehispanica para el desarrollo de las culturas aborígenes y luego la colonia, después de la conquista española. Son pocas las minas de sal que funcionan, la mayoría no son tecnificadas. Abundan los manantiales o manaderos salinos en la cuenca de la cordillera oriental.

Pero el hecho más notorio y de resaltar en el presente artículo lo constituye el Rol de la Sal y su participación en la mezcla de los fluidos hidrotermales que dieron origen a los cinturones esmeraldíferos oriental (edad cretácica) y occidental (edad Oligoceno) de la cordillera oriental de Colombia (Debate edad) (**Andrés M. Ravelo 2020**). Según **Andrés M. Ravelo 2020** ( Algunos elementos traza como la relación V/Cr, y elementos como el Fe, Na, Mg, ayudan a diferenciar la belleza, color y brillo de las esmeraldas colombianas. ( El Sodio probablemente aportado por la Sal, entre otros minerales), Diferenciándose las esmeraldas Colombianas de las otras del Mundo. ( **Figura 17.** Fura, Una de las Esmeraldas en bruto más grandes del Mundo-Muzo-Boyacá Colombia. Subcuenca Tablazo **Figura 14** ).

**Implicaciones en los Sistemas Sociales**

El Domo Salino más grande e importante de Colombia, en la ciudad de Zipaquirá Cundinamarca, posee la iglesia subterránea de sal, una de las más importantes del mundo. La cual recibió en el año 2024 más de Setecientos mil turistas. (**Figura 18.** Nota Periódico el Tiempo 2025, **Figura 19,** Instalaciones Iglesia de Sal de Zipaquirá). Dinamizando la economía de la Región y el País.

Esta metodología también se aplica a áreas complejas como los cinturones salinos (presal), el Golfo de México, el Golfo de América, la costa brasileña, la costa africana, el Mediterráneo, la costa de Alaska y Canadá, las cordilleras y estribaciones de las Montañas Rocosas, los Andes, el Atlas, el Himalaya y la Península Arábiga, entre otras, así como a áreas de baja o mínima complejidad estructural tectónica. **Asimismo ayuda en el aumento de la producción en yacimientos complejos, al confirmar y refinar los modelos geológicos y geomecánicos de yacimientos que presentan este problema de doble e incluso triple interpretaciones y modelos.**

Algunas de las herramientas de la teoría de Fuente Compleja SCT, El método EAST-P de la SCT, fue propuesto a Ecopetrol en abril de 2024, por un valor comparable a las transacciones de las grandes compañías tecnológicas. Este valor lógicamente excedía la capacidad económica y financiera de la compañía, por esta razón nosotros **invitamos a @Pötus, lista Forbes y grandes compañías a participar de este desarrollo.**

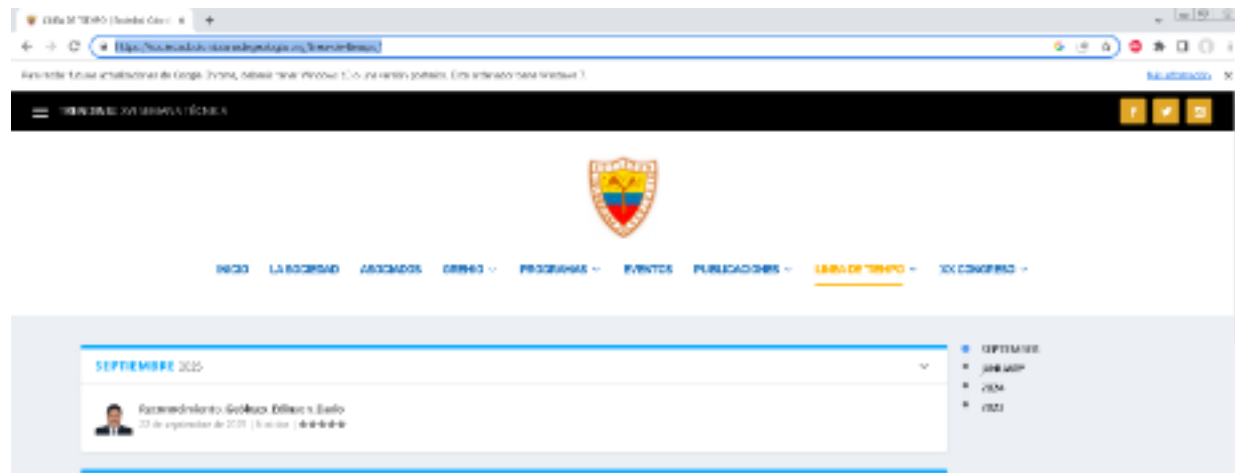
El análisis del soporte técnico, le ha merecido reconocimiento por sus aportes al conocimiento geocientífico de Colombia por parte de importantes personalidades y entidades. ( Maya journal of geosciences September edition 2025, pag. 154, Art-1/10 ), <https://revistamaya.com/wp-content/uploads/2025/08/Revista-Maya-Geociencias-Septiembre-2025.pdf>.

Artículo-2(Páginas-37-47): <https://revistamaya.com/wp-content/uploads/2025/09/Revista-Maya-Geociencias-EDICION-ESPECIAL-XXV-2025.pdf>.

Artículo-3(páginas-76-98):<https://revistamaya.com/wp-content/uploads/2025/10/Revista-Maya-Geociencias-EDICION-ESPECIAL-XXVI-2025.pdf>

Artículo-4(páginas-169-180): <https://revistamaya.com/wp-content/uploads/2025/11/Revista-Maya-Geociencias-Diciembre-2025.pdf>

La prestigiosa entidad **Sociedad Colombiana de Geología- SCG**, se ha sumado al reconocimiento a través de la publicación en su página WEB. Enlace <https://sociedadcolombianadegeologia.org/reconocimiento-edinson-dario/>



**Nota1:** La Sociedad Colombiana de Geología (**SCG**) y la Asociación Colombiana de geólogos y geofísicos del Petróleo (**ACGGP**), son organizaciones de índole privada que cumplen similar función social-funciones públicas: Difundir, publicitar, apoyar, todo lo relacionado con las Geociencias, y ciencias de la tierra.

Rechazamos el bloqueo institucional y Censura aplicada al presente trabajo investigativo, por parte de los señores **Jaime Gonzalo Checa Jimenez-Presidente ACGGP y Flover Rodriguez Portillo Director Ejecutivo**, quienes en tres ocasiones han negado la publicación tanto del reconocimiento otorgado por prestigiosas entidades por el trabajo investigativo en geociencias, como de los artículos informativos donde se muestran los resultados del trabajo clasificado como de interés Nacional. **Además de negar el reconocimiento otorgado por los aportes a las Geociencias del País, Queriendo imponer arbitrariamente una revisión previa a los artículos informativos lo cual está prohibido por la ley y los acuerdos-tratados internacionales, violando la libertad de expresión y libertad de información, valores fundamentales supremos en una democracia. (Art 13 CADH)**

**“La censura es *per se* discriminatoria(...)” (Sentencia T 539 DE 1994)**, basado en lo anterior con la aplicación de censura se está discriminando al afectado del presente comunicado, **y a su vez con su acción los señores Jaime Gonzalo Checa Jimenez-presidente de la ACGGP, y Flover Rodriguez Portillo, Director Ejecutivo, estarían discriminando al presidente de los Estados Unidos de América quien es una de las tantas personas y audiencia a quienes va dirigido el mensaje informativo.** Además de estar ocultando información de interés Nacional al Pueblo colombiano, al obstruir el flujo libre de información y el debate público respecto de los resultados del presente trabajo investigativo en geociencias.(**Art 13 Convención Americana Derechos Humanos**).

**REFERENCES**

- Alarcón Gómez, C. M., Gómez-Coronado, J. S., Lizarazo Pabón, J. A., Díaz Villamizar, J. S.& Patarroyo, G. D. 2019. Nuevo Reporte De Plantas Fósiles En La Formación Girón Sobre El Cañón Del Río Lebrija, Santander. Estratos-Uis-2019. 2p. Boletín No 375.
- Alberto Nuñez Tello. 1986. Petrogénesis Del Batolito De Ibagué. Ingeominas. Geología Colombiana No. 15.1986. Pp.35-45. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6560058>
- Alarcón CM, Clavijo-Torres J, Mantilla-Figueroa LC, Rodríguez JG. 2020. Nueva propuesta de edades para el registro sedimentario de las formaciones Bocas y Jordán y su relación con el desarrollo de la actividad magmática del Grupo Plutónico de Santander (cordillera Oriental, Colombia). Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 44(173):1137-1151, octubre-diciembre de 2020. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1208>
- Alejandro Piraquive Bermudez 2017. Structural Framework, deformation and exhumation of the Santa Marta Schists: accretion and deformational history of a Caribbean Terrane at the north of the Sierra Nevada de Santa Marta. Tesis Doctoral Universidad Nacional de Colombia Facultad de Ciencias, Departamento de Geociencias Bogotá, Colombia 2017. 394 p
- Andreina García Reyes 2018, Thesis Doctoral-Sorbonne University. Magnetic anomalies and plate tectonic history of the caribbean plate and Mexican Gulf. 218p.
- Andreína García-Reyes, Jérôme Dymont. 2021. Structure, age, and origin of the Caribbean Plate unraveled. Earth and Planetary Science Letters, 2021, 571, pp.117100. 10.1016/j.epsl.2021.117100 .hal-03452889 29 p.
- Andrés Sebastián Martin Ravelo. 2020. Mineralogía, Aspectos geoquímicos y petrogénesis de las esmeraldas en el modelo colombiano. Charla Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=15gZ7AVww84>
- ANH-UIS 2008. Evolución Térmica De La Subcuenca De La Baja Guajira. Contrato N° 56 De 2008. UIS-ANH INFORME FINAL 144 p.
- ANH-Universidad Nacional de Colombia 2020. Evaluación del potencial Exploratorio de las Unidades Cenozoicas del Valle Superior del Magdalena. 800 p. <https://experience.arcgis.com/experience/b4cebb9e9f8743e5b0d75264121d93bc/>
- ANH-UPTC 2020, Integración Geológica, Evaluación De Los Sistemas Petrolíferos Y Prospectividad De Las Cuencas Frontera De Colombia. Cuenca Cordillera Oriental. Sogamoso, Diciembre de 2020. 441p
- ANH-UPTC 2024. Atlas De Áreas De Interés Para La Exploración De H2 En El Norte De Colombia- 104 p.
- Aurora Zavala-Monsiváis1,\*, José Rafael Barboza-Gudiño2, Fernando Velasco-Tapia3, María Elena García-Arreola2. 2012. Sucesión volcánica Jurásica en el área de Charcas, San Luis Potosí: Contribución al entendimiento del Arco Nazas en el noreste de México. 28 p. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana Volumen 64, núm. 3, 2012, p. 277-293 <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2012v6>

- Bayona, G., Rapalini, A. and Costanzo-Alvarez, V. 2006. Paleomagnetism in Mesozoic rocks of the northern Andes and its implications in Mesozoic tectonics of northwestern South America. *Earth, Planets and Space*, 58, 1255–1272, <https://doi.org/10.1186/BF03352621>
- Bayona, G., Jiménez, G., Silva, C., Cardona, A., Montes, C., Roncancio, J. and Cordani, U. 2010. Paleomagnetic data and K–Ar ages from Mesozoic units of the Santa Marta massif: a preliminary interpretation for block rotation and translations. *Journal of South American Earth Sciences*, 29, 817–831, <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2009.10.005>
- Bayona, G., Bustamante, C., Nova, G. and Salazar–Franco, A.M. 2020. Jurassic evolution of the northwestern corner of Gondwana: Present knowledge and future challenges in studying Colombian Jurassic rocks. *Publicaciones Geológicas Especiales*, 36, <https://doi.org/10.32685/pub.esp.36.2019.05>
- Blanco-Quintero, I.F., García-Casco, A. et al. 2014. Late Jurassic terrane collision in the northwestern margin of Gondwana (Cajamarca Complex, eastern flank of the Central Cordillera, Colombia). *International Geology Review*, 56, 1852–1872, <https://doi.org/10.1080/00206814.2014.963710>
- Blickwede, J.F. 2001. The Nazas Formation: A detailed look at the early Mesozoic convergent margin along the western rim of the Gulf of Mexico Basin. *AAPG Memoirs*, 75, 317–342.
- Boschman, L.M., van Hinsbergen, D.J., Torsvik, T.H., Spakman, W. and Pindell, J.L. 2014. Kinematic reconstruction of the Caribbean region since the Early Jurassic. *Earth-Science Reviews*, 138, 102–136, <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.08.007>
- Carlos A. Vargas and Paul Mann 2013. Tearing and Breaking Off of Subducted Slabs as the Result of Collision of the Panama Arc-Indenter with Northwestern South America. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 103, No. 3, pp. 2025–2046, June 2013, 22p. <https://doi.org/10.1785/0120120328>
- Carlos Alberto Vargas, Carlos A. Zuluaga, Mathias Bernet, and Sergio Amaya. 2025. Surficial serpentinite emplacements and their potential links with the mantle wedge in NW South America. 12 p. <https://www.lyellcollection.org/doi/full/10.1144/SP558-2023-120>
- Cediél, F., R. P. Shaw, and C. Cáceres, 2003, Tectonic assembly of the Northern Andean Block, in C. Bartolini, R. T. Buffler, and J. Blickwede, eds., *The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon habitats, basin formation, and plate tectonics: AAPG Memoir 79*, p. 815– 848. 34 p.
- Clasificación de Rocas Magmáticas. <https://post.geoxnet.com/rocas-magmaticas-clasificacion-de-los-magmas/>
- Definición de Batolito. <https://petroigne.wordpress.com/formas-de-yacimiento/formas-plutonicas-y-filonianas/plutones/batolitos/>
- C.J. Busby<sup>1</sup> and E. Centeno-García<sup>2</sup>. 2022. The “Nazas Arc” is a continental rift province: Implications for Mesozoic tectonic reconstructions of the southwest Cordillera, U.S. and Mexico. <sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Sciences, University of California, Davis, California 95616, USA <sup>2</sup>Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Avenida Universidad 3000, Ciudad Universitaria, México D.F. 04510, México 23p 2022 the geological society geological of america.
- Coombs, H.E., Kerr, A.C., Pindell, J., Buchs, D., Weber, B., and Solari, L., 2020, Petrogenesis of the crystalline basement along the western Gulf of Mexico: Postcollisional magmatism during the formation of Pangea, in Martens, U., and Molina Garza, R.S., eds., *Southern and Central Mexico: Basement Framework, Tectonic Evolution, and Provenance of Mesozoic–Cenozoic Basins: Geological Society of America Special Paper 546*, p. 1–24, [https://doi.org/10.1130/2020.2546\(02\)](https://doi.org/10.1130/2020.2546(02)).
- Dany Yuleimar Mejía Vélez. 2019. Metamorfismo Jurásico En Los Andes Colombianos: ¿Respuesta Del Arco A La Transición De Un Régimen De Subducción Extensional A Uno Transpresivo? . Universidad Nacional de Colombia Facultad de Minas, Departamento de Materiales y Minerales, Área Curricular de Recursos Minerales Medellín, Colombia 2019. 85 p. Tesis Maestría.
- Diego Osorio-Afanador, Francisco Velandia. 2021. Late Jurassic syn-extensional sedimentary deposition and Cenozoic basin inversion as recorded in The Girón Formation, northern Andes of Colombia 30p. *Andean Geology* 48 (2):237-266. May, 2021 doi: 10.5027/andgeoV48n2-3264
- D. F. Jaramillo-Minorta, et al, "Modelo sedimentario-deposicional de la formación Girón en la sección del km 42 vía Girón-Zapatoca, Santander, Colombia" *Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo*, vol. 23 (2), pp. 37-49, julio. 2023. DOI: <https://doi.org/10.19053/1900771X.v23.n2.2023.16147> 13p.
- D. Tamara, E. Rojas, L. Quintero, F. Lascarro, D. Manco. Aspectos tectónicos en la génesis de la Formación La Quinta y su relación con los depósitos minerales de cobre en la serranía del Perijá, Colombia. *Tecnura*, 28(79), 123-139. <https://doi.org/10.14483/22487638.2082417> p.
- Fabio Cediél, Robert Peter Shaw 2019. *Geology and Tectonics of Northwestern South America The Pacific-Caribbean-Andean Junction*. 1010 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-76132-9> .
- Gómez, J., Montes, N.E. & Marín, E., compiladores. 2023. Mapa Geológico de Colombia 2023. Escala 1:1 500 000. Servicio Geológico Colombiano. Bogotá. [https://www2.sgc.gov.co/MGC/Paginas/mgc\\_1\\_5M2023.aspx](https://www2.sgc.gov.co/MGC/Paginas/mgc_1_5M2023.aspx)
- Horton, B.K., Parra, M. & Mora, A. 2020. Construction of the Eastern Cordillera of Colombia: Insights from the sedimentary record. In: Gómez, J. & Mateus–Zabala, D. (editors), *The Geology of Colombia, Volume 3 Paleogene – Neogene*. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 37, p. 67–88. Bogotá. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.37.2019.03>
- Ian Davison, James Pindell & Johnny Hull 2018. *The Basins, Orogens and Evolution of the southern Gulf of Mexico and northern Caribbean*. 52 p. Published by The Geological Society of London.
- Instituto Nacional de Investigaciones Geologico-Mineras 1970. *Economic Geology Of The Zipaquirá Quadrangle And Adjoining Area*, 141 p.
- Ingeominas. 1985. *compilación-y-diagnóstico-de-la-información-geoquímica-histórica-en-la-parte-central-de-la-cordillera-oriental-36-638*.
- Irina Filina , James Austin, Tony Dor´e , Elizabeth Johnson , Daniel Minguez , Ian Norton , John Snedden , Robert J. Stern. 2022. Opening of the Gulf of Mexico: What we know, what questions remain, and how we might answer them. 30 p. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2021.229150>
- Irina Filina and Erin Beutel. 2022. *Geological and Geophysical Constraints Guide New Tectonic Reconstruction of the Gulf of Mexico*. University of Nebraska – Lincoln College of Charleston. November 22, 2022. 36p.
- James Lawrence Pindell. 1981. *Permo-Triassic reconstruction of Western Pangea and the evolution of the Gulf of Mexico-Caribbean región*. University at Albany, State University of New York. 133p Master thesis.
- James L. Pindell 1985. *Alleghenian Reconstruction And Subsequent Evolution Of The Gulf Of Mexico, Bahamas, And PProto-CariBBean* James L. Pindell. Exploration Research Division, Pennzoil Company, Houston, Texas. 39p 210ma Tectonics, Vol. 4, No. 1, Pages 1-39, January 1985.

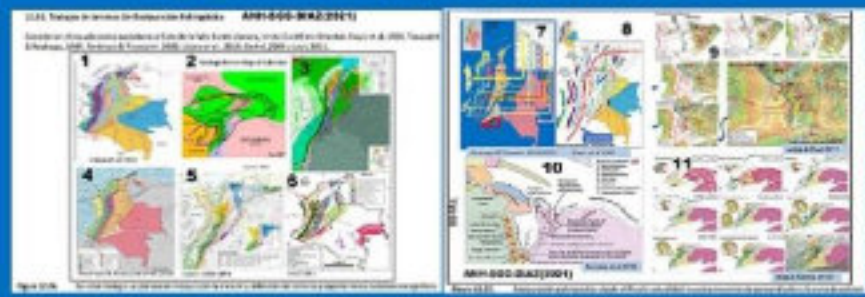
- James Pindell and Lorcan Kennan 2001. Kinematic Evolution of the Gulf of Mexico and Caribbean. Tectonic Analysis, Ltd., Dept. Earth Science, Rice University, Houston, Texas, USA. 51 p.
- J. Pindell L. Kennan K.P. Stanek W.V. Maresch And G. Draper 2009. Foundations of Gulf of Mexico and Caribbean evolution: eight controversies resolved. Tectonic Analysis Ltd. Department of Earth Science, Rice University 39 p.
- James Pindell & Lorcan Kennan 2009. Tectonic evolution of the Gulf of Mexico, Caribbean and northern South America in the mantle reference frame: an update. In: James, K., Lorente, M. A. & Pindell, J. (eds) The geology and evolution of the region between North and South America, Geological Society of London, Special Publication.
- James Pindell 2013. Origin of the Caribbean? Look Toward the Pacific. 7p. Explorer Newsletter.
- James Pindell, Diego Villagómez, Roberto Molina-Garza, Rod Graham and Bodo Weber. 2020. A revised synthesis of the rift and drift history of the Gulf of Mexico and surrounding regions in the light of improved age dating of the Middle Jurassic salt. 2020. Geological Society, London, Special Publications, 504, <https://doi.org/10.1144/SP504-2020-43>
- James Pindell, Diego Villagómez, Roberto Molina Garza, Alejandro Beltrán, Daniel F. Stockli, Mark Wildman. 2022 Late Cretaceous–Miocene depositional evolution of Chiapas, Mexico: A foreland controlled by collision of Greater Antilles arc and the subsequent relative migration of the Chortís Block. 29 p.
- James Pindell 2021. Catedra Selecta – Tectonic evolution Mexican Gulf-Conferencia Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=8CAhxGbnL9w>
- James Pindell 2022. 52.2 James Pindell - Dynamo-thermal subsidence and sag–salt section deposition-Conferencia.
- Jose Rafael Barboza-Gudino, Maria Teresa Orozco-Esquivel, Martin Gomez-Anguiano, Aurora Zavala-Monsivais. 2008. The Early Mesozoic volcanic arc of western North America in northeastern Mexico. 15p. 2008 Journal of South American Earth Sciences 25 (2008) 49–63.
- Juan Camilo Ruiz Amaya. 2021. Modelamiento estructural entre el Páramo de Sumapaz y la Sabana de Bogotá. Charla youtube ACGGP. 2021
- López-Isaza, J.A. & Zuluaga, C.A. 2020. Late Triassic to Jurassic magmatism in Colombia: Implications for the evolution of the northern margin of South America. In: Gómez, J. & Pinilla-Pachón, A.O. (editors), The Geology of Colombia, Volume 2 Mesozoic. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 36, p. 77–116. Bogotá. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.36.2019.03> 40 p.
- M. B. I. Weber, A. Cardona, F. Paniagua, U. Cordani, L. Sepulveda & R. Wilson. 2009 The Cabo de la Vela Mafic–Ultramafic Complex, Northeastern Colombian Caribbean region: a record of Multistage evolution of a late Cretaceous intra-oceanic arc. 20 p- From: JAMES, K. H., LORENTE, M. A. & PINDELL, J. L. (eds) The Origin and Evolution of the Caribbean Plate. Geological Society, London, Special Publications, 328, 547–566. DOI: 10.1144/SP328.22 0305-8719/09/\$15.00 # The Geological Society of London 2009.

- María Luisa Monsalve-Bustamante\*, Harold Ávila-Vallejo, Iván Darío Ortiz-Martin and Susana Osorio-Ocampo. 2022. Characterization and space–time distribution of Plio-Quaternary volcanism NE of Caldas, Colombia. 23p. [https://www.researchgate.net/publication/389622981\\_Characterization\\_and\\_space-time\\_distribution\\_of\\_Plio-Quaternary\\_volcanism\\_in\\_the\\_Northeast\\_of\\_Caldas\\_Colombia](https://www.researchgate.net/publication/389622981_Characterization_and_space-time_distribution_of_Plio-Quaternary_volcanism_in_the_Northeast_of_Caldas_Colombia)
- Martin Reyes<sup>1,2</sup> · Jonas Kley<sup>1</sup> · Andrés Mora<sup>3</sup> · István Dunkl<sup>4</sup> · Juan Carvajal-Torres<sup>2,5</sup> 2024. Age and tectonic setting of Mesozoic extension constrained by the first volcanic events in the Eastern Cordillera and Middle Magdalena Valley, Colombia. Received: 6 June 2021 / Accepted: 20 June 2024 © The Author(s) 2024 International Journal of Earth Sciences <https://doi.org/10.1007/s00531-024-02441-7> 27 p.
- Mildred Del Carmen Zepeda Martinez - Tesis Doctoral UNAM. 2021. Reconstrucción de la Evolución tectono sedimentaria del jurásico temprano-medio de la cuenca Tlaxiaco, Sur de México. Implicaciones en la Historia de Atenuación continental del margen occidental de Pangea. 213 p.
- Moreno-Sanchez, M., and A. Pardo-Trujillo, 2003, Stratigraphical and sedimentological constraints on western Colombia: Implications on the evolution of the Caribbean plate, in C. Bartolini, R. T. Buffler, and J. Blickwede, eds., The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon habitats, basin formation, and plate tectonics: AAPG Memoir 79, p. 891–924. 34 p.
- Oswaldo Ordoñez C. 2020. ORO EN COLOMBIA: HISTORIA, PRESENTE Y POTENCIAL. Charla Youtube, <https://www.youtube.com/watch?v=R0VCM1KU-0>
- Patarroyo, P. 2020. Barremian deposits of Colombia: A special emphasis on marine successions. In: Gómez, J. & Pinilla-Pachón, A.O. (editors), The Geology of Colombia, Volume 2 Mesozoic. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 36, p. 403–439. Bogotá. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.36.2019.12> 38 p.
- Pindell, James Lawrence (1985) Plate-tectonic evolution of the Gulf of Mexico and Caribbean region, 302 p. Durham Doctoral theses, Durham University. Available at Durham E-Theses Online: <http://etheses.dur.ac.uk/7042/>
- Pindell, J., Kennan, L., Maresch, W.V., Stanek, K.-P., Draper, G., and Higgs, R., 2005, Plate-kinematics and crustal dynamics of circum-Caribbean arc-continent interactions: Tectonic controls on basin development in Proto-Caribbean margins, in Avé Lallemant, H.G., and Sisson, V.B. eds., Caribbean–South American plate interactions, Venezuela: Geological Society of America Special Paper 394, p. 7–52, doi: 10.1130/2005.2394(01). 46 p.
- Rodríguez-García, G.; Zapata, J.P.; Correa-Martínez, A.M.; Ramírez, D.A.; Obando, G. (2020). Aportes al conocimiento del plutonismo del Arco Mocoa-Santa Marta durante el Jurásico Temprano-Medio, en la margen noroccidental de los Andes, Colombia. Boletín de Geología, 42(3), 15-50. <https://doi.org/10.18273/revbol.v42n3-2020001> 36 p.
- Rodríguez García, G., Correa Martínez, A. M., Zapata, J. P., Ramírez, D. A., & Sabrica, C. A. (2022). Evolution of arc magmatic cycles from the Carboniferous to the Early Cretaceous in the western paleomargin of Gondwana, north of the Andes. Boletín Geológico, 49(2). <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bol.geol.49.2.2022.663> 29 p.

- Rodríguez-García, G., Correa-Martínez, A.M., Zapata-García, G., Arango-Mejía, M.I., Obando-Erazo, G., Zapata-Villada, J.P. & Bermúdez, J.G. 2020. Diverse Jurassic magmatic arcs of the Colombian Andes: Constraints from petrography, geochronology, and geochemistry. In: Gómez, J. & Pinilla-Pachón, A.O. (editors), The Geology of Colombia, Volume 2 Mesozoic. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 36, 54 p. Bogotá. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.36.2019.04> 54p.
- Restrepo, J.J. & Toussaint, J.F. 2020. Tectonostratigraphic terranes in Colombia: An update. First part: Continental terranes. In: Gómez, J. & Mateus-Zabala, D. (editors), The Geology of Colombia, Volume 1 Proterozoic – Paleozoic. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 35, p. 37–63. Bogotá. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.35.2019.03> 28p.
- Sanchez, Javier and Paul Mann, 2015, Integrated structural and basinal analysis of the Cesar-Rancheria Basin, Colombia: Implications for it's tectonic history and petroleum systems, in C. Bartolini and P. Mann, eds., Petroleum geology and potential of the Colombian Caribbean Margin: AAPG Memoir 108, p. 431–470.
- SGM 2014. Formación Nazas. 4p. Ficha de Unidad litoestratigráfica-Formación.
- Spikings, R. & Paul, A. 2019. The Permian – Triassic history of magmatic rocks of the northern Andes (Colombia and Ecuador): Supercontinent assembly and disassembly. In: Gómez, J. & Pinilla-Pachón, A.O. (editors), The Geology of Colombia, Volume 2 Mesozoic. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 36, p. 1–43. Bogotá. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.36.2019.01> 44 p.
- Spikings, R.; Van der Lelij, R. The Geochemical and Isotopic Record of Wilson Cycles in Northwestern South America: From the Iapetus to the Caribbean. Geosciences 2022, 12, 5. <https://doi.org/10.3390/geosciences12010005> 32 p.
- Timoleón Garzón 2021. Potencial mineral y algunos proyectos mineros colombianos. Charla Youtube: <https://www.youtube.com/watch?v=0-5meQFa3As>
- Toussaint, J.F. & Restrepo, J.J. 2020. Tectonostratigraphic terranes in Colombia: An update. Second part: Oceanic terranes. In: Gómez, J. & Pinilla-Pachón, A.O. (editors), The Geology of Colombia, Volume 2 Mesozoic. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 36, p. 237–260. Bogotá. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.36.2019.07> 24p.
- Vargas, C.A. 2020. Subduction geometries in northwestern South America. In: Gómez, J. & Pinilla-Pachón, A.O. (editors), The Geology of Colombia, Volume 4 Quaternary. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 38, p. 397–422. Bogotá. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.38.2019.11>
- Víctor Ramos 2021. Nuevos paradigmas de la Tectónica Andina. Charla Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=9IfGdXKlQY>
- Víctor Ramos 2022. La tectónica mesozoica en los Andes Colombianos. Charla Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=VimLTqmB7y4>
- Villagómez, D., Steffensen, C., Pindell, J., Molina-Garza, R.S., Gray, G., Graham, R., O'Sullivan, P., Stockli, D., Spikings, R. 2006. Tectono-sedimentary evolution of Southern Mexico. Implications for Cretaceous and younger source-to-sink systems in the Mexican foreland basins and the Gulf of Mexico. 64 p.

**God's grace allows us to solve mystery that has lasted more than 60 - 90 years.**

**11 proposed models, fail to answer all the questions that still exist.**



**Complex Source Theory will generate a revolution, a radical transformation of the mining and energy industry, giving different solutions for increase O&G&M discoveries, reserves and production, in complex and normal areas.**

Contact: [edinson.alvarez@gmail.com](mailto:edinson.alvarez@gmail.com)  
O&G and Mining Geoscientist Exploration Specialist

I invite @realDonaldTrump to mediate with the big companies and VIP.

- \* New concepts
- \* Interdisciplinary teams
- \* New Technologies
- \* New methodologies
- \* New science
- \* New Results



[edinson.alvarez@gmail.com](mailto:edinson.alvarez@gmail.com)

Exploration Geologist Specialist - Geophysicist, expert in O-&G-Mining integrated studies (Colombia, Perú and México), Giving solutions to geoscientific problems, which have been in uncertainty for more than 5 decades. With important + economic implications.

The God's grace guide us to develop the "Complex Source Theory", a new mechanism that allow us increasing traditional O&G&M discoveries, production, reserves, as new energies and CCUS.

Geological mapping, surveys design, acquisition, processor PSTM (Conv-3C-4C-TZ-OBC), geomodeller, seismic interpreter and reservoir characterization (Conventional-and-Unconventional Reservoirs). Stratigraphic sequence, seismic attributes, AVO analysis, fluids substitution, seismic inversion, risk and uncertainty, leads and prospects, reserves.

Discovery of New prospective corridors and O&G prospects, in Foothills, Llanos, Putumayo, VIM, VMM, VSM, COR, CR, CAT, GuajiraOff-Guajira, SSJFB, Sinú-Sinu Off, Cayos basin, Colombia basin.

**IMPORTANT CONTRIBUTIONS IN GEOSCIENCES  
PROMISE TO REVOLUTIONIZE O&G&M EXPLORATION. No 5/10.**

**THE THIRD PART OF THE GULF OF MEXICO THAT BELONGS TO COLOMBIA.  
A MARVELOUS, MAGICAL, AND CINEMATIC JOURNEY  
THROUGH THE JURASSIC PERIOD, BY EDINSON ALVAREZ.**

**EDINSON D. ALVAREZ S. 1,2**

1 Exploration Geologist, O&G&M Specialist,  
Researcher of tectonic and structurally complex areas.

2 Expert in geoscientific solutions through integrated O&G&M studies.  
with strong positive economic implications.



**Complex Source Theory (Edinson Alvarez 2025):** A mechanism used by interdisciplinary groups of specialists in any field of science, where new concepts, new methodologies, new technology, and new knowledge are employed, obtaining new results, in order to resolve complex issues.. (Image Courtesy of Pixabay).

**EAST-P Method-Tool (Processing and Seismic Treatment Edinson Alvarez 2025):** It requires specialized personnel, computer equipment and advanced software.

**Edinson Geochemical Hydrocarbon Family Classification Maps -Tool (Edinson Alvarez 2025):** New classification of hydrocarbon families based on geochemical-isotopic-molecular signatures, migration pattern from source rock, their close relationship with geology, geochemical modeling of generation, expulsion, and hydrocarbon migration routes in a regional context.

**Integrated O&G&M studies - Onshore-Offshore-Tool:** It involves the participation of more than 20 geoscience disciplines, in order to find answers to complex industry problems, with strong positive economic implications.

**Citation:** Alvarez Serrato Edinson Dario, 2025 The Third Part Of The Gulf Of Mexico That Belongs To Colombia. A Marvelous, Magical, And Cinematic Journey Through The Jurassic Period, Told By Edinson Alvarez. Important Contributions In Geosciences Promise To Revolutionize O&G&M Exploration. No 5/10. Revista Maya December 2025. 39 p.  
Citation Articles 1,2,3, at the end.

**INTRODUCTION**

This work aims to contribute to the geoscientific knowledge of an area of importance to the global oil, gas, and mining (O&G&M) industry: the Jurassic evolution of the Gulf of America, Gulf of Mexico, and the Colombian and Venezuelan territories (Northwestern Corner of South America-Gondwana). **This study seeks to demonstrate, with technical and scientific evidence, the relationship between plate tectonics, magmatic arcs, volcanic arcs, and the development of rift zones and subduction zones, combined to understand the origin, growth, and development of sedimentary basins of interest to the global mining and energy industry.**

**In this first phase, the central theme is resolving the uncertainties or specific unanswered questions posed by the first Spanish explorers in 1525 when they founded the city of Santa Marta and in 1538 when they founded the city of Bogotá, Colombia, approximately 500 years ago.** We will also address the questions posed by contemporary geoscientists and researchers worldwide over more than 100 years of the history and development of the petroleum industry in the Gulf of Mexico region. we will examine the implications of this issue for petroleum, mining, and social systems in a broad sense..

On the Colombian side, we would like to highlight the various companies, institutions, entities, and individuals that have contributed to the development of knowledge in these areas, such as the Colombian Geological Service (SGC), the Colombian Petroleum Company **Ecopetrol**, the Institute of Petroleum and Transition Energy Research (ICPET), the National Hydrocarbons Agency (ANH), and state and private universities such as the University of Caldas, its Institute of Stratigraphic Research (IIES), the National University of Colombia (UNAL), the Industrial University of Santander (UIS), the Pedagogical and Technological University of Colombia (UPTC), EAFIT University, the University of Pamplona, and the University of the Andes, among others...

Highlighting the tireless and important work carried out by the renowned and honorable Doctors: **James Pindell, Diego Villagómez, Roberto Molina-Garza, Rod Graham and Bodo Weber 2020, A revised synthesis of the rift and drift history of the Gulf of Mexico and surrounding regions in the light of improved age dating of the Middle Jurassic salt. 49 p.** <https://doi.org/10.1144/SP504-2020-43>, Freeto the public through their YouTube conference. **Cátedra Selecta.- James Pindell-2021.**

**El Dr. James Pindell** has dedicated his entire life to the study, understanding and geological evolution of the Gulf of Mexico with his Master's thesis **Permo-Triassic reconstruction of Western Pangea and the evolution. 1981 And Doctoral Thesis: Plate-tectonic evolution of the Gulf of Mexico and Caribbean region 1985.** And significant and sufficient related work up to the date of 2025.

Highlighting the work of the doctors **Restrepo, J.J. & Toussaint, J.F. 2020. Tectonostratigraphic terranes in Colombia: An update. First part: Continental terranes. In: Gómez, J. & Mateus-Zabala, D. (editors), The Geology of Colombia, Volume 1 Proterozoic – Paleozoic. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 35, p. 37–63. Bogotá.** <https://doi.org/10.32685/pub.esp.35.2019.03>, who have dedicated their entire lives to the study of Colombian Geology, and their work on tectonostratigraphic terrains, in different and renewed versions of 1973, 1988, 1993, 1998, 2020, among others.

We would like to clarify that the narrative style used by the author is solely intended to generate new readers, audience, and interest in scientific research related to Geosciences – Earth sciences. This is to avoid any misinterpretation of arrogance, as the narrative style is simply a strategy for attracting an audience. We have the utmost respect and admiration for those who have made valuable contributions to Geosciences. All glory and praise belong to God.

The narrative form is a tribute to one of the greatest figures in world literature, Miguel de Cervantes Saavedra (1547-1616), with his masterful work, Don Quixote of La Mancha (1605). **In this case, we will refer to "Giants" as concepts, techniques, technologies, methodologies, procedures, tools, uncertainties, unresolved questions, etc.** We invite you to see the positive side of history, which is the contributions to geosciences for our country, Colombia, and in this case, the impressive and spectacular Gulf of Mexico.

We will take a spectacular, fascinating, wonderful and cinematic geological journey through the Colombian-Mexican-American Jurassic world.

We also draw a parallel with sports, regarding the giants we are going to demolish in this edition. Records are meant to be broken or demolishing; similarly, if our proposal has weaknesses or flaws, it will most likely be surpassed or toppled by a new and/or better proposal in the future.

#### **METODOLOGY**

In order to overcome the structural, stratigraphic, sedimentological, volcanological, geological, geophysical, geochronological, geochemical, and seismological obstacles and difficulties posed by the tectonic-structural complexity of the area, the following activities are carried out:

- Compilation of information from petroleum exploration, geochemical, geophysical, geological, stratigraphic, tectonic-structural, petroleum systems, volcanological, geochronological, and other studies of the area of interest.

- As part of the Author's independent professional activity, several integrated studies have been carried out to address the issue of the structural tectonic complexity of the study area, and its implications for oil and gas exploration and production activity in Colombia and the Gulf of Mexico. **This case relates to tectonostratigraphic evolution, primarily during the Jurassic geological period (145 to 201.3 million years ago), also including the Late Triassic (201.3 to 237 million years ago) (201.3-210 million years ago).**

#### **RESULTS**

##### **1. General Tectonic Framework and Terminology.**

To understand the development of this chapter, we will refer to the following terms (**Figures 1 and 2**):

**Triassic-Jurassic Gulf of Edinson Alvarez:** A large body of marine water surrounded by the following geographical features, giving it its gulf-like configuration: the Aoxaca and Chortis terranes to the west-northwest, continental Mexico to the north and east, and continental Colombia to the east-southeast. (Upper Triassic-Lower Jurassic) (**Figures 1 y 3**)

**Jurassic Bay of Edinson Alvarez:** A narrow body of marine water surrounded by the following geographical features, giving it its bay configuration: the Aoxaca and Chortis terranes to the west-northwest, continental Mexico to the north and east, and continental Colombia to the east-southeast. (Lower Jurassic) (**Figures 4 y 5**)

**Edinson's Jurassic Strait:** Opening Zone, fracture-rupture zone, entry of the Pacific Ocean into the Gulf of Mexico and Paleobasin of the Eastern Cordillera of Colombia. (Lower-Middle Jurassic). (**Figures 2,6,7, 9,10 y 14**)

**The Edinson's Jurassic Strait,** It had several openings or narrow passages named below:

**Edinson's Jurassic Strait (North);** Main rupture or strait created in the Jurassic 170-169 ma. Between the Mexican Chiapas Massif and the Colombian Upper Guajira (Serrania de Macuira-Cosinas).

**JhonEdi's Jurassic Strait (Middle):** Break or Strait Created between the Upper Guajira of Colombia (Serrania de Cosinas-Macuira) and the Sierra Nevada de Santa Marta.(Honor Jhon Edinson Alvarez M.–Son)

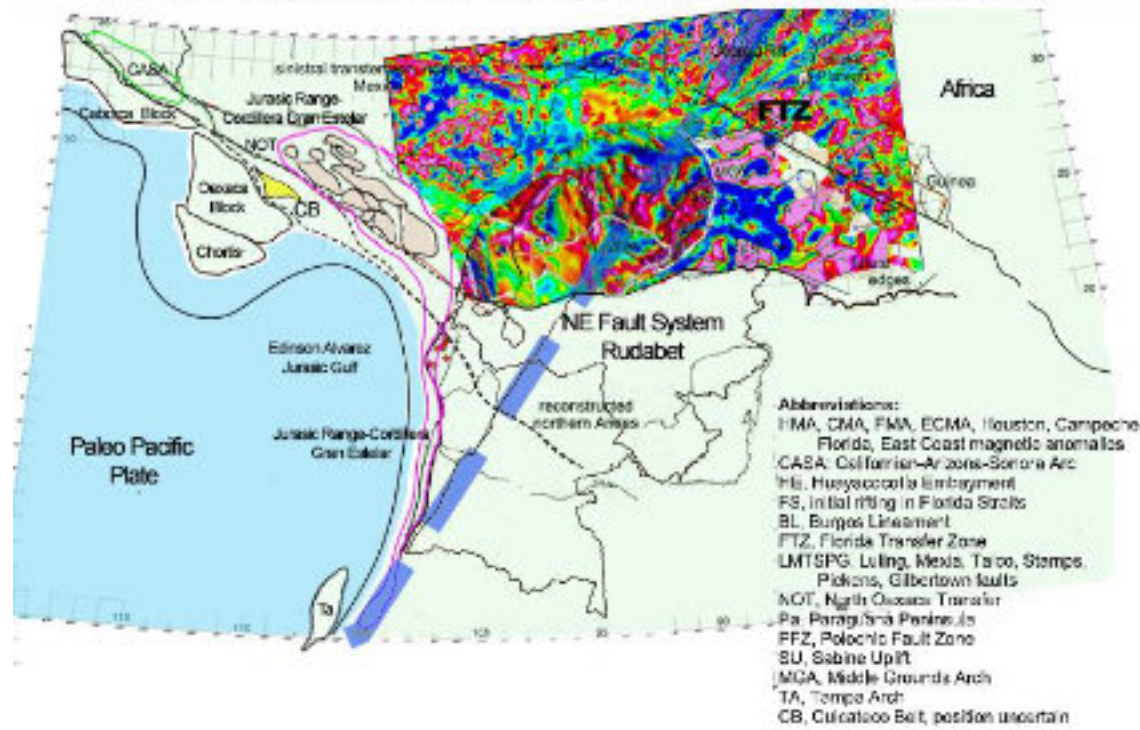
**Floris's Jurassic Strait (South):** Break or Strait Created on the Western Side of the Sierra Nevada de Santa Marta, controlled by the Bucaramanga Fault. (**Figure 14**) (Honor Florinda Serrato-Mother)

**Independent Milenar's Jurassic Strait:** Break or Strait Created to the southwest of the Cundinamarca Basin (Southwestern part of the paleobasin of the Eastern Cordillera) controlled by the Ibagué Fault. (**Figure 14**). (Honor Ana Milena Alvarez Serrato-Sister).

**Jurassic Mountain Range Gran Estelar:** The Great Triassic-Jurassic Cordillera, formed by the union of the Paleo Sierra Madre Oriental of Mexico and the Paleo Cordillera Central of Colombia, is composed of Precambrian-Paleozoic metamorphic crystalline basement, granitoid intrusions, and fluvial and volcanosedimentary deposits, as well as volcanic arc sedimentary complexes. Paleogeographically, it functions as back retaining wall of the slope escarpment of the Gulf of Mexico, relative to the waters of the Pacific Ocean. (Honor beloved wife Estela Moreno Z.) (**Figures 1, 3, 4 y 5**).

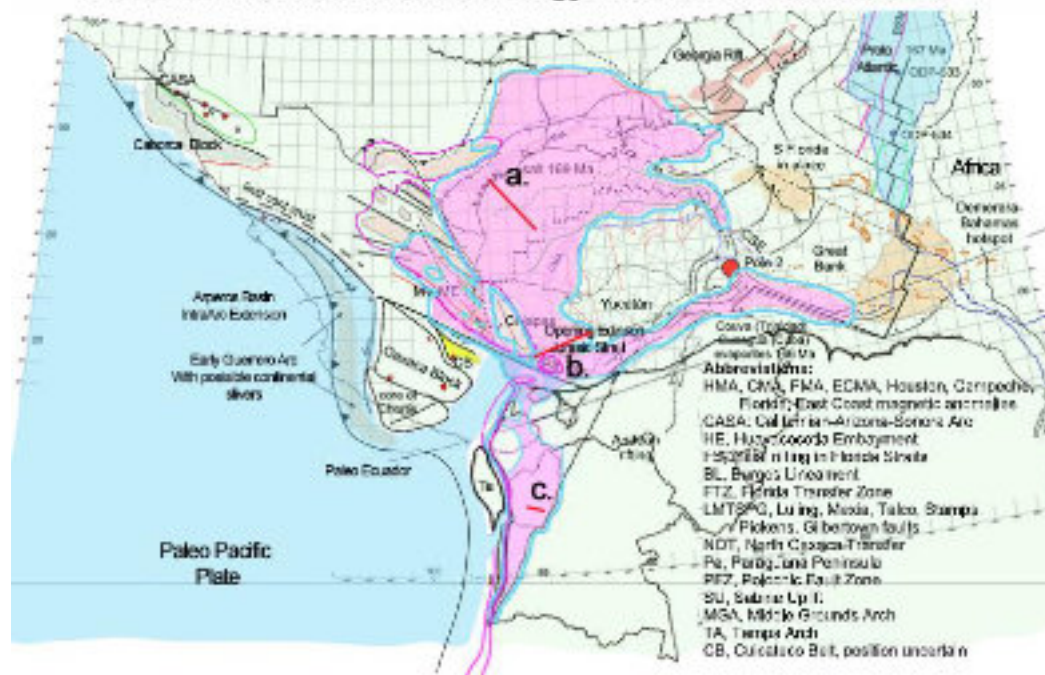
**Large Fault System, Rift, Rudabet Lineament (Honor Ruben Dario Alvarez Betancourt-Father, Figures 1 y 3);** Composed of the Great System of faults, rift and lineament of the Guaicáramo- foothills Faults (Colombia), Boconó- foothills Faults(Venezuela), NE Yucatán lineament, Georgia Rift and Appalachian foothills Lineament.

**Fig 1. Mexican Gulf Tectonic Evolution - 210-200 m.a. Late triassic-Early Jurassic**  
Edinson Alvarez-Geoscientist 2025, edinson.alvarez@gmail.com . Modified from Pindell et al 2021.



**Figure 1.** Main Geological, Morphological and Tectonic-Structural Features for Laurentia-Gondwana during the Late Triassic-Early Jurassic Period. 200-210 Ma.

**Fig 2. Mexican Gulf Tectonic Evolution - 167 m.a. Middle Jurassic**  
Edinson Alvarez-Geoscientist 2025, edinson.alvarez@gmail.com . Modified from Pindell et al 2021.



**Figura 2.** Location of the Seismic-Stratigraphic profiles in a. Gulf of America, b. Gulf of Mexico, c. Cundinamarca Basin-Colombia, Pink color corresponds to Salt Deposits for the period 170 to 166 m.a. approximately, (Figure 16)

2. Analysis

Using the advanced tools of Complex Source Theory (CST), it became very easy to find an answer to the question posed by the renowned geoscientists honored in this article, and which for decades has kept the community of geologists, stratigraphers, volcanologists, seismologists, geophysicists, geoscientists, and the global mining and energy sector in general up at night.

All the answers come from the paleogeographic reconstruction of the Gulf of Mexico based on the work of renowned geoscientists: **James Pindell, Diego Villagómez, Roberto Molina-Garza, Rod Graham and Bodo Weber 2020, A revised synthesis of the rift and drift history of the Gulf of Mexico and surrounding regions in the light of improved age dating of the Middle Jurassic salt. 49 p.** <https://doi.org/10.1144/SP504-2020-43>. Free to the public through their YouTube conference **Cátedra Selecta.- James Pindell-2021.**

and from the work of the **Doctors Restrepo, J.J. & Toussaint, J.F. 2020. Tectonostratigraphic terranes in Colombia: An update. First part: Continental terranes.** In: **Gómez, J. & Mateus-Zabala, D. (editors), The Geology of Colombia, Volume 1 Proterozoic – Paleozoic. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 35, p. 37–63. Bogotá.** <https://doi.org/10.32685/pub.esp.35.2019.03>.

Logically complemented by information from studies conducted by important and recognized geoscientists described in the Bibliography, all integrated with the advanced tools of the **SCT Complex Source Theory (Edinson Alvarez 2025)**. Results of the tectonic evolution of the Gulf of Mexico, which can be observed in **Figures 3,4,5,6,7,8** for the Late Triassic period (201.3 to 210 million years ago) – Jurassic. 145 to 201.3 million years ago.

In the following tectonic-paleogeographic reconstruction, Colombia's Tertiary deformation is restored (**Similar a Pindell 1985, V. Ramos 2021**). And the stretching of the Eastern Cordillera is consistent with the location of the western margin of the superimposed volcanic arc. The configuration of the Chibcha Block of **Restrepo, J.J. & Toussaint, J.F. 2020**. Was used. All other parameters of the paleogeographic reconstruction were maintained, **Pindell et al 2020-2021**. The Late Triassic period was regenerated and/or configured based on **Pindell 1985-1992-1994-Pindell et al 2020-2021**.

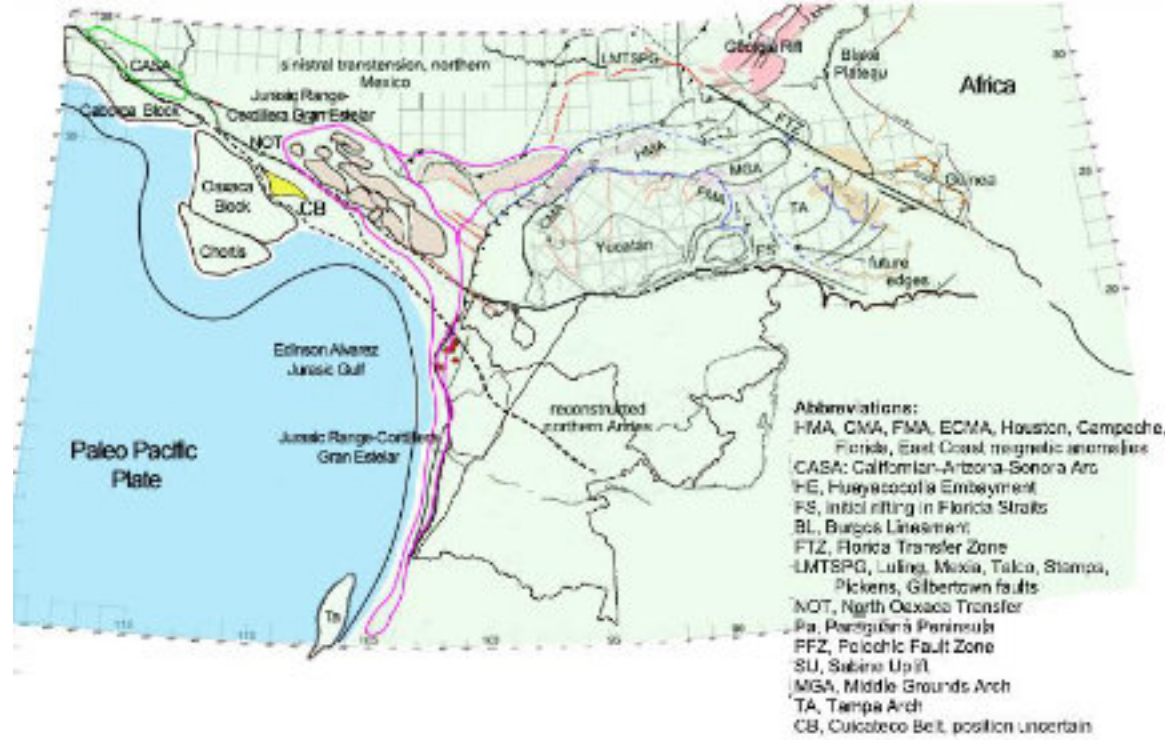
The Salt Polygon for Colombia was developed based on the work of **Ingeominas 1970-1985 y el Dr. Oswaldo Ordoñez C. 2020**. Applying an equivalent stretch towards the middle Magdalena Valley. Presal sediments are not shown in this reconstruction, nor is the Tahami (Ta)-Colombia block discussed (Part of a forthcoming edition).

Based on the analysis of the Paleogeographic Reconstruction Tectonic Evolution of the Gulf of Mexico, we begin to answer the different questions raised in the following section of Giants to Be Knocked Down.

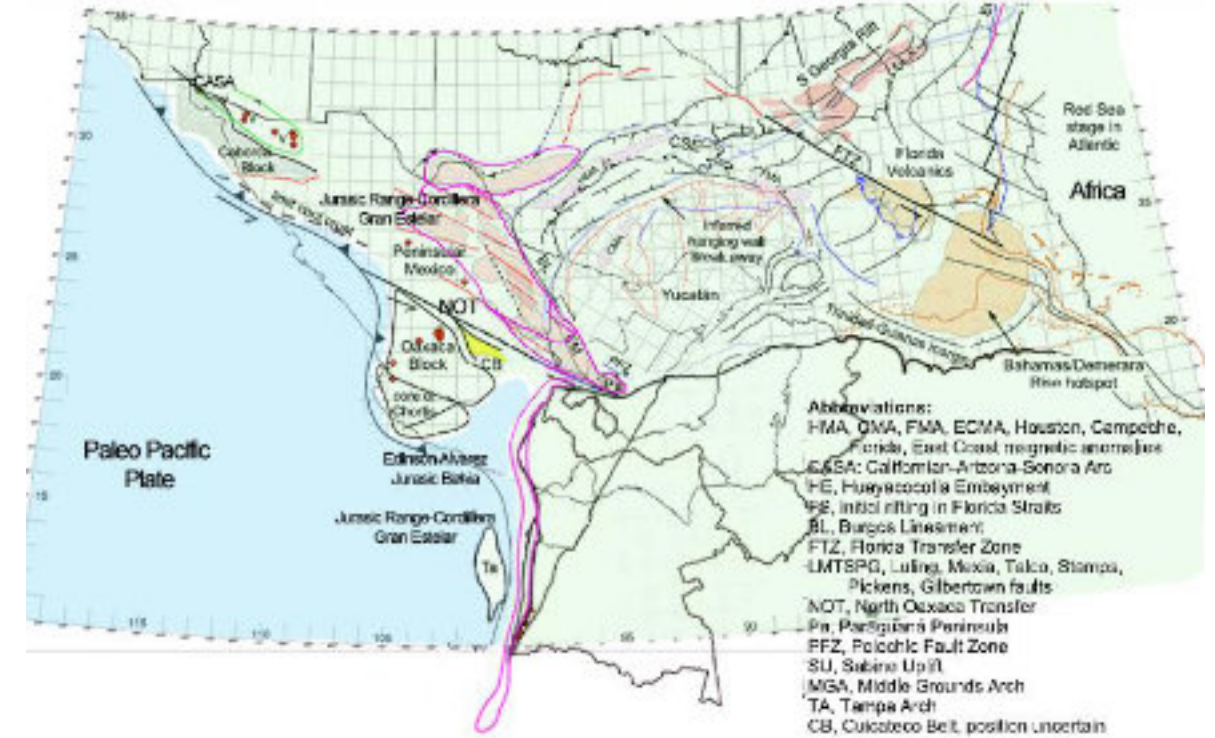
Additionally, one of the objectives of this work is to demonstrate the spatio-temporal relationship of the sedimentary deposits of the Jurassic Period of the Gulf of Mexico, with the sedimentary deposits of the same Jurassic period for the Colombian Basins, especially the Jurassic paleobasin of the Eastern Cordillera of Colombia.

**Figures 3,4,5,6,7,8, tectonic evolution of the Gulf of Mexico during the Late Triassic period (201.3 a 210 m.a.)–Jurassic. 145 a 201.3 million years ago,**

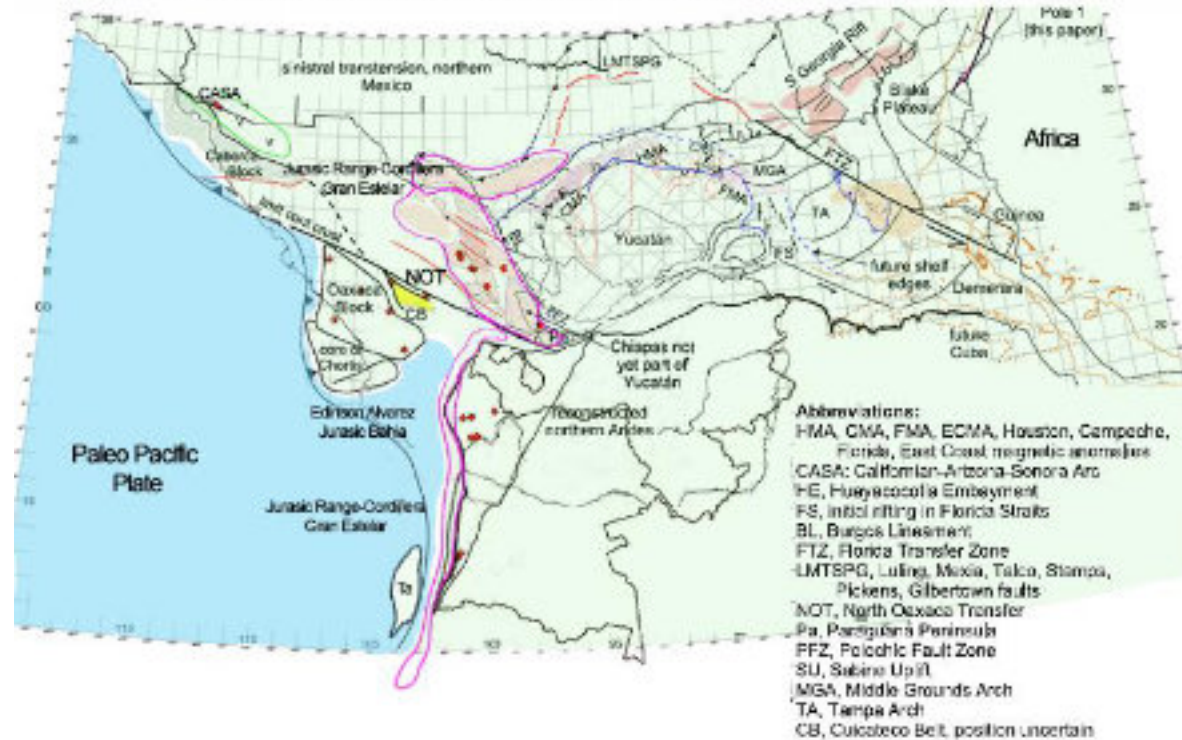
**Fig 3. Mexican Gulf Tectonic Evolution - 210-200 m.a. Late triasic-Early Jurassic**  
Edinson Alvarez-Geoscientist 2025, edinson.alvarez@gmail.com . Modified from Pindell et al 2021.



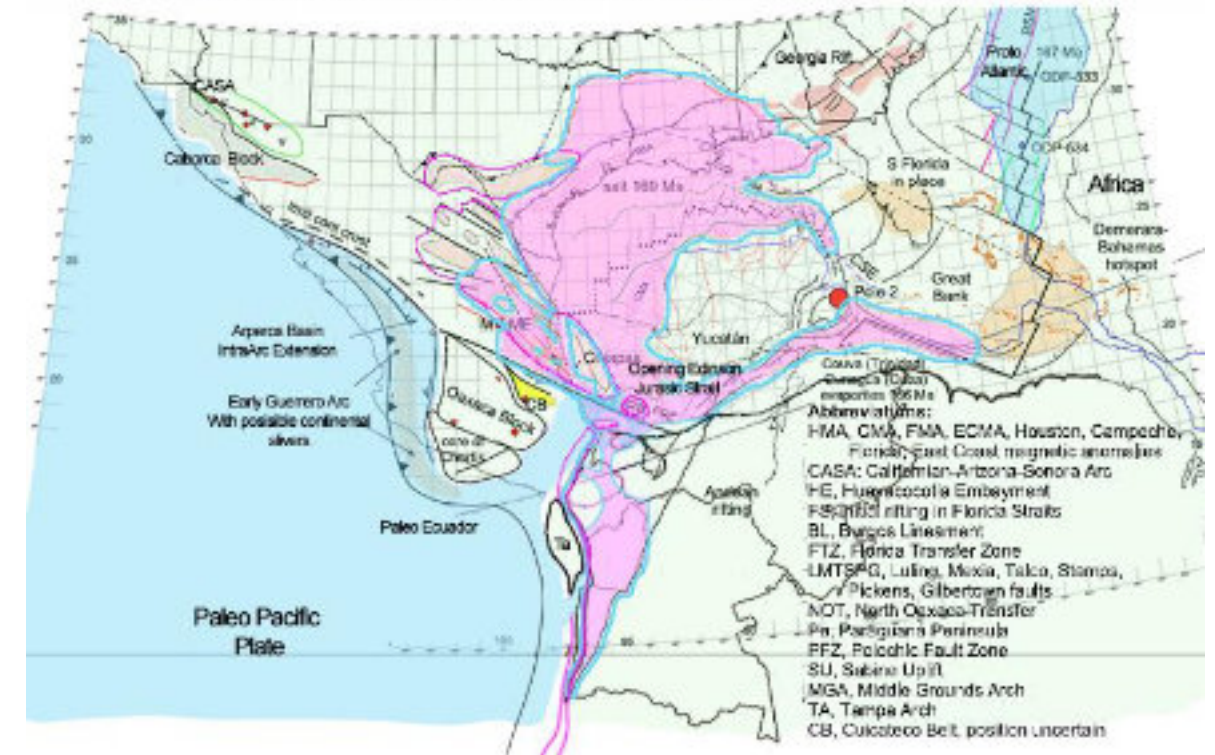
**Fig 5. Mexican Gulf Tectonic Evolution - 177 m.a. Early Jurassic**  
Edinson Alvarez-Geoscientist 2025, edinson.alvarez@gmail.com . Modified from Pindell et al 2021.



**Fig 4. Mexican Gulf Tectonic Evolution - 195 m.a. Early Jurassic**  
Edinson Alvarez-Geoscientist 2025, edinson.alvarez@gmail.com . Modified from Pindell et al 2021.



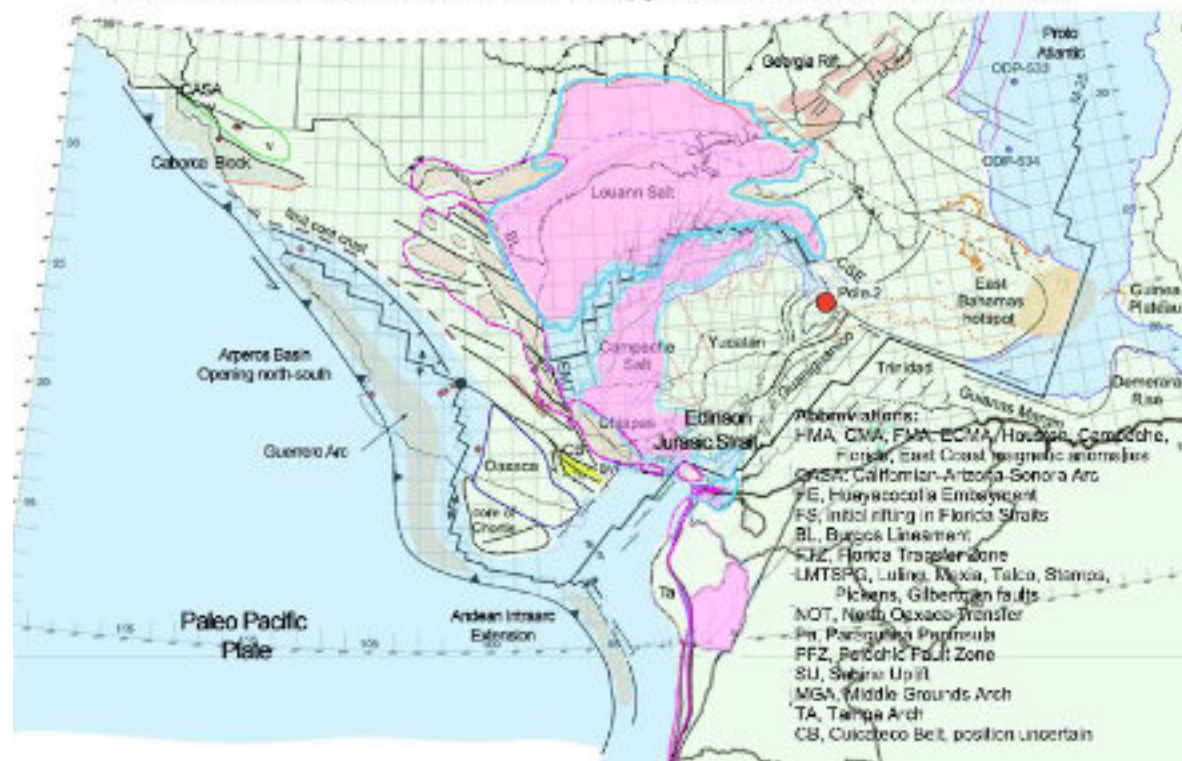
**Fig 6. Mexican Gulf Tectonic Evolution - 167 m.a. Middle Jurassic**  
Edinson Alvarez-Geoscientist 2025, edinson.alvarez@gmail.com . Modified from Pindell et al 2021.



**Fig 7. Mexican Gulf Tectonic Evolution - 159 m.a. Late Jurassic**  
Edinson Alvarez-Geoscientist 2025, edinson.alvarez@gmail.com . Modified from Pindell et al 2021.



**Fig 8. Mexican Gulf Tectonic Evolution - 154 m.a. Late Jurassic**  
Edinson Alvarez-Geoscientist 2025, edinson.alvarez@gmail.com . Modified from Pindell et al 2021.



### 3. Giants

The following are the Giants that we will demolish in this chapter. **We will refer to Giants as (Concepts, techniques, technologies, methodologies, procedures, tools, uncertainties, unresolved questions, etc.).**

**3.1 Giant No.1 ( Giant No. 8 Knocked Down this series), With more than 500 years of history, we will resolve it in the Conclusions of this work.**

This corresponds to the questions by the Spaniards who arrived in Colombia in 1525 with the founding of Santa Marta, and later their entry into the interior of the territory, founding the city of Bogotá in 1538.

**3.2 Giant No.2 ( Giant No. 9 Knocked Down in this Series):**

**Alarcón CM et al 2020.** (Alarcón CM, Clavijo-Torres J, Mantilla-Figueroa LC, Rodríguez JG. 2020).

de arcos magmáticos marginales (Rodríguez, et al., 2018). Uno de los retos actuales es la reconstrucción de la historia geológica del Jurásico en los Andes del norte, no solo desde el punto de vista geoquímico y geocronológico de las rocas plutónicas y volcánicas, sino porque deben entenderse de forma integral las relaciones del magmatismo con la formación de cuencas y la acumulación de sucesiones sedimentarias. Como lo sugieren Bayona,

**3.3 Giant No.3 (Giant No. 10 Knocked Down in this Series):**

**Mildred Del Carmen Zepeda Martinez - Tesis Doctoral UNAM. 2021**

evolución tectónica de México durante el Jurásico siguen siendo ampliamente debatidos. La dificultad en reconstruir con detalle la evolución tectónica del rift en México se debe principalmente a que resulta muy complicado identificar las fallas maestras que acomodaron la extensión continental durante el Jurásico. En efecto, los eventos tectónicos que caracterizan la historia geológica Cretácica

propuesta. Por consiguiente, el problema de traslape cortical sigue sin tener aparentemente una solución satisfactoria y aceptada de manera conjunta por la comunidad científica. A continuación, se

**3.4 Giant No.4 (Giant No. 11 Knocked Down in this Series):**

Youtube Conference **Cátedra Selecta.- James Pindell-2021** (James Pindell, Diego Villagómez, Roberto Molina-Garza, Rod Graham and Bodo Weber 2020 ).

Also, how well does a regional extension model for "Peninsular Mexico" fit the basement geology? We mentioned anatexis, mid-crustal unroofing on moderately sinistral NW-SE faults/shear zones prior to deposition, and crustal thinning to about 25 km to provide long-term accommodation for the Mesozoic section. Do these things stand up to more critical examination? Or, do we need to return to the Mojave-Sonora Megashear?

**3.5 Giant No.5** (Giant No. 12 Knocked Down in this Series):

**Filina et al 2022.** (Irina Filina, James Austin, Tony Dor'e, Elizabeth Johnson, Daniel Minguéz, Ian Norton, John Snedden, Robert J. Stern. 2022.)

1) The nature of the Triassic redbed basin preceding GoM opening - whether these units represent a successor basin to the Ouachita-Marathon orogeny or precursor rifting to GoM formation. The issue is tied to the challenge of identifying firm evidence of pre-breakup rifting, which is currently sparse compared to other rifted margins;

**3.6 Giant No.6** (Giant No. 13 Knocked Down in this Series):

**Filina et al 2022.**

2) The timing of salt deposition with respect to the Middle Jurassic seafloor spreading - specifically whether the salt predated, was synchronous with, or just postdated the initial spreading;

subdivision. Where salt exists (Fig. 2a), seismic imaging of underlying (i.e., syn-opening) sequences is difficult. Whether salt was deposited during the last stages of continental rifting, over oceanic crust, and/or concurrent with the first stages of seafloor spreading, remains unclear.

**3.7 Giant No.7** (Giant No. 14 Knocked Down in this Series):

**Filina et al 2022.**

3) Whether GoM opening was facilitated by magma-rich breakup associated with SDRs, or it was mantle poor and resulted in exhumed mantle close to the ocean-continent boundary;

**3.8 Giant No.8** (Giant No. 15 Knocked Down in this Series):

**Filina et al 2022.** (Irina Filina, James Austin, Tony Dor'e, Elizabeth Johnson, Daniel Minguéz, Ian Norton, John Snedden, Robert J. Stern. 2022.)

4) The related issue of continental restoration of pre-GoM crustal blocks. The newly mapped geological structures within and adjacent to the OCT, such as interpreted SDR complexes with adjacent presalt sedimentary basins and outer troughs, in addition to magnetic anomalies may further constrain tectonic reconstruction of the basin.

**3.9 Giant No.9** (Giant No. 16 Knocked Down in this Series):

**Pindell et al 2020-2021.**

Two unresolved issues stand out as most significant. One is the tectonic process by which the highs and lows in the top-rift unconformity were created along the west Florida margin, which records ther-

**3.10 Giant No.10** (Giant No. 17 Knocked Down in this Series):

**Pindell et al 2020-2021.** (James Pindell, Diego Villagómez, Roberto Molina-Garza, Rod Graham and Bodo Weber 2020).

Florida Peninsular Arch and hence may terminate against a poorly understood 'Florida Transfer Zone' (Erlich and Pindell 2020). The second issue

**3.11 Giant No.11** (Giant No. 18 Knocked Down in this Series):

In Colombia, the oil sector and the geoscientific world have traditionally assumed that the salt corresponds to Lower Cretaceous deposition.

**Juan Camilo Ruiz Amaya. 2021**

➤ Se propone un desacople entre la secuencia basal interpretada como Paleozoica y los pliegues observados en superficie, debido a la formación salina del Cretácico Inferior.

**3.12 Giant No.12** (Giant No. 19 Knocked Down in this Series):

**Juan Camilo Ruiz Amaya. 2021**

Un problema por resolver...

Hasta la fecha, entre la Sabana de Bogotá y el Páramo de Sumapaz no hay un modelo tectónico actualizado que tenga en cuenta las principales características del estilo estructural y proporcione argumentos para definir el rol de la sal y la cronología del plegamiento.

**Answers can be found in the Final Conclusions of this study.**

4. Spatiotemporal Relationship of Sedimentary Deposits During the Jurassic Period of the Gulf of Mexico with Respect to the Jurassic Sedimentary Deposits of the Colombian Basins.

4.1 Paleogeographic Correlation

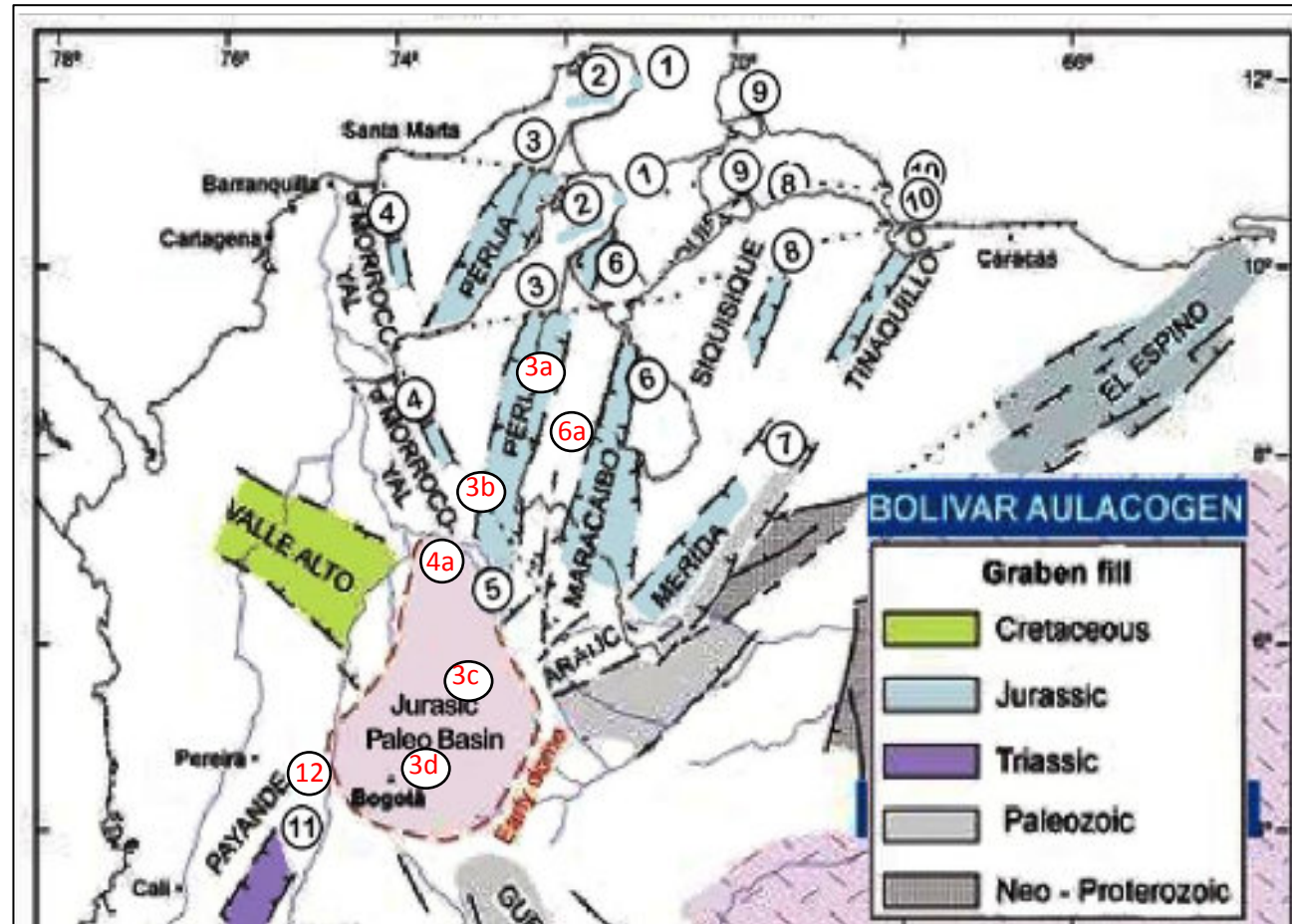


Figure 9. Approximate paleogeographic map of Colombia showing the main structures by geological age. Numbers 1 to 4 (including sub-items) correspond to Jurassic marine sedimentation. Stations 3C, 4, and 5 show erosion in the stratigraphic column during the Lower and Middle Jurassic periods. See supplementary figures 10, 11, 12, 13, 14, 15, and 16.

Figures 9 y 11. Modified from Fabio Cediél, Robert Peter Shaw 2019. (Compiled after Bartok et al. (1985), Sung Hi Choi et al. (2017), Geyer (1973), Cediél (1969), Maze (1984), Mendi et al. (2013), Schubert (1986), Leal-Mejía et al. (2018), Edinson Alvarez (2025))

4.2 Chronostratigraphic-Sedimentological Correlation

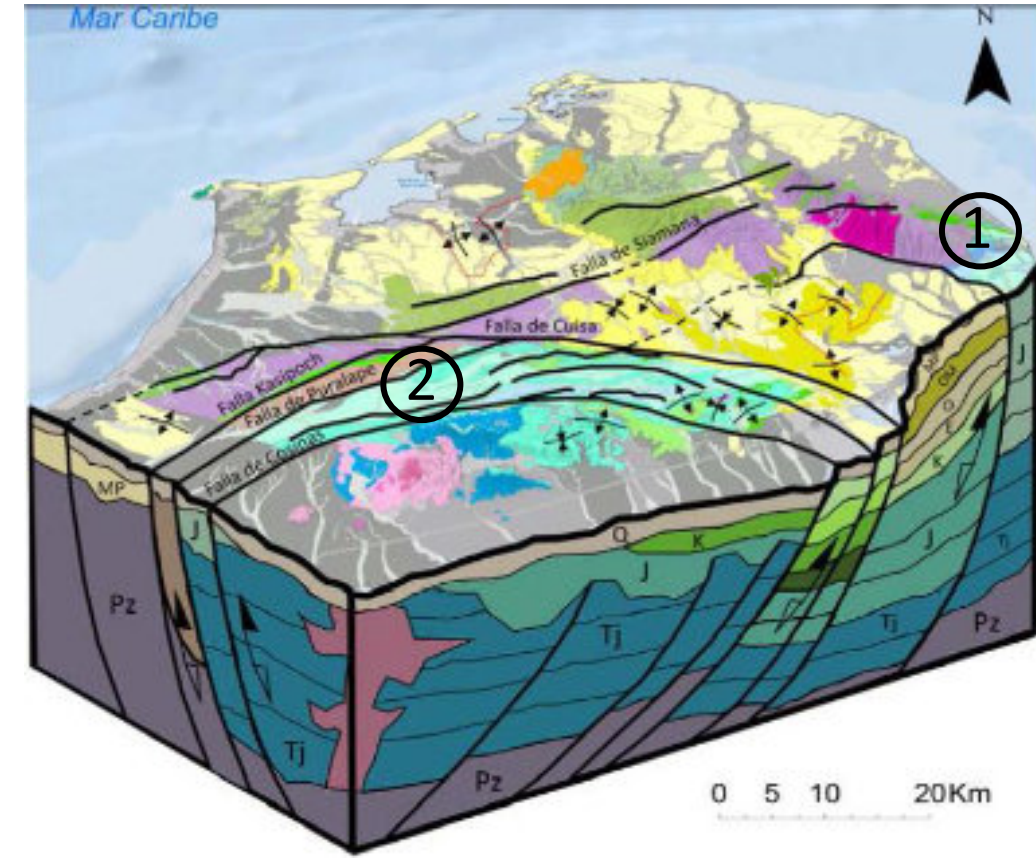


Figure 10. 3D geological map of the Guajira Peninsula, Colombia, showing Jurassic marine sedimentation. ANH-UPTC 2024. And the direction of deformation-erosion of the Jurassic deposits. 1. Serranía Macuira 2. Serranía Cosinas.

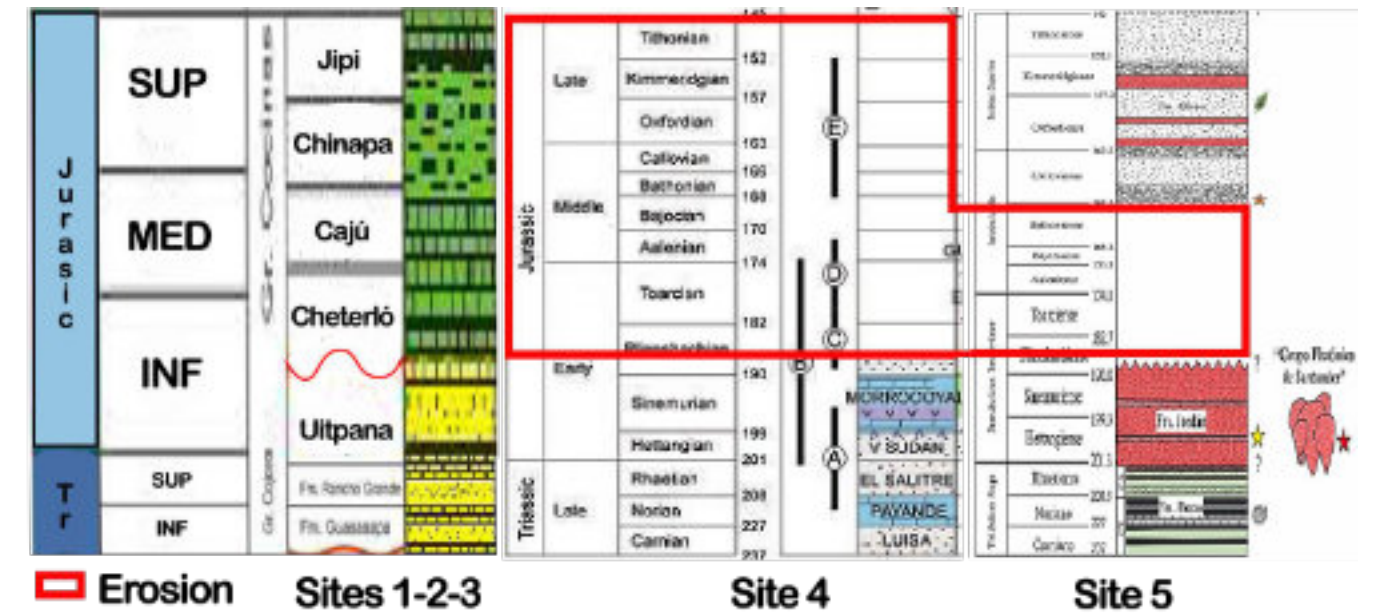
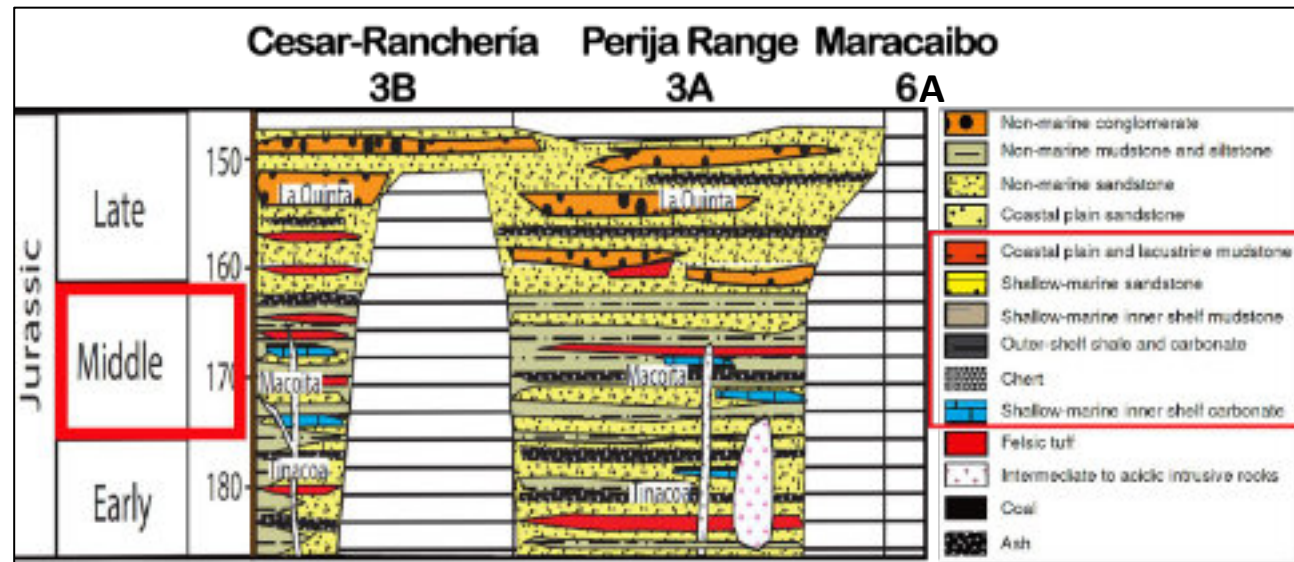
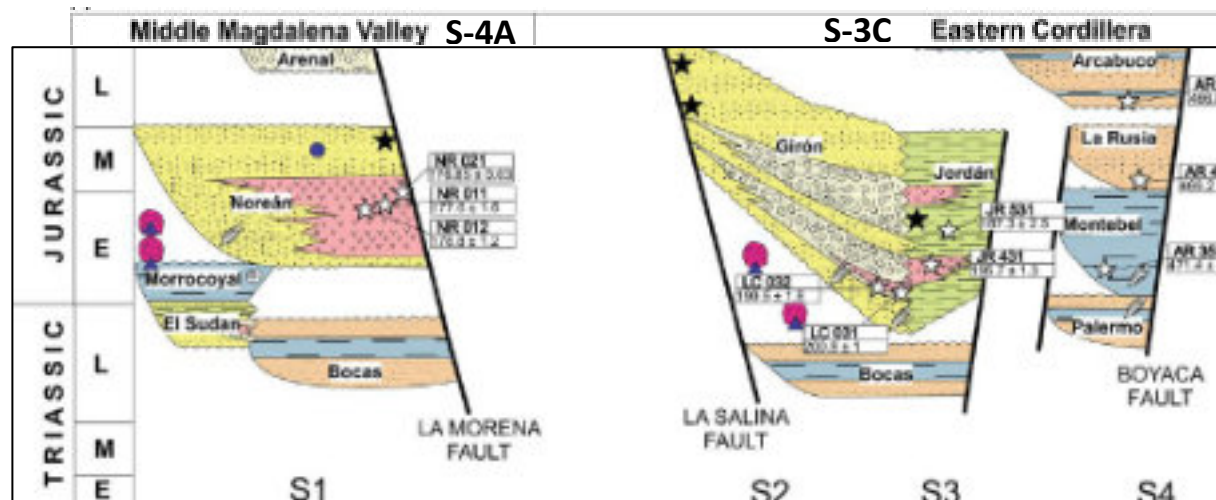


Figure 11. Stratigraphic Columns of the Triassic-Jurassic, stations 1-2-3-4-5 Sector of the Santander Massif, Sierra Nevada de Santa Marta-Guajira and Perijá, Colombia. Modified from ANH-UIS-2008, Fabio Cediél, Robert Peter Shaw 2019, Alarcon CM et al 2020. Location figures 9 and 10.



**Figura 12.** Jurassic Stratigraphic Columns, Exclusive Marine Deposition in the Middle Jurassic, Salt Deposition Time. Stations 3A-3B-6A, Location **Figure 9**. Serranía de Perijá Sector, Cesar Ranchería and Maracaibo Basin. Modified from Sanchez, Javier and Paul Mann, 2015. Stratigraphic data were compiled from Miller (1962), Forero (1970), Caceres et al. (1980), Kellogg (1984), Maze (1984), Parnaud et al. (1995), Mann et al. (2006), Vence (2008), and Ayala (2009).

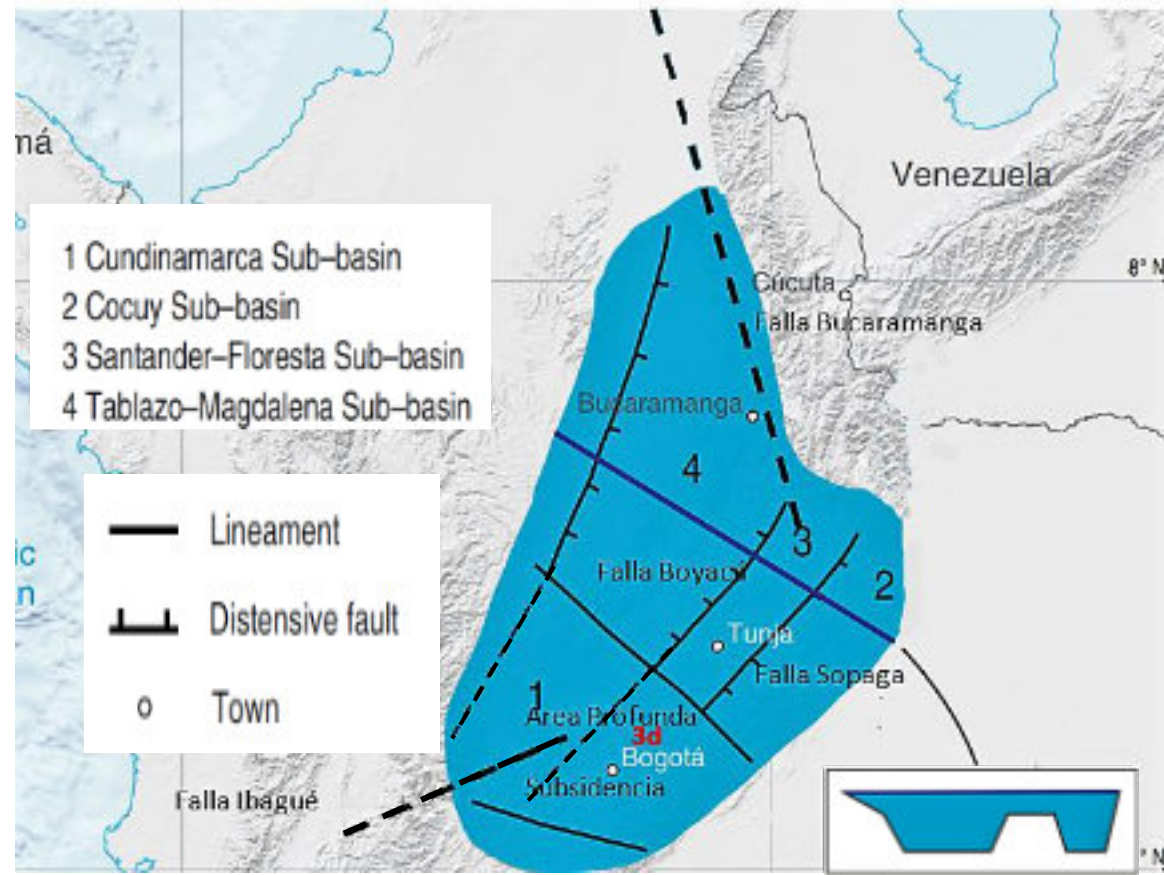


**Figura 13.** Stratigraphic Columns of the Triassic-Jurassic, stations 4A and 3C **figure 9**. Modified from Martin Reyes et al 2024 (Data compiled from Renzoni (1962), (1967), Cediél (1968), Cooper et al. (1995), Clavijo (1996), Mojica et al. (1996), Sarmiento (2001), Sarmiento-Rojas et al. (2006), Kammer and Sanchez (2006), Mora et al. (2006, 2009, 2013), Clavijo et al. (2008), Caballero et al. (2013), Horton et al. (2010, 2015), Moreno et al. (2013), Bayona et al. (2020), Rodríguez-García et al. (2020). Central Axial Zone paleobasin Eastern Cordillera of Colombia (Boyaca Fault-Soapaga Fault).

When performing the tectonic restoration of Colombia for the Jurassic period, stations 1,2,3,4,5 (**Figure 9**), Sierra Nevada de Santa Marta, Baja-Alta Guajira, Cesar Ranchería and Serranía de Perijá, descend to the height of the Gulf of Maracaibo, putting all these structures in direct contact (**Perijá Graben, Cesar Ranchería, Bucaramanga Fault, closer to the paleobasin Eastern Cordillera of Colombia**), which are proposed as corridors through which the Jurassic sea of the Pacific Ocean entered to fill the Paleobasin of the Eastern Cordillera (**Figure 9**).

From the analysis of the previous stratigraphic columns (**Figures 9, 10, 11, 12, 13**), the following conclusions can be drawn: **There were two Jurassic corridors of influx waters from the Pacific Ocean** that flowed respectively into the paleobasin of the Eastern Cordillera in Colombian territory:

1. **Marine Lower Jurassic Corridor:** Corresponding to marine deposits in locations adjacent to the western Sierra Nevada de Santa Marta, the Middle Magdalena Valley (Morrocoyal Formation), and the axial portion of the Eastern Cordillera paleobasin (Montebel Formation), locations **4-4a-3c** (**Figures 9, 11, and 13**). These deposits are capped by a late Middle Jurassic unconformity that erased or eroded the Middle Jurassic stratigraphic column. These events are related to block uplift associated with the Bucaramanga Fault, the Boyacá Fault, and the Soapaga Fault, factors that controlled Jurassic deposition in their area of influence.
2. **Marine Middle Jurassic Corridor:** This corresponds to the marine deposits of the Macoita Formation, Cheterló-Cajú-Chinapa, of the Middle Jurassic, located in the Upper Guajira, Lower Guajira, Serranía de Perijá, Cesar Ranchería corridor, extending to the Bucaramanga fault and the periphery of the paleobasin of the Eastern Cordillera of Colombia. Locations **1, 2, 3, 3a, 3b** **Figures 9, 10, 11, 12**.
3. **Figures 9, 10, 11, 12, and 13** clearly show structural control of Jurassic deposition through the arrangement of sediments on adjacent horsts and grabens in an approximately northeast-southwest direction. Within the structural highs, no deposition and/or erosion is observed, while the missing depositional sequence appears in the adjacent grabens (**Figure 12**). Note also that in **Figure 13**, a large area appears uplifted and/or eroded, leaving the presence of Lower and Middle Jurassic deposition uncertain.
4. The previous uncertainty is resolved by the deposition of the sequence at the **3d** location shown in **Figures 9, 14, and 16**. The existence of the stratigraphic sequence (**Figure 16C**) indicates that Jurassic corridors 1 and 2 were active during the Jurassic period, feeding the paleobasin of the Eastern Cordillera of Colombia, consistent with the structural orientation of the rift (horst and graben northeast-southwest direction) and the positive slope direction (greater depth and subsidence towards the Bogotá-Cundinamarca Basin area). **Figures 9 and 14**.
5. There is a possibility of a third corridor for Colombia, called the **Independent Milenar Jurassic Strait**: a rupture or strait created southwest of the Cundinamarca Basin (southwestern part of the Eastern Cordillera paleobasin) controlled by the Ibagué Fault (**Figure 14**). This corridor fed the Eastern Cordillera Jurassic paleobasin through the Ibagué Fault corridor, as shown in **Figures 9 and 14**. It most likely crossed the volcanic arc, creating the channel for water to enter the basin. However, there is no sedimentary record as such in this area, most likely due to the uplift of the Central Cordillera and subsequent erosion of the sequence. (Discussion of the Cajamarca Complex, next edition).

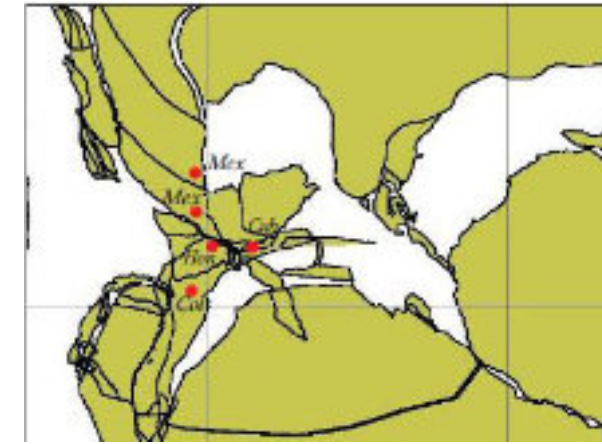


**Figure 14.** Approximation of Structural Elements of the Paleobasin of the Eastern Cordillera of Colombia. Modified from Patarroyo, P. 2020, (Without reconstruction). The blue area represents a very general outline of the paleobasin. 3d approximate location intersecting the seismic line of the **Figure 2 y 16c**.

#### 4.3 Paleontological Correlation

The known Jurassic sedimentary deposits in Colombia are primarily continental-fluvial-volcanic, poorly dated, and belong to the Girón Formation. However, the study presented by **Alarcón Gómez, C. M., et al. (Estratos-UIS-2019)** identified a new fossiliferous horizon containing the fern species \*Phleboteris polypodioides\*, identified by Pons (1982). This discovery allowed researchers to assume a Late Jurassic age for the section found in the Lebrija River. The study also indicated a wide geographic distribution of this species along the equator, with similar deposits also found in countries such as Mexico, Cuba, Honduras, and Egypt during the same period (**Figure 15**).

Although the preceding paleontological analysis corresponds to the Late Jurassic, it clearly indicates the proximity and similarity of paleoclimatic conditions between northwestern South America and southern North America (Mexico-Honduras). Providing evidence of proximity within the entire work of reconstruction and tectonic evolution of the Gulf of Mexico, a central part of this article.



**Figure 15.** Geographic distribution of the Phleboteris polypodioides fern. Modified from **Alarcón Gómez, C. M., et al. Estratos-UIS- 2019**.

#### 4.3 Morphological, Sedimentary, Chronological and Structural correlation

To complete our spectacular, wonderful and cinematic journey through the Colombian Jurassic period, we arrive at the **3d station figures 2, 9 and 16**.

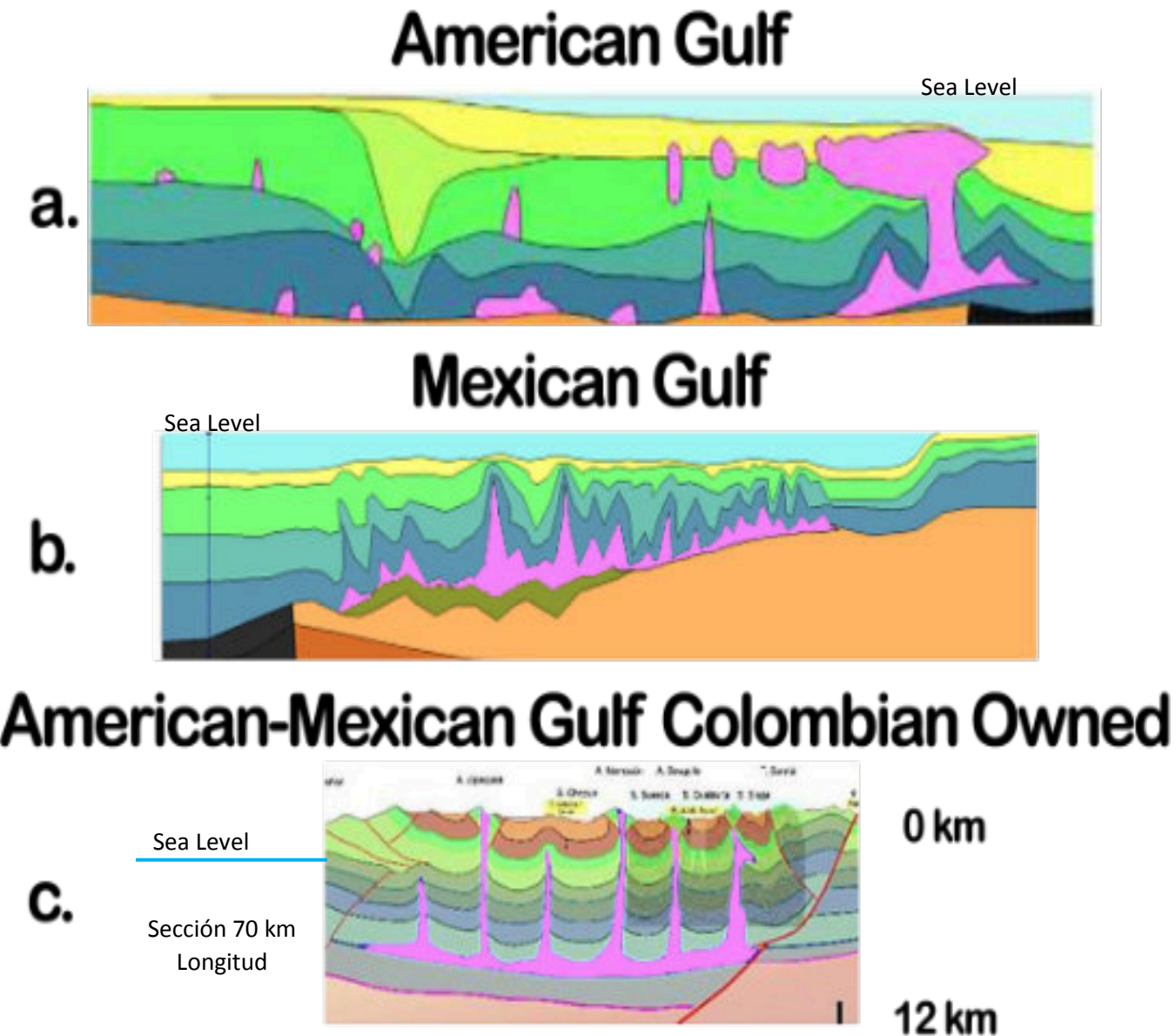
Here, all the pieces, tests, and evidence that confirm our marvelous journey come together, from the tectonic reconstruction and evolution of the Gulf of Mexico developed in **Figures 3 to 8**, with the opening of the **Edinson Strait** and the deposition of the Salt in the Middle Jurassic (**Figure 6**) both in the Gulf of Mexico and Colombia; the paleogeographic reconstruction and evolution of Colombia for the Jurassic period (**Figure 9**), which demonstrate the proximity of the main structures, the Perijá Rift, Cesar Ranchería, and the Bucaramanga Fault, to the paleobasin of the Eastern Cordillera of Colombia. The evidence of the existence of marine deposition from the Lower and Middle Jurassic (before and during the deposition of the Salt ) through these channels—the Serranía de Cosinas-Macuire (Upper and Lower Guajira), the Perijá Rift, Cesar Ranchería and the Bucaramanga, Boyacá, and Soapaga Faults (**Figures 9, 10, 11, 12, 13, 14**); Additional paleontological evidence of the proximity of the territories (**Figure 15**), culminating in the great salt deposition event in the Cundinamarca Basin (South of the Jurassic paleobasin of the Eastern Cordillera) **Figures 2, 6, 9, and 16**.

According to studies and numerical models, the salt was deposited rapidly, reaching a thickness of 3 km in one million years. **Filina et al 2022**.

It is believed that the salt was deposited very rapidly, in less than a million years (e.g., Warren, 2006). This estimate is consistent with numerical modeling of salt deposition in the South Atlantic (Montaron and Tapponnier, 2010), and also with estimates from stratigraphy of the Santos Basin, Brazil (Dias, 2005). The hypothesis of rapid deposition also matches modern rates from the few regions of current salt deposition (see Davison et al., 2012) and with the known ~640,000-year duration of up to 3 km thick Messinian salt deposition in the Mediterranean (e.g., Krijgsman et al., 1999). If GoM salt deposition was

From the analysis of the items in section 4.0 above, we can conclude that we have identified two new unexplored plays and/or petroleum systems in the Cundinamarca Basin, belonging to the Jurassic paleobasin of the Eastern Paleocordillera of Colombia.

1. **Jurassic Play:** Formed by the deposition of organic shales from the Lower Jurassic - Hypothetical **Zipa Formation** of Edinson Alvarez 2025 (Source Rock) contemporaries with Morrocoyal and Montebel formations. Interdigitated towards the edges of the Basin with detrital volcanosedimentary, slope deposits, debris flows, turbidites (Reservoir Rock) and a 3 to 4 km seal of salt deposited during the Middle Jurassic.
2. **Cretaceous play associated with salt seal:** Source Rock: Fόμεque Formation, Reservoir Rock: Une Formation, Seal Rock: Migrated Salt. The same applies to higher sequences.



**Fig. 16. Comparative Salt Structures, Depth Sediments, and Basins, American Gulf-Mexican Gulf-Cundinamarca Basin (Colombia)**  
Modified From Irina Filina and Erin Beutel. 2022. Y ANH-UPTC 2020. Location Figure 2,14-3d.

**Figure 16** is the key evidence for the previous interpretations. **The Great Chibcha Terrane of Restrepo and Toussaint (2020)** constitutes, according to this study, the westernmost part of the large continental structural escarpment of Laurentia (**Figures 1 and 3**). It is closed to the south by the **Great Rudabet Rift-Lineament System (Honor Ruben Dario Alvarez Betancourt, Father. Figure 1)**. It occupies approximately one-third of the size of the basin that gave rise to the Gulf of Mexico-Gulf of America (including the Paleobasin of the Eastern Cordillera of Colombia) during the Jurassic period. In the Bajocian-Bathonian period (170-166 Ma, Middle Jurassic), the Edinson strait opened **Figure 6**, made up of three openings **Edinson strait North, JhonEdi strait center, Floris Strait South, an optional independent Milenar Strait at southwest** from Paleobasin of the Eastern Cordillera of Colombia, where the Pacific Ocean flowed and entered to fill the paleobasins of the Gulf of Mexico (Gulf of Mexico-Gulf of America) and paleobasin of the eastern mountain range of Colombia, depositing the salt existing in the basin, key to the development and origin of the World Class petroleum systems of the Gulf of Mexico-Gulf of America.

The separation of the South American continent (Colombia-Venezuela, among others) from Laurentia continued after the aforementioned events, with the Gulf of Mexico basin and the Eastern Cordillera paleobasin taking different paths, moving away from each other. Subsequently, the incursion of the Cretaceous sea generated different events for each basin. While the Jurassic to Recent sedimentary basins remain submerged in the Gulf of Mexico, the Eastern Cordillera paleobasin developed and underwent Eocene-Miocene and subsequent uplift events, raising the sedimentary sequence 2,500 meters above sea level, with the city of Bogotá serving as a primary reference point. (**Figures 9, 14, and 16**)

To continue correlating the Gulf of America-Gulf of Mexico basins and the Paleobasin of the Eastern Cordillera of Colombia, we will review the similarity of the interpretation of the Seismic Sections made in the works of **Irina Filina and Erin Beutel. 2022. Y ANH-UPTC 2020. We can observe the following aspects that they have in common:**

- 1- Thickness of the Sedimentary Sequence 8 to 14 km ( General 10 km ) **Figura 16.**
- 2- Thickness of the salt sequence 3-4 km. (**Figura 6-16**)
- 3- Structural deformation of the salt sequence (Extending almost and in some cases the entire sedimentary sequence. For this to occur, not only is active tectonic deformation needed, but also a powerful salt deposit, in this case close to 3-4 km) **Figura 16.**
- 4- Paleogeographic point of common origin. (**Figura 1 y 3**)

**In Colombia, the oil sector and the geoscientific community have traditionally assumed that the salt corresponds to Cretaceous deposition, as shown on all chronostratigraphic maps of the country up to 2025.** However, there are several points that do not support this thesis and, on the contrary, contradict this theory, among them are:

- 1- Since the Cretaceous play is one of the most studied and drilled in the country due to the interest in its petroleum systems, there is no significant report of salt or saline deformation in the Llanos basin, Catatumbo, upper-middle Magdalena valley, Maracaibo Basin, where Cretaceous deposition was also recorded.
- 2- The Jurassic paleobasin of the Eastern Cordillera of Colombia has been little studied and almost unexplored, according to **ANH-UPTC 2020.**

La cuenca Cordillera Oriental es una de las cuencas frontera colombianas que mayor interés exploratorio a generado a lo largo de los últimos 25 años. Este interés condujo al descubrimiento de hidrocarburos en los campos Gibraltar, Bolívar, Corrales y Guando. Sin embargo a pesar de estos campos con producción comercial teniendo en cuenta el tamaño de la cuenca, la cantidad de sísmica disponible y el número de pozos exploratorios se trata de una provincia geológica inexplorada.

3- The few wells drilled in the Eastern Cordillera basin of Colombia mostly only reach the Cretaceous sequence, leaving the Jurassic record unknown. This is especially true in the Cundinamarca basin.

The existence of the aforementioned phenomenon regarding Jurassic salt in Colombia is not merely anecdotal, but has an impact that has not been widely related and studied on the **Petroleum, Mining, and Social Systems of the area.**

#### Implications of Jurassic Salt in Colombia's Petroleum, Mining, and Social Systems.

#### Implications of Jurassic Salt in Petroleum Systems.

Having demonstrated in this article the origin of the salt existing in the stratigraphic sequence of the Eastern Cordillera of Colombia, the following impacts are generated.

We can conclude that we have identified two new unexplored plays and/or petroleum systems in the Cundinamarca Basin, belonging to the Jurassic paleobasin of the Eastern Paleocordillera of Colombia.

1. **Jurassic Play:** Formed by the deposition of organic shales from the Lower Jurassic - Hypothetical **Zipa Formation** of Edinson Alvarez 2025 (Source Rock) contemporaries with Morrocoyal and Montebel formations. Interdigitated towards the edges of the Basin with detrital volcanosedimentary, slope deposits, debris flows, turbidites (Reservoir Rock) and a 3 to 4 km seal of salt deposited during the Middle Jurassic.
2. **Cretaceous play associated with salt seal:** Source Rock: Fόμεque Formation, Reservoir Rock: Une Formation, Seal Rock: Migrated Salt. The same applies to upper sequences.

#### Implications of Jurassic Salt for Mining Systems

Salt has been important since pre-Hispanic times for the development of indigenous cultures and later during the colonial period after the Spanish conquest. Few salt mines are currently operational, and most are not technologically advanced. Salt springs are abundant in the eastern mountain range basin.

But the most notable and worthy fact in this article is the role of salt and its participation in the mixing of hydrothermal fluids that gave rise to the eastern (Cretaceous age) and western (Oligocene age) emerald belts of the Eastern Cordillera of Colombia (age debate) (**Andres M. Ravelo 2020**). According to **Andres M. Ravelo (2020)**, some trace elements, such as the V/Cr ratio, and trace elements like Fe, Na, and Mg, help differentiate the beauty, color, and brilliance of Colombian emeralds. (Sodium is probably contributed by salt, among other minerals.) This distinguishes Colombian emeralds from others around the world. (**Figure 17**. Fura, one of the largest rough emeralds in the world - Muzo - Boyacá, Colombia. Tablazo Sub-basin, **Figure 14**).



**Figure 17.** Fura, one of the largest rough emeralds in the world - Muzo - Boyacá, Colombia. Taken from <https://www.lasZorillas.co/el-dia-en-que-victor-carranza-encontro-a-fura-una-de-las-esmeraldas-mas-grandes-del-mundo/#>

#### Implications of Jurassic Salt in Social Systems.

The largest and most important salt dome in Colombia, located in the city of Zipaquirá, Cundinamarca, houses the **underground Salt Church**, one of the most important in the world. **In 2024, it received over 700,000 tourists.** (**Figure 18**. Note from the newspaper El Tiempo, 2025; **Figure 19**. Facilities of the Zipaquirá Salt Church). It is boosting the economy of the region and the country.



**Figure 18.** Record number of tourists visit the Salt Church of Zipaquirá. Article from El Tiempo newspaper, 2025.

<https://www.eltiempo.com/hogota/mas-de-700-000-turistas-visitaron-la-catedral-de-sal-de-zipaquirá-en-el-2024-3415793>



**Figure 19.** Facilities of the Salt Church of Zipaquirá. Taken from <https://www.catedraldesal.gov.co/>.

## DISCUSSION

This work unlocks several existing limitations in the geoscientific world related to the tectonic evolution of one of the main oil sources in the world, the Gulf of Mexico (Gulf of America-Gulf of Mexico) and in parallel the Jurassic petroleum system of the Colombian basins.

One of the main geological features is **the discovery of the Rudabet Great Fault System-Lineament (Honor to Ruben Dario Alvarez Betancourt (Father), Figures 1 and 3)**. This system controls the base of the large continental structural scarp of Laurentia (**Figure 3**). This discovery helps resolve several contemporary questions, which are central to this study, and which address uncertainties raised by leading geoscientists worldwide.: **James Pindell, Diego Villagómez, Roberto Molina-Garza, Rod Graham and Bodo Weber 2020-2021; Mildred Del Carmen Zepeda Martinez - Tesis Doctoral UNAM. 2021; Alarcón CM, Clavijo-Torres J, Mantilla-Figueroa LC, Rodríguez JG.2020; Irina Filina, James Austin, Tony Dor´e, Elizabeth Johnson, Daniel Minguez, Ian Norton, John Snedden , Robert J. Stern. 2022. And others.** This feature demonstrates that the **Restrepo and Toussaint 2020 Chibcha Terrane constitutes**, according to this study, the westernmost part of the large Laurentian structural escarpment (**Figure 3**). It occupies approximately one-third of the size of the basin that gave rise to the Gulf of Mexico-Gulf of America (including the Paleobasin of the Eastern Cordillera of Colombia) during the Jurassic period.

Although improvements, refinements, and modifications can be made to the proposal presented in this study, the fact remains that the perfect tie up obtained through **the Rudabet Fault-Lineament System (Honor Ruben Dario Alvarez Betancourt-Father., Figures 1 and 3)** is and will be the starting point for future reconstructions of tectonic evolution forward or backward from this tie-down point or constraint in geological time. The issue that still warrants review is determining whether this tie-down point corresponds to the 200 Ma age of the Dr. Pindell et al. 2020-2021 model, or to a slightly earlier age between 200 and 210 Ma. This would require considering the travel velocities of the Chortis-Oaxaca blocks and their implications for past reconstructions, a topic beyond the scope of this work.

In Colombia, the oil sector and the geoscientific community have traditionally assumed that the salt corresponds to Cretaceous deposition, as shown on all chronostratigraphic maps of the country up to 2025. However, there are several points that do not support this thesis and, on the contrary, contradict this theory, among them are:

- 1- Since the Cretaceous play is one of the most studied and drilled in the country due to the interest in its petroleum systems, there is no significant report of salt or saline deformation in the Llanos basin, Catatumbo, upper-middle Magdalena valley, Maracaibo Basin, where Cretaceous deposition was also recorded.

- 2- The Jurassic paleobasin of the Eastern Cordillera of Colombia has been little studied and almost unexplored, according to **ANH-UPTC 2020**.
- 3- The few wells drilled in the Eastern Cordillera basin of Colombia mostly only reach the Cretaceous sequence, leaving the Jurassic record unknown. This is especially true in the Cundinamarca basin.
- 4- The analysis of the facts, indications, evidence, and previous records clearly shows us that while the Cretaceous transgression to the South American continent has been widely studied and analyzed, we find that the entry of the sea or flooding into the territory was extensive and massive, that is, there was direct communication with the open sea, therefore there were normal salinity conditions unsuitable for the deposition of salt.. While the analysis of the facts, clues, evidence, and records provided in this work demonstrates that during the Middle Jurassic period (**Bajocian-Bathonian, 166-170 Ma**), the Naza Arch of Mexico was in collision with the northwestern corner of South America (Gondwana), breaking the Jurassic Great Estelar Ridge, creating the Edinson Strait (Edinson Strait-Noth, JhonEdi Strait-Center, and Floris Strait-South) entering the Pacific Ocean to flood the Gulf of Mexico (Gulf of America and Gulf of Mexico), also flooding the paleobasin of the Eastern Cordillera of Colombia, **Demonstrated by the marine corridors of the lower and middle Jurassic, defined from the stratigraphic columns 1,2,3,3a,3b,3d and 3d; 4, 4a, 3c, (later eroded), Figures 6,9,10,11,12,13,14,15,16.** This generated a restricted flow of seawater, causing low circulation and therefore hypersalinity, which, combined with the large extent of the Basin and the high atmospheric conditions of high temperatures, favored the rapid deposition of salt. (**Filina et al 2022**), which reached a thickness of 3 to 4 km. **We can clearly conclude that the salt from the Eastern Cordillera of Colombia is part of the same environment, time and conditions as those that formed in the Gulf of Mexico during the Middle Jurassic.**

The integration of knowledge developed through the Complex Source Theory (CST) and its various advanced tools allows us to shed light on and answer all the questions that, for more than five hundred years (the Spanish Conquest era) and one hundred years (the contemporary era), have troubled geoscientists and petroleum explorers regarding the tectonic, sedimentary, stratigraphic, and structural evolution of the Gulf of Mexico (Gulf of America-Gulf of Mexico and the paleo-Eastern Cordillera of Colombia). **Figures 1 to 16. (The same treatment has been applied to all other oil and mining basins in Colombia.)**

The answers become logical, simple, and gain value in light of Complex Source Theory (CST) and its tools, as you will see in the concluding part of this study.

**If your company faces a highly complex geoscientific problem with significant economic implications, Complex Source Theory (CST) and its tools are here to solve it.** For a more detailed analysis and solution to complex tectonic, structural, and stratigraphic problems, please consult with the author of this article.

**CONCLUSION**

The SCT Complex Source Theory and its advanced tools demonstrate their value in this report, contributing to the knowledge and understanding of the tectonic evolution of the Gulf of Mexico (Gulf of America-Gulf of Mexico and the Paleobasin of the Eastern Cordillera of Colombia) during the Jurassic Period. This contributes to geoscientific knowledge and development, which will help guarantee the country's energy, economic, and social sustainability.

Through this analysis, we have demonstrated how the SCT's postulates have been corroborated and proven over time, revealing their predictive power. And in this article, dedicated to Miguel de Cervantes Saavedra and his work, **we verify the demolition of twelve (12) giants in the field (we will refer to giants as: concepts, techniques, technologies, methodologies, procedures, tools, uncertainties, unanswered questions, etc.).**

**Giant No.1** ( Giant No. 8 Knocked Down from this series ):

This corresponds to the question the Spanish posed to the Indigenous people of the Colombian interior (Sabana de Bogotá) about the origin of the salt they traded in the region, given the absence of a nearby sea. **The Indigenous people's response** at the time was: (It comes from Mother Earth, from the interior of the Earth). **The scientific answer after 500 years of history by Edinson Alvarez-Geoscientist:** It comes from the marine deposition of the Gulf of Mexico (including the Gulf of America, Gulf of Mexico and Paleobasin of the Eastern Cordillera of Colombia), deposited in the Middle Jurassic period (Bajocian-Bathonian, 166-170 Ma).

**Giant No.2** ( Giant No. 9 Knocked Down from this series ):

**Alarcón CM et al 2020.** (Alarcón CM, Clavijo-Torres J, Mantilla-Figueroa LC, Rodríguez JG. 2020).

de arcos magmáticos marginales (Rodríguez, et al., 2018). Uno de los retos actuales es la reconstrucción de la historia geológica del Jurásico en los Andes del norte, no solo desde el punto de vista geoquímico y geocronológico de las rocas plutónicas y volcánicas, sino porque deben entenderse de forma integral las relaciones del magmatismo con la formación de cuencas y la acumulación de sucesiones sedimentarias. Como lo sugieren Bayona,

**Answer:** The spatio-temporal relationship of subduction processes, the generation of volcanic-plutonic arcs, rifting, and basin filling and deposition is largely clarified, providing the general framework for subsequent and prior processes in the tectono-stratigraphic formation and evolution of Mexican, American, and Colombian basins during the Jurassic Period and part of the Late Triassic. (For further details regarding the events and implications in the oil, gas, and mining exploration cycle, consult the author of this article.)

**Giant No.3** ( Giant No. 10 Knocked Down from this series ):

**Mildred Del Carmen Zepeda Martinez - Tesis Doctoral UNAM. 2021**

evolución tectónica de México durante el Jurásico siguen siendo ampliamente debatidos. La dificultad en reconstruir con detalle la evolución tectónica del rift en México se debe principalmente a que resulta muy complicado identificar las fallas maestras que acomodaron la extensión continental durante el Jurásico. En efecto, los eventos tectónicos que caracterizan la historia geológica Cretácica

propuesta. Por consiguiente, el problema de traslape cortical sigue sin tener aparentemente una solución satisfactoria y aceptada de manera conjunta por la comunidad científica. A continuación, se

**Answer:** With this new proposal by **Dr. Edinson Alvarez (2025) (Modified from Pindell et al. (2020-2021))**, not only is the problem of crustal overlap between Mexico and Colombia (Laurentia-Gondwana) resolved, but a large number of questions related to the structural and stratigraphic tectonic evolution of the Gulf of Mexico during the Jurassic period are also answered. (For further details about the events and implications in the O&G&M exploration cycle, consult the author of this article.)

**Giant No.4** ( Giant No. 11 Knocked Down from this series ):

Youtube Conference **Cátedra Selecta.- James Pindell-2021** (James Pindell, Diego Villagómez, Roberto Molina-Garza, Rod Graham and Bodo Weber 2020 ).

Also, how well does a regional extension model for "Peninsular Mexico" fit the basement geology? We mentioned anatexis, mid-crustal unroofing on moderately sinistral NW-SE faults/shear zones prior to deposition, and crustal thinning to about 25 km to provide long-term accommodation for the Mesozoic section. Do these things stand up to more critical examination? Or, do we need to return to the Mojave-Sonora Megashear?

**Answer:** Regarding the question posed by **Dr. Pindell et al. (2020-2021)**, the answer is Adopt this new model with the corresponding adjustments, which resolves the majority of questions existing in the geoscientific community, as demonstrated by the supporting evidence of this research study. (For further details regarding the events and implications in the oil, gas, and mining exploration cycle, please consult the author of this article.)

**Giant No.5** ( Giant No. 12 Knocked Down from this series):

**Filina et al 2022.** (Irina Filina, James Austin, Tony Dor'e, Elizabeth Johnson, Daniel Minguez, Ian Norton, John Snedden, Robert J. Stern. 2022.)

1) The nature of the Triassic redbed basin preceding GoM opening - whether these units represent a successor basin to the Ouachita-Marathon orogeny or precursor rifting to GoM formation. The issue is tied to the challenge of identifying firm evidence of pre-breakup rifting, which is currently sparse compared to other rifted margins;

**Answer:** The Triassic Redbed Deposits are related to the two events mentioned: the final stages of the Ouachita-Marathon Orogeny and the opening of the Gulf of Mexico. (For further details about the events and implications for the oil, gas, and mineral exploration cycle, please consult the author of this article.)

**Giant No.6** ( Giant No. 13 Knocked Down from this series):

**Filina et al 2022.**

2) The timing of salt deposition with respect to the Middle Jurassic seafloor spreading - specifically whether the salt predated, was synchronous with, or just postdated the initial spreading;

subdivision. Where salt exists (Fig. 2a), seismic imaging of underlying (i.e., syn-opening) sequences is difficult. Whether salt was deposited during the last stages of continental rifting, over oceanic crust, and/or concurrent with the first stages of seafloor spreading, remains unclear.

**Answer:** The solution to this problem is called the **EAST-P Method-Tool of the SCT (Processing and Seismic Treatment, Edinson Alvarez, 2025)**, which has been used to solve complex structural tectonic problems where seismic imaging is poor, to bad quality. See Articles 2 and 3 of this series. (For further details about the events and implications in the O&G&M exploration cycle, consult the author of this article.)

**Giant No.7** ( Giant No. 14 Knocked Down from this series):

**Filina et al 2022.**

3) Whether GoM opening was facilitated by magma-rich breakup associated with SDRs, or it was mantle poor and resulted in exhumed mantle close to the ocean-continent boundary;

**Answer:** The initial opening phase of the Gulf of Mexico was Magma-Poor type, migrating to a Magma-Rich type event, with the continuous generation of oceanic crust, ending with the termination of the mantle feeder at the end of the Jurassic-Early Cretaceous. (For more details about the events and implications in the oil, gas, and mining exploration cycle, consult the author of this article.)

**Giant No.8** ( Giant No. 15 Knocked Down from this series):

**Filina et al 2022.**

4) The related issue of continental restoration of pre-GoM crustal blocks. The newly mapped geological structures within and adjacent to the OCT, such as interpreted SDR complexes with adjacent presalt sedimentary basins and outer troughs, in addition to magnetic anomalies may further constrain tectonic reconstruction of the basin.

**Answer:** Multiple authors and proposals for the location of blocks, the basis for reconstructing the tectonic evolution of the Gulf of Mexico, have been published; however, none is definitive, as they lack sufficient evidence to prevail over the others. This paper provides a solution to this problem, which has preoccupied geoscientists worldwide for over 100 years. (For further details regarding the events and implications of the oil, gas, and mineral exploration cycle, please consult the author of this article.)

**Gigante No.9** ( Giant No. 16 Knocked Down from this series):

**Pindell et al 2020.**

Two unresolved issues stand out as most significant. One is the tectonic process by which the highs and lows in the top-rift unconformity were created along the west Florida margin, which records ther-

**Answer:** The tectonic reconstruction in **Figures 3, 4, and 5** reveals the mechanism that triggered the development of these structures. (For further details on the events and implications of the oil, gas, and mining exploration cycle, please consult the author of this article.)

**Giant No.10** ( Giant No. 17 Knocked Down from this series):

**Pindell et al 2020.** (James Pindell, Diego Villagómez, Roberto Molina-Garza, Rod Graham and Bodo Weber 2020)

Florida Peninsular Arch and hence may terminate against a poorly understood 'Florida Transfer Zone' (Erlich and Pindell 2020). The second issue

**Answer:** In the tectonic reconstruction of **Figures 3, 4, 5**, one can better understand how Florida Transformation Zones (FTZ) work. (For further details about the events and implications in the O&G&M exploration cycle, consult the author of this article).

**Giant No.11** ( Giant No. 18 Knocked Down from this series):

**Juan Camilo Ruiz Amaya. 2021**

Se propone un desacople entre la secuencia basal interpretada como Paleozoica y los pliegues observados en superficie, debido a la formación salina del Cretácico Inferior.

In Colombia, the oil sector and the geoscientific community have traditionally assumed that the salt corresponds to Cretaceous deposition, as shown on all chronostratigraphic maps of the country up to 2025.

**Answer:** The analysis of the facts, indications, evidence, and previous records clearly shows us that while the Cretaceous transgression to the South American continent has been widely studied and analyzed, we find that the entry of the sea or flooding into the territory was extensive and massive, that is, there was direct communication with the open sea, therefore there were normal salinity conditions unsuitable for the deposition of salt.. While the analysis of the facts, clues, evidence, and records provided in this work demonstrates that during the Middle Jurassic period (**Bajocian-Bathonian, 166-170 Ma**), the Naza Arch of Mexico was in collision with the northwestern corner of South America (Gondwana), breaking the Jurassic Great Estelar Ridge, creating the Edinson Strait ( Edinson Strait-North, JhonEdi Strait–Center, and Floris Strait-South) entering the Pacific Ocean to flood the Gulf of Mexico (Gulf of America and Gulf of Mexico), also flooding the paleobasin of the Eastern Cordillera of Colombia, **Demonstrated by the marine corridors of the lower and middle Jurassic, defined from the stratigraphic columns 1,2,3,3a,3b,3d and 3d; 4, 4a, 3c (later eroded), Figures 6,9,10,11,12,13,14,15,16.** This generated a restricted flow of seawater, causing low circulation and therefore hypersalinity, which, combined with the large extent of the Basin and the high atmospheric conditions of high temperatures, favored the rapid deposition of salt. (**Filina et al 2022**), which reached a thickness of 3 to 4 km. **We can clearly conclude that the salt from the Eastern Cordillera of Colombia is part of the same environment, time and conditions as those that formed in the Gulf of Mexico during the Middle Jurassic.** (For further details about the events and implications in the O&G&M exploration cycle, consult the author of this article).

**Giant No.12** ( Giant No. 19 Knocked Down from this series):

**Juan Camilo Ruiz Amaya. 2021**

Un problema por resolver...

Hasta la fecha, entre la Sabana de Bogotá y el Páramo de Sumapaz no hay un modelo tectónico actualizado que tenga en cuenta las principales características del estilo estructural y proporcione argumentos para definir el rol de la sal y la cronología del plegamiento.

**Answer:** This study lays the groundwork for understanding the Sumapaz and Bogotá Savannah areas, which are key to reconstructing the area's tectonic model. (For further details about the events and implications of the oil, gas, and mining exploration cycle, please consult the author of this article.)

All of the above, integrated, can be applied to the following problem basins, reported by Dr. **Filina et al 2022.**

Furthermore, there are many other sediment-filled extensional basins around the world that need to be better understood, such as the Caspian Sea, the Black Sea, the Aleutian Basin, the Baltic Sea, and the Sea of Japan. The approach of combining the perspectives of both in-

The existence of the above phenomenon is not only anecdotal, but has an impact that has not been widely related and studied **on the Petroleum, Mining, and Social Systems of the area.**

#### **Implications of Jurassic Salt in Petroleum Systems.**

We can conclude that we have identified two new unexplored plays and/or petroleum systems in the Cundinamarca Basin, belonging to the Jurassic paleobasin of the Eastern Cordillera of Colombia.

1. **Jurassic Play:** Formed by the deposition of organic shales from the Lower Jurassic - Hypothetical **Zipa Formation** of Edinson Alvarez 2025 (Source Rock) contemporaries with Morrocoyal and Montebel formations. Interdigitated towards the edges of the Basin with detrital volcanosedimentary, slope deposits, debris flows, turbidites (Reservoir Rock) and a 3 to 4 km seal of salt deposited during the Middle Jurassic.
2. **Cretaceous play associated with salt seal:** Source Rock: Fόμεque Formation, Reservoir Rock: Une Formation, Seal Rock: Migrated Salt. The same applies to upper sequences.

### Implications of Jurassic Salt for Mining Systems

Salt has been important since pre-Hispanic times for the development of indigenous cultures and later during the colonial period after the Spanish conquest. Few salt mines are currently operational, and most are not technologically advanced. Salt springs are abundant in the eastern mountain range basin.

But the most notable and worthy fact in this article is the role of salt and its participation in the mixing of hydrothermal fluids that gave rise to the eastern (Cretaceous age) and western (Oligocene age) emerald belts of the Eastern Cordillera of Colombia (age debate) (Andres M. Ravelo 2020). According to Andres M. Ravelo (2020), some trace elements, such as the V/Cr ratio, and trace elements like Fe, Na, and Mg, help differentiate the beauty, color, and brilliance of Colombian emeralds. (Sodium is probably contributed by salt, among other minerals.) This distinguishes Colombian emeralds from others around the world. (Figure 17. Fura, one of the largest rough emeralds in the world - Muzo - Boyacá, Colombia. Tablazo Sub-basin, Figure 14).

### Implications of Jurassic Salt in Social Systems.

The largest and most important salt dome in Colombia, located in the city of Zipaquirá, Cundinamarca, houses the **underground Salt Church**, one of the most important in the world. In 2024, it received over **700,000 tourists**. (Figure 18. Note from the newspaper El Tiempo, 2025; Figure 19. Facilities of the Zipaquirá Salt Church). It is boosting the economy of the region and the country.

This methodology is also applicable to complex areas such as pre-salt belts, the Gulf of Mexico, Gulf of America, Brazilian coast, African coast, Mediterranean, the coasts of Alaska and Canada, the mountain ranges and foothills of the Rocky Mountains, Andes, Atlas Mountains, Himalayas, and the Arabian Peninsula, among others, as well as areas of low or minimal tectonic structural complexity. **It also helps increase production in complex reservoirs by confirming and refining the geological and geomechanical models of reservoirs that present this problem of double or even triple interpretations and models.**

Some of the tools of the SCT Complex Source Theory, such as the SCT EAST-P method, were proposed to Ecopetrol in April 2024, for a value comparable to the transactions of large technology companies. This value logically exceeded the company's economic and financial capacity; **therefore, we invite to @Pötus, Forbes List and giant Companies to participate in this development.**

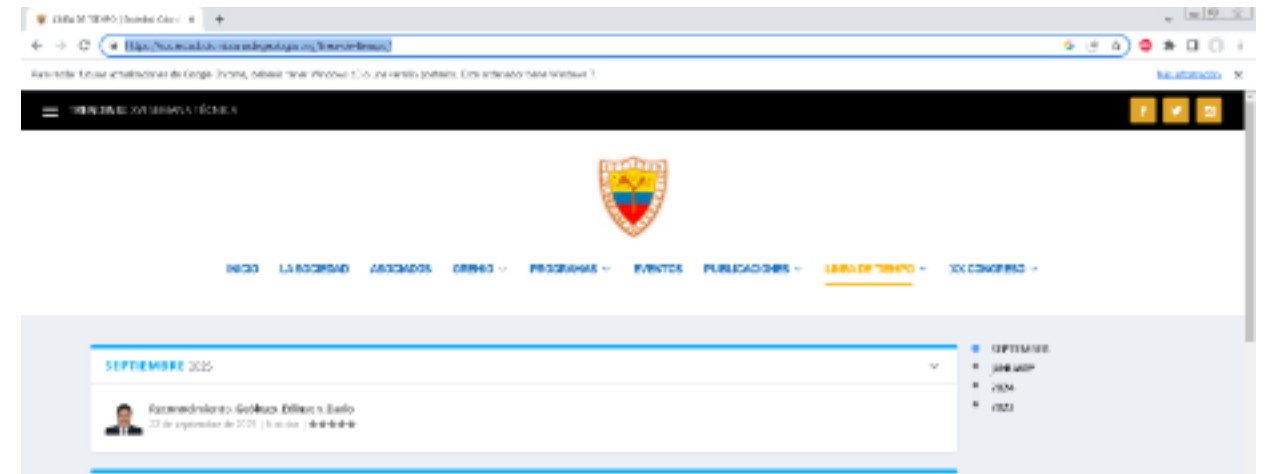
Analysis of the technical support has deserved him recognition for his contributions to geoscientific knowledge of Colombia by important personalities and entities..(Maya journal of geosciences September edition 2025, pag. 154, Art-1/10 ), <https://revistamaya.com/wp-content/uploads/2025/08/Revista-Maya-Geociencias-Septiembre-2025.pdf>.

Article-2(Páginas-37-47): <https://revistamaya.com/wp-content/uploads/2025/09/Revista-Maya-Geociencias-EDICION-ESPECIAL-XXV-2025.pdf>.

Article-3(páginas-76-98):<https://revistamaya.com/wp-content/uploads/2025/10/Revista-Maya-Geociencias-EDICION-ESPECIAL-XXVI-2025.pdf>

Article-4(páginas-169-180): <https://revistamaya.com/wp-content/uploads/2025/11/Revista-Maya-Geociencias-Diciembre-2025.pdf>

The prestigious **Colombian Geological Society (SCG)** has joined in disseminating the recognition and results of the research work through publication on its website. [https://sociedadcolombianadegeologia.org/reconocimiento\\_edinson\\_dario/](https://sociedadcolombianadegeologia.org/reconocimiento_edinson_dario/)



**Note1: The Colombian Geological Society (SCG) and the Colombian Association of Petroleum Geologists and Geophysicists (ACGGP) are private organizations that fulfill a similar social function - public functions: To disseminate, publicize, and support everything related to knowledge of Geosciences and Earth Sciences.**

We reject the institutional blockade and censorship applied to this research work by **Jaime Gonzalo Checa Jimenez, President of ACGGP, and Flover Rodriguez Portillo, Executive Director**, who have on three occasions denied the publication of both the recognition granted by prestigious entities for the research work in geosciences and the informative articles presenting the results of the work classified as being of national interest. **In addition to denying the recognition granted for contributions to the country's geosciences, they are arbitrarily attempting to impose a prior review of the informative articles, which is prohibited by law and international agreements and treaties, violating freedom of expression and freedom of information, fundamental and supreme values in a democracy. (Art 13 CADH)**

**“Censorship is inherently discriminatory(...)” (Judgment T 539 of 1994).** Based on the premise, the application of censorship discriminates against the affected person, by the same way Furthermore, through their actions, **Mr. Jaime Gonzalo Checa Jimenez, President of the ACGGP, and Mr. Flover Rodriguez Portillo, Executive Director**, would be discriminating against the President of the United States of America, who is one of the many individuals and audience members to whom this informational message is directed. In addition, they are concealing information of national interest from the Colombian people by obstructing the free flow of information and public debate regarding the results of this geoscience research. **(Art 13 Convención Americana Derechos Humanos).**

**REFERENCES**

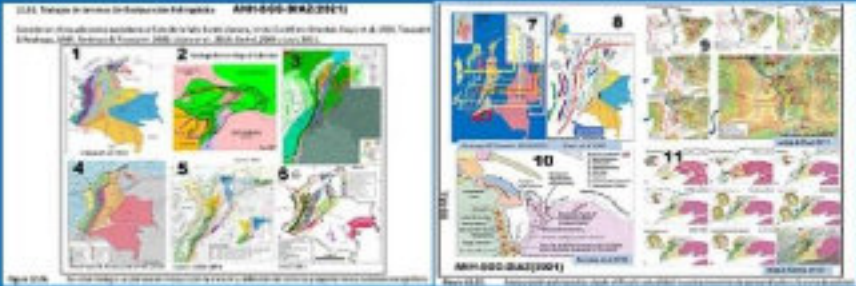
- Alarcón Gómez, C. M., Gómez-Coronado, J. S., Lizarazo Pabón, J. A., Díaz Villamizar, J. S. & Patarroyo, G. D. 2019. Nuevo Reporte De Plantas Fósiles En La Formación Girón Sobre El Cañón Del Río Lebrija, Santander. Estratos-Uis-2019. 2p. Boletín No 375.
- Alberto Nuñez Tello. 1986. Petrogenesis Del Batolito De Ibaguè. Ingeominas. Geología Colombiana No. 15.1986. Pp.35-45. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6560058>
- Alarcón CM, Clavijo-Torres J, Mantilla-Figueroa LC, Rodríguez JG. 2020. Nueva propuesta de edades para el registro sedimentario de las formaciones Bocas y Jordán y su relación con el desarrollo de la actividad magmática del Grupo Plutónico de Santander (cordillera Oriental, Colombia). Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 44(173):1137-1151, octubre-diciembre de 2020. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1208>
- Alejandro Piraquive Bermudez 2017. Structural Framework, deformation and exhumation of the Santa Marta Schists: accretion and deformational history of a Caribbean Terrane at the north of the Sierra Nevada de Santa Marta. Tesis Doctoral Universidad Nacional de Colombia Facultad de Ciencias, Departamento de Geociencias Bogota, Colombia 2017. 394 p
- Andreina Garcia Reyes 2018, Thesis Doctoral-Sorbonne University. Magnetic anomalies and plate tectonic history of the caribbean plate and Mexican Gulf. 218p.
- Andreína García-Reyes, Jérôme Dymont. 2021. Structure, age, and origin of the Caribbean Plate unraveled. Earth and Planetary Science Letters, 2021, 571, pp.117100. 10.1016/j.epsl.2021.117100 .hal-03452889 29 p.
- Andres Sebastian Martin Ravelo. 2020. Mineralogía, Aspectos geoquímicos y petrogénesis de las esmeraldas en el modelo colombiano. Charla Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=15gZ7AVww84>
- ANH-UIS 2008. Evolución Térmica De La Subcuenca De La Baja Guajira. Contrato N° 56 De 2008. UIS-ANH INFORME FINAL 144 p.
- ANH-Universidad Nacional de Colombia 2020. Evaluación del potencial Exploratorio de las Unidades Cenozoicas del Valle Superior del Magdalena. 800 p. <https://experience.arcgis.com/experience/b4cebb9e9f8743e5b0d75264121d93bc/>
- ANH-UPTC 2020, Integración Geológica, Evaluación De Los Sistemas Petrolíferos Y Prospectividad De Las Cuencas Frontera De Colombia. Cuenca Cordillera Oriental. Sogamoso, Diciembre de 2020. 441p
- ANH-UPTC 2024. Atlas De Areas De Interés Para La Exploración De H2 En El Norte De Colombia- 104 p.
- Aurora Zavala-Monsiváis1,\*, José Rafael Barboza-Gudiño2, Fernando Velasco-Tapia3, María Elena García-Arreola2. 2012. Sucesión volcánica Jurásica en el área de Charcas, San Luis Potosí: Contribución al entendimiento del Arco Nazas en el noreste de México. 28 p. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana Volumen 64, núm. 3, 2012, p. 277-293 <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2012v6>
- Bayona, G., Rapalini, A. and Costanzo-Alvarez, V. 2006. Paleomagnetism in Mesozoic rocks of the northern Andes and its implications in Mesozoic tectonics of northwestern South America. Earth, Planets and Space, 58, 1255–1272, <https://doi.org/10.1186/BF03352621>
- Bayona, G., Jiménez, G., Silva, C., Cardona, A., Montes, C., Roncancio, J. and Cordani, U. 2010. Paleomagnetic data and K–Ar ages from Mesozoic units of the Santa Marta massif: a preliminary interpretation for block rotation and translations. Journal of South American Earth Sciences, 29, 817–831, <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2009.10.005>
- Bayona, G., Bustamante, C., Nova, G. and Salazar–Franco, A.M. 2020. Jurassic evolution of the northwestern corner of Gondwana: Present knowledge and future challenges in studying Colombian Jurassic rocks. Publicaciones Geológicas Especiales, 36, <https://doi.org/10.32685/pub.esp.36.2019.05>
- Blanco-Quintero, I.F., García-Casco, A. et al. 2014. Late Jurassic terrane collision in the northwestern margin of Gondwana (Cajamarca Complex, eastern flank of the Central Cordillera, Colombia). International Geology Review, 56, 1852–1872, <https://doi.org/10.1080/00206814.2014.963710>
- Blickwede, J.F. 2001. The Nazas Formation: A detailed look at the early Mesozoic convergent margin along the western rim of the Gulf of Mexico Basin. AAPG Memoirs, 75, 317–342.
- Boschman, L.M., van Hinsbergen, D.J., Torsvik, T.H., Spakman, W. and Pindell, J.L. 2014. Kinematic reconstruction of the Caribbean region since the Early Jurassic. Earth-Science Reviews, 138, 102–136, <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.08.007>
- Carlos A. Vargas and Paul Mann 2013. Tearing and Breaking Off of Subducted Slabs as the Result of Collision of the Panama Arc-Indenter with Northwestern South America. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 103, No. 3, pp. 2025–2046, June 2013, 22p. <https://doi.org/10.1785/0120120328>
- Carlos Alberto Vargas, Carlos A. Zuluaga, Mathias Bernet, and Sergio Amaya. 2025. Surficial serpentinite emplacements and their potential links with the mantle wedge in NW South America. 12 p. <https://www.lyellcollection.org/doi/full/10.1144/SP558-2023-120>
- Cediel, F., R. P. Shaw, and C. Ca´ceres, 2003, Tectonic assembly of the Northern Andean Block, in C. Bartolini, R. T. Buffler, and J. Blickwede, eds., The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon habitats, basin formation, and plate tectonics: AAPG Memoir 79, p. 815– 848. 34 p.
- Clasificación de Rocas Magmáticas. <https://post.geoxnet.com/rocas-magmaticas-clasificacion-de-los-magmas/>
- Definición de Batolito. <https://petroigne.wordpress.com/formas-de-yacimiento/formas-plutonicas-y-filonianas/plutones/batolitos/>
- C.J. Busby1 and E. Centeno-García2.2022. The “Nazas Arc” is a continental rift province: Implications for Mesozoic tectonic reconstructions of the southwest Cordillera, U.S. and Mexico. 1Department of Earth and Planetary Sciences, University of California, Davis, California 95616, USA 2Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Avenida Universidad 3000, Ciudad Universitaria, México D.F. 04510, México 23p 2022 the geological society society geological of america.
- Coombs, H.E., Kerr, A.C., Pindell, J., Buchs, D., Weber, B., and Solari, L., 2020, Petrogenesis of the crystalline basement along the western Gulf of Mexico: Postcollisional magmatism during the formation of Pangea, in Martens, U., and Molina Garza, R.S., eds., Southern and Central Mexico: Basement Framework, Tectonic Evolution, and Provenance of Mesozoic–Cenozoic Basins: Geological Society of America Special Paper 546, p. 1–24, [https://doi.org/10.1130/2020.2546\(02\)](https://doi.org/10.1130/2020.2546(02)).

- Dany Yuleimar Mejía Vélez. 2019. Metamorfismo Jurásico En Los Andes Colombianos: ¿Respuesta Del Arco A La Transición De Un Régimen De Subducción Extensional A Uno Transpresivo? . Universidad Nacional de Colombia Facultad de Minas, Departamento de Materiales y Minerales, Área Curricular de Recursos Minerales Medellín, Colombia 2019. 85 p. tesis maestría.
- Diego Osorio-Afanador, Francisco Velandia. 2021. Late Jurassic syn-extensional sedimentary deposition and Cenozoic basin inversion as recorded in The Girón Formation, northern Andes of Colombia 30p. *Andean Geology* 48 (2):237-266. May, 2021 doi: 10.5027/andgeoV48n2-3264
- D. F. Jaramillo-Minorta, et al, "Modelo sedimentario-deposicional de la formación Girón en la sección del km 42 vía Girón-Zapatoca, Santander, Colombia" *Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo*, vol. 23 (2), pp. 37-49, julio. 2023. DOI: <https://doi.org/10.19053/1900771X.v23.n2.2023.16147> 13p.
- D. Tamara, E. Rojas, L. Quientero, F. Lascarro, D. Manco. Aspectos tectonicos en la genesis de la Formacion La Quinta y su relacion con los depositos minerales de cobre en la serrania del Perija, Colombia. *Tecnura*, 28(79), 123-139. <https://doi.org/10.14483/22487638.2082417> p.
- Fabio Cediél, Robert Peter Shaw 2019. *Geology and Tectonics of Northwestern South America The Pacific-Caribbean-Andean Junction*. 1010 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-76132-9> .
- Gómez, J., Montes, N.E. & Marín, E., compiladores. 2023. *Mapa Geológico de Colombia 2023*. Escala 1:1 500 000. Servicio Geológico Colombiano. Bogotá. [https://www2.sgc.gov.co/MGC/Paginas/mgc\\_1\\_5M2023.aspx](https://www2.sgc.gov.co/MGC/Paginas/mgc_1_5M2023.aspx)
- Horton, B.K., Parra, M. & Mora, A. 2020. Construction of the Eastern Cordillera of Colombia: Insights from the sedimentary record. In: Gómez, J. & Mateus-Zabala, D. (editors), *The Geology of Colombia, Volume 3 Paleogene – Neogene*. Servicio Geológico Colombiano, *Publicaciones Geológicas Especiales* 37, p. 67–88. Bogotá. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.37.2019.03>
- Ian Davison, James Pindell & Johnny Hull 2018. *The Basins, Orogens and Evolution of the southern Gulf of Mexico and northern Caribbean*. 52 p. Published by The Geological Society of London.
- Instituto Nacional de Investigaciones Geologico-Mineras 1970. *Economic Geology Of The Zipaquirá Quadrangle And. Adjoining Area*, 141 p.
- Ingeominas. 1985. *compilación-y-diagnóstico-de-la-información-geoquímica-histórica-en-la-parte-central-de-la-cordillera-oriental-36-638*.
- Irina Filina , James Austin, Tony Doré , Elizabeth Johnson , Daniel Minguez , Ian Norton , John Snedden , Robert J. Stern. 2022. Opening of the Gulf of Mexico: What we know, what questions remain, and how we might answer them. 30 p. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2021.229150>
- Irina Filina and Erin Beutel. 2022. *Geological and Geophysical Constraints Guide New Tectonic Reconstruction of the Gulf of Mexico*. University of Nebraska – Lincoln College of Charleston. November 22, 2022. 36p.
- James Lawrence Pindell. 1981. *Permo-Triassic reconstruction of Western Pangea and the evolution of the Gulf of Mexico-Caribbean región*. University at Albany, State University of New York. 133p Master thesis.
- James L. Pindell 1985. *Alleghenian Reconstruction And Subsequent Evolution Of The Gulf Of Mexico, Bahamas, And P Roto-Cari B Bean* James L. Pindell. Exploration Research Division, Pennzoil Company, Houston, Texas. 39p *210ma Tectonics*, Vol. 4, No. 1, Pages 1-39, January 1985.
- James Pindell and Lorcan Kennan 2001. *Kinematic Evolution of the Gulf of Mexico and Caribbean. Tectonic Analysis, Ltd., Dept. Earth Science, Rice University, Houston, Texas, USA*. 51 p.
- J. Pindell L. Kennan K.P. Stanek W.V. Maresch And G. Draper 2009. *Foundations of Gulf of Mexico and Caribbean evolution: eight controversies resolved*. Tectonic Analysis Ltd. Department of Earth Science, Rice University 39 p.
- James Pindell & Lorcan Kennan 2009. *Tectonic evolution of the Gulf of Mexico, Caribbean and northern South America in the mantle reference frame: an update*. In: James, K., Lorente, M. A. & Pindell, J. (eds) *The geology and evolution of the region between North and South America*, Geological Society of London, Special Publication.
- James Pindell 2013. *Origin of the Caribbean? Look Toward the Pacific*. 7p. *Explorer Newsletter*.
- James Pindell, Diego Villagómez, Roberto Molina-Garza, Rod Graham and Bodo Weber. 2020. *A revised synthesis of the rift and drift history of the Gulf of Mexico and surrounding regions in the light of improved age dating of the Middle Jurassic salt*. 2020. Geological Society, London, Special Publications, 504, <https://doi.org/10.1144/SP504-2020-43>
- James Pindell , Diego Villagómez , Roberto Molina Garza , Alejandro Beltrán , Daniel F. Stockli , Mark Wildman . 2022 *Late Cretaceous–Miocene depositional evolution of Chiapas, Mexico: A foreland controlled by collision of Greater Antilles arc and the subsequent relative migration of the Chortís Block*. 29 p.
- James Pindell 2021. *Catedra Selecta – Tectonic evolution Mexican Gulf-Conferencia Youtube*. <https://www.youtube.com/watch?v=8CAhxGbnL9w>
- James Pindell 2022. 52.2 James Pindell - *Dynamo-thermal subsidence and sag–salt section deposition-Conferencia*.
- Jose Rafael Barboza-Gudino , Maria Teresa Orozco-Esquivel , Martin Gomez-Anguiano c, Aurora Zavala-Monsivais. 2008. *The Early Mesozoic volcanic arc of western North America in northeastern Mexico*. 15p. 2008 *Journal of South American Earth Sciences* 25 (2008) 49–63.
- Juan Camilo Ruiz Amaya. 2021. *Modelamiento estructural entre el Páramo de Sumapaz y la Sabana de Bogotá*. Charla youtube ACGGP. 2021
- López-Isaza, J.A. & Zuluaga, C.A. 2020. *Late Triassic to Jurassic magmatism in Colombia: Implications for the evolution of the northern margin of South America*. In: Gómez, J. & Pinilla-Pachon, A.O. (editors), *The Geology of Colombia, Volume 2 Mesozoic*. Servicio Geológico Colombiano, *Publicaciones Geológicas Especiales* 36, p. 77–116. Bogotá. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.36.2019.03> 40 p.
- M. B. I. Weber, A. Cardona, F. Paniagua, U. Cordani, L. Sepulveda & R. Wilson. 2009 *The Cabo de la Vela Mafic–Ultramafic Complex, Northeastern Colombian Caribbean region: a record of Multistage evolution of a late Cretaceous intra-oceanic arc*. 20 p- From: JAMES, K. H., LORENTE, M. A. & PINDELL, J. L. (eds) *The Origin and Evolution of the Caribbean Plate*. Geological Society, London, Special Publications, 328, 547–566. DOI: 10.1144/SP328.22 0305-8719/09/\$15.00 # The Geological Society of London 2009.

- Maria Luisa Monsalve-Bustamante\*, Harold Avila-Vallejo, Ivan Darío Ortiz-Martin and Susana Osorio-Ocampo. 2022. Characterization and space–time distribution of Plio-Quaternary volcanism NE of Caldas, Colombia. 23p. [https://www.researchgate.net/publication/389622981\\_Characterization\\_and\\_space-time\\_distribution\\_of\\_Plio-Quaternary\\_volcanism\\_in\\_the\\_Northeast\\_of\\_Caldas\\_Colombia](https://www.researchgate.net/publication/389622981_Characterization_and_space-time_distribution_of_Plio-Quaternary_volcanism_in_the_Northeast_of_Caldas_Colombia)
- Martin Reyes<sup>1,2</sup> · Jonas Kley<sup>1</sup> · Andrés Mora<sup>3</sup> · István Dunkl<sup>4</sup> · Juan Carvajal-Torres<sup>2,5</sup> 2024. Age and tectonic setting of Mesozoic extension constrained by the first volcanic events in the Eastern Cordillera and Middle Magdalena Valley, Colombia. Received: 6 June 2021 / Accepted: 20 June 2024 © The Author(s) 2024 International Journal of Earth Sciences <https://doi.org/10.1007/s00531-024-02441-7> 27 p.
- Mildred Del Carmen Zepeda Martinez - Tesis Doctoral UNAM. 2021. Reconstrucción de la Evolucion tectono sedimentaria del jurásico temprano-medio de la cuenca Tlaxiaco, Sur de México. Implicaciones en la Historia de Atenuación continental del margen occidental de Pangea. 213 p.
- Moreno-Sanchez, M., and A. Pardo-Trujillo, 2003, Stratigraphical and sedimentological constraints on western Colombia: Implications on the evolution of the Caribbean plate, in C. Bartolini, R. T. Buffler, and J. Blickwede, eds., The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon habitats, basin formation, and plate tectonics: AAPG Memoir 79, p. 891– 924. 34 p.
- Oswaldo Ordoñez C. 2020. ORO EN COLOMBIA: HISTORIA, PRESENTE Y POTENCIAL. Charla Youtube, <https://www.youtube.com/watch?v=R0VCM1KU-0>
- Patarroyo, P. 2020. Barremian deposits of Colombia: A special emphasis on marine successions. In: Gómez, J. & Pinilla–Pachon, A.O. (editors), The Geology of Colombia, Volume 2 Mesozoic. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 36, p. 403–439. Bogotá. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.36.2019.12> 38 p.
- Pindell, James Lawrence (1985) Plate-tectonic evolution of the Gulf of Mexico and Caribbean region, 302 p. Durham Doctoral theses, Durham University. Available at Durham E-Theses Online: <http://etheses.dur.ac.uk/7042/>
- Pindell, J., Kennan, L., Maresch, W.V., Stanek, K.-P., Draper, G., and Higgs, R., 2005, Plate-kinematics and crustal dynamics of circum-Caribbean arc-continent interactions: Tectonic controls on basin development in Proto-Caribbean margins, in Avé Lallemant, H.G., and Sisson, V.B. eds., Caribbean–South American plate interactions, Venezuela: Geological Society of America Special Paper 394, p. 7–52, doi: 10.1130/2005.2394(01). 46 p.
- Rodríguez-García, G.; Zapata, J.P.; Correa-Martínez, A.M.; Ramírez, D.A.; Obando, G. (2020). Aportes al conocimiento del plutonismo del Arco Mocoa-Santa Marta durante el Jurásico Temprano-Medio, en la margen noroccidental de los Andes, Colombia. Boletín de Geología, 42(3), 15-50. <https://doi.org/10.18273/revbol.v42n3-2020001> 36 p.
- Rodríguez García, G., Correa Martínez, A. M., Zapata, J. P., Ramírez, D. A., & Sabrica, C. A. (2022). Evolution of arc magmatic cycles from the Carboniferous to the Early Cretaceous in the western paleomargin of Gondwana, north of the Andes. Boletín Geológico, 49(2). <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bol.geol.49.2.2022.663> 29 p.
- Rodríguez–García, G., Correa–Martínez, A.M., Zapata–García, G., Arango–Mejía, M.I., Obando–Erazo, G., Zapata–Villada, J.P. & Bermúdez, J.G. 2020. Diverse Jurassic magmatic arcs of the Colombian Andes: Constraints from petrography, geochronology, and geochemistry. In: Gómez, J. & Pinilla–Pachon, A.O. (editors), The Geology of Colombia, Volume 2 Mesozoic. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 36, 54 p. Bogotá. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.36.2019.04> 54p.
- Restrepo, J.J. & Toussaint, J.F. 2020. Tectonostratigraphic terranes in Colombia: An update. First part: Continental terranes. In: Gómez, J. & Mateus–Zabala, D. (editors), The Geology of Colombia, Volume 1 Proterozoic – Paleozoic. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 35, p. 37–63. Bogotá. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.35.2019.03> 28p.
- Sanchez, Javier and Paul Mann, 2015, Integrated structural and basinal analysis of the Cesar-Rancheria Basin, Colombia: Implications for it’s tectonic history and petroleum systems, in C. Bartolini and P. Mann, eds., Petroleum geology and potential of the Colombian Caribbean Margin: AAPG Memoir 108, p. 431–470.
- SGM 2014. Formación Nazas. 4p. Ficha de Unidad lotoestratigrafica-Formación.
- Spikings, R. & Paul, A. 2019. The Permian – Triassic history of magmatic rocks of the northern Andes (Colombia and Ecuador): Supercontinent assembly and disassembly. In: Gómez, J. & Pinilla–Pachon, A.O. (editors), The Geology of Colombia, Volume 2 Mesozoic. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 36, p. 1–43. Bogotá. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.36.2019.01> 44 p.
- Spikings, R.; Van der Lelij, R. The Geochemical and Isotopic Record of Wilson Cycles in Northwestern South America: From the Iapetus to the Caribbean. Geosciences 2022, 12, 5. <https://doi.org/10.3390/geosciences12010005> 32 p.
- Timoleón Garzón 2021. Potencial mineral y algunos proyectos mineros colombianos. Charla Youtube: <https://www.youtube.com/watch?v=0-5meQFa3As>
- Toussaint, J.F. & Restrepo, J.J. 2020. Tectonostratigraphic terranes in Colombia: An update. Second part: Oceanic terranes. In: Gómez, J. & Pinilla–Pachon, A.O. (editors), The Geology of Colombia, Volume 2 Mesozoic. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 36, p. 237–260. Bogotá. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.36.2019.07> 24p.
- Vargas, C.A. 2020. Subduction geometries in northwestern South America. In: Gómez, J. & Pinilla–Pachon, A.O. (editors), The Geology of Colombia, Volume 4 Quaternary. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 38, p. 397–422. Bogotá. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.38.2019.11>
- Víctor Ramos 2021. Nuevos paradigmas de la Tectónica Andina. Charla Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=9IfGdXKlQY>
- Víctor Ramos 2022. La tectónica mesozoica en los Andes Colombianos. Charla Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=VimLTqmB7y4>
- Villagómez, D., Steffensen, C., Pindell, J., Molina-Garza, R.S., Gray, G., Graham, R., O’Sullivan, P., Stockli, D., Spikings, R. 2006. Tectono-sedimentary evolution of Southern Mexico. Implications for Cretaceous and younger source-to-sink systems in the Mexican foreland basins and the Gulf of Mexico. 64 p.

**God's grace allows us to solve mystery that has lasted more than 60 - 90 years.**

**11 proposed models, fail to answer all the questions that still exist.**



**Complex Source Theory** will generate a revolution, a radical transformation of the mining and energy industry, giving different solutions for increase O&G&M discoveries, reserves and production, in complex and normal areas.

Contact: [edinson.alvarez@gmail.com](mailto:edinson.alvarez@gmail.com)  
O&G and Mining Geoscientist Exploration Specialist

I invite @RealDonaldTrump to mediate with the big companies and VIP.

- \* New concepts
- \* Interdisciplinary teams
- \* New Technologies
- \* New methodologies
- \* New science
- \* New Results



[edinson.alvarez@gmail.com](mailto:edinson.alvarez@gmail.com)

Exploration Geologist Specialist - Geophysicist, expert in O-&-G-Mining integrated studies (Colombia, Perú and México), Giving solutions to geoscientific problems, which have been in uncertainty for more than 5 decades. With important + economic implications.

The God's grace guide us to develop the "Complex Source Theory", a new mechanism that allow us increasing traditional O&G&M discoveries, production, reserves, as new energies and CCUS.

Geological mapping, surveys design, acquisition, processor PSTM (Conv-3C-4C-TZ-OBC), geomodeller, seismic interpreter and reservoir characterization (Conventional-and-Unconventional Reservoirs). Stratigraphic sequence, seismic attributes, AVO analysis, fluids substitution, seismic inversion, risk and uncertainty, leads and prospects, reserves.

Discovery of New prospective corridors and O&G prospects, in Foothills, Llanos, Putumayo, VIM, VMM, VSM, COR, CR, CAT, GuajiraOff-Guajira, SSJFB, Sinú-Sinu Off, Cayos basin, Colombia basin.

**LAS 5 GIGANUCLEARES FUERZAS GEOLÓGICAS Y TECTÓNICAS QUE DIERON ORIGEN AL GOLFO DE MÉXICO. POR EDINSON ALVAREZ.**

**IMPORTANTES CONTRIBUCIONES EN GEOCIENCIAS PROMETEN REVOLUCIONAR LA EXPLORACIÓN O&G&M. No 6/12.**

**EDINSON D. ALVAREZ S. 1,2**

1 Exploration Geologist, O&G&M Specialist, Researcher of tectonic and structurally complex areas.

2 Experto en soluciones geocientíficas a través de estudios integrados O&G&M, con importantes implicaciones económicas.



**Complex Source Theory (Edinson Alvarez 2025):** Mecanismo utilizado por grupos interdisciplinarios de especialistas en cualquier campo de la ciencia, donde se emplean nuevos conceptos, nuevas metodologías, nueva tecnología, nuevo conocimiento, obteniendo nuevos resultados, con el fin de resolver temas complejos. (Imagen Cortesía Pixabay).

**EAST-P Method-Tool (Processing and Seismic Treatment Edinson Alvarez 2025):** Requiere equipo de personal especializado, equipos de cómputo y software avanzado.

**Edinson Geochemical Hydrocarbon Family Classification Maps -Tool (Edinson Alvarez 2025):** Nueva Clasificación de Familias de Hidrocarburos basadas en la huella geoquímica-isotópica-molecular, el rastro de migración desde la fuente, su relación estrecha con la geología, el modelamiento geoquímico de generación expulsión y rutas de migración de hidrocarburos en un contexto regional.

**Estudios Integrados Onshore-Offshore-Tool:** Involucra la participación de más de 20 disciplinas de las geociencias, a fin de encontrar respuestas a problemas complejos de la industria, con Fuertes implicaciones económicas positivas.

**Como citar:** Alvarez Serrato Edinson Darío, 2026. Las 5 Giganucleares Fuerzas Geológicas Y Tectónicas Que Dieron Origen Al Golfo De México. Contado Por Edinson Alvarez. Importantes Contribuciones En Geociencias Prometen Revolucionar La Exploración O&G&M. No 6/12.Revista Maya Enero2026.42 p Citas Artículo 1,2,3,4,5 al final.

## INTRODUCTION

El presente trabajo tiene como fin aportar al conocimiento Geocientífico de un área importante para la industria O&G&M mundial. La Evolución Jurásica del Golfo de América, Golfo de México, Territorio Colombiano y Venezolano (Esquina Noroccidental de Suramérica-Gondwana). En esta ocasión se desea mostrar con evidencias técnicas y científicas la relación entre tectónica de placas, arcos magmáticos, arcos volcánicos, desarrollo de Zonas de Rift y Zonas de Subducción, combinados para comprender el origen, crecimiento y desarrollo de las cuencas sedimentarias de interés para la industria Minero-Energética mundial.

En esta fase, el tema central es la solución a las incertidumbres o preguntas específicas sin respuesta, planteadas por los geocientíficos contemporáneos e investigadores a nivel mundial, hechas durante más de 100 años de historia y desarrollo de la industria petrolera en la Región del Golfo de México. Veremos también las implicaciones del problema en los sistemas petrolíferos, de una manera muy general.

Destacando del lado Colombiano a las diferentes empresas, instituciones, entidades y personas que han contribuido al desarrollo del conocimiento en tales tópicos como son el Servicio Geológico Colombiano (SGC), La Empresa Colombiana de Petróleos Ecopetrol, El Instituto de Investigaciones del Petróleo y Energías de Transición – (ICPET), La agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH), las universidades estatales y privadas como la Universidad de Caldas, su Instituto de Investigaciones Estratigráficas IIES, La Universidad Nacional de Colombia (Unal), Universidad Industrial de Santander (UIS), Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), Universidad EAFIT, Universidad de Pamplona, Universidad de los Andes, entre otras... Para este capítulo en especial, el aporte de importantes investigadores y Geocientíficos de la Industria Minero Energética de México y Estados Unidos de América, incluida la Universidad Autónoma de México UNAM.

Destacando el incansable e importante trabajo desarrollado por los Reconocidos y honorables Doctores: James Pindell, Diego Villagómez, Roberto Molina-Garza, Rod Graham and Bodo Weber 2020, A revised synthesis of the rift and drift history of the Gulf of Mexico and surrounding regions in the light of improved age dating of the Middle Jurassic salt. 49 p. <https://doi.org/10.1144/SP504-2020-43>, Libresal público a través de su conferencia de Youtube Cátedra Selecta.- James Pindell-2021.

El Dr. James Pindell ha dedicado toda su vida al estudio, entendimiento y evolución geológica del Golfo de México con su tesis de Maestría Permo-Triassic reconstruction of Western Pangea and the evolution. 1981 y Tesis Doctoral Plate-tectonic evolution of the Gulf of Mexico and Caribbean region 1985. E importantes y suficientes trabajos relacionados posteriores hasta la fecha 2026.

Destacar el Trabajo de los Doctores Restrepo, J.J. & Toussaint, J.F. 2020. Tectonostratigraphic terranes in Colombia: An update. First part: Continental terranes. In: Gómez, J. & Mateus-Zabala, D. (editors), The Geology of Colombia, Volume 1 Proterozoic – Paleozoic. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 35, p. 37–63. Bogotá. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.35.2019.03>, quienes han dedicado toda su vida al estudio de la Geología Colombiana, y su obra sobre terrenos tectonoestratigráficos, en diferentes y renovadas versiones de 1973, 1988, 1993, 1998, 2020, entre otras.

El presente trabajo incorpora Nueva información de relevancia estratégica, que permitirá delimitar, perfeccionar, calibrar y/o robustecer el modelo de evolución geológica y tectónica para el Golfo de México-América, durante el periodo Triásico Superior-Jurásico, presentado en el Artículo No. 5 de esta serie. De esta manera conocer la sucesión de eventos geológicos y/o tectónicos que desencadenaron el origen, crecimiento y evolución del Golfo de México. **Pregunta con cerca de 100 años de historia, que aún no ha tenido una respuesta satisfactoria y la cual es solucionada en el presente capítulo.**

Aprovechamos para aclarar que la forma narrativa utilizada por el autor, es solo con el interés de generar nuevos lectores, audiencia e interesados en la investigación científica relacionada con las Geociencias – ciencias de la tierra. Lo anterior para no confundir alguna actitud arrogante, ya que la forma narrativa corresponde a una estrategia netamente de atracción de audiencia. Todo el respeto y admiración para quienes han hecho sus valiosos aportes a las Geociencias. **La Grandeza y la Gloria es para Dios.**

La forma Narrativa es en Homenaje a uno de los más grandes de la literatura Universal Miguel de Cervantes Saavedra (1547-1616), con su obra Magistral Don Quijote de la Mancha (1605)). Para este caso **llamaremos Gigantes a ( Conceptos, técnicas, tecnologías, metodologías, procedimientos, herramientas, incertidumbres, preguntas no resueltas, etc.). Los invitamos a ver el lado positivo de la historia, el cual son los aportes en geociencias para nuestro país Colombia y en este caso el Impresionante y espectacular Golfo de México-América.**

Daremos un espectacular, fascinante, maravilloso y cinematográfico viaje geológico por el mundo Jurásico Colombo-Mexicano-Americano.

Igualmente hacemos un símil con el Deporte, respecto de los Gigantes que vamos a derribar en la presente edición. Los Records son para batirlos o derribarlos, de igual manera nuestra propuesta en caso de tener debilidades o fracturas, muy probablemente será batida o derribada por una nueva y/o mejor propuesta en el futuro.

## METODOLOGY

Para poder superar los obstáculos y dificultades estructurales, estratigráficas, sedimentológicas, vulcanológicas, geológicas, geofísicas, geocronológicas, geoquímicas, sismológicas, que plantea la complejidad tectónica-estructural del área, se procede a realizar las siguientes actividades:

- Recopilación de información procedente de exploración petrolera, estudios geoquímicos, geofísicos, geológicos, estratigráficos, tectónico-estructurales, sistemas petroleros, vulcanológicos, geocronológicos, y otros estudios del área de interés.

- Como parte de la actividad profesional independiente del Autor, se han realizado varios estudios integrados para abordar el tema de la complejidad tectónica estructural del área de estudio, y sus implicaciones en la actividad exploratoria y de producción de petróleo y gas en Colombia y el Golfo de México. **Para este caso relacionado con la evolución tectonoestratigráfica principalmente en el periodo geológico Jurásico. 145 a 201.3 millones de años. Incluyendo también al triásico superior 201.3 a 237 m.a. (201.3-210 m.a.)**

**RESULTS**

**1. Marco Tectónico General y Terminología.**

Para entender el desarrollo del presente capítulo acudiremos a los Sigüientes términos, actualizados del Artículo 5, algunos con base en la incorporación de nuevos datos al modelo (Figura 1 y 2):

**Golfo Triásico-Jurásico De Edinson Alvarez:** Masa de Agua Marina amplia rodeada por los sigüientes accidentes geográficos dándole su configuración de Golfo: Terrenos Aoxaca y Chortis al Occidente-Noroccidente, México Continental al Norte y Oriente, Colombia Continental Al Oriente-Sur Oriente. (Triásico Superior-Jurásico Inferior)(Figuras 1 y 3)

**Bahía Jurásica De Edinson Alvarez:** Masa de Agua Marina estrecha rodeada por los sigüientes accidentes geográficos dándole su configuración de Bahía: Terrenos Aoxaca y Chortis al Occidente-Noroccidente, México Continental al Norte y Oriente, Colombia Continental Al Oriente -Sur Oriente. (Jurásico Inferior)(Figuras 4 y 5)

**Estrecho Jurásico De Edinson:** Zona de Apertura, fractura, rotura, entrada del Océano Pacífico al Golfo de México y Paleocuenca de la Cordillera Oriental de Colombia.(Jurásico Inferior-medio) (Figuras 2,6,7,8)

**El Estrecho Jurásico De Edinson,** contó con varias aperturas o estrechos nombrados a Continuación:

**Estrecho Jurásico De Edinson (Norte);** Rotura o Estrecho principal Creado en el Jurásico 170-169 ma. Entre el Macizo de Chiapas Mexicano y La Alta Guajira Colombiana (Serranía de Macuira-Cosinas).

**Estrecho Jurásico De JhonEdi (Centro):** Rotura o Estrecho Creado entre La Alta Guajira Colombiana (Serranía de Cosinas-Macuira) y la Sierra Nevada de Santa Marta. (Honor Jhon Edinson Alvarez M. –Hijo)

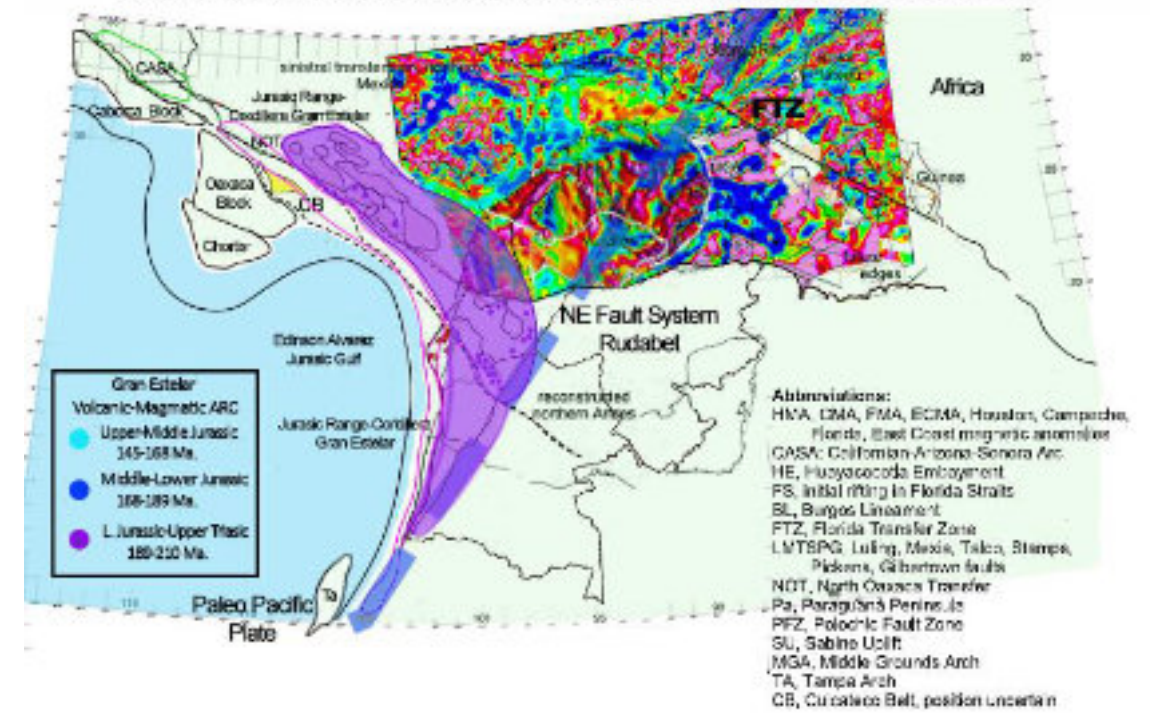
**Estrecho Jurásico De Floris (Sur):** Rotura o Estrecho Creado entre la Sierra Nevada de Santa Marta y las Serranía de San Lucas, controlado por la Falla de Bucaramanga.(Fig6, Fig14-Art5)(Honor Florinda Serrato-Madre)

**Estrecho Jurásico Independiente Milenar:** Rotura o Estrecho Creado al suroccidente de la Cuenca de Cundinamarca (Parte Sur occidental de la paleocuenca de la Cordillera Oriental) controlado por la Falla de Ibagué. (Fig6, Figura 14-Art5). (Honor Ana Milena Alvarez Serrato-Hermana).

**Proto Cordillera Triásica-Jurásica Gran Estelar:** Proto Cordillera Triásica-Jurásica Gran Estelar conformada por la parte de terrenos altos-serranía ubicados contiguos al occidente de la Paleo Sierra Madre Oriental Mexicana, extendiéndose por todo México hacia el sur y continuando hacia la Paleo Cordillera Central de Colombia. De basamento cristalino metamórfico precámbrico-paleozoico, intrusivos granitoides y depósitos vulcano sedimentarios fluviales, marinos, complejos sedimentarios de arco volcánicos. Paleogeográficamente funciona como respaldo de Talud del gran Escarpe Continental del Golfo de México, respecto de las aguas del océano pacífico. (Honor Amada Esposa Estela Moreno Z.) (Figuras 1, 2, 3, 4 y 5).

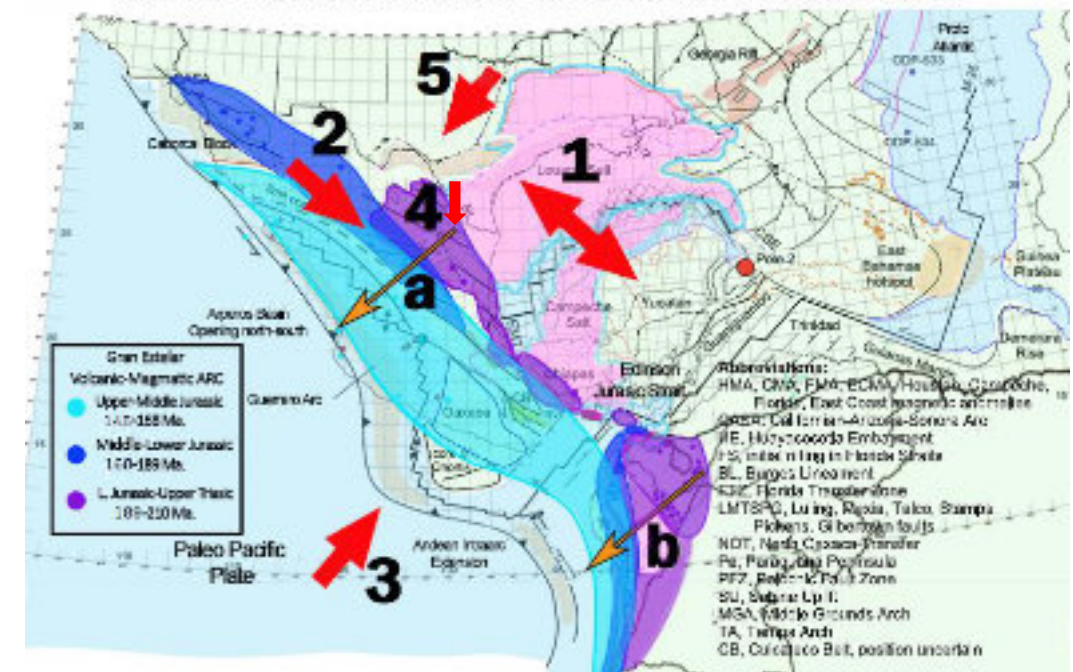
**Gran Sistema de Fallas, Rift, Lineamiento Rudabet (Honor Ruben Dario Alvarez Betancourt-Padre, Figura1 y 3);** Integrado por el Gran sistema de fallas, rift y lineamiento de las Fallas de Guaicáramo-piedemonte (Colombia), Falla de Boconó- piedemonte(Venezuela), lineamiento NE Yucatán(México), Rift de Georgia y Fallas-lineamientos de piedemonte de los Montes Apalaches(USA).

**Fig 1. Mexican Gulf Tectonic Evolution - 210-200 m.a. Late triassic-Early Jurassic**  
Edinson Alvarez -Geoscientist 2025, edinson.alvarez@gmail.com . Modified from Pindell et al 2021.



**Figura 1.** Principales Rasgos Geológicos, morfológicos y tectónico estructurales para Laurentia-Gondwana durante finales del periodo Triásico-Comienzos Jurásico. 200-210 ma. Cerca de 10 Lineamientos Estructurales Controlan la posición de Yucatán.

**Fig 2. Mexican Gulf Tectonic Evolution - 154 m.a. Late Jurassic**  
Edinson Alvarez -Geoscientist 2025, edinson.alvarez@gmail.com . Modified from Pindell et al 2021.



**Figura 2.** Distribución y Ubicación de los Arcos Magmáticos-Volcánicos Gran Estelar Este-Centro-Oeste, a,b. Dirección Roll Back E-W Paleo Pacific Plate-Placa Farallones Laurentia-Godnwana. 1, 2,3,4,5 Fuerzas Giganucleraes que Dieron Origen Al Golfo de México. Descritas en el Item 4-5 del presente estudio.

**Arco Volcánico-Magmático Gran Estelar Este (Triásico superior-Jurásico Inferior):** Conformado por la extensión de la Paleo Sierra Madre Oriental Mexicana, Perijá, Paleo Mérida y la Paleo Cordillera Oriental de Colombia. (Honor Amada Esposa Estela Moreno Z.) (Figuras 1, 2, 3, 4 y 5).

**Arco Volcánico-Magmático Gran Estelar Central-Medio (Jurásico Inferior-Jurásico Medio):** Conformado por la extensión de la Paleo Sierra Madre Oriental Mexicana, paleo Mesa Central, Sierra Nevada de Santa Marta, Serranía de San Lucas y la Paleo Cordillera Central de Colombia. (Honor Amada Esposa Estela Moreno Z.) (Figuras 1, 2, 3, 4, 5, y 6).

**Arco Volcánico-Magmático Gran Estelar Oeste (Jurásico Medio-Jurásico Superior):** Conformado por la extensión de la Paleo Sierra Madre Oriental-Occidental Mexicana, paleo Mesa Central, Sierra Nevada de Santa Marta, Serranía de San Lucas y la Paleo Cordillera Central de Colombia. (Honor Amada Esposa Estela Moreno Z.) (Figuras 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8).

## 2. Análisis

Utilizando las herramientas avanzadas de la Teoría de Fuente Compleja TFC, se hizo muy fácil encontrar una respuesta al interrogante planteado por los reconocidos geocientíficos homenajeados en el presente artículo, y que durante décadas ha trasnochado a la comunidad de geólogos, estratígrafos, vulcanólogos, sismólogos, geofísicos, geocientíficos, sector minero energético mundial en general.

Todas las respuestas proceden de la reconstrucción paleogeográfica del Golfo de México basado en el trabajo de los reconocidos Geocientíficos: **James Pindell, Diego Villagómez, Roberto Molina-Garza, Rod Graham and Bodo Weber 2020, A revised synthesis of the rift and drift history of the Gulf of Mexico and surrounding regions in the light of improved age dating of the Middle Jurassic salt. 49 p.** <https://doi.org/10.1144/SP504-2020-43>, Libres al público a través de su conferencia de Youtube **Cátedra Selecta.- James Pindell-2021.**

De los trabajos de los **Doctores Restrepo, J.J. & Toussaint, J.F. 2020. Tectonostratigraphic terranes in Colombia: An update. First part: Continental terranes. In: Gómez, J. & Mateus-Zabala, D. (editors), The Geology of Colombia, Volume 1 Proterozoic – Paleozoic. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 35, p. 37–63. Bogotá.** <https://doi.org/10.32685/pub.esp.35.2019.03>.

Para el presente capítulo, se incorporan los valiosos Datos Geocronológicos, Geoquímicos, estratigráficos, sedimentológicos y estructurales, relacionados con arcos volcánicos y magmáticos para el periodo triásico-jurásico, tanto de México-USA (Laurentia), como Colombia-Venezuela (Gondwana); de los reconocidos Doctores: **Claudio Bartolini 2013, Joshua H. Rosenfeld. 2002, Elena Centeno García 2018-23, Elisa Fitz Díaz. 2018-2020, Parolari M, Martini M, Gómez-Tuena A, Ortega-Gutiérrez F, Errázuriz-Henao C, and Cavazos-Tovar JG (2022), Hildebrando Leal-Mejía, Robert P. Shaw, and Joan Carles Melgarejo i Draper 2019, Carlos A. Zuluaga and Julián A. López 2019, BAQUERO Marvin, VISCARRET Patxo, VALENCIA Víctor; TAZZO-RANGEL María Daniela; ANDARA José, URBANI Franco, SIFONTES Ramón, CENTENO José. 2015. Sonia Güiza González,**

**Geoquímica Sénior. 2020-21, López-Isaza, J.A. & Zuluaga, C.A. 2020, Spikings, R. & Paul, A. 2019, Rodríguez-García, G., Correa-Martínez, A.M., Zapata-García, G., Arango-Mejía, M.I., Obando-Erazo, G., Zapata-Villada, J.P. & Bermúdez, J.G. 2020. Rodríguez García, G., Correa Martínez, A. M., Zapata, J. P., Ramírez, D. A., & Sabrica, C. A. (2022), Camilo Londoño Bustamante 2020. (Grupo de Investigación Tectónica-estratigráfica Egeo-Unal, Grupo Tectónica-Eafit), entre otros.**

Complementado lo anterior, con la información de los estudios realizados por importante y reconocidos geocientíficos descritos en la Bibliografía, integrado todo con las herramientas avanzadas de la **Teoría de Fuente compleja SCT (Edinson Alvarez 2025)**. Resultados del Origen y evolución tectónica del Golfo de México-América, que se pueden observar en las **figuras 1,2,3,4,5,6,7,8,12**, para el periodo triásico superior (201.3 a 210 m.a.)–Jurásico. 145 a 201.3 millones de años.

En la siguiente reconstrucción tectónica-paleogeográfica, Colombia se restaura la deformación terciaria (**Similar a Pindell 1985, V. Ramos 2021, Edinson Alvarez 2025**). Y el estiramiento de la Cordillera Oriental, compagina con la ubicación de la margen occidental de la Cordillera Gran Estelar y posteriormente con los Arcos volcánicos superpuestos. Se utilizó la configuración del Bloque Chibcha de **Restrepo, J.J. & Toussaint, J.F. 2020**. Se mantuvieron todos los demás parámetros de la reconstrucción paleogeográfica de **Pindell et al 2020-2021**. Se regeneró y/o configuró el periodo Triásico Superior Basado en **Pindell 1985-1992-1994-Pindell et al 2020-2021, Edinson Alvarez 2025**.

El Polígono de la Sal para Colombia se realizó con base en los trabajos de **Ingeominas 1970-1985, Dr. Oswaldo Ordoñez C. 2020 y Sonia Güiza González, 2020-21**. Aplicándole un estiramiento equivalente hacia el Valle medio del Magdalena (Teniendo en cuenta la deformación terciaria de la Cordillera Oriental de Colombia). No se grafican sedimentos presal en la presente reconstrucción, como tampoco se debate lo relacionado con el bloque Tahami (Ta)-Colombia (Parte de una próxima edición).

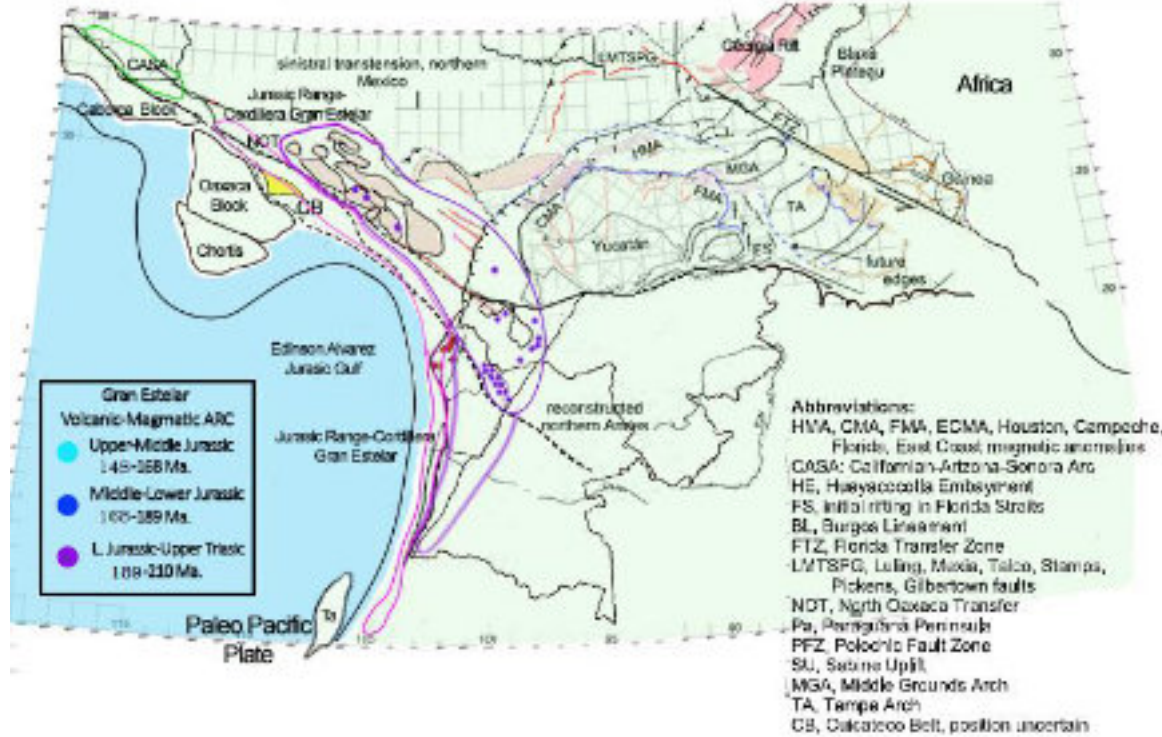
**Al incorporar los datos geocronológicos y demás relacionados con los arcos volcánicos-magmáticos del periodo triásico-jurásico de México, Colombia y Venezuela**, se pudo dar una mejor configuración a la ubicación de la Proto Cordillera Gran Estelar, como de la evolución de los Arcos magmáticos-volcánicos y establecer su correlación espacio temporal tanto de Laurentia, como de Gondwana, confirmando la solidez del modelo de evolución tectónica para el Golfo de México-América.

Con Base en el análisis de la Reconstrucción paleogeográfica Evolución tectónica del Golfo de México, empezamos a dar respuesta a los diferentes interrogantes planteados en la sección siguiente de Gigantes a Derribar.

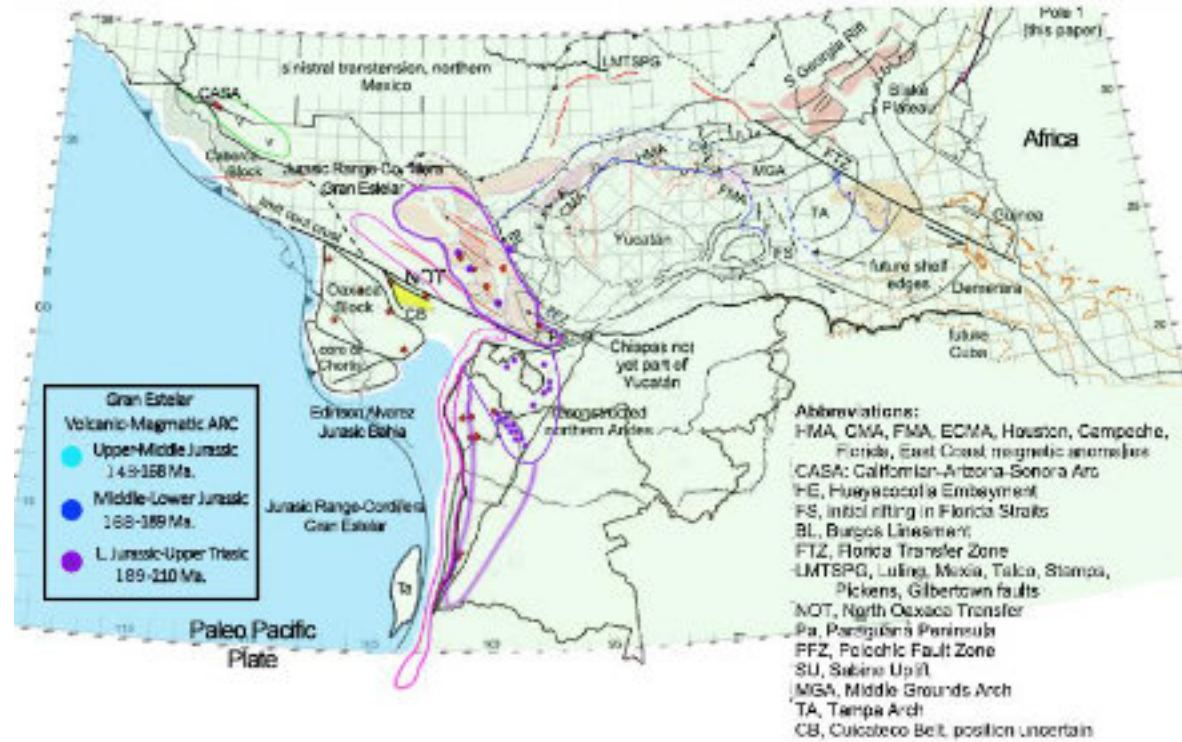
Adicionalmente, uno de los objetivos del presente trabajo es demostrar la relación espacio-temporal de los depósitos sedimentarios del Periodo Jurásico del Golfo de México, con los depósitos sedimentarios del mismo periodo Jurásico para las Cuencas Colombianas, especialmente la paleocuenca jurásica de la cordillera Oriental de Colombia.

**A Continuación figuras 3,4,5,6,7,8, evolución tectónica del Golfo de México** para el periodo triásico superior (201.3 a 210 m.a.)–Jurásico. 145 a 201.3 millones de años. (Versión Actualizada del Artículo 5 de esta serie).

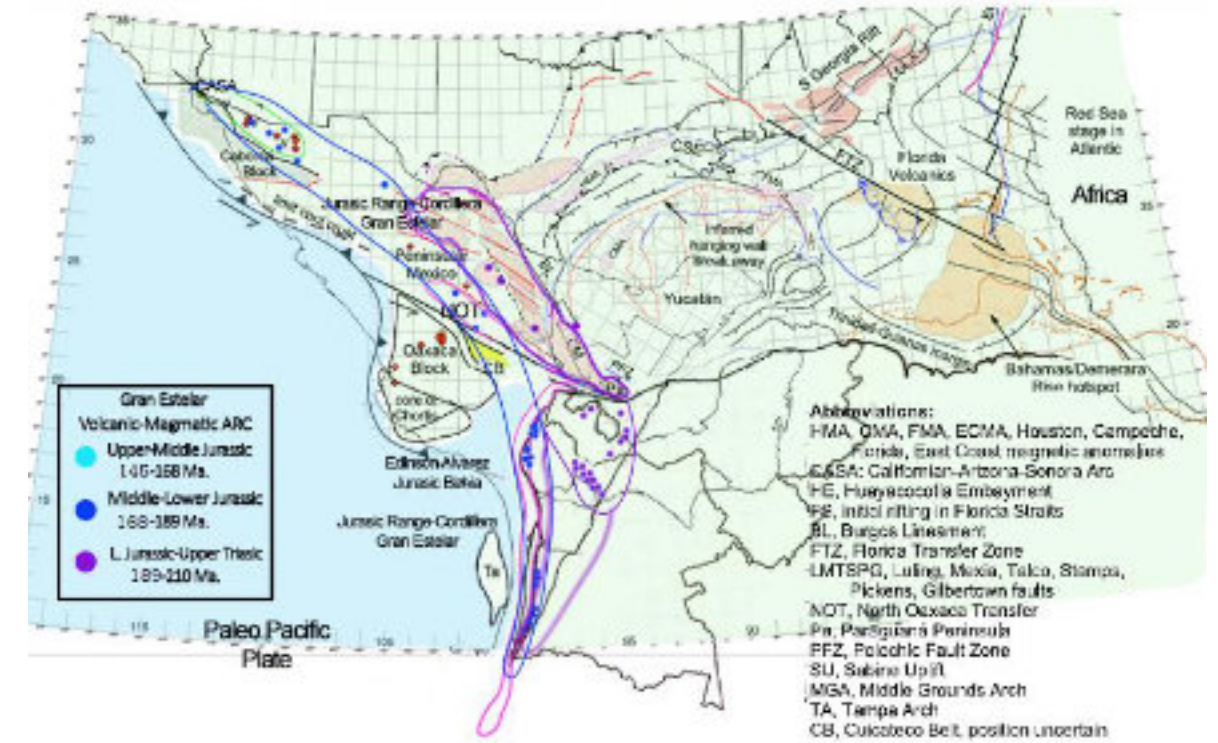
**Fig 3. Mexican Gulf Tectonic Evolution - 210-200 m.a. Late triasic-Early Jurassic**  
Edinson Alvarez -Geoscientist 2025, edinson.alvarez@gmail.com . Modified from Pindell et al 2021.



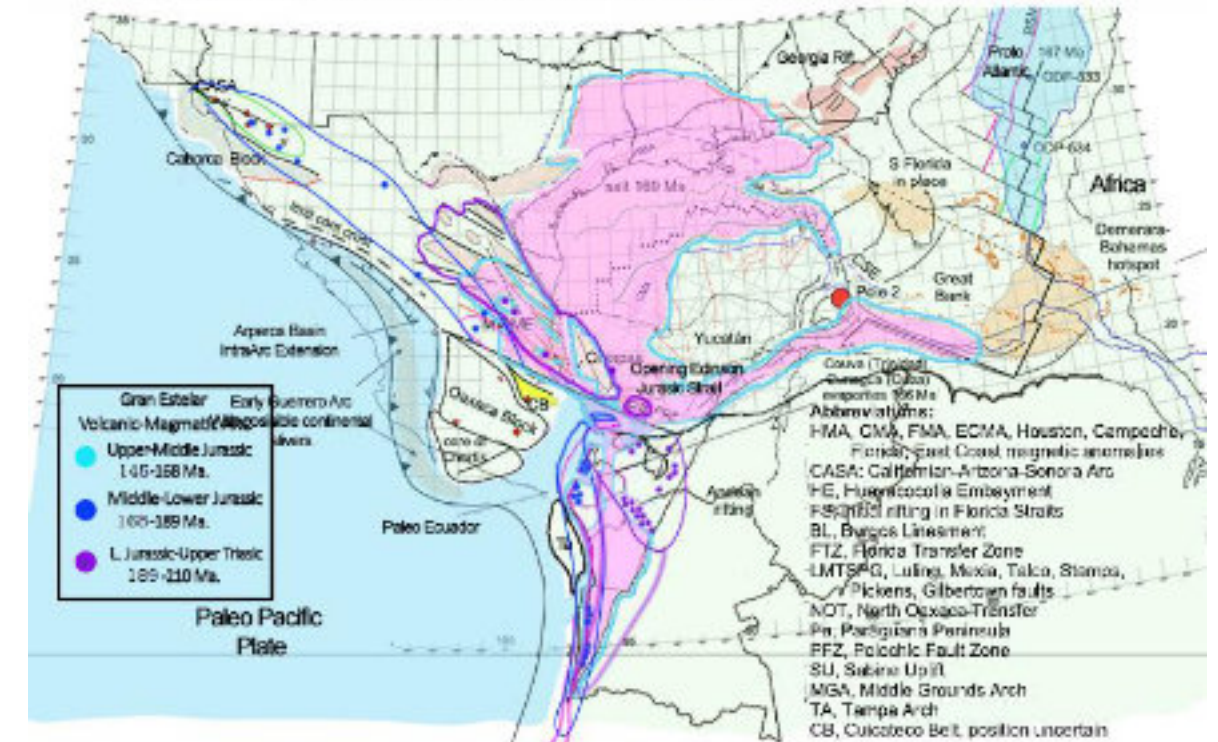
**Fig 4. Mexican Gulf Tectonic Evolution - 195 m.a. Early Jurassic**  
Edinson Alvarez -Geoscientist 2025, edinson.alvarez@gmail.com . Modified from Pindell et al 2021.



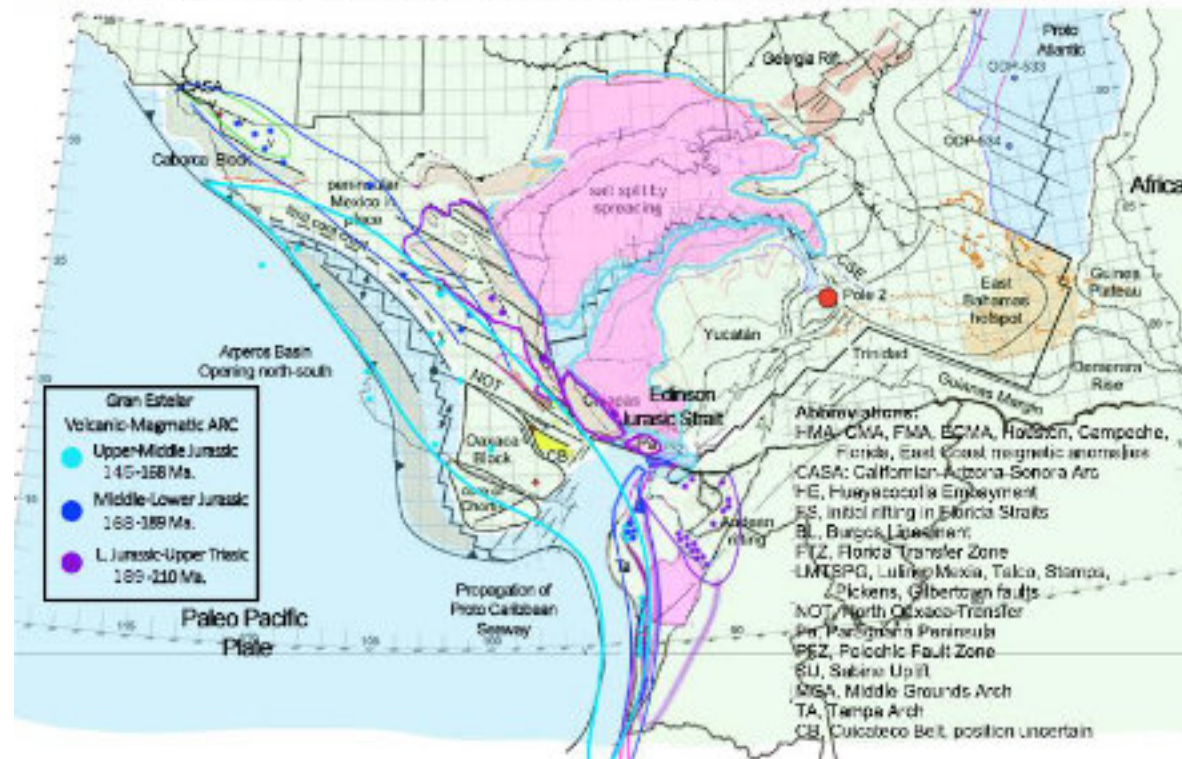
**Fig 5. Mexican Gulf Tectonic Evolution - 177 m.a. Early Jurassic**  
Edinson Alvarez -Geoscientist 2025, edinson.alvarez@gmail.com . Modified from Pindell et al 2021.



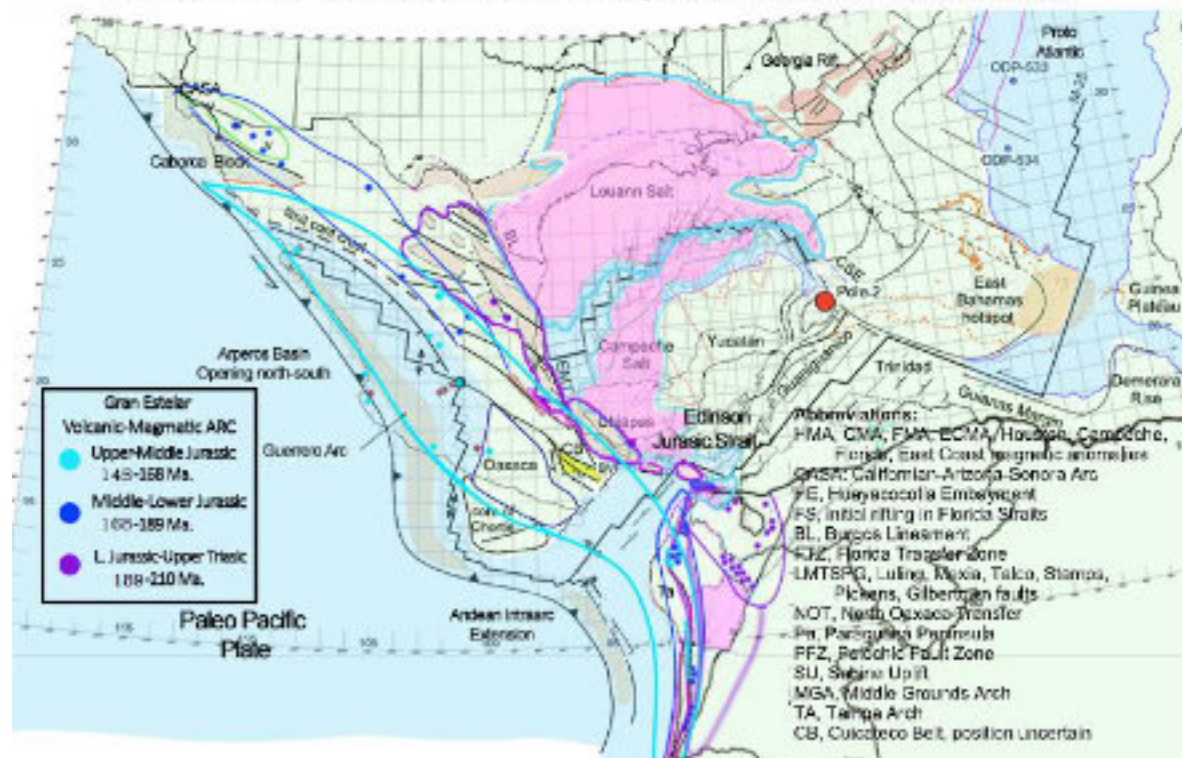
**Fig 6. Mexican Gulf Tectonic Evolution - 167 m.a. Middle Jurassic**  
Edinson Alvarez -Geoscientist 2025, edinson.alvarez@gmail.com . Modified from Pindell et al 2021.



**Fig 7. Mexican Gulf Tectonic Evolution - 159 m.a. Late Jurassic**  
Edinson Alvarez -Geoscientist 2025, edinson.alvarez@gmail.com . Modified from Pindell et al 2021.



**Fig 8. Mexican Gulf Tectonic Evolution - 154 m.a. Late Jurassic**  
Edinson Alvarez -Geoscientist 2025, edinson.alvarez@gmail.com . Modified from Pindell et al 2021.



### 3. Gigantes

A continuación se relacionan los Gigantes que vamos a derribar en el presente capítulo. **Llamaremos Gigantes a ( Conceptos, técnicas, tecnologías, metodologías, procedimientos, herramientas, incertidumbres, preguntas no resueltas, etc.).**

#### 3.1 Gigante No. 1 de este capítulo ( Gigante No. 20 Derribado de esta serie ):

Directamente Relacionado con la sucesión de eventos que generaron o dieron origen a la configuración estructural y sedimentaria del Golfo de México.

Spikings, R. & Paul, A. 2019.

The relationship between Triassic plate margin extension and the final fragmentation of Pangaea is unclear. However,

Filina et al 2022. (Irina Filina, James Austin, Tony Dor'e, Elizabeth Johnson, Daniel Minguez, Ian Norton, John Snedden , Robert J. Stern. 2022. )

exploration. However, the opening of the basin remains debated for two reasons: 1) the quality of data does not allow for reliable interpretations of crustal features beneath thick and complex overburden, and 2) most industry well and geophysical data are proprietary. The last concerted effort by industry and academia to summarize the

#### 3.2 Gigante No.2 ( Gigante No. 21 Derribado de esta Serie ) :

Alarcón CM et al 2020. (Alarcón CM, Clavijo-Torres J, Mantilla-Figueroa LC, Rodríguez JG. 2020).

de arcos magmáticos marginales (Rodríguez, et al., 2018). Uno de los retos actuales es la reconstrucción de la historia geológica del Jurásico en los Andes del norte, no solo desde el punto de vista geoquímico y geocronológico de las rocas plutónicas y volcánicas, sino porque deben entenderse de forma integral las relaciones del magmatismo con la formación de cuencas y la acumulación de sucesiones sedimentarias. Como lo sugieren Bayona,

Camilo Bustamante Londoño 2020. (Grupo de Investigación Tectónica-estratigráfica Egeo-Unal, Grupo Tectónica-Eafit)

- Relación entre cuencas sedimentarias, magmatismo y metamorfismo.

**3.3 Gigante No.3** ( Gigante No. 22 Derribado de esta Serie ) :

**Camilo Bustamante Londoño 2020.** (Grupo de Investigación Tectónica-estratigráfica Egeo-Unal, Grupo Tectónica-Eafit)

- ¿Cómo fueron las variaciones de los espesores corticales durante el Jurásico?

**3.4 Gigante No.4** ( Gigante No. 23 Derribado de esta Serie ) :

**Camilo Bustamante Londoño 2020.** (Grupo de Investigación Tectónica-estratigráfica Egeo-Unal, Grupo Tectónica-Eafit)

- ¿Cómo se comportó la margen convergente durante el Jurásico?

**3.5 Gigante No.5** ( Gigante No. 24 Derribado de esta Serie ) :

**Camilo Bustamante Londoño 2020.** (Grupo de Investigación Tectónica-estratigráfica Egeo-Unal, Grupo Tectónica-Eafit)

- Tres modelos de evolución:  
 - Slab roll-back  
 - Erosión por subducción  
 - Convergencia oblicua

**3.6 Gigante No.6** ( Gigante No. 25 Derribado de esta Serie ):

**Mildred Del Carmen Zepeda Martínez - Tesis Doctoral UNAM. 2021**

estas premisas, reconstruir la evolución de las cuencas del Jurásico Inferior-Medio de México no sólo enriquecería el debate sobre la dinámica de un proceso tectónico de escala global como es la fragmentación de un supercontinente, sino que también podría contribuir a la comprensión del origen y distribución de los reservorios de petróleo que existen en el país.

Respuestas se podrán observar en las Conclusiones Finales del presente estudio.

**4. Relación Espacio Temporal de los Depósitos Sedimentarios Durante el Periodo Jurásico del Golfo de México Respecto de los Depósitos Sedimentarios Jurásicos de las Cuencas Colombianas.**

**4.1 Correlación Geocronológica Arcos Volcánicos y Magmáticos de Laurentia(México-USA)-Gondwana(Colombia-Venezuela):**

Al Incorporar los datos geocronológicos y demás relacionados con los arcos volcánicos-magmáticos del periodo triásico-jurásico de México, Colombia y Venezuela, se pudo dar una mejor configuración a la ubicación de la Proto Cordillera Gran Estelar, como de la evolución de los Arcos magmáticos-volcánicos y establecer su correlación espacio temporal tanto de Laurentia, como de Gondwana, confirmando la solidez del modelo de evolución tectónica para el Golfo de México-América.

De tal manera se hizo el análisis de las dataciones radiométricas en rocas magmáticas ( ígneas-volcánicas), para el área que nos interesa, límite W sutura Laurentia-Gondwana del periodo Triásico Superior-Jurásico. Encontrando tres grandes grupos de edades isotópicas U-Pb, K-Ar, Ar-Ar, obtenidas por diferentes estudios, así:

**4.1.1 Arco Volcánico-Magmático Gran Estelar Este** (Triásico superior-Jurásico Inferior-210-189 ma):

**Venezuela:** Ministerio de Minas e Hidrocarburos de Venezuela 1968. (Figuras 2,3,4)

**Sierra Perijá**

Granito el palmar K-AR 210.

Granodiorita El Palmar sm 200+-4

**Cordillera de los Andes Mérida**

Granodiorita Sierra Nevada de Mérida Rb-Sr 200+-2,5

Granito de Tovar Rb-Sr 200+-6

Granito porfídico Valera K-Ar 210+-5

Granito de Piñango K-Ar 195+-5, 200+-10, 196+-10

Granito de Timotes K-Ar 181+-9 (Anómalo)

**Baquero Marvin et al 2015. Mérida.**

Granodiorita el Carmen 211+- 1 ma. Vande Ielij et al 2011.

Granito de La Culata 206,1 (+3,0/-3,8) Ma y 207,3 (+4,0/-3,0) Ma correspondiente al Triásico Superior

**Colombia:**

Santander Plutonic group: Santa Bárbara - Rionegro -Mogotes Batholiths and The Pescadero, La Corcova and Páramo Rico plutons (U-Pb zircon, Ma) 210-196. **Hildebrando Leal-Mejía et al 2019.**

**México:**

Valle de Huizachal-Aramberri U-Pb 195-189

Chiapas U-Pb 191 **Parolari M, Martini M. et al 2022.**

Chiapas 196. **Elena Centeno García 2023.**

**Arco Volcánico-Magmático Gran Estelar Este (Triásico superior-Jurásico Inferior):** Conformado por la extensión de la Paleo Sierra Madre Oriental Mexicana, Perijá, Paleo Mérida y la Paleo Cordillera Oriental de Colombia. (Honor Amada Esposa Estela Moreno Z.) (Figuras 1, 2, 3, 4 y 5).

**4.1.2 Arco Volcánico-Magmático Gran Estelar Central (Jurásico Inferior-Jurásico Medio- 168-189 ma):**

**Venezuela:** Ministerio de Minas e Hidrocarburos de Venezuela 1968. (Figuras 2,5,6)

**Cordillera de los Andes Mérida**

Granito El Baño sm 175+-2,5 (Anomalía-Refiere Valor que se encuentra por fuera de la tendencia general del Arco, se explica como una desviación de la ruta de emplazamiento general del arco principal)

**Colombia:**

Southern Ibagué Batholith, Norosí and San Martín batholiths (U-Pb zircon, Ma) Ca. 189–182  
Sierra Nevada de Santa Marta batholiths (pueblo Bello-Patillal and Aracataca-central) Ca. 180  
Mocoa-Garzón trend batholiths Ca. 179–173. **Hildebrando Leal-Mejía et al 2019.**

**México:**

Durango U-Pb 184-168  
Sierra de Catorce-Charcas-Zacatecas U-Pb 179-168  
Tizapa Mine U-Pb 186  
Ayú Complex U-Pb 175-168  
Tlaxiaco Basin U-Pb 184-177  
Acapaulco U-Pb 179  
Islas Marias U-Pb 170

**Parolari M, Martini M. et al 2022., Elena Centeno García 2023.**

**Arco Volcánico-Magmático Gran Estelar Central-Medio (Jurásico Inferior-Jurásico Medio):**

Conformado por la extensión de la Paleo Sierra Madre Oriental Mexicana, paleo Mesa Central, Sierra Nevada de Santa Marta, Serranía de San Lucas y la Paleo Cordillera Central de Colombia. (Honor Amada Esposa Estela Moreno Z.) (Figuras 1, 2, 3, 4, 5, y 6).

**4.1.3 Arco Volcánico-Magmático Gran Estelar Oeste (Jurásico Medio-Jurásico Superior-145-168 ma):**

**Colombia:**

Northern Ibagué Batholith Ca. 169–152  
Segovia Batholith Ca. 167–158. **Hildebrando Leal-Mejía et al 2019.**

**México:**

Diferentes Cuerpos al Oeste de la Sutura de Arperos, Terreno Guerrero 150-165 **Centeno García 2023.**

**Arco Volcánico-Magmático Gran Estelar Oeste (Jurásico Medio-Jurásico Superior):** Conformado por

la extensión de la Paleo Sierra Madre Oriental-Occidental Mexicana, paleo Mesa Central, Sierra Nevada de Santa Marta, Serranía de San Lucas y la Paleo Cordillera Central de Colombia. (Honor Amada Esposa Estela Moreno Z.) (Figuras 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8).

**4.2 Correlación Geológica, geoquímica, sedimentológica, facial, estructural, paleogeográfica, paleontológica, geocronológica, Laurentia(México-USA)-Gondwana(Colombia-Venezuela):**

Para terminar de consolidar, fortalecer y probar nuestro modelo presentado a la comunidad geocientífica internacional en el capítulo 5 de esta serie del mes de diciembre de 2025 (<https://revistamaya.com/wp-content/uploads/2025/12/Revista-Maya-Geociencias-EDICION-ESPECIALXXVII-2025.pdf>), procederemos a integrar las evidencias técnicas y científicas que permiten validar el modelo de evolución geológica y tectónica propuesta en el presente trabajo para el Golfo de México. (Figuras 9 y 10)

**4.2.1 Modelo Roll Back de la Placa Farallones (Triásico-Jurásico).**

En el importante trabajo de la Dra, **Dany Yuleimar Mejía Vélez 2019 (Tesis Maestría Unal-Colombia)**, resume:

Los modelos más aceptados en la actualidad sobre la evolución de la margen noroccidental de Gondwana en el Jurásico defienden la existencia de un arco continuo desde el Jurásico inferior hasta el cretáceo superior construido en una margen sometida a un régimen extensional en una subducción tipo roll-back, esta hipótesis soporta su argumento en la migración del frente magmático desde el oriente sin considerar ningún tipo de influencia de desplazamientos en el rumbo durante la estructuración y evolución del arco (Villagomez et al. 2011; Cochrane et al 2014a, Cochrane et al. 2014b; Spikings et al. 2015, Spikings et al. 2016; Van der Lelij et al. 2016; Zapata et al. 2016; Spikings et al. 2019).

Igualmente la Dra. **Elena Centeno García 2023**, Del Lado Mexicano-**UNAM** señala la misma conclusión para Laurentia. (Figuras 9 y 10):

1. Magmatismo tiene una tendencia a migrar de E a W entre los 190 y 155 Ma

4.2.2 Modelo Roll Back de la Placa Farallones (Triásico-Jurásico). Geocronología en Zircones, Laurentia (México-USA)-Gondwana (Colombia-Venezuela):

Se ha integrado los resultados de geocronología en Zircones de lo Dra. Elisa Fitz et al 2020 y del Dr, Hildebrando Leal Mejía et al 2019 ( Figura 9).

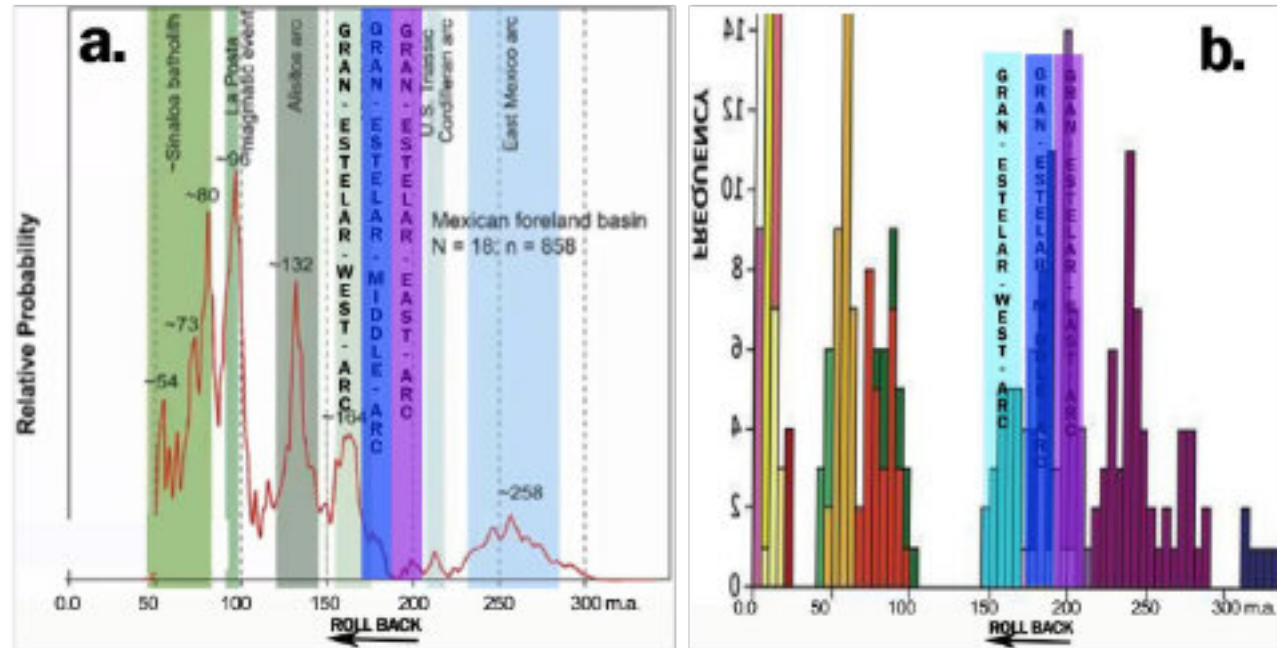


Figura 9. a. Análisis Geocronológico U-Pb en Zircones Detríticos en el Orógeno Mexicano. b. Granitoides Colombia Modificado de Elisa Fitz et al 2020 y del Dr, Hildebrando Leal Mejía et al 2019. En ambos casos se observa los picos correspondientes con las fechas de formación de los Arcos Magmáticos- Volcánicos Gran Estelar Este-Medio-Oeste.

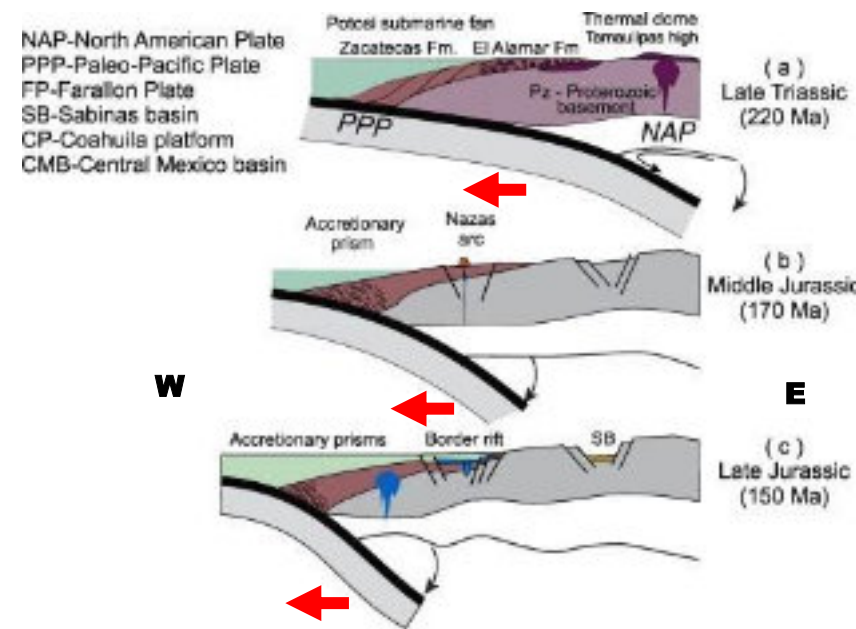


Figura 10. Evolución tectónica Zona Subducción México para el Triásico Superior-Jurásico. Tomado de Elisa Fitz et al 2018, mostrando el Roll Back E-W de la placa Farallones. Imágenes a. ( Para 210ma) y c.: falta el Arco Magmático Gran Estelar.

4.2.3 Correlación Geológica, geoquímica, sedimentológica, facial, estructural, paleogeográfica, paleontológica, geocronológica, Laurentia(México-USA)-Gondwana(Colombia-Venezuela):

El Dr. Claudio Bartolini et al 2003, realizan un importante aporte a las geociencias del periodo Triásico y jurásico de Laurentia-Gondwana, con la amplia correlación entre la Formación Nazas de México, Con la Formación Girón y La Quinta en Colombia y Venezuela. La cual ha sido ampliamente estudiada y propuesta también por otros autores. Sin embargo había estado bajo interrogación concretar y/o confirmar tan importante análisis y postulado. Hecho que nos enorgullece comprobar 23 años después, mediante la reconstrucción tectónica y geocronológica hecha en el presente trabajo (Fig. 1,3).

Bartolini, C., H. Lang, and T. Spell, 2003.

**THE NORTH-SOUTH AMERICA CONNECTION (?)**

In Colombia and Venezuela, Jurassic volcanic, intrusive, and sedimentary rocks of La Quinta and Girón Formations share many of the characteristics of the Nazas Formation in Mexico, such as age, lithologies, geochemical affinity, environments of deposition, and tectonic setting. These similarities, along with the configuration of Pangea in the early Mesozoic, suggest that La Quinta, Girón and Nazas Formations were an integral part of a once-continuous Triassic-Jurassic continental-margin magmatic arc that may have existed along the western margin of Pangea supercontinent.

En la Figura 3 del presente Artículo, se comprueba la importante teoría postulada por los Dres. Bartolini, C., H. Lang, and T. Spell, 2003. Gran Logro y éxito del presente estudio.

El Dr. Edinson Alvarez 2025 (Artículo 5 de esta Serie), realizan un importante aporte a las geociencias del periodo Triásico y jurásico de Laurentia-Gondwana, con la amplia correlación entre la Formación Louant Salt (Golfo de México-América) y la Formación Sal de Zipaquirá-Cundinamarca Basin-Colombia (Edinson Alvarez 2025). Del Jurásico Medio. Proyectando la existencia de la Formación Zipa (Edinson Alvarez 2025) del Jurásico Inferior, Correlacionable con las Formaciones Marinas y Facies Marinas, Formación Montebel, cercana en la Cordillera Oriental de Colombia; Formación Morrocoyal en el Valle Medio del Magdalena y en cercanías de la parte occidental de la Sierra Nevada de Santa Marta-Colombia, con Werner Formation en el Golfo de México. (Figura 11. Correlación Espacio temporal – reconstrucción tectónica-paleogeográfica-Formación de Sal Golfo de México, con la Sal de Colombia, Formación Zipaquirá Edinson Alvarez 2025-Complementos Artículo 5 de esta Serie).

## THE THIRD PART OF THE GULF OF MEXICO THAT BELONGS TO COLOMBIA

EDINSON ALVAREZ-GEOSCIENTIST 2025 - edinson.alvarez@gmail.com

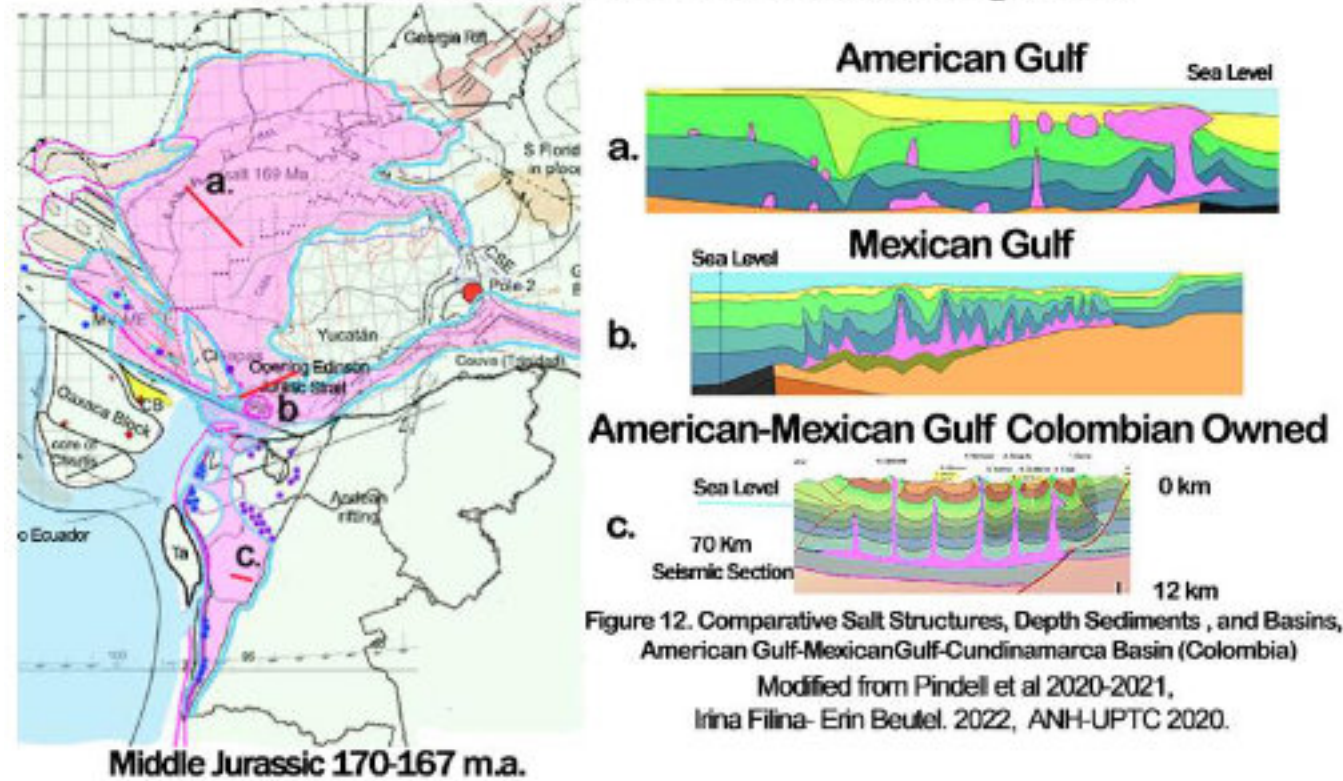


Figura 11. Correlación Formación de Sal Golfo de México con la Sal de Colombia, Formación Sal de Zapaquirá, Elevada a Rango de Formación por Edinson Alvarez 2025.

### 4.3 Las Cinco Giganucleares Fuerzas Geológicas y Tectónicas que Dieron Origen Al Golfo de México.

Se realizó una Integración Avanzada de la Información, basada en los principios de la Teoría de Fuente Compleja SCT (Edinson Alvarez 2025). Paso para Determinar el Origen y Evolución del Golfo de México. Figura 2.

#### 4.3.1 Pluma Mantelar

Una Pluma mantelar Justo debajo del golfo de México, causante de levantamiento, distensión y flujo de magmas máficos, generando el rift central del Golfo a finales del Jurásico medio y terminación del flujo magmático y/o de lavas a inicios del cretácico. (Periodo estimado en Filina and Beutel 2022). (Requisitos Fragmentación Supercontinente-Juan Pablo Lovecchio 2020-Item 4.3.3)(Figura 2-No.1.)

#### 4.3.2 Subducción Con Roll Back Extensión

El Roll Back en la Subducción de la placa Farrallones sobre territorio Mexicano-Americano (Laurentia) y Sobre Territorio Colombiano-Venezolano (Gondwana), plenamente estudiados y comprobado por los estudios anteriormente citados. Dany Yuleimar Mejía Vélez 2019 (Tesis Maestría Unal-Colombia), Elena Centeno García 2023, Elisa Fitz et al 2018, entre otros. (Figura 2-No.3., a y b )

#### 4.3.3 Colapso Gravitacional

El Colapso Gravitacional de la secuencia vulcano clástica de la Formación Nazas y suprayacentes unidades, en el oxfordiano Jurásico Superior 157-163 ma. (Bartolini et al 2003), Pindell 2020-2021. entre otros. (Figura 2-No. 4. )

Coherentes los tres anteriores con el listado presentado por el Dr. Juan Pablo Lovecchio 2020, (Requisitos Fragmentación Supercontinente-)

### Continental breakup

#### Processes:

1. Mantle plume impingement
2. Orogenic gravitational collapse
3. Subduction-related extension (slab retreat, negative rollover, slab steepening)

Sin Embargo, con la Teoría de Fuente Compleja SCT (Edinson Alvarez 2025), se ha adicionado Dos Nuevas Fuerzas que Participaron en el Origen, Creación y Evolución del Golfo De México-América.

#### 4.3.4 Movimiento de Fallas Transformantes Alineadas con North Oaxaca Transfer, Mojave-Sonora y Tamaulipas Transfer.

El movimientos de Fallas Transformantes en la Parte Occidental de Laurentia, fue vital no solo para el transporte de Bloques Alóctonos como Aoxaca y Chortis, etc... sino que ayudó y facilitó el viaje, transporte y deformación del Colapso Gravitacional de la Formación Nazas, Antes Mencionado. (Figura 2-No.2. )

#### 4.3.5 Movimiento de Deriva Continental de la Placa Norte Americana.

El Movimiento de Deriva Continental de la Placa Norte Americana ampliamente estudiado, igualmente referido por la Dra. Elisa Fitz 2020. Movimiento hacia el Sur Oeste (SW), también apporto esfuerzo y deformación, al complejo y variado ambiente geológico y Tectónico del Golfo de México.

La forma como se desarrollaron los eventos, interacción y análisis de las cinco fuerzas geológicas y tectónicas antes mencionadas pueden observarse en la Secuencia de Figuras 1,2,3,4,5,6,7,8,junto con las gráficas y columnas estratigrafías referidas en el Artículo 5 de esta Serie.

**DISCUSSION**

El presente trabajo destraba varias limitantes existentes en el mundo geocientífico relacionados con la evolución tectónica de una de las principales fuentes petroleras del Mundo, el Golfo de México (Golfo de América-Golfo de México) y paralelamente del sistema petrolero jurásico de las cuencas Colombianas.

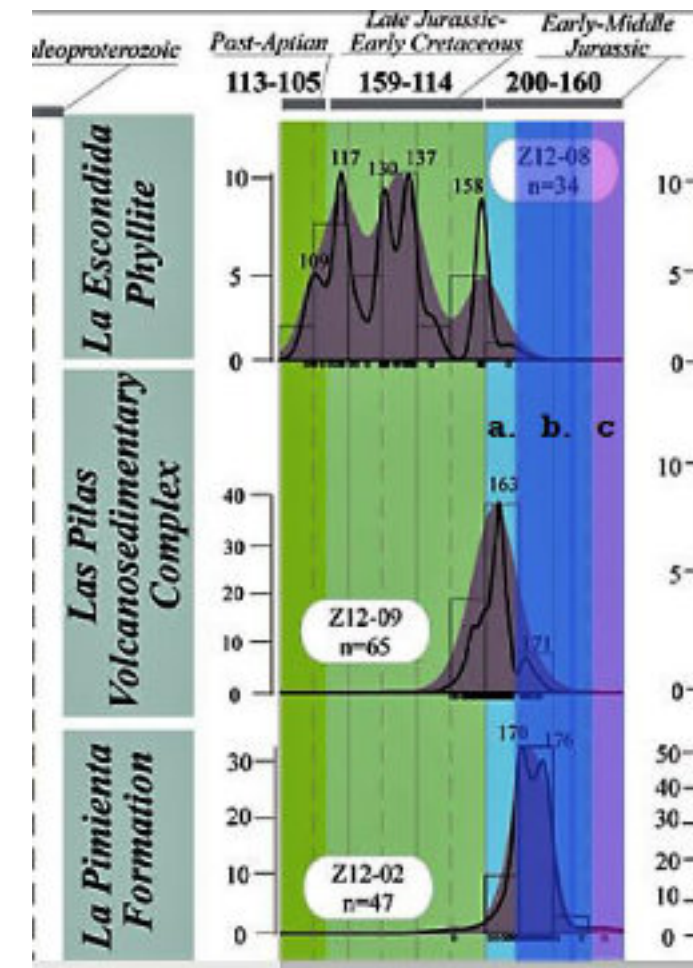
Uno de los principales rasgos geológicos lo constituye el descubrimiento del el Gran **Sistema de Fallas Rudabet (Honor Ruben Dario Alvarez Betancourt-Padre, Figura 1 y 3)**. El cual controla en su base el gran escarpe estructural continental de Laurentia (**Figura 3**). Tema que ayuda a resolver varias preguntas contemporáneas-actuales, relacionadas como gigantes en el presente estudio, incertidumbres esbozadas por importantes geocientíficos de nivel mundial: **James Pindell, Diego Villagómez, Roberto Molina-Garza, Rod Graham and Bodo Weber 2020-2021; Mildred Del Carmen Zepeda Martínez - Tesis Doctoral UNAM. 2021; Alarcón CM, Clavijo-Torres J, Mantilla-Figueroa LC, Rodríguez JG.2020; Irina Filina, James Austin, Tony Doré, Elizabeth Johnson, Daniel Minguez, Ian Norton, John Snedden, Robert J. Stern. 2022 y otros.** Rasgo que demuestra que El Gran Terreno Chibcha de Restrepo y Toussaint 2020, constituyen según el presente estudio, el extremo occidental de la gran escarpa estructural de Laurentia (**Figura 3**). Ocupando cerca de la tercera parte del tamaño de Cuenca, que dio Origen al Golfo de México-Golfo de América (Incluida la Paleocuenca de la Cordillera Oriental de Colombia). para el periodo Triásico Superior-Jurásico.

Aunque se pueden hacer mejoras, retoques, modificaciones a la propuesta presentada en el presente estudio, lo cierto es que el amarre perfecto obtenido a través del **Sistema de Fallas Rudabet (Honor Ruben Dario Alvarez Betancourt-Padre, Figura 1 y 3)**. Es y será el punto de partida o inicio de futuras reconstrucciones de evolución tectónica para adelante o para atrás de este punto de amarre o constrain en el tiempo geológico. El tema que aun merece revisión es determinar si ese punto de amarre corresponde a la edad 200 ma. Del modelo del Dr. Pindell et al 2020-2021, o un poco mas alejado entre 200 y 210 ma. Para ello tener en cuenta las velocidades de viaje de los bloques Chortis-Oaxaca y sus implicaciones en las reconstrucciones hacia el pasado, tema que no alcanza ser objeto de análisis del presente trabajo.

Como soporte de la existencia de una cadena montañosa-volcánica desde el triásico superior hasta el jurásico medio-superior, que se extendía desde México (Laurentia) y Colombia (Gondwana) denominada en el presente trabajo **Proto Cordillera Triásica-Jurásica Gran Estelar**: Proto Cordillera Triásica-Jurásica Gran Estelar conformada por la parte de terrenos altos-serranía ubicados contiguos al occidente de la Paleosierra Madre Oriental Mexicana y la Proto Cordillera Central de Colombia, se tienen los presentes elementos:

1. Según la reconstrucción paleogeográfica-tectónica realizada en el presente trabajo, se requiere de un elemento estructural que funcione como respaldo de Talud del gran Escarpe continental del Golfo de México, respecto de las aguas del océano pacífico, para el periodo Triásico Superior-Jurásico Medio. (Honor Amada Esposa Estela Moreno Z.) (**Figuras 1, 2, 3, 4 y 5**).

2. Al analizar la ubicación y evolución durante el periodo Triásico Superior-Jurásico de los Arcos Volcánicos-Magmáticos Gran Estelar Este, Medio y Oeste, se observa, interpreta y analiza que el área de intersección, solapamiento o cruce de estos tres arcos magmáticos, se ubica justo en la zona donde se proyecta la existencia de esta cadena montañosa-volcánica. (**Figuras 1, 2, 3, 4 y 5**).
3. Buena parte de la proto cordillera Triásica Superior-Jurásica Superior Gran Estelar, sufrió colapso gravitacional y extensión en el jurásico medio-superior en México, que conjunto con la Separación del Laurentia y Gondwana, la erosionaron, enterraron y/o desvanecieron en Buena parte de México y dieron paso al ingreso de las aguas jurásicas que entraron por la apertura principal **Estrecho de Edinson Alvarez (Figura 6)** (Ubicado entre el Macizo de Chiapas y la Península de la Guajira (En el jurásico Medio, Serranía de Cosinas, Serranía de Macuira) (**Ver Artículo 5 de esta serie**). Mientras que en Colombia, la actividad de los Arcos Volcánicos-Magmáticos Gran Estelar Medio y Oeste, ayudaron a dar forma a la Cordillera Central de Colombia.
4. Los análisis de detritos de Zircón realizados al oeste de la proto cordillera Triásica Superior-Jurásica Superior Gran Estelar, en el área de Sierra Zacatecas (Zona Central de México), en las Formaciones La Pimienta, Las Pilas y La Escondida, reflejan la existencia de estas unidades volcánicas, como aportantes de material detrítico para las formaciones mencionadas. **Figura 12. Modificado de Berlaine Ortega-Flores 2016.**



**Figura 12.** Deposición Detrítica correspondiente a los Arcos Volcánicos Gran Estelar Este(c), Medio(b) y Oeste(a), en el área Sierra Zacatecas México. Modificado de **Berlaine Ortega-Flores 2016.**

En Colombia tradicionalmente el Sector Petrolero y el mundo Geocientífico, ha asumido que la sal corresponde a depositación cretácica inferior, así aparece en todas las cartas coronoestratigráficas del país a la fecha 2025. Sin embargo hay varios puntos que no soportan esa tesis y por el contrario contradicen esa teoría, entre ellos están (Ver Artículo 5 de esta Serie):

- 1- Siendo el play Cretácico uno de los más estudiados y perforados en el país por el interés de sus sistemas petroleros, no hay reporte abundante de sal, ni deformación salina de la cuenca de los llanos orientales, catatumbo, valle medio y superior del Magdalena, Cuenca de Maracaibo, donde igualmente se registró la depositación cretácica.
- 2- La paleocuenca jurásica de la Cordillera oriental de Colombia ha sido poco estudiada y casi inexplorada según **ANH-UPTC 2020**.
- 3- Los escasos pozos perforados en la cuenca de la Cordillera oriental de Colombia profundizan solo hasta la secuencia cretácica en su gran mayoría, desconociéndose el registro jurásico (Especialmente en la Subcuenca de Cundinamarca **(Figura 14-del Artículo 5 de esta serie)**).
- 4- El análisis de los hechos, indicios, pruebas, registros anteriores nos muestran claramente que Mientras la Transgresión cretácica al continente suramericano ha sido ampliamente estudiada y analizada, nos encontramos que el ingreso del mar o inundación al territorio fue amplia y masiva, es decir había comunicación directa con el mar abierto, por lo tanto se tenían condiciones normales de salinidad no aptas para la depositación de la sal. Mientras que el análisis de los hechos, indicios, pruebas, registros aportados en el presente trabajo, demuestran que durante el periodo Jurásico Medio **(Bajociano-Bathoniano. 166-170 ma)**, El Arco Nazas de México estaba en colisión con la esquina Noroccidental de Suramérica (Gondwana), rompiendo la Cordillera Jurásica Gran Estelar, creando el estrecho de Edinson (Norte, centro y sur) ingresando el océano pacífico a inundar el Golfo de México (Golfo de América y Golfo de México), igualmente inundando la paleocuenca de la Cordillera Oriental de Colombia, Demostrado por los corredores marinos del jurásico inferior y medio, definidos a partir de las columnas estratigráficas **1,2,3,3a,3b y 3d; 4, 4a, 3c (posteriormente erosionadas), Figuras 6,9,10,11,12,13,14,15,16**. Generando un flujo de agua de mar restringida, ocasionando baja circulación, y por lo tanto hipersalinidad, que conjugado con la gran extensión de la Cuenca y las altas condiciones atmosféricas de altas temperaturas, favorecieron la rápida depositación de la sal **(Filina et al 2022)**, que alcanza un espesor de 3 a 4 km. **Claramente podemos concluir que la sal de la cordillera Oriental de Colombia hace parte del mismo ambiente, tiempo y condiciones a las que se formaron en el Golfo de México, durante el jurásico Medio.** (Ver Artículo 5 de esta Serie).

#### Implicaciones en los Sistemas Petroleros

Del Análisis correspondiente de los ítems de la sección 4.0 del Artículo 5 de esta Serie, podemos concluir, que nos encontramos ante dos nuevos play y/o Sistemas petroleros hipotéticos no explorados en la Cuenca De Cundinamarca, perteneciente a la paleocuenca jurásica de la Cordillera Oriental de Colombia.

1. **Play Jurásico:** Conformado por la depositación de shales orgánicos del jurásico inferior-**Hipotética Formación Zipa** de Edinson Alvarez 2025 (Roca Fuente, contemporánea con las Formaciones Marinas-De facies marinas Morrocoyal y Formación Montebel), interdigitado hacia los bordes de la Cuenca con depósitos vulcanosedimentarios detríticos de ladera, flujos de escombros, turbiditas (Roca Reservorio) y sello de 3 a 4 km de sal depositada durante el jurásico Medio.
2. **Play Cretácico asociado a sello de sal:** Roca Fuente Formación Fómeque, Roca Reservorio Formación Une, Roca Sello Sal alóctona. Igual para las secuencias superiores.

El Análisis estratigráfico y estructural Regional indica que existe la posibilidad, que debajo del Play Jurásico descrito anteriormente, se encuentre la secuencia Triásica conformada por las unidades y/o sus equivalentes **(Figura 9,14- capítulo 5 de esta serie, estación 11 )**:

En el costado este, el batolito de Ibagué intruye otra serie de rocas sedimentarias y volcánicas de edad pre-cretácea, conocida anteriormente como **Grupo Payandé**, el cual consta de tres unidades claramente diferenciables, ordenadas cronoestratigráficamente de más joven a más antigua así **(Alberto Nuñez 1986)**:

- **Formación Saldaña:** Es la unidad más superior; se divide en dos miembros, uno inferior predominantemente volcánico, llamado informalmente por Jimeno y Guevara (1976:19) Unidad Volcánica y otro superior, sedimentario y discordante sobre el anterior, denominado por los mismos autores Unidad Arcósica. Upper Triassic- Lower Jurassic age. (Bayona et al 2020).

- **Formación Payandé:** compuesta por dos miembros, uno calcáreo y otros clástico; niveles fosilíferos reportados en esta unidad han confirmado una edad Triásico superior (Karniano Noriano). Late Triassic age (Karnian-Norian). (Bayona et al 2020).

- **Formación Luisa:** Consiste en potentes bancos de brechas sedimentarias y conglomerados arcósicos, testigos de una intensa erosión. Por estar suprayacida por la fosilífera Formación Payandé, se le asigna una edad. Permian age. (Bayona et al 2020).

La integración del conocimiento desarrollado a través de la Teoría de Fuente Compleja SCT, y sus diferentes herramientas avanzadas, nos permite dar luces y respuestas a todos los interrogantes que por más cien años ( época contemporánea ), han inquietado a los geocientíficos y exploradores petroleros, sobre la evolución tectónica-sedimentaria-estratigráfica y estructural del Golfo de México (Golfo de América-Golfo de México y la paleo Cordillera Oriental de Colombia). **Figuras 1 al 8. (Igual tratamiento ha sido aplicado para todas las otras cuencas petroleras y mineras de Colombia)**

Las respuestas se vuelven lógicas, sencillas, y toman valor a la luz de la Teoría de Fuente Compleja (SCT) y sus herramientas. Como lo verán en la parte concluyente del presente estudio.

**Si tienes un problema Geocientífico de alta complejidad en su compañía, con importantes implicaciones económicas, la Teoría de Fuente Compleja (SCT) y sus herramientas ha llegado para resolverlo.** Un análisis más detallado y solución de problemas de alta complejidad tectónica, estructural y estratigráfica puede consultarse con el autor de este artículo.

**CONCLUSION**

La Teoría de Fuente Compleja SCT y sus herramientas avanzadas, demuestran su valor en el presente informe, contribuyendo al conocimiento y entendimiento de la evolución tectónica del Golfo de México ( Golfo de América-Golfo de México y la Paleocuenca de la cordillera Oriental de Colombia), Durante el Periodo Triásico Superior-Jurásico. Aportando al conocimiento y desarrollo geocientífico, que servirá para garantizar la sostenibilidad energética, económica y social del País.

Hemos probado a través del presente análisis, como los postulados de la SCT, se han ido corroborando y probando con el paso del tiempo, develando el poder predictivo de la misma. Y en el presente artículo en Honor a Miguel de Cervantes Saavedra y su obra, **comprobamos el derribo de Seis (6) Gigantes para el área ( Llamaremos Gigantes a: Conceptos, técnicas, tecnologías, metodologías, procedimientos, herramientas, incertidumbres, preguntas sin respuesta, etc.). Contando Un Total de 25 Gigantes Derribados en estos 6 Artículos Publicados.**

**5.1 Gigante No.1 de este capítulo ( Gigante No. 20 Derribado de esta serie):**

Directamente Relacionado con la sucesión de eventos que generaron o dieron origen a la configuración estructural y sedimentaria del Golfo de México.

**Spikings, R. & Paul, A. 2019.**

The relationship between Triassic plate margin extension and the final fragmentation of Pangaea is unclear. However,

**Filina et al 2022.** (Irina Filina, James Austin, Tony Doré, Elizabeth Johnson, Daniel Minguez, Ian Norton, John Snedden, Robert J. Stern. 2022. )

exploration. However, the opening of the basin remains debated for two reasons: 1) the quality of data does not allow for reliable interpretations of crustal features beneath thick and complex overburden, and 2) most industry well and geophysical data are proprietary. The last concerted effort by industry and academia to summarize the

**Respuesta:** Con el presente estudio se aclara en Buena parte la relación espacio-temporal de los procesos de subducción, generación de arcos volcánicos-plutónicos, proceso de rift, llenado y depositación de cuencas, siendo el marco general para los demás procesos posteriores y anteriores de la formación y evolución tectono-estratigráfica de Cuencas tanto Mexicanas, Americanas, como Colombianas Durante el Periodo Jurásico y parte del Triásico Superior. **Como los procesos que dieron origen a la extensión y fragmentación de la Pangea, específicamente. (Figuras 2,3,4,5,6,7,8)** ( Para ampliar detalles acerca de los sucesos, eventos e implicaciones en el ciclo exploratorio O&G&M consultar con el autor de este artículo ).

**5.2 Gigante No.2 ( Gigante No. 21 Derribado de esta Serie ) :**

**Alarcón CM et al 2020.** (Alarcón CM, Clavijo-Torres J, Mantilla-Figueroa LC, Rodríguez JG. 2020).

de arcos magmáticos marginales (Rodríguez, et al., 2018). Uno de los retos actuales es la reconstrucción de la historia geológica del Jurásico en los Andes del norte, no solo desde el punto de vista geoquímico y geocronológico de las rocas plutónicas y volcánicas, sino porque deben entenderse de forma integral las relaciones del magmatismo con la formación de cuencas y la acumulación de sucesiones sedimentarias. Como lo sugieren Bayona,

**Camilo Bustamante Londoño 2020.** (Grupo de Investigación Tectónica-estratigráfica Egeo-Unal, Grupo Tectónica-Eafit)

- Relación entre cuencas sedimentarias, magmatismo y metamorfismo.

**Respuesta:** Se aclara en Buena parte la relación espacio-temporal de los procesos de subducción, generación de arcos volcánicos-plutónicos, proceso de rift, llenado y depositación de cuencas, siendo el marco general para los demás procesos posteriores y anteriores de la formación y evolución tectono-estratigráfica de Cuencas tanto Mexicanas, Americanas, como Colombianas Durante el Periodo Jurásico y parte del Triásico Superior. Se determina el marco espacio temporal tectónico-estructural-sedimentario, para poder determinar las relaciones entre cuencas sedimentarias, magmatismo y metamorfismo. **(Figuras 3,4,5,6,7,8)** ( Para ampliar detalles acerca de los sucesos, eventos e implicaciones en el ciclo exploratorio O&G&M consultar con el autor de este artículo ).

**5.3 Gigante No.3 ( Gigante No. 22 Derribado de esta Serie ) :**

**Camilo Bustamante Londoño 2020.** (Grupo de Investigación Tectónica-estratigráfica Egeo-Unal, Grupo Tectónica-Eafit)

- ¿Cómo fueron las variaciones de los espesores corticales durante el Jurásico?

**Respuesta:** La integración e interpretación de los eventos volcánicos, magmáticos, tectónico-estructurales, sedimentación, relaciones paleogeográficas y geocronológicas, entre otros. Permiten inferir-estimar-establecer la relación de espesores corticales durante el periodo Triásico Superior-Jurásico. **(Figuras 3,4,5,6,7,8)** ( Para ampliar detalles acerca de los sucesos, eventos e implicaciones en el ciclo exploratorio O&G&M consultar con el autor de este artículo ).

**5.4 Gigante No.4** ( Gigante No. 23 Derribado de esta Serie ) :

**Camilo Bustamante Londoño 2020.** (Grupo de Investigación Tectónica-estratigráfica Egeo-Unal, Grupo Tectónica-Eafit)

- ¿Cómo se comportó la margen convergente durante el Jurásico?

**Respuesta:** La integración e interpretación de los eventos volcánicos, magmáticos, tectónico-estructurales, sedimentación, relaciones paleogeográficas y geocronológicas, entre otros. Permiten determinar como se comportó el margen Convergente durante el periodo Triásico Superior-Jurásico. (Figuras 3,4,5,6,7,8) ( Para ampliar detalles acerca de los sucesos, eventos e implicaciones en el ciclo exploratorio O&G&M consultar con el autor de este artículo).

**5.5 Gigante No.5** ( Gigante No. 24 Derribado de esta Serie ) :

**Camilo Bustamante Londoño 2020.** (Grupo de Investigación Tectónica-estratigráfica Egeo-Unal, Grupo Tectónica-Eafit)

- Tres modelos de evolución:  
- Slab roll-back  
- Erosión por subducción  
- Convergencia oblicua

**Respuesta:** Claramente se observa que los investigadores Geocientíficos tanto del Norte (México-USA), como del Sur (Colombia-Venezuela), y los resultados del presente estudio- Edinson Alvarez 2025-26, confirman el Modelo del Slab Roll Back, como uno de los principales detonantes de la apertura y evolución del Golfo de México-América-fragmentación de la Pangea. Los otros eventos son complementarios, y pueden o no obedecer a situaciones particulares-locales-regionales, dentro del proceso evolutivo. (Figura 2, 3,4,5,6,7,8,10) ( Para ampliar detalles acerca de los sucesos, eventos e implicaciones en el ciclo exploratorio O&G&M consultar con el autor de este artículo).

**5.6 Gigante No.6** ( Gigante No. 25 Derribado de esta Serie ):

**Mildred Del Carmen Zepeda Martínez - Tesis Doctoral UNAM. 2021**

estas premisas, reconstruir la evolución de las cuencas del Jurásico Inferior-Medio de México no sólo enriquecería el debate sobre la dinámica de un proceso tectónico de escala global como es la fragmentación de un supercontinente, sino que también podría contribuir a la comprensión del origen y distribución de los reservorios de petróleo que existen en el país.

**Respuesta:** Los Aporte y conocimientos Geocientíficos del presente estudio, Claramente impactan en los procesos de formación, generación y evolución de los sistemas petroleros y Mineros, tanto del Golfo De México-América, Cordillera Oriental de Colombia y Cuencas de Venezuela, como de los recursos mineros de la parte continental de los citados países. (Figuras 1,2,3,4,5,6,7,8) ( Para ampliar detalles acerca de los sucesos, eventos e implicaciones en el ciclo exploratorio O&G&M consultar con el autor de este artículo).

**5.7 Implicaciones en los Sistemas Petroleros para Colombia.**

Del Análisis correspondiente de los items de la sección 4.0 (Ver Artículo 5) y Discusión anterior, podemos concluir, que nos encontramos ante dos nuevos play y/o Sistemas petroleros hipotéticos no explorados en la Cuenca De Cundinamarca, perteneciente a la paleocuenca jurásica de la Cordillera Oriental de Colombia.

3. **Play Jurásico:** Conformado por la depositación de shales orgánicos del jurásico inferior-**Hipotética Formación Zipa** de Edinson Alvarez 2025 (Roca Fuente, contemporánea con las Formaciones Marinas-De facies marinas, Morrocoyal y Formación Montebel), interdigitado hacia los bordes de la Cuenca con depósitos vulcanosedimentarios detríticos de ladera, flujos de escombros, turbiditas (Roca Reservorio) y sello de 3 a 4 km de sal depositada durante el jurásico Medio.
4. **Play Cretácico asociado a sello de sal:** Roca Fuente Formación Fómeque, Roca Reservorio Formación Une, Roca Sello Sal alóctona. Igual para secuencias superiores.

El Análisis estratigráfico y estructural Regional indica que existe la posibilidad para la Cuenca de Cundinamarca-Colombia, que debajo del Play Jurásico descrito anteriormente, se encuentre la secuencia Triásica conformada por las unidades **Formación Saldaña, Payandé y Luisa y/o sus equivalentes**, tema que debe ser probado o descartado a través del análisis e interpretación sísmica 2D-3D y la perforación profunda de la cuenca. (Trabajo para la ANH, Servicio Geológico Colombiano, Ecopetrol y/o Compañías Extranjeras) (Figura 9,14, Artículo 5 de esta serie, estación 11 ).

**5.8** Mediante la interpretación de la intersección de los Arcos Magmáticos-Volcánicos Gran Estelar Este-Medio y Oeste, como la existencia de depositación detrítica de circones de edad Triásico Superior-Jurásico en secuencias posteriores al oeste Sierra Zacatecas (Zona Central México), Entre otros. Ayudan a demostrar la existencia de la Proto Cordillera Gran Estelar del Tríasico Superior-Jurásico, de extensión continental, abarcando desde el centronorte de México, hasta el sur de Colombia. **Figuras 1,2,3,12.**

## 5.9 Las Cinco Giganucleares Fuerzas Geológicas y Tectónicas que Dieron Origen Al Golfo de México-América.

Mediante El presente estudio, se pudo identificar los diferentes eventos que dieron origen al Golfo de México-América. Cinco Giganucleares Fuerzas participaron de Su origen, creación, evolución y desarrollo de la Cuenca:

### 5.9.1 Pluma Mantelar

Una Pluma mantelar Justo debajo del golfo de México, causante de levantamiento, distensión y flujo de magmas máficos, generando el rift central del Golfo a finales del Jurásico medio y terminación del flujo magmático y/o de lavas a inicios del cretácico. **(Periodo estimado en Filina and Beutel 2022). (Requisitos Fragmentación Supercontinente- Juan Pablo Lovecchio 2020-Item4.3.3) (Figura 2-No1)**

### 5.9.2 Subducción Con Roll Back Extensión

El Roll Back en la Subducción de la placa Farrallones sobre territorio Mexicano-Americano (Laurentia) y Sobre Territorio Colombiano-Venezolano (Gondwana), plenamente estudiados y comprobado por los estudios anteriormente citados. **Dany Yuleimar Mejía Vélez 2019 (Tesis Maestría Unal-Colombia), Elena Centeno García 2023, Elisa Fitz et al 2018, entre otros. (Figura 2-a,b, 2-No3)**

### 5.9.3 Colapso Gravitacional

El Colapso Gravitacional de la secuencia vulcano sedimentaria de la **Formación Nazas y suprayacentes unidades, en el oxfordiano Jurásico Superior 157-163 ma. (Bartolini et al 2003), Pindell 2020-2021, entre otros autores. (Figura 2-No4)**

**Complementario a lo anterior la Teoría de Fuente Compleja SCT (Edinson Alvarez 2025),** ha adicionado Dos Nuevas Giganucleares Fuerzas.

### 5.9.4 Movimiento de Fallas Transformantes Alineadas con North Oaxaca Transfer, Mojave- Sonora y Tamaulipas Transfer.

El movimiento de Fallas Transformantes en la Parte Occidental de Laurentia, fue vital no solo para el transporte de Bloques Alóctonos como Aoxaca y Chortis, etc... sino que ayudó y facilitó el viaje, transporte y deformación del Colapso Gravitacional de la Formación Nazas, Antes Mencionado. Empujando y aportando esfuerzo a la apertura del Golfo de México. **(Figura 2-No2)**

### 5.9.5 Movimiento de Deriva Continental de la Placa Norte Americana.

El Movimiento de Deriva Continental de la Placa Norte Americana ampliamente estudiado, igualmente referido por la **Dra. Elisa Fitz 2020. Movimiento hacia el Sur Oeste (SW), también apporto esfuerzo y deformación, al complejo y variado ambiente geológico y Tectónico del Golfo de México. (Figura 2-No5)**

**La forma como se desarrollaron los eventos, interacción y análisis de las cinco fuerzas geológicas y tectónicas antes mencionadas pueden observarse en la Secuencia de Figuras 1,2,3,4,5,6,7,8, junto con las gráficas y columnas estratigrafías referidas en el Artículo 5 de esta Serie.**

## 5.10 Consideraciones para el Premio Nobel en Ciencias-Geociencias

Según el informe **HISTORIA DE LA EXPLORACIÓN PETROLERA EN MÉXICO**, <https://www.facebook.com/groups/tampicoantiguo/posts/2373490346009997/> : El principio de la industria petrolera mundial tuvo lugar con el éxito del pozo Drake, en Oil Creek, Pennsylvania, en el año de 1859. (aproximadamente hace 170 años)

Y según Google.com la primera plataforma móvil marina (MODU) que perforó en el Golfo de México fue el Mr. Charlie en 1954, cerca de Louisiana, EE. UU., un precursor global de la perforación en alta mar. (Aproximadamente hace 70 años).

En los importantes aportes del Dr. Josh Rosenfeld. 2002. Expresa:

**Muchos geocientíficos y empresas han gastado energía y recursos para proveer los datos e interpretaciones que apoyan el entendimiento actual del Bloque de Yucatán.**

Lo anterior indica que a pesar de haber hecho importantes contribuciones al conocimiento de la Cuenca, **más de Diez Mil Geocientíficos del mundo, en más de 100 años de Historia (Privados-Independientes-Academia);** aún persisten incertidumbres Sobre el Origen y Evolución Tectono estratigráfica del Golfo de México (Relacionados como Gigantes en los Artículos 5 y 6 de la presente Serie):

**Tema que felizmente hemos resuelto a través de las Herramientas Avanzadas de la Teoría de Fuente Compleja (SCT- Edinson Alvarez 2025). con importantes implicaciones en el ciclo exploratorio Producción de Petróleo-Gas Mundial. (Fig. 1,2,3,4,5,6,7,8,13,14,15)**

**Se ha resuelto con éxito una pregunta con Cerca de 500 años de historia y 24 preguntas, la Mayoría con más de 100 años de historia, a través de la serie de Artículos 01 al 06, respondiendo a los interrogantes planteados por los más destacados Geocientíficos contemporáneos del Mundo. Trabajo lo suficientemente Valioso e Importante, como Aporte A las Geociencias a nivel Mundial, que nos permite Humildemente poner en consideración La Nominación y Otorgamiento del Premio Nobel En Ciencias, por los descubrimientos Realizados en el presente Estudio...**

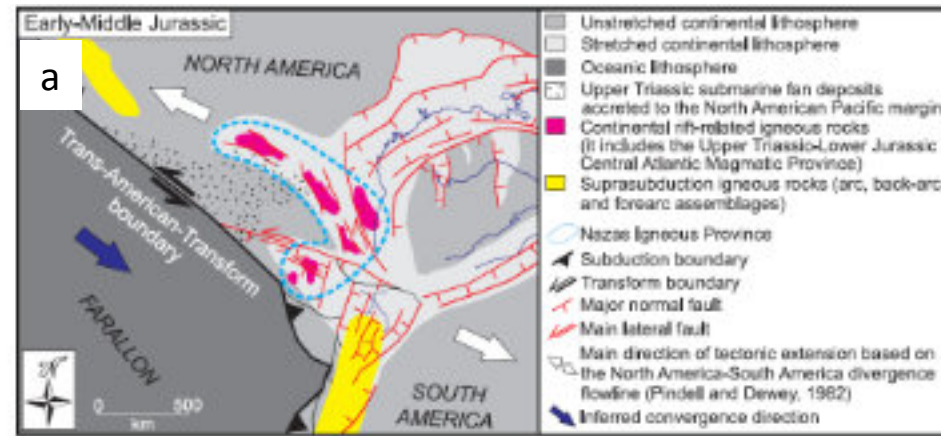


Fig. 13. [Colour online] Geotectonic reconstruction of the North America - South America divergent boundary during Early-Middle Jurassic time (~190-170 Ma), after Boschma et al. 2014; Bayona et al. 2020; Erlich & Pindell, 2023 and Pindell et al. 2021). The reconstruction shows the novel interpretation of the Nazca province related to the continental rift between North and South America. In this new scenario, we propose that the Mexican segment of the North American margin was a transform boundary.



Figura 2. Reconstrucción paleogeográfica del margen este ecuatorial de Pangea durante el Jurásico Temprano-Medio, mostrando la posición paleogeográfica del sur de México en una posición más noroccidental y la localización de las fallas mayores que delimitaron las cuencas desarrolladas durante el desarrollo del rift de Pangea. Adaptado de Parolari et al. (2022) y Zepeda-Martínez et al. (2021).

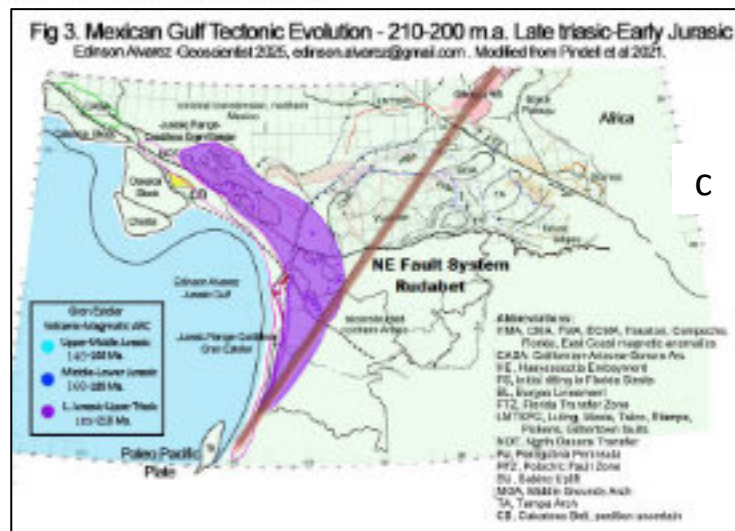


Figura 13. Comparación del modelo presentado en el presente trabajo Edinson Alvarez 2025-26, con amarre estructural, tectónico, geocronológico, geoquímico, estratigráfico, sedimentológico, petrográfico, paleontológico, vulcanológico, entre otros, respecto a recientes modelos Publicados en a. Parolari M, Martini M. et al 2022. b. María Patricia Velasco de León 2024. c. Edinson Alvarez 2025-2026.

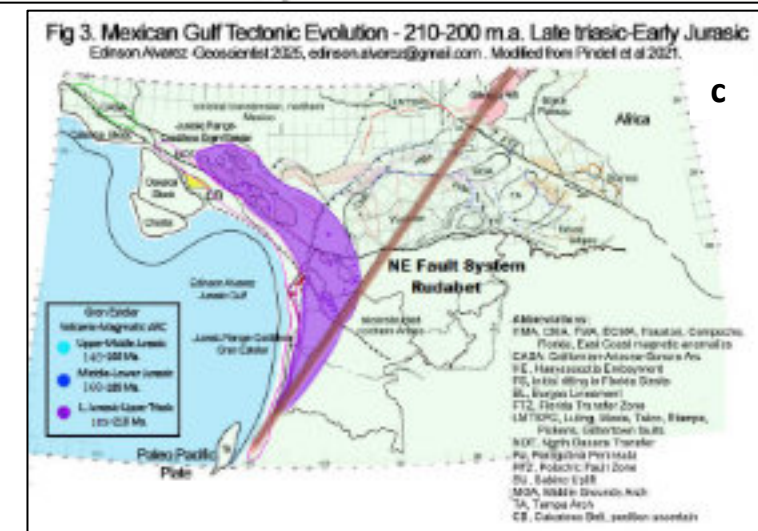
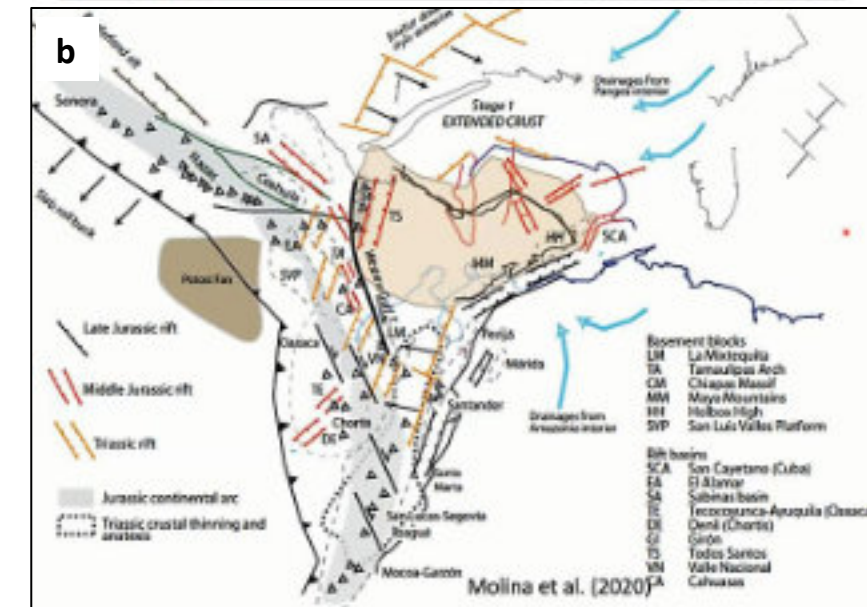
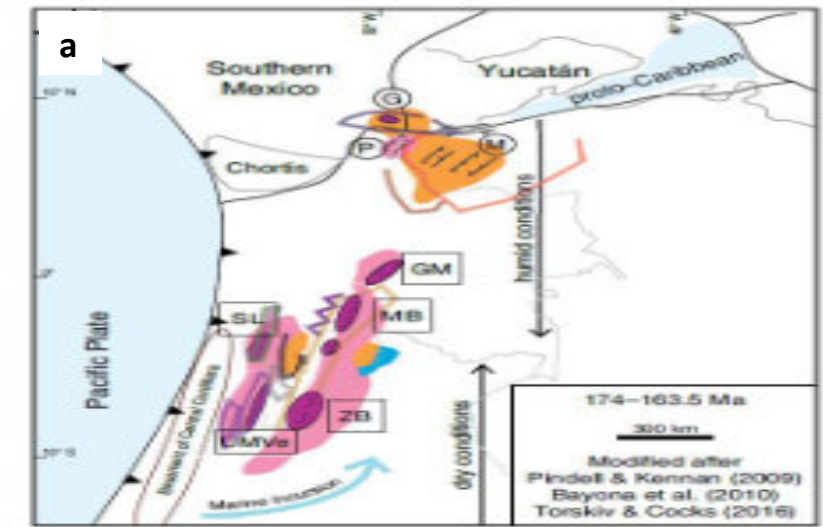
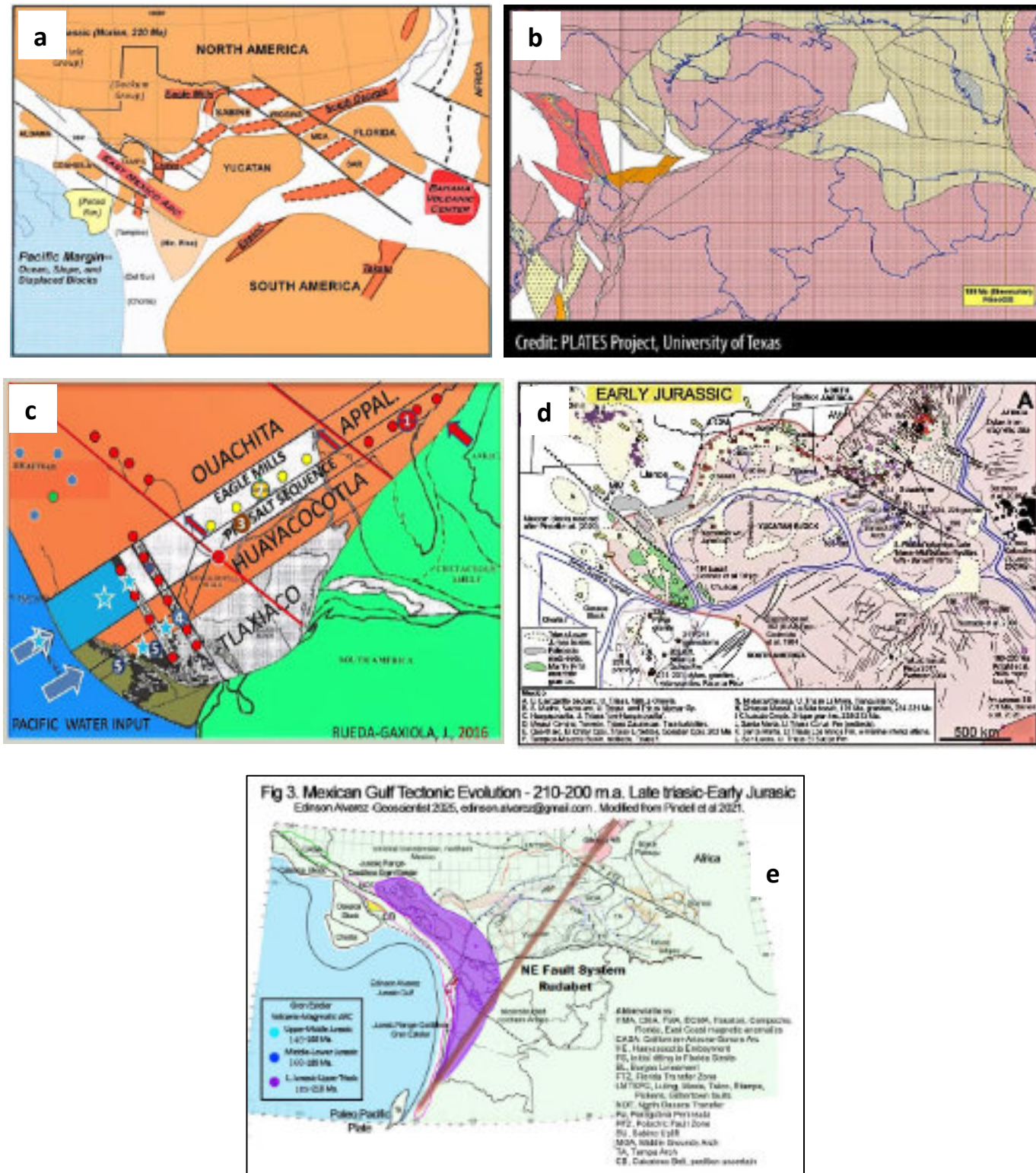


Figura 14. Comparison of the model presented in this work Edinson Alvarez 2025-26, with tie down structural, tectonic, geochronological, geochemical, stratigraphic, sedimentological, petrographic, paleontological, volcanological, among others, with respect to recent models published in a. Modified from Bayona et al 2019-20. b. Molina et al 2020, taken from Bayona 2021. c. Edinson Alvarez 2025-2026.



**Figura 15.** Comparison of the model presented in this work Edinson Alvarez 2025-26, with tie down structural, tectonic, geochronological, geochemical, stratigraphic, sedimentological, petrographic, paleontological, volcanological, among others, with respect to recent models published in a. Tom Ewing- 2016. b. Plates Project Texas University, taken from Robert J. Stern and Randy Keller 2018. c. Rueda-Gaxiola J. 2016-2019 d. Pindell and Heyn 2022 e. Edinson Alvarez 2025-2026, Upper Triassic-Lower Jurassic.

Esta metodología también se aplica a áreas complejas como los cinturones salinos (presal), el Golfo de México, el Golfo de América, la costa brasileña, la costa africana, el Mediterráneo, la costa de Alaska y Canadá, las cordilleras y estribaciones de las Montañas Rocosas, los Andes, el Atlas, el Himalaya y la Península Arábiga, entre otras, así como a áreas de baja o mínima complejidad estructural tectónica. Asimismo ayuda en el aumento de la producción en yacimientos complejos, al confirmar y refinar los modelos geológicos y geomecánicos de yacimientos que presentan este problema de doble e incluso triple interpretaciones y modelos.

Algunas de la herramientas de la teoría de Fuente Compleja SCT, El método EAST-P de la SCT, fue propuesto a Ecopetrol en abril de 2024, por un valor comparable a las transacciones de las grandes compañías tecnológicas. Este valor lógicamente excedía la capacidad económica y financiera de la compañía, por esta razón nosotros invitamos a @Pötus, lista Forbes y grandes compañías a participar de este desarrollo.

Si tienes un problema Geocientífico de alta complejidad en su compañía, con importantes implicaciones económicas, la Teoría de Fuente Compleja (SCT) y sus herramientas ha llegado para resolverlo. Un análisis más detallado y solución de problemas de alta complejidad tectónica, estructural y estratigráfica puede consultarse con el autor de este artículo.

El análisis del soporte técnico, le ha merecido reconocimiento por sus aportes al conocimiento geocientífico de Colombia por parte de importantes personalidades y entidades. ( Maya journal of geosciences September edition 2025, pag. 154, Art-1/10 ), <https://revistamaya.com/wp-content/uploads/2025/08/Revista-Maya-Geociencias-Septiembre-2025.pdf>.

**Artículo-1(Páginas-150-154):** Alvarez Serrato Edinson Dario, 2025. Predictive Corridor Model O&G prospects, Lower Magdalena Valley and SSJ 2025. P 150-154. <https://revistamaya.com/wp-content/uploads/2025/08/Revista-Maya-Geociencias-Septiembre-2025.pdf>

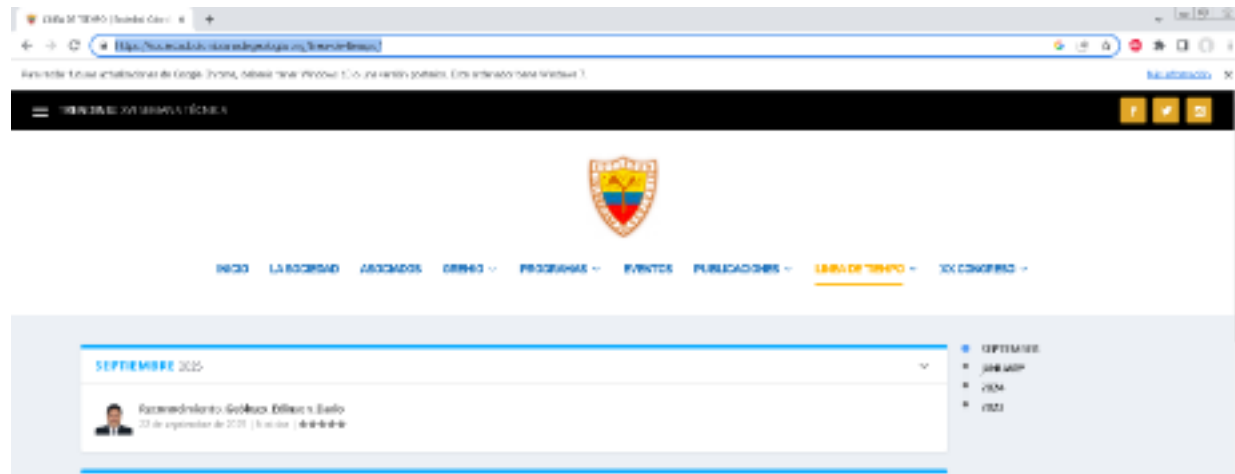
**Artículo-2(Páginas-37-47):** Alvarez Serrato Edinson Dario, 2025. Structural Seismic Interpretation of SSJ (2003-2025) Vs East-P Method Solution by Edinson Alvarez-2025. P-37-47. <https://revistamaya.com/wp-content/uploads/2025/09/Revista-Maya-Geociencias-EDICION-ESPECIAL-XXV-2025.pdf> <https://revistamaya.com/wp-content/uploads/2025/09/Revista-Maya-Geociencias-EDICION-ESPECIAL-XXV-2025.pdf>

**Artículo-3(páginas-76-98):** Alvarez Serrato Edinson Dario, 2025. Regional Integration, complex seismic interpretation and Petroleum systems. of VIM- SSJ - SinuOFF, Guajira OFF. And Urabá.2025. P 79-98. : <https://revistamaya.com/wp-content/uploads/2025/10/Revista-Maya-Geociencias-EDICION-ESPECIAL-XXVI-2025.pdf> <https://revistamaya.com/wp-content/uploads/2025/10/Revista-Maya-Geociencias-EDICION-ESPECIAL-XXVI-2025.pdf>

**Artículo-4(páginas-169-180):** Alvarez Serrato Edinson Dario, 2025. Solution to Uncertainty Volcanic Arc Of The Subduction Zone, Over The Central Cordillera, Colombian Andes. 2025. P 169-180. <https://revistamaya.com/wp-content/uploads/2025/11/Revista-Maya-Geociencias-Diciembre-2025.pdf> <https://revistamaya.com/wp-content/uploads/2025/11/Revista-Maya-Geociencias-Diciembre-2025.pdf>

**Artículo-5(páginas-169-180):** Alvarez Serrato Edinson Dario, 2025. The third part of the Gulf of Mexico that belongs to Colombia. A Marvelous, Magical, And Cinematic Journey Through The Jurassic Period, Told By Edinson Alvarez.2025. Cordillera Oriental de Colombia. Importantes Contribuciones En Geociencias Prometen Revolucionar La Exploración O&G&M. No 5/10.Revista Maya Diciembre 2025. 39 p. <https://revistamaya.com/wp-content/uploads/2025/12/Revista-Maya-Geociencias-EDICION-ESPECIALXXVII-2025.pdf>

La prestigiosa entidad **Sociedad Colombiana de Geología- SCG**, se ha sumado al reconocimiento a través de la publicación en su página WEB. Enlace [https://sociedadcolombianadegeologia.org/reconocimiento\\_edinson\\_dario/](https://sociedadcolombianadegeologia.org/reconocimiento_edinson_dario/)



**Nota1:** La Sociedad Colombiana de Geología (**SCG**) y la Asociación Colombiana de geólogos y geofísicos del Petróleo (**ACGGP**), son organizaciones de índole privada que cumplen similar función social-funciones públicas: Difundir, publicitar, apoyar, todo lo relacionado con las Geociencias, y ciencias de la tierra.

Rechazamos el bloqueo institucional y Censura aplicada al presente trabajo investigativo, por parte de los señores **Jaime Gonzalo Checa Jimenez-Presidente ACGGP y Flover Rodriguez Portillo Director Ejecutivo**, quienes en tres ocasiones han negado la publicación tanto del reconocimiento otorgado por prestigiosas entidades por el trabajo investigativo en geociencias, como de los artículos informativos donde se muestran los resultados del trabajo clasificado como de interés Nacional. **Además de negar el reconocimiento otorgado por los aportes a las Geociencias del País, Queriendo imponer arbitrariamente una revisión previa a los artículos informativos lo cual está prohibido por la ley y los acuerdos-tratados internacionales, violando la libertad de expresión y libertad de información, valores fundamentales supremos en una democracia. (Art 20 Constitución Nacional, Art 13 CADH Convención Americana Derechos Humanos)**

**“La censura es per se discriminatoria(…)” (Sentencia T 539 DE 1994)**, basado en lo anterior con la aplicación de censura se está discriminando al afectado del presente comunicado, **y a su vez con su acción los señores Jaime Gonzalo Checa Jimenez-presidente de la ACGGP, y Flover Rodriguez Portillo, Director Ejecutivo, estarían discriminando al presidente de los Estados Unidos de América quien es una de las tantas personas y audiencia a quienes va dirigido el mensaje informativo.** Además de estar ocultando información de interés Nacional al Pueblo Colombiano, al obstruir el flujo libre de información y el debate público respecto de los resultados del presente trabajo investigativo en geociencias. **(Art 20 Constitución Nacional, Art 13 Convención Americana Derechos Humanos).**

**AGRADECIMIENTOS:**

Sinceros Agradecimientos a los **Dres. Claudio Bartolini, Josh Rosenfeld y a todo el equipo de profesionales editores, auxiliares, miembros de la Revista Maya de Geociencias**, por su apoyo para la publicación y difusión de los resultados del presente Trabajo de Investigación. Y a Todas Aquellas personas que contribuyeron y aportaron para el desarrollo de los mismos.

**REFERENCES**

- Alarcón Gómez, C. M., Gómez-Coronado, J. S., Lizarazo Pabón, J. A., Díaz Villamizar, J. S. & Patarroyo, G. D. 2019. Nuevo Reporte De Plantas Fósiles En La Formación Girón Sobre El Cañón Del Río Lebrija, Santander. Estratos-Uis-2019. 2p. Boletín No 375.
- Alberto Nuñez Tello. 1986. Petrogénesis Del Batolito De Ibagué. Ingeominas. Geología Colombiana No. 15.1986. Pp.35-45. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6560058>
- Alarcón CM, Clavijo-Torres J, Mantilla-Figueroa LC, Rodríguez JG. 2020. Nueva propuesta de edades para el registro sedimentario de las formaciones Bocas y Jordán y su relación con el desarrollo de la actividad magmática del Grupo Plutónico de Santander (cordillera Oriental, Colombia). Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 44(173):1137-1151, octubre-diciembre de 2020. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1208>
- Alejandro Piraquive Bermudez 2017. Structural Framework, deformation and exhumation of the Santa Marta Schists: accretion and deformational history of a Caribbean Terrane at the north of the Sierra Nevada de Santa Marta. Tesis Doctoral Universidad Nacional de Colombia Facultad de Ciencias, Departamento de Geociencias Bogota, Colombia 2017. 394 p
- Andreína García Reyes 2018, Thesis Doctoral-Sorbonne University. Magnetic anomalies and plate tectonic history of the caribbean plate and Mexican Gulf. 218p.
- Andreína García-Reyes, Jérôme Dymont. 2021. Structure, age, and origin of the Caribbean Plate unraveled. Earth and Planetary Science Letters, 2021, 571, pp.117100. 10.1016/j.epsl.2021.117100 .hal-03452889 29 p.
- Andrés Sebastián Martin Ravelo. 2020. Mineralogía, Aspectos geoquímicos y petrogénesis de las esmeraldas en el modelo colombiano. Charla Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=15gZ7AVww84>
- ANH-UIS 2008. Evolución Térmica De La Subcuenca De La Baja Guajira. Contrato N° 56 De 2008. UIS-ANH INFORME FINAL 144 p.
- ANH-Universidad Nacional de Colombia 2020. Evaluación del potencial Exploratorio de las Unidades Cenozoicas del Valle Superior del Magdalena. 800 p. <https://experience.arcgis.com/experience/b4cebb9e9f8743e5b0d75264121d93bc/>
- ANH-UPTC 2020, Integración Geológica, Evaluación De Los Sistemas Petrolíferos Y Prospectividad De Las Cuencas Frontera De Colombia. Cuenca Cordillera Oriental. Sogamoso, Diciembre de 2020. 441p
- ANH-UPTC 2024. Atlas De Áreas De Interés Para La Exploración De H2 En El Norte De Colombia- 104 p.
- Aurora Zavala-Monsiváis1,\* , José Rafael Barboza-Gudiño2, Fernando Velasco-Tapia3, María Elena García-Arreola2. 2012. Sucesión volcánica Jurásica en el área de Charcas, San Luis Potosí: Contribución al entendimiento del Arco Nazas en el noreste de México. 28 p. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana Volumen 64, núm. 3, 2012, p. 277-293 <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2012v6>
- BAQUERO Marvin, VISCARRET Patxo; VALENCIA Víctor ; TAZZO-RANGEL María Daniela ; ANDARA José ; URBANI Franco ; SIFONTES Ramón ; CENTENO José 2015. Petrografía, Geoquímica Y Geocronología U-Pb En Zircón De Rocas Granitoides Pertenecientes Al Domo De Mifafí Y La Culata, Estado Mérida, Venezuela (Petrography, geochemistry and geochronology U-Pb zircon of granitoid rocks from Domo de Mifafí and La Culata, Mérida State, Venezuela). VI Simposio Venezolano de Geociencias de Rocas Ígneas y Metamórficas 4p.

- Bartolini, C., H. Lang, and T. Spell, 2003, Geochronology, geochemistry, and tectonic setting of the Mesozoic Nazas arc in north-central Mexico, and its continuation to northern South America, in C. Bartolini, R. T. Buffler, and J. Blickwede, eds., The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon habitats, basin formation, and plate tectonics: AAPG Memoir 79, p. 427–461.
- Bayona, G., Rapalini, A. and Costanzo-Alvarez, V. 2006. Paleomagnetism in Mesozoic rocks of the northern Andes and its implications in Mesozoic tectonics of northwestern South America. *Earth, Planets and Space*, 58, 1255–1272, <https://doi.org/10.1186/BF03352621>
- Bayona, G., Jiménez, G., Silva, C., Cardona, A., Montes, C., Roncancio, J. and Cordani, U. 2010. Paleomagnetic data and K–Ar ages from Mesozoic units of the Santa Marta massif: a preliminary interpretation for block rotation and translations. *Journal of South American Earth Sciences*, 29, 817–831, <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2009.10.005>
- Bayona, G., Bustamante, C., Nova, G. and Salazar–Franco, A.M. 2020. Jurassic evolution of the northwestern corner of Gondwana: Present knowledge and future challenges in studying Colombian Jurassic rocks. *Publicaciones Geológicas Especiales*, 36, <https://doi.org/10.32685/pub.esp.36.2019.05>
- Berlaine Ortega-Flores, Luigi A. Solari & Felipe De Jesús Escalona-Alcázar. 2015. The Mesozoic successions of western Sierra de Zcatecas, Central Mexico: provenance and tectonic implications. 22 p. *Geol. Mag.* 153 (4), 2016, pp. 696–717. Cambridge University Press 2015 doi:10.1017/S0016756815000977.
- Blanco-Quintero, I.F., García-Casco, A. et al. 2014. Late Jurassic terrane collision in the northwestern margin of Gondwana (Cajamarca Complex, eastern flank of the Central Cordillera, Colombia). *International Geology Review*, 56, 1852–1872, <https://doi.org/10.1080/00206814.2014.963710>
- Blickwede, J.F. 2001. The Nazas Formation: A detailed look at the early Mesozoic convergent margin along the western rim of the Gulf of Mexico Basin. *AAPG Memoirs*, 75, 317–342.
- Boschman, L.M., van Hinsbergen, D.J., Torsvik, T.H., Spakman, W. and Pindell, J.L. 2014. Kinematic reconstruction of the Caribbean region since the Early Jurassic. *Earth-Science Reviews*, 138, 102–136, <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.08.007>
- Camilo Londoño Bustamante 2020. Universidad Eafit. El registro Jurásico de la Cordillera Central: certezas, problemas y retos. Cuarentena con Geociencias. <https://www.youtube.com/watch?v=rocXysx7PRA>
- Carlos A. Vargas and Paul Mann 2013. Tearing and Breaking Off of Subducted Slabs as the Result of Collision of the Panama Arc-Indenter with Northwestern South America. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 103, No. 3, pp. 2025–2046, June 2013, 22p. <https://doi.org/10.1785/0120120328>
- Carlos Alberto Vargas, Carlos A. Zuluaga, Mathias Bernet, and Sergio Amaya. 2025. Surficial serpentinite emplacements and their potential links with the mantle wedge in NW South America. 12 p. <https://www.lyellcollection.org/doi/full/10.1144/SP558-2023-120>
- Carlos A. Zuluaga and Julián A. López. 2019. Ordovician Orogeny and Jurassic Low-Lying Orogen in the Santander Massif, Northern Andes (Colombia). Chapter 4.
- Cediel, F., R. P. Shaw, and C. Cáceres, 2003, Tectonic assembly of the Northern Andean Block, in C. Bartolini, R. T. Buffler, and J. Blickwede, eds., The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon habitats, basin formation, and plate tectonics: AAPG Memoir 79, p. 815–848. 34 p.
- Clasificación de Rocas Magmáticas. <https://post.geoxnet.com/rocas-magmaticas-clasificacion-de-los-magmas/>
- Definición de Batolito. <https://petroigne.wordpress.com/formas-de-yacimiento/formas-plutonicas-y-filonianas/plutones/batolitos/>
- C.J. Busby<sup>1</sup> and E. Centeno-García<sup>2</sup>. 2022. The “Nazas Arc” is a continental rift province: Implications for Mesozoic tectonic reconstructions of the southwest Cordillera, U.S. and Mexico. 1 Department of Earth and Planetary Sciences, University of California, Davis, California 95616, USA 2 Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Avenida Universidad 3000, Ciudad Universitaria, México D.F. 04510, México 23p 2022 the geological society of america.
- Coombs, H.E., Kerr, A.C., Pindell, J., Buchs, D., Weber, B., and Solari, L., 2020, Petrogenesis of the crystalline basement along the western Gulf of Mexico: Postcollisional magmatism during the formation of Pangea, in Martens, U., and Molina Garza, R.S., eds., Southern and Central Mexico: Basement Framework, Tectonic Evolution, and Provenance of Mesozoic–Cenozoic Basins: Geological Society of America Special Paper 546, p. 1–24, [https://doi.org/10.1130/2020.2546\(02\)](https://doi.org/10.1130/2020.2546(02)).
- Dany Yuleimar Mejía Vélez. 2019. Metamorfismo Jurásico En Los Andes Colombianos: ¿Respuesta Del Arco A La Transición De Un Régimen De Subducción Extensional A Uno Transpresivo? . Universidad Nacional de Colombia Facultad de Minas, Departamento de Materiales y Minerales, Área Curricular de Recursos Minerales Medellín, Colombia 2019. 85 p. Tesis Maestría.
- Diego Osorio-Afanador, Francisco Velandia. 2021. Late Jurassic syn-extensional sedimentary deposition and Cenozoic basin inversion as recorded in The Girón Formation, northern Andes of Colombia 30p. *Andean Geology* 48 (2):237-266. May, 2021 doi: 10.5027/andgeoV48n2-3264
- D. F. Jaramillo-Minorta, et al, "Modelo sedimentario-deposicional de la formación Girón en la sección del km 42 vía Girón-Zapatoca, Santander, Colombia" *Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo*, vol. 23 (2), pp. 37-49, julio. 2023. DOI: <https://doi.org/10.19053/1900771X.v23.n2.2023.16147> 13p.
- D. Tamara, E. Rojas, L. Quintero, F. Lascarro, D. Manco. Aspectos tectónicos en la génesis de la Formación La Quinta y su relación con los depósitos minerales de cobre en la serranía del Perijá, Colombia. *Tecnura*, 28(79), 123-139. <https://doi.org/10.14483/22487638.2082417> p.
- Elena Centeno García 2023. GeoSeminario "Evolución Tectónica de México" - Geolatinas.org. Conferencia Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=v4LcthCmkBE>.
- Elisa Fitz Díaz. 2020- Geología de México- Cátedra selecta-UNAM Conferencia Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=HDi2D-6uXd8>
- Fabio Cediel, Robert Peter Shaw 2019. Geology and Tectonics of Northwestern South America The Pacific-Caribbean-Andean Junction. 1010 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-76132-9>.
- Gómez, J., Montes, N.E. & Marín, E., compiladores. 2023. Mapa Geológico de Colombia 2023. Escala 1:1 500 000. Servicio Geológico Colombiano. Bogotá. [https://www2.sgc.gov.co/MGC/Paginas/mgc\\_1\\_5M2023.aspx](https://www2.sgc.gov.co/MGC/Paginas/mgc_1_5M2023.aspx)
- Guerra Roel, R., Pastor Galán, D., Chavez-Cabello, G., Ramirez-Pena, C. F., ArandaGomez, J. J., Patino Méndez, G., et al. (2024). The Sierra Madre Oriental Orocline: Paleomagnetism of the Nazas province in NE Mexico. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 129, e2024JB029239. <https://doi.org/10.1029/2024JB029239> 24p.

- Hildebrando Leal-Mejía, Robert P. Shaw, and Joan Carles Melgarejo i Draper. 2019. Spatial-Temporal Migration of Granitoid Magmatism and the Phanerozoic Tectono- Magmatic Evolution of the Colombian Andes. Chapter 5.
- Historia De La Exploración Petrolera En Mexico-2025.  
<https://www.facebook.com/groups/tampicoantiguo/posts/2373490346009997/>
- Horton, B.K., Parra, M. & Mora, A. 2020. Construction of the Eastern Cordillera of Colombia: Insights from the sedimentary record. In: Gómez, J. & Mateus-Zabala, D. (editors), The Geology of Colombia, Volume 3 Paleogene – Neogene. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 37, p. 67–88. Bogotá. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.37.2019.03>
- Ian Davison, James Pindell & Johnny Hull 2018. The Basins, Orogens and Evolution of the southern Gulf of Mexico and northern Caribbean. 52 p. Published by The Geological Society of London.
- Instituto Nacional de Investigaciones Geologico-Mineras 1970. Economic Geology Of The Zipaquirá Quadrangle And. Adjoining Area, 141 p.
- Ingeominas. 1985. compilación-y-diagnóstico-de-la-información-geoquímica-histórica-en-la-parte-central-de-la-cordillera-oriental-36-638.
- Irina Filina , James Austin, Tony Doré , Elizabeth Johnson , Daniel Minguez , Ian Norton , John Snedden , Robert J. Stern. 2022. Opening of the Gulf of Mexico: What we know, what questions remain, and how we might answer them. 30 p. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2021.229150>
- Irina Filina and Erin Beutel. 2022. Geological and Geophysical Constraints Guide New Tectonic Reconstruction of the Gulf of Mexico. University of Nebraska – Lincoln College of Charleston. November 22, 2022. 36p.
- James Lawrence Pindell. 1981. Permo-Triassic reconstruction of Western Pangea and the evolution of the Gulf of Mexico-Caribbean región. University at Albany, State University of New York. 133p Master thesis.
- James L. Pindell 1985. Alleghenian Reconstruction And Subsequent Evolution Of The Gulf Of Mexico, Bahamas, And P Roto-Cari B Bean James L. Pindell. Exploration Research Division, Pennzoil Company, Houston, Texas. 39p 210ma Tectonics, Vol. 4, No. 1, Pages 1-39, January 1985.
- James Pindell and Lorcan Kennan 2001. Kinematic Evolution of the Gulf of Mexico and Caribbean. Tectonic Analysis, Ltd., Dept. Earth Science, Rice University, Houston, Texas, USA. 51 p.
- J. Pindell L. Kennan K.P. Stanek W.V. Maresch And G. Draper 2009. Foundations of Gulf of Mexico and Caribbean evolution: eight controversies resolved. Tectonic Analysis Ltd. Department of Earth Science, Rice University 39 p.
- James Pindell & Lorcan Kennan 2009. Tectonic evolution of the Gulf of Mexico, Caribbean and northern South America in the mantle reference frame: an update. In: James, K., Lorente, M. A. & Pindell, J. (eds) The geology and evolution of the region between North and South America, Geological Society of London, Special Publication.
- James Pindell 2013. Origin of the Caribbean? Look Toward the Pacific. 7p. Explorer Newsletter.
- James Pindell, Diego Villagómez, Roberto Molina-Garza, Rod Graham and Bodo Weber. 2020. A revised synthesis of the rift and drift history of the Gulf of Mexico and surrounding regions in the light of improved age dating of the Middle Jurassic salt. 2020. Geological Society, London, Special Publications, 504, <https://doi.org/10.1144/SP504-2020-43>
- James Pindell , Diego Villagómez , Roberto Molina Garza , Alejandro Beltrán , Daniel F. Stockli , Mark Wildman . 2022 Late Cretaceous–Miocene depositional evolution of Chiapas, Mexico: A foreland controlled by collision of Greater Antilles arc and the subsequent relative migration of the Chortís Block. 29 p.

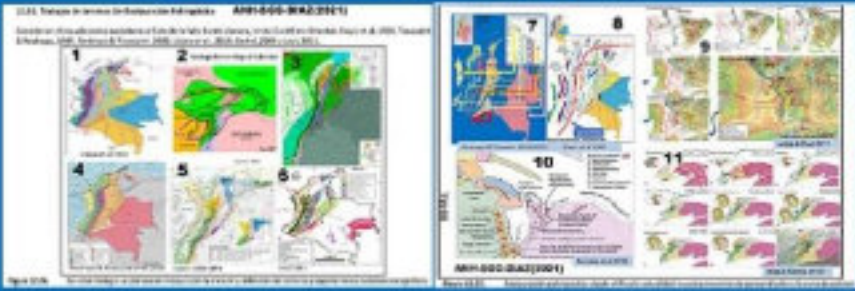
- James Pindell 2021. Cátedra Selecta – Tectonic evolution Mexican Gulf-Conferencia Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=8CAhxGbnL9w>
- James Pindell 2022. 52.2 James Pindell - Dynamo-thermal subsidence and sag–salt section deposition-Conferencia Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=sM5ykC-p9dU>.
- Jaime Rueda Glaxiola 2019. Geodynamic Evolution Of The Gulf Of Mexico. Youtube Conference. <https://www.youtube.com/watch?v=mb11VZO46Lw>
- Jose Rafael Barboza-Gudino ., Maria Teresa Orozco-Esquivel , Martin Gómez-Anguiano c, Aurora Zavala-Monsivais. 2008. The Early Mesozoic volcanic arc of western North America in northeastern Mexico. 15p. 2008 Journal of South American Earth Sciences 25 (2008) 49–63.
- Joshua H. Rosenfeld. 2002. El potencial económico del Bloque de Yucatán en México, Guatemala y Bécice. Boletín De La Sociedad Geológica Mexicana, Tomo Lv, Núm. 1, 2002, Veritas Exploration Services. P. 30-37. 8p.
- Juan Camilo Ruiz Amaya. 2021. Modelamiento estructural entre el Páramo de Sumapaz y la Sabana de Bogotá. Charla youtube ACGGP. 2021.
- Juan Pablo Lovecchio 2020. Rifting: Cómo la Ruptura de Continentes Puede Crear Oportunidades de Exploración. AAPG Latin America & Caribbean Region. Conferencia Youtube <https://www.youtube.com/watch?v=Pp7bUFGDaLM>
- López-Isaza, J.A. & Zuluaga, C.A. 2020. Late Triassic to Jurassic magmatism in Colombia: Implications for the evolution of the northern margin of South America. In: Gómez, J. & Pinilla-Pachón, A.O. (editors), The Geology of Colombia, Volume 2 Mesozoic. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 36, p. 77–116. Bogotá. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.36.2019.03> 40 p.
- María Patricia Velasco de León 2024. Paleobiota y Geología del Jurásico del Sur de México Universidad Nacional Autónoma de México. 292 p.
- M. B. I. Weber, A. Cardona, F. Paniagua, U. Cordani, L. Sepulveda & R. Wilson. 2009 The Cabo de la Vela Mafic–Ultramafic Complex, Northeastern Colombian Caribbean region: a record of Multistage evolution of a late Cretaceous intra-oceanic arc. 20 p- From: JAMES, K. H., LORENTE, M. A. & PINDELL, J. L. (eds) The Origin and Evolution of the Caribbean Plate. Geological Society, London, Special Publications, 328, 547–566. DOI: 10.1144/SP328.22 0305-8719/09/\$15.00 # The Geological Society of London 2009.
- Maria Luisa Monsalve-Bustamante\*, Harold Avila-Vallejo, Ivan Darío Ortiz-Martin and Susana Osorio-Ocampo. 2022. Characterization and space–time distribution of Plio-Quaternary volcanism NE of Caldas, Colombia. 23p. [https://www.researchgate.net/publication/389622981\\_Characterization\\_and\\_space-time\\_distribution\\_of\\_Plio-Quaternary\\_volcanism\\_in\\_the\\_Northeast\\_of\\_Caldas\\_Colombia](https://www.researchgate.net/publication/389622981_Characterization_and_space-time_distribution_of_Plio-Quaternary_volcanism_in_the_Northeast_of_Caldas_Colombia)
- Ministerio de Minas e Hidrocarburos de Venezuela 1968. Edades Isotópica de Rocas Venezolanas. Dirección de Geología. 17 p.
- Martin Reyes<sup>1,2</sup> · Jonas Kley<sup>1</sup> · Andrés Mora<sup>3</sup> · István Dunkl<sup>4</sup> · Juan Carvajal-Torres<sup>2,5</sup> 2024. Age and tectonic setting of Mesozoic extension constrained by the first volcanic events in the Eastern Cordillera and Middle Magdalena Valley, Colombia. Received: 6 June 2021 / Accepted: 20 June 2024 © The Author(s) 2024 International Journal of Earth Sciences <https://doi.org/10.1007/s00531-024-02441-7> 27 p.
- Mildred Del Carmen Zepeda Martínez - Tesis Doctoral UNAM. 2021. Reconstrucción de la Evolución tectono sedimentaria del jurásico temprano-medio de la cuenca Tlaxiaco, Sur de México. Implicaciones en la Historia de Atenuación continental del margen occidental de Pangea. 213 p.

- Moreno-Sanchez, M., and A. Pardo-Trujillo, 2003, Stratigraphical and sedimentological constraints on western Colombia: Implications on the evolution of the Caribbean plate, in C. Bartolini, R. T. Buffler, and J. Blickwede, eds., The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon habitats, basin formation, and plate tectonics: AAPG Memoir 79, p. 891– 924. 34 p.
- Oswaldo Ordoñez C. 2020. ORO EN COLOMBIA: HISTORIA, PRESENTE Y POTENCIAL. Charla Youtube, [https://www.youtube.com/watch?v=R0VCM1KU-\\_0](https://www.youtube.com/watch?v=R0VCM1KU-_0)
- Parolari M, Martini M, Gómez-Tuena A, Ortega-Gutiérrez F, Errázuriz-Henao C, and Cavazos-Tovar JG (2022) The petrogenesis of Early–Middle Jurassic magmatism in southern and central Mexico and its role during the break-up of Western Pangaea. Geological Magazine 159: 873–892. <https://doi.org/10.1017/S0016756822000061> 20p.
- Patarroyo, P. 2020. Barremian deposits of Colombia: A special emphasis on marine successions. In: Gómez, J. & Pinilla–Pachón, A.O. (editors), The Geology of Colombia, Volume 2 Mesozoic. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 36, p. 403–439. Bogotá. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.36.2019.12> 38 p.
- Pemex 2010. Provincias geológicas de México. Pemex Exploración y Producción, Subdirección Técnica de Exploración. 18p.
- Pindell, James Lawrence (1985) Plate-tectonic evolution of the Gulf of Mexico and Caribbean region, 302 p. Durham Doctoral theses, Durham University. Available at Durham E-Theses Online: <http://etheses.dur.ac.uk/7042/>
- Pindell, J., Kennan, L., Maresch, W.V., Stanek, K.-P., Draper, G., and Higgs, R., 2005, Plate-kinematics and crustal dynamics of circum-Caribbean arc-continent interactions: Tectonic controls on basin development in Proto-Caribbean margins, in Avé Lallemant, H.G., and Sisson, V.B. eds., Caribbean–South American plate interactions, Venezuela: Geological Society of America Special Paper 394, p. 7–52, doi: 10.1130/2005.2394(01). 46 p.
- Rogelio Hernández-Vergara, Elisa Fitz-Díaz, Gilles Brocard and Dante Jaime Morán-Zenteno. 2020. Illite 40Ar–39Ar dating of Eocene deformation in the Q1 Chiapas Fold and Thrust Belt, southern Mexico. DOI: 10.1144/SP504-2020-75. 30 p.
- Rodríguez-García, G.; Zapata, J.P.; Correa-Martínez, A.M.; Ramírez, D.A.; Obando, G. (2020). Aportes al conocimiento del plutonismo del Arco Mocoa-Santa Marta durante el Jurásico Temprano-Medio, en la margen noroccidental de los Andes, Colombia. Boletín de Geología, 42(3), 15-50. <https://doi.org/10.18273/revbol.v42n3-2020001> 36 p.
- Rodríguez García, G., Correa Martínez, A. M., Zapata, J. P., Ramírez, D. A., & Sábrica, C. A. (2022). Evolution of arc magmatic cycles from the Carboniferous to the Early Cretaceous in the western paleomargin of Gondwana, north of the Andes. Boletín Geológico, 49(2). <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bol.geol.49.2.2022.663> 29 p.
- Rodríguez–García, G., Correa–Martínez, A.M., Zapata–García, G., Arango–Mejía, M.I., Obando–Erazo, G., Zapata–Villada, J.P. & Bermúdez, J.G. 2020. Diverse Jurassic magmatic arcs of the Colombian Andes: Constraints from petrography, geochronology, and geochemistry. In: Gómez, J. & Pinilla–Pachón, A.O. (editors), The Geology of Colombia, Volume 2 Mesozoic. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 36, 54 p. Bogotá. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.36.2019.04> 54p.

- Restrepo, J.J. & Toussaint, J.F. 2020. Tectonostratigraphic terranes in Colombia: An update. First part: Continental terranes. In: Gómez, J. & Mateus–Zabala, D. (editors), The Geology of Colombia, Volume 1 Proterozoic – Paleozoic. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 35, p. 37–63. Bogotá. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.35.2019.03> 28p.
- Robert J. Stern and Randy Keller 2018. New Strategies For Studying The Crust, Lithosphere, And Tectonics Of The Gulf Of Mexico Region. The University of Texas at Dallas The University of Oklahoma. Youtube Conference <https://www.youtube.com/watch?v=tMbCGOWUMcI>
- Sanchez, Javier and Paul Mann, 2015, Integrated structural and basinal analysis of the Cesar-Rancheria Basin, Colombia: Implications for it’s tectonic history and petroleum systems, in C. Bartolini and P. Mann, eds., Petroleum geology and potential of the Colombian Caribbean Margin: AAPG Memoir 108, p. 431–470.
- SGM 2014. Formación Nazas. 4p. Ficha de Unidad litoestratigráfica-Formación.
- Sonia Güiza González, Geoquímica Sénior. (2020-21). Alcance de la geoquímica en la Cordillera Oriental para el potencial de metales estratégicos. DOI: 10.13140/RG.2.2.34907.69927.50 p.
- Spikings, R. & Paul, A. 2019. The Permian – Triassic history of magmatic rocks of the northern Andes (Colombia and Ecuador): Supercontinent assembly and disassembly. In: Gómez, J. & Pinilla–Pachón, A.O. (editors), The Geology of Colombia, Volume 2 Mesozoic. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 36, p. 1–43. Bogotá. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.36.2019.01> 44 p.
- Spikings, R.; Van der Lelij, R. The Geochemical and Isotopic Record of Wilson Cycles in Northwestern South America: From the Iapetus to the Caribbean. Geosciences 2022, 12, 5. <https://doi.org/10.3390/geosciences12010005> 32 p.
- Timoleón Garzón 2021. Potencial mineral y algunos proyectos mineros colombianos. Charla Youtube: <https://www.youtube.com/watch?v=0-5meQFa3As>
- Tom Ewing- 2016. Texas Geologic History Quick Overview. Conference Youtube <https://www.youtube.com/watch?v=A1zGgOktFQ8&>
- Toussaint, J.F. & Restrepo, J.J. 2020. Tectonostratigraphic terranes in Colombia: An update. Second part: Oceanic terranes. In: Gómez, J. & Pinilla–Pachón, A.O. (editors), The Geology of Colombia, Volume 2 Mesozoic. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 36, p. 237–260. Bogotá. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.36.2019.07> 24p.
- Vargas, C.A. 2020. Subduction geometries in northwestern South America. In: Gómez, J. & Pinilla–Pachón, A.O. (editors), The Geology of Colombia, Volume 4 Quaternary. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 38, p. 397–422. Bogotá. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.38.2019.11>
- Victor Ramos 2021. Nuevos paradigmas de la Tectónica Andina. Charla Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=9IfGdXKlQY>
- Victor Ramos 2022. La tectónica mesozoica en los Andes Colombianos. Charla Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=VimLTqmB7y4>
- Villagómez, D., Steffensen, C., Pindell, J., Molina-Garza, R.S., Gray, G., Graham, R., O’Sullivan, P., Stockli, D., Spikings, R. 2006. Tectono-sedimentary evolution of Southern Mexico. Implications for Cretaceous and younger source-to-sink systems in the Mexican foreland basins and the Gulf of Mexico. 64 p.

**God's grace allows us to solve mystery that has lasted more than 60 - 90 years.**

**11 proposed models, fail to answer all the questions that still exist.**



**Complex Source Theory** will generate a revolution, a radical transformation of the mining and energy industry, giving different solutions for increase O&G&M discoveries, reserves and production, in complex and normal areas.

Contact: [edinson.alvarez@gmail.com](mailto:edinson.alvarez@gmail.com)  
O&G and Mining Geoscientist Exploration Specialist

I invite @RealDonaldTrump to mediate with the big companies and VIP.

- \* New concepts
- \* Interdisciplinary teams
- \* New Technologies
- \* New methodologies
- \* New science
- \* New Results



[edinson.alvarez@gmail.com](mailto:edinson.alvarez@gmail.com)

Exploration Geologist Specialist - Geophysicist, expert in O-&G-Mining integrated studies (Colombia, Perú and México), Giving solutions to geoscientific problems, which have been in uncertainty for more than 5 decades. With important + economic implications.

The God's grace guide us to develop the "Complex Source Theory", a new mechanism that allow us increasing traditional O&G&M discoveries, production, reserves, as new energies and CCUS.

Geological mapping, surveys design, acquisition, processor PSTM (Conv-3C-4C-TZ-OBC), geomodeller, seismic interpreter and reservoir characterization (Conventional-and-Unconventional Reservoirs). Stratigraphic sequence, seismic attributes, AVO analysis, fluids substitution, seismic inversion, risk and uncertainty, leads and prospects, reserves.

Discovery of New prospective corridors and O&G prospects, in Foothills, Llanos, Putumayo, VIM, VMM, VSM, COR, CR, CAT, GuajiraOff-Guajira, SSJFB, Sinú-Sinu Off, Cayos basin, Colombia basin.

**THE FIVE GIGANUCLEAR GEOLOGICAL AND TECTONIC FORCES THAT GAVE RISE TO THE GULF OF MEXICO. BY EDINSON ALVAREZ.**

**IMPORTANT CONTRIBUTIONS IN GEOSCIENCES PROMISE TO REVOLUTIONIZE O&G&M EXPLORATION. No. 6/12.**

**EDINSON D. ALVAREZ S. 1,2**

- 1 Exploration Geologist, O&G&M Specialist, Researcher of tectonic and structurally complex areas.
- 2 Expert in geoscientific solutions through integrated O&G&M studies. with strong positive economic implications.



**Complex Source Theory (Edinson Alvarez 2025):** A mechanism used by interdisciplinary groups of specialists in any field of science, where new concepts, new methodologies, new technology, and new knowledge are employed, obtaining new results, in order to resolve complex issues.. (Image Courtesy of Pixabay).

**EAST-P Method-Tool (Processing and Seismic Treatment Edinson Alvarez 2025):** It requires specialized personnel, computer equipment and advanced software.

**Edinson Geochemical Hydrocarbon Family Classification Maps -Tool (Edinson Alvarez 2025):** New classification of hydrocarbon families based on geochemical-isotopic-molecular signatures, migration pattern from source rock, their close relationship with geology, geochemical modeling of generation, expulsion, and hydrocarbon migration routes in a regional context.

**Integrated O&G&M studies - Onshore-Offshore-Tool:** It involves the participation of more than 20 geoscience disciplines, in order to find answers to complex industry problems, with strong positive economic implications.

**Citation:** Alvarez Serrato Edinson Dario, 2026 The Five Giganuclear Geological and Tectonic Forces that Gave Rise to the Gulf of Mexico, Told By Edinson Alvarez. Important Contributions In Geosciences Promise To Revolutionize O&G&M Exploration. No 6/12.Revista Maya January 2026. 42 p. Citation Articles 1,2,3,4,5, at the end.

## INTRODUCTION

This work aims to contribute to the geoscientific knowledge of an area of importance to the global oil, gas, and mining (O&G&M) industry: the Jurassic evolution of the Gulf of America, Gulf of Mexico, and the Colombian and Venezuelan territories (Northwestern Corner of South America-Gondwana). **This study seeks to demonstrate, with technical and scientific evidence, the relationship between plate tectonics, magmatic arcs, volcanic arcs, and the development of rift zones and subduction zones, combined to understand the origin, growth, and development of sedimentary basins of interest to the global mining and energy industry.**

**In this first phase, the central theme is resolving the uncertainties or specific unanswered questions posed by the contemporary geoscientists and researchers worldwide over more than 100 years of the history and development of the petroleum industry in the Gulf of Mexico region.** we will examine the implications of this issue for petroleum systems in a broad sense..

On the Colombian side, we would like to highlight the various companies, institutions, entities, and individuals that have contributed to the development of knowledge in these areas, such as the Colombian Geological Service (SGC), the Colombian Petroleum Company **Ecopetrol**, the Institute of Petroleum and Transition Energy Research (ICPET), the National Hydrocarbons Agency (ANH), and state and private universities such as the University of Caldas, its Institute of Stratigraphic Research (IIES), the National University of Colombia (UNAL), the Industrial University of Santander (UIS), the Pedagogical and Technological University of Colombia (UPTC), **EAFIT** University, the University of Pamplona, and the University of the Andes, among others... For this chapter in particular, the contribution of important researchers and Geoscientists from the Mining and Energy Industry of Mexico and the United States of America, including the **National Autonomous University of Mexico (UNAM)**.

Highlighting the tireless and important work carried out by the renowned and honorable Doctors: **James Pindell, Diego Villagómez, Roberto Molina-Garza, Rod Graham and Bodo Weber 2020, A revised synthesis of the rift and drift history of the Gulf of Mexico and surrounding regions in the light of improved age dating of the Middle Jurassic salt. 49 p.** <https://doi.org/10.1144/SP504-2020-43>, Freeto the public through their YouTube conference. **Cátedra Selecta. James Pindell-2021.**

**El Dr. James Pindell** has dedicated his entire life to the study, understanding and geological evolution of the Gulf of Mexico with his Master's thesis **Permo-Triassic reconstruction of Western Pangea and the evolution. 1981 And Doctoral Thesis: Plate-tectonic evolution of the Gulf of Mexico and Caribbean region 1985.** And significant and sufficient related work up to the date of 2026.

Highlighting the work of the doctors **Restrepo, J.J. & Toussaint, J.F. 2020. Tectonostratigraphic terranes in Colombia: An update. First part: Continental terranes. In: Gómez, J. & Mateus-Zabala, D. (editors), The Geology of Colombia, Volume 1 Proterozoic – Paleozoic. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 35, p. 37–63. Bogotá. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.35.2019.03>**, who have dedicated their entire lives to the study of Colombian Geology, and their work on tectonostratigraphic terrains, in different and renewed versions of 1973, 1988, 1993, 1998, 2020, among others.

This work incorporates new information of strategic relevance, which will allow for the delimitation, refinement, calibration, and/or strengthening of the geological and tectonic evolution model for the Gulf of Mexico-America during the Upper Triassic-Jurassic period, presented in **Article No. 5 of this series.** This will enable us to understand the succession of geological and/or tectonic events that triggered the origin, growth, and evolution of the Gulf of Mexico. **This question, with nearly 100 years of history, has not yet received a satisfactory answer and is resolved in this chapter.**

We would like to clarify that the narrative style used by the author is solely intended to generate new readers, audience, and interest in scientific research related to Geosciences – Earth sciences. This is to avoid any misinterpretation of arrogance, as the narrative style is simply a strategy for attracting an audience. We have the utmost respect and admiration for those who have made valuable contributions to Geosciences. **All glory and praise belong to God.**

The narrative form is a tribute to one of the greatest figures in world literature, Miguel de Cervantes Saavedra (1547-1616), with his masterful work, Don Quixote of La Mancha (1605). **In this case, we will refer to "Giants" as concepts, techniques, technologies, methodologies, procedures, tools, uncertainties, unresolved questions, etc.** We invite you to see the positive side of history, which is the contributions to geosciences for our country, Colombia, and in this case, the impressive and spectacular Gulf of Mexico.

We will take a spectacular, fascinating, wonderful and cinematic geological journey through the Colombian-Mexican-American Jurassic world.

We also draw a parallel with sports, regarding the giants we are going to demolish in this edition. Records are meant to be broken or demolishing; similarly, if our proposal has weaknesses or flaws, it will most likely be surpassed or toppled by a new and/or better proposal in the future.

## METODOLOGY

In order to overcome the structural, stratigraphic, sedimentological, volcanological, geological, geophysical, geochronological, geochemical, and seismological obstacles and difficulties posed by the tectonic-structural complexity of the area, the following activities are carried out:

- Compilation of information from petroleum exploration, geochemical, geophysical, geological, stratigraphic, tectonic-structural, petroleum systems, volcanological, geochronological, and other studies of the area of interest.

- As part of the Author's independent professional activity, several integrated studies have been carried out to address the issue of the structural tectonic complexity of the study area, and its implications for oil and gas exploration and production activity in Colombia and the Gulf of Mexico. **This case relates to tectonostratigraphic evolution, primarily during the Jurassic geological period (145 to 201.3 million years ago), also including the Upper Triassic (201.3 to 237 million years ago) (201.3-210 million years ago).**

**RESULTS**

**1. General Tectonic Framework and Terminology.**

To understand the development of this chapter, we will refer to the following terms, updated from Article 5, some based on the incorporation of new data into the model (**Figures 1, 2**):

**Triassic-Jurassic Gulf of Edinson Alvarez:** A large body of marine water surrounded by the following geographical features, giving it its gulf-like configuration: the Aoxaca and Chortis terranes to the west-northwest, continental Mexico to the north and east, and continental Colombia to the east-southeast. (Upper Triassic-Lower Jurassic) (**Figures 1, 3**)

**Jurassic Bay of Edinson Alvarez:** A narrow body of marine water surrounded by the following geographical features, giving it its bay configuration: the Aoxaca and Chortis terranes to the west-northwest, continental Mexico to the north and east, and continental Colombia to the east-southeast. (Lower Jurassic) (**Figures 4, 5**)

**Edinson's Jurassic Strait:** Opening Zone, fracture-rupture zone, entry of the Pacific Ocean into the Gulf of Mexico and Paleobasin of the Eastern Cordillera of Colombia. (Lower-Middle Jurassic). (**Figures 2,6,7, 8, Art 5-Figures 9,10,14**)

**The Edinson's Jurassic Strait,** It had several openings or narrow passages named below:

**Edinson's Jurassic Strait (North);** Main rupture or strait created in the Jurassic 170-169 ma. Between the Mexican Chiapas Massif and the Colombian Upper Guajira (Serrania de Macuira-Cosinas).

**JhonEdi's Jurassic Strait (Middle):** Break or Strait Created between the Upper Guajira of Colombia (Serrania de Cosinas-Macuira) and the Sierra Nevada de Santa Marta.(Honor Jhon Edinson AlvarezM. Son)

**Floris's Jurassic Strait (South):** Break or Strait Created between Western Side of the Sierra Nevada de Santa Marta and Serranía de San Lucas, controlled by the Bucaramanga Fault. (**Fig6, Fig14-Art5**) (Honor Florinda Serrato-Mother)

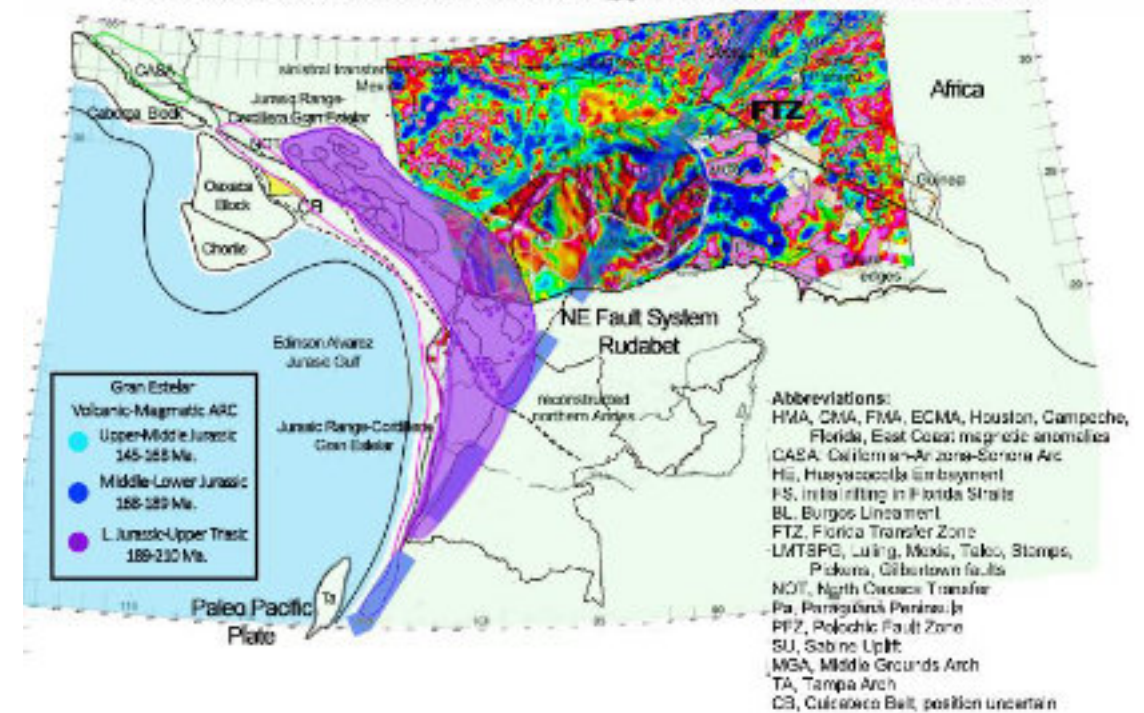
**Independent Milenar's Jurassic Strait:** Break or Strait Created to the southwest of the Cundinamarca Basin (Southwestern part of the paleobasin of the Eastern Cordillera) controlled by the Ibagué Fault. (**Fig6, Fig14-Art5**). (Honor Ana Milena Alvarez Serrato-Sister).

**Triassic -Jurassic Mountain Range Gran Estelar:** The Gran Estelar Triassic-Jurassic proto-Cordillera, formed by the union of the west side of the Paleo Sierra Madre Oriental of Mexico, extending throughout Mexico southward and continuing into the Paleo-Central Cordillera of Colombia. Is composed of Precambrian-Paleozoic metamorphic crystalline basement, granitoid intrusions, and fluvial and volcanosedimentary, marine deposits, as well as volcanic arc sedimentary complexes. Paleogeographically, it functions as back retaining wall of the continental slope escarpment of the Gulf of Mexico, relative to the waters of the Pacific Ocean.(Honor beloved wife Estela Moreno Z.)(**Fig.1,3,4,5**).

**Large Fault System, Rift, Rudabet Lineament (Honor Ruben Dario Alvarez Betancourt-Father, Figures 1, 3);** Composed of the Great System of faults, rift and lineament of the Guaicáramo- foothills Faults (Colombia), Boconó- foothills Faults(Venezuela), NE Yucatán lineament (México), Georgia Rift and Appalachian foothills Lineament (USA).

**Fig 1. Mexican Gulf Tectonic Evolution - 210-200 m.a. Late triasic-Early Jurassic**

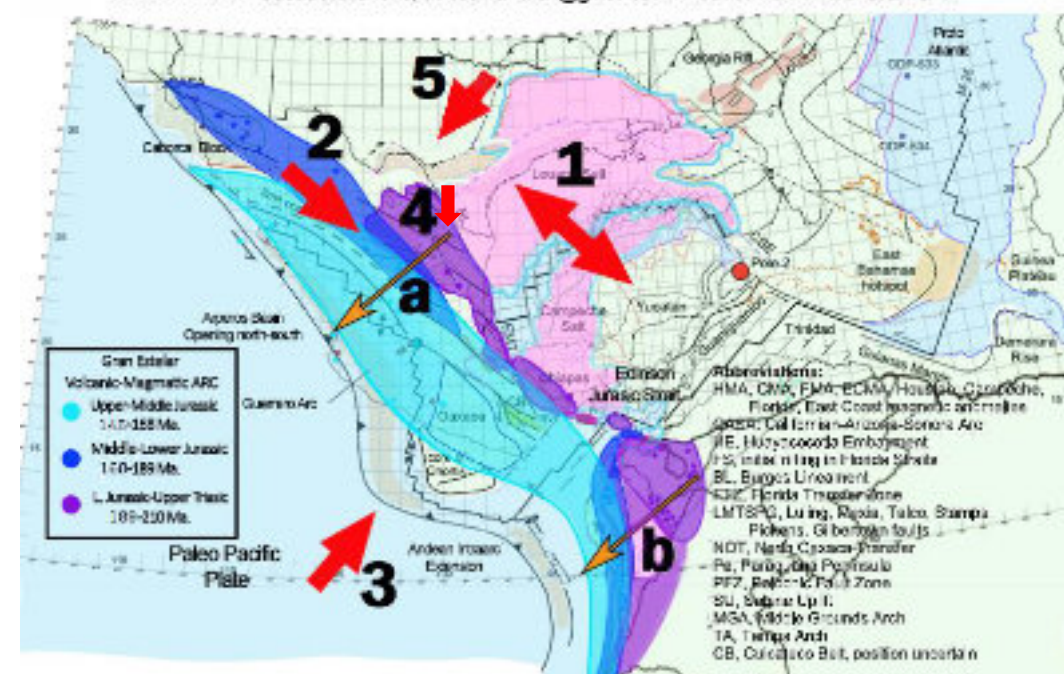
Edinson Alvarez -Geoscientist 2025, edinson.alvarez@gmail.com . Modified from Pindell et al 2021.



**Figure 1.** Main Geological, Morphological and Tectonic-Structural Features for Laurentia-Gondwana during the Late Triassic- Early Jurassic Period. 200-210 Ma. Close to 10 Structural Lineaments Control Yucatan's Position.

**Fig 2. Mexican Gulf Tectonic Evolution - 154 m.a. Late Jurassic**

Edinson Alvarez -Geoscientist 2025, edinson.alvarez@gmail.com . Modified from Pindell et al 2021.



**Figure 2.** Distribution and Location of the East-Central-West Gran Estelar Magmatic-Volcanic Arcs, a,b. E-W Roll Back Direction Paleo Pacific Plate-FarallonesPlate, Laurentia-Godwana. 1, 2,3,4,5 Giganucleares Forces that Gave Origin to the Gulf of Mexico. Described in Item 4-5 of this study.

**Eastern Gran Estelar Volcanic-Magmatic Arc (Upper Triassic-Lower Jurassic):** Composed of the extension of the Mexican Paleo Sierra Madre Oriental, Perijá, Paleo Mérida, and the Colombian Paleo Cordillera Oriental. (Honor beloved wife, Estela Moreno Z.) (Figures 1, 2, 3, 4, and 5).

**Central-Middle Gran Estelar Volcanic-Magmatic Arc (Lower Jurassic-Middle Jurassic):** Composed of the extension of the Mexican Paleo Sierra Madre Oriental, Paleo Mesa Central, Sierra Nevada de Santa Marta, Serranía de San Lucas, and the Colombian Paleo Cordillera Central. (Honor beloved wife, Estela Moreno Z.) (Figures 1, 2, 3, 4, 5, and 6).

**Western Gran Estelar Volcanic-Magmatic Arc (Middle-Upper Jurassic):** Formed by the extension of the Mexican Paleo Sierra Madre Oriental-Occidental, Paleo Mesa Central, Sierra Nevada de Santa Marta, Serranía de San Lucas and the Paleo Cordillera Central of Colombia. (Honor beloved wife Estela Moreno Z.) (Figures 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8).

## 2. Analysis

Using the advanced tools of Complex Source Theory (CST), it became very easy to find an answer to the question posed by the renowned geoscientists honored in this article, and which for decades has kept the community of geologists, stratigraphers, volcanologists, seismologists, geophysicists, geoscientists, and the global mining and energy sector in general up at night.

All the answers come from the paleogeographic reconstruction of the Gulf of Mexico based on the work of renowned geoscientists: **James Pindell, Diego Villagómez, Roberto Molina-Garza, Rod Graham and Bodo Weber 2020, A revised synthesis of the rift and drift history of the Gulf of Mexico and surrounding regions in the light of improved age dating of the Middle Jurassic salt. 49 p.** <https://doi.org/10.1144/SP504-2020-43>, Free to the public through their YouTube conference **Cátedra Selecta.- James Pindell-2021.**

From the work of the **Doctors Restrepo, J.J. & Toussaint, J.F. 2020. Tectonostratigraphic terranes in Colombia: An update. First part: Continental terranes. In: Gómez, J. & Mateus-Zabala, D. (editors), The Geology of Colombia, Volume 1 Proterozoic – Paleozoic. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 35, p. 37–63. Bogotá. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.35.2019.03>.**

For this chapter, valuable geochronological, geochemical, stratigraphic, sedimentological, and structural data related to volcanic and magmatic arcs for the Triassic-Jurassic period are incorporated to model, from both Mexico-USA (Laurentia) and Colombia-Venezuela (Gondwana); from the renowned Doctors: **Claudio Bartolini 2003, Joshua H. Rosenfeld. 2002, Elena Centeno García 2018-23, Elisa Fitz Díaz. 2018-2020, Parolari M, Martini M, Gómez-Tuena A, Ortega-Gutiérrez F, Errázuriz-Henao C, and Cavazos-Tovar JG (2022), Hildebrando Leal-Mejía, Robert P. Shaw, and Joan Carles Melgarejo i Draper 2019, Carlos A. Zuluaga and Julián A. López 2019, BAQUERO Marvin, VISCARRET Patxo, VALENCIA Víctor; TAZZO-RANGEL María Daniela; ANDARA José, URBANI Franco, SIFONTES Ramón, CENTENO José. 2015. Sonia Güiza González, Geoquímica Sénior. 2020-21, López-Isaza,**

**J.A. & Zuluaga, C.A. 2020, Spikings, R. & Paul, A. 2019, Rodríguez-García, G., Correa-Martínez, A.M., Zapata-García, G., Arango-Mejía, M.I., Obando-Erazo, G., Zapata-Villada, J.P. & Bermúdez, J.G. 2020. Rodríguez García, G., Correa Martínez, A. M., Zapata, J. P., Ramírez, D. A., & Sabrica, C. A. (2022), Camilo Londoño Bustamante 2020. (Grupo de Investigación Tectónica-estratigráfica Egeo-Unal, Grupo Tectónica-Eafit), entre otros.**

Complementing the above with information from studies conducted by important and recognized geoscientists described in the Bibliography, all integrated with the advanced tools of the **SCT Complex Source Theory (Edinson Alvarez 2025)**. Results of the tectonic evolution of the Gulf of Mexico, which can be observed in **Figures 3,4,5,6,7,8** for the Upper Triassic period (201.3 to 210 million years ago) – Jurassic. 145 to 201.3 million years ago.

In the following tectonic-paleogeographic reconstruction, Colombia's Tertiary deformation is restored (**Similar a Pindell 1985, V. Ramos 2021, Edinson Alvarez 2025**). And the stretching of the Eastern Cordillera is consistent with the location of the western margin of proto Cordillera Gran Estelar and later Gran Estelar Middle and West Magmatic Arc. The configuration of the Chibcha Block of **Restrepo, J.J. & Toussaint, J.F. 2020**. Was used. All other parameters of the paleogeographic reconstruction were maintained, **Pindell et al 2020-2021**. The Upper Triassic period was regenerated and/or configured based on **Pindell 1985-1992-1994-Pindell et al 2020-2021, Edinson Alvarez 2025**).

The Salt Polygon for Colombia was developed based on the work of **Ingeominas 1970-1985, Dr. Oswaldo Ordoñez C. 2020. And Sonia Güiza González, 2020-21**. Applying an equivalent stretch towards the middle Magdalena Valley (Taking into account the Tertiary deformation of the Eastern Cordillera of Colombia). Presal sediments are not shown in this reconstruction, nor is the Tahami (Ta)-Colombia block discussed (Part of a forthcoming edition).

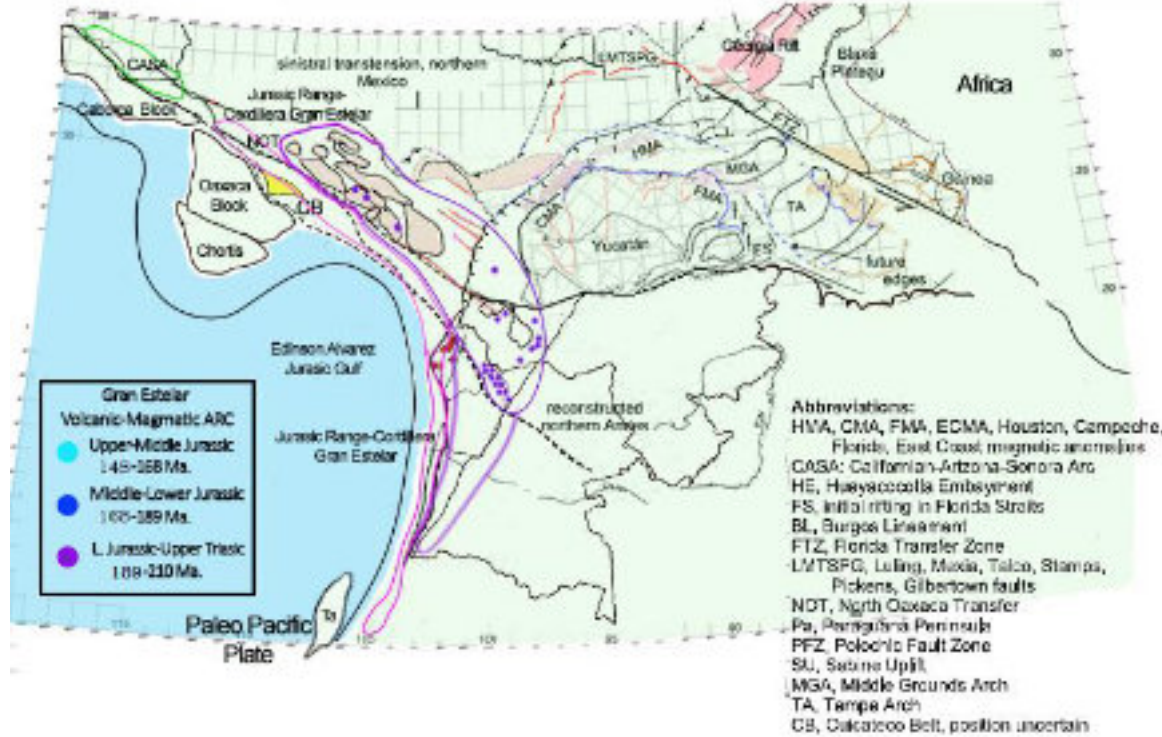
**By incorporating geochronological and other data related to the volcanic-magmatic arcs of the Triassic-Jurassic period of Mexico, Colombia and Venezuela**, it was possible to give a better configuration to the location of the Proto Cordillera Gran Estelar, as well as the evolution of the magmatic-volcanic arcs and establish their spatiotemporal correlation of both Laurentia, as well as Gondwana, confirming the solidity of the tectonic evolution model for the Gulf of Mexico-America.

Based on the analysis of the Paleogeographic Reconstruction Tectonic Evolution of the Gulf of Mexico, we begin to answer the different questions raised in the following section of Giants to Be Knocked Down.

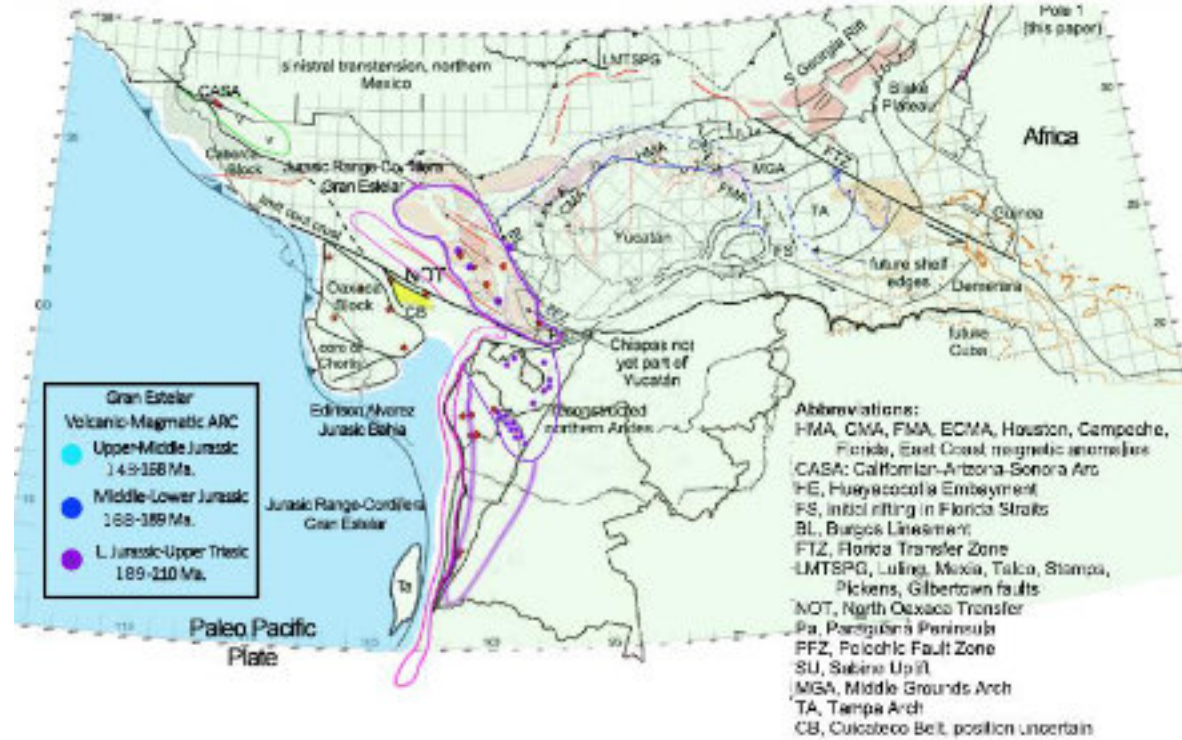
Additionally, one of the objectives of this work is to demonstrate the spatio-temporal relationship of the sedimentary deposits of the Jurassic Period of the Gulf of Mexico, with the sedimentary deposits of the same Jurassic period for the Colombian Basins, especially the Jurassic paleobasin of the Eastern Cordillera of Colombia.

**Figures 3,4,5,6,7,8, tectonic evolution of the Gulf of Mexico during the Upper Triassic period (201.3 a 210 m.a.)–Jurassic. 145 a 201.3 million years ago,**

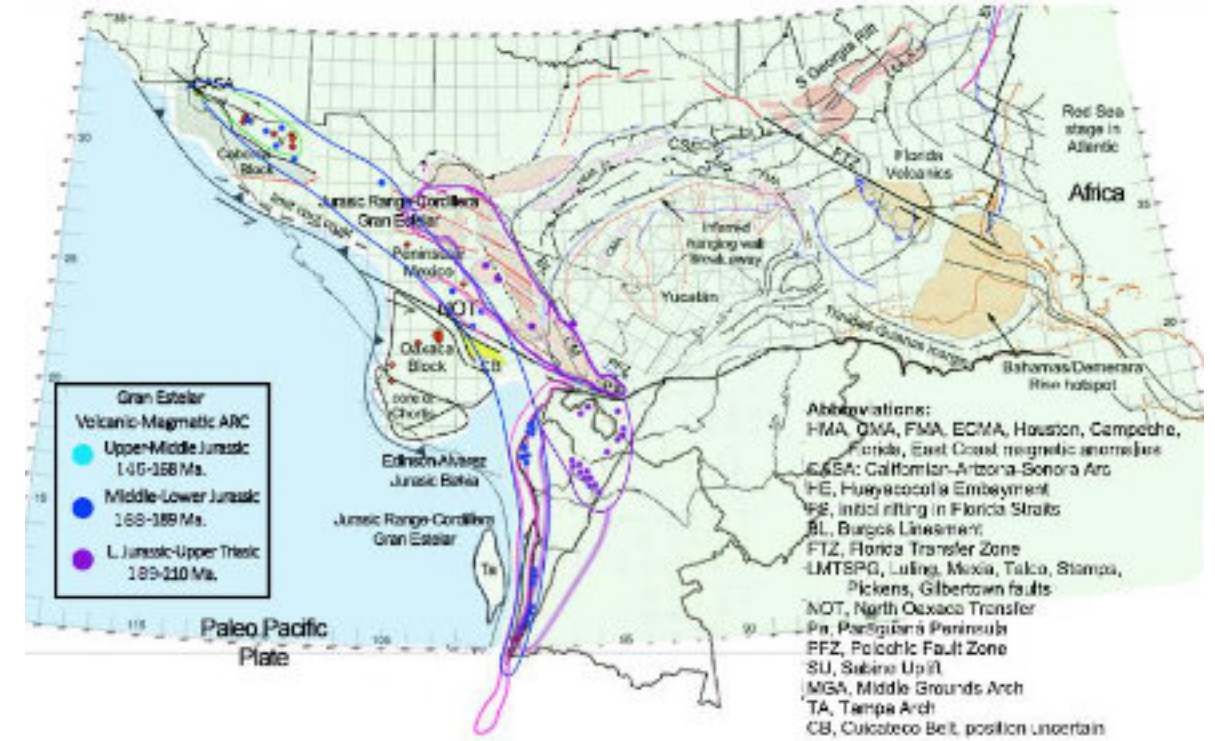
**Fig 3. Mexican Gulf Tectonic Evolution - 210-200 m.a. Late triasic-Early Jurassic**  
Edinson Alvarez -Geoscientist 2025, edinson.alvarez@gmail.com . Modified from Pindell et al 2021.



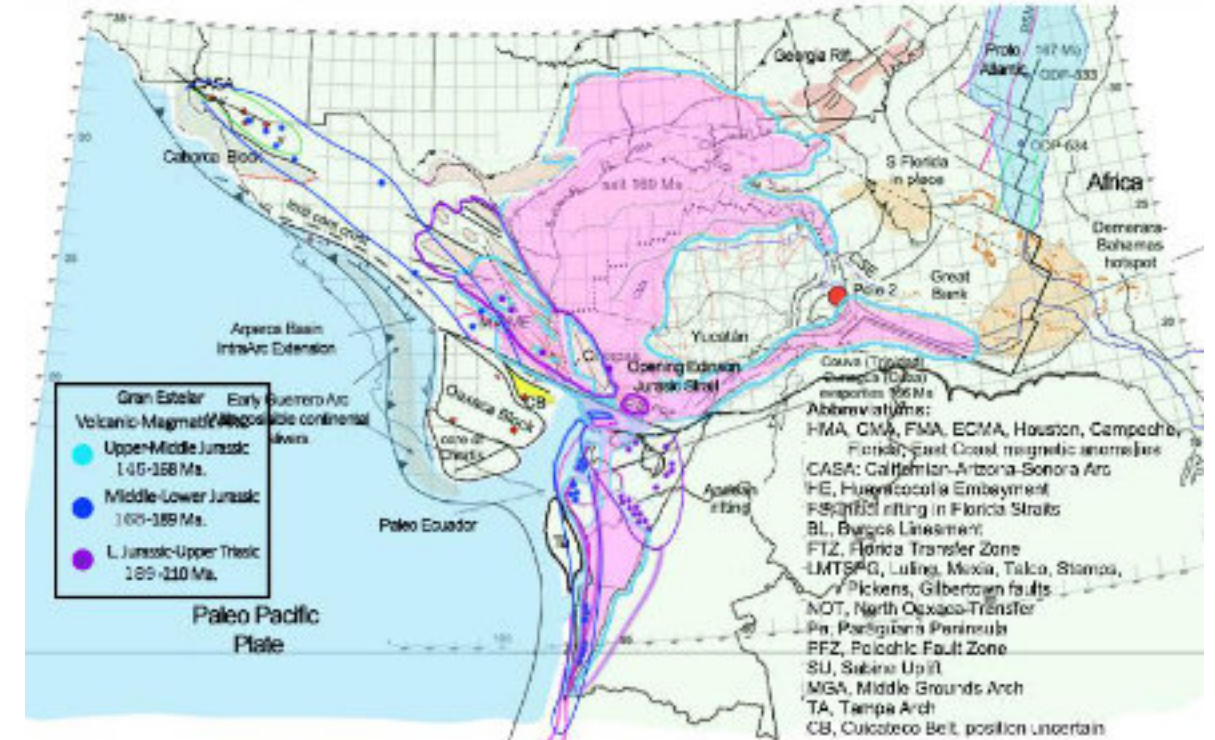
**Fig 4. Mexican Gulf Tectonic Evolution - 195 m.a. Early Jurassic**  
Edinson Alvarez -Geoscientist 2025, edinson.alvarez@gmail.com . Modified from Pindell et al 2021.



**Fig 5. Mexican Gulf Tectonic Evolution - 177 m.a. Early Jurassic**  
Edinson Alvarez -Geoscientist 2025, edinson.alvarez@gmail.com . Modified from Pindell et al 2021.

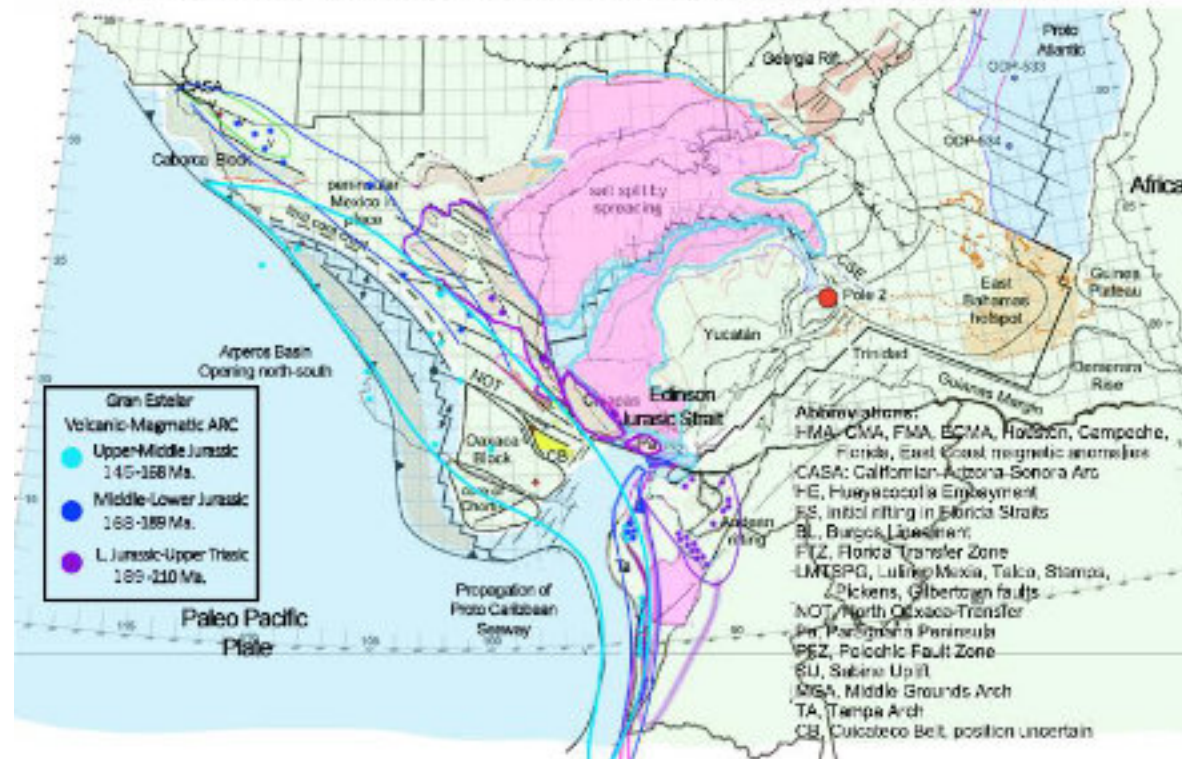


**Fig 6. Mexican Gulf Tectonic Evolution - 167 m.a. Middle Jurassic**  
Edinson Alvarez -Geoscientist 2025, edinson.alvarez@gmail.com . Modified from Pindell et al 2021.



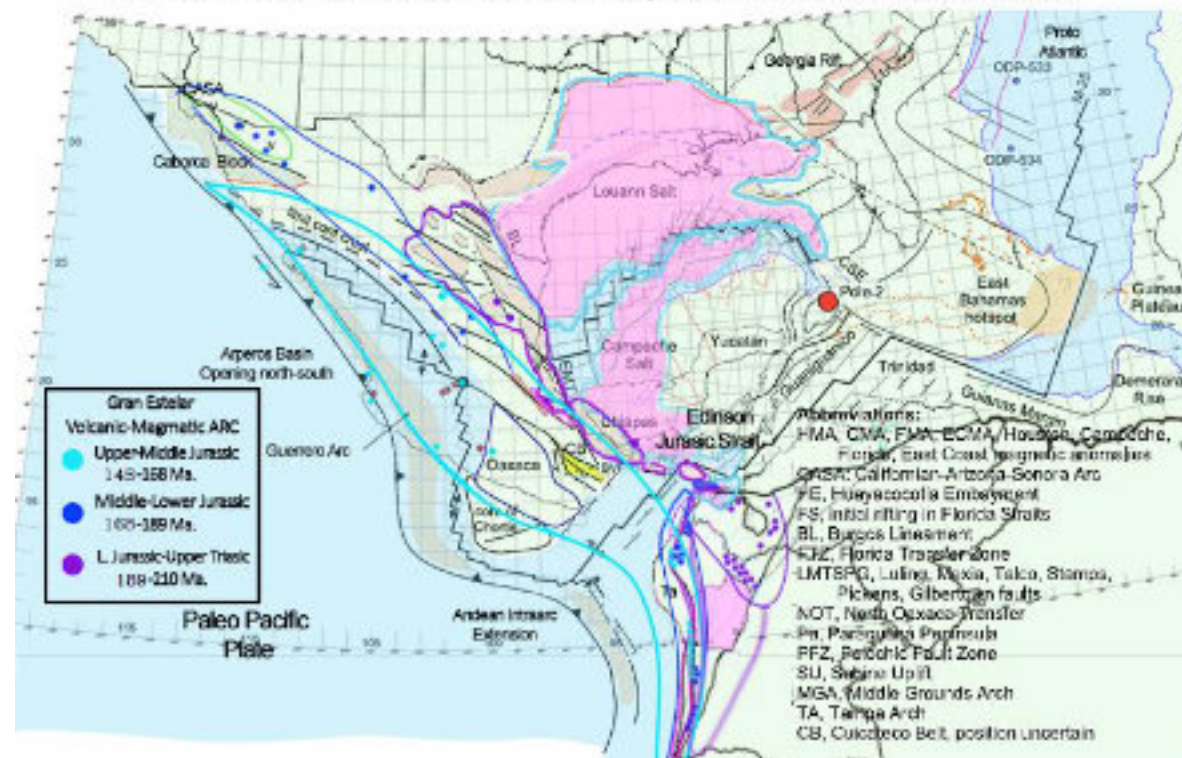
**Fig 7. Mexican Gulf Tectonic Evolution - 159 m.a. Late Jurassic**

Edinson Alvarez -Geoscientist 2025, edinson.alvarez@gmail.com . Modified from Pindell et al 2021.



**Fig 8. Mexican Gulf Tectonic Evolution - 154 m.a. Late Jurassic**

Edinson Alvarez -Geoscientist 2025, edinson.alvarez@gmail.com . Modified from Pindell et al 2021.



### 3. Giants

The following are the Giants that we will demolish in this chapter. We will refer to Giants as (Concepts, techniques, technologies, methodologies, procedures, tools, uncertainties, unresolved questions, etc.).

#### 3.1 Giant No. 1 ( Giant No. 20 Knocked Down this series):

Directly related to the succession of events that generated or gave rise to the structural and sedimentary configuration of the Gulf of Mexico.

Spikings, R. & Paul, A. 2019.

The relationship between Triassic plate margin extension and the final fragmentation of Pangaea is unclear. However,

Filina et al 2022. (Irina Filina, James Austin, Tony Dor'e, Elizabeth Johnson, Daniel Minguez, Ian Norton, John Snedden , Robert J. Stern. 2022. )

exploration. However, the opening of the basin remains debated for two reasons: 1) the quality of data does not allow for reliable interpretations of crustal features beneath thick and complex overburden, and 2) most industry well and geophysical data are proprietary. The last concerted effort by industry and academia to summarize the

#### 3.2 Giant No.2 ( Giant No. 21 Knocked Down this series):

Alarcón CM et al 2020. (Alarcón CM, Clavijo-Torres J, Mantilla-Figueroa LC, Rodríguez JG. 2020).

de arcos magmáticos marginales (Rodríguez, et al., 2018). Uno de los retos actuales es la reconstrucción de la historia geológica del Jurásico en los Andes del norte, no solo desde el punto de vista geoquímico y geocronológico de las rocas plutónicas y volcánicas, sino porque deben entenderse de forma integral las relaciones del magmatismo con la formación de cuencas y la acumulación de sucesiones sedimentarias. Como lo sugieren Bayona,

Camilo Bustamante Londoño 2020. (Grupo de Investigación Tectónica-estratigráfica Egeo-Unal, Grupo Tectónica-Eafit)

- Relación entre cuencas sedimentarias, magmatismo y metamorfismo.

**3.3 Giant No.3** ( Giant No. 22 Knocked Down this series):

**Camilo Bustamante Londoño 2020.** (Grupo de Investigación Tectónica-estratigráfica Egeo-Unal, Grupo Tectónica-Eafit)

- ¿Cómo fueron las variaciones de los espesores corticales durante el Jurásico?

**3.4 Giant No.4** ( Giant No. 23 Knocked Down this series):

**Camilo Bustamante Londoño 2020.** (Grupo de Investigación Tectónica-estratigráfica Egeo-Unal, Grupo Tectónica-Eafit)

- ¿Cómo se comportó la margen convergente durante el Jurásico?

**3.5 Giant No.5** ( Giant No. 24 Knocked Down this series):

**Camilo Bustamante Londoño 2020.** (Grupo de Investigación Tectónica-estratigráfica Egeo-Unal, Grupo Tectónica-Eafit)

- Tres modelos de evolución:  
 - Slab roll-back  
 - Erosión por subducción  
 - Convergencia oblicua

**3.6 Giant No.6** ( Giant No. 25 Knocked Down this series):

**Mildred Del Carmen Zepeda Martínez - Tesis Doctoral UNAM. 2021**

estas premisas, reconstruir la evolución de las cuencas del Jurásico Inferior-Medio de México no sólo enriquecería el debate sobre la dinámica de un proceso tectónico de escala global como es la fragmentación de un supercontinente, sino que también podría contribuir a la comprensión del origen y distribución de los reservorios de petróleo que existen en el país.

**Answers can be found in the Final Conclusions of this study.**

**4. Spatiotemporal Relationship of Sedimentary Deposits During the Jurassic Period of the Gulf of Mexico with Respect to the Jurassic Sedimentary Deposits of the Colombian Basins.**

**4.1 Geochronological Correlation of Volcanic and Magmatic Arcs of Laurentia (Mexico-USA)-Gondwana (Colombia-Venezuela):**

By incorporating geochronological and other data related to the volcanic-magmatic arcs of the Triassic-Jurassic period of Mexico, Colombia and Venezuela, it was possible to give a better configuration to the location of the Proto Cordillera Gran Estelar, as well as the evolution of the magmatic-volcanic arcs and establish their spatiotemporal correlation of both Laurentia, as well as Gondwana, confirming the solidity of the tectonic evolution model for the Gulf of Mexico-America.

The analysis of radiometric dating of magmatic (igneous-volcanic) rocks was thus carried out for the area of interest, the Laurentian-Gondwanan suture boundary of the Upper Triassic-Jurassic period. Three major groups of isotopic ages were found: U-Pb, K-Ar, and Ar-Ar, obtained from different studies, as follows:

**4.1.1 Eastern Gran Estelar Volcanic-Magmatic Arc (Upper Triassic-Lower Jurassic-210-189 Ma):**

**Venezuela:** Ministerio de Minas e Hidrocarburos de Venezuela 1968. (Figures 2,3,4)

**Sierra Perijá**

Granito el palmar K-AR 210.

Granodiorita El Palmar sm 200+-4

**Cordillera de los Andes Mérida**

Granodiorita Sierra Nevada de Mérida Rb-Sr 200+-2,5

Granito de Tovar Rb-Sr 200+-6

Granito porfídico Valera K-Ar 210+-5

Granito de Piñango K-Ar 195+-5, 200+-10, 196+-10

Granito de Timotes K-Ar 181+-9 (Anómalo)

**Baquero Marvin et al 2015. Mérida.**

Granodiorita el Carmen 211+- 1 ma. Vande Ielij et al 2011.

Granito de La Culata 206,1 (+3,0/-3,8) Ma y 207,3 (+4,0/-3,0) Ma Upper Triassic.

**Colombia:**

Santander Plutonic group: Santa Bárbara - Rionegro - Mogotes Batholiths and The Pescadero, La Corcova and Páramo Rico plutons (U-Pb zircon, Ma) 210-196. **Hildebrando Leal-Mejía et al 2019.**

**México:**

Valle de Huizachal-Aramberri U-Pb 195-189

Chiapas U-Pb 191 **Parolari M, Martini M. et al 2022.**

Chiapas 196. **Elena Centeno García 2023.**

**Eastern Gran Estelar Volcanic-Magmatic Arc (Upper Triassic-Lower Jurassic):** Composed of the extension of the Mexican Paleo Sierra Madre Oriental, Perijá, Paleo Mérida, and the Colombian Paleo Cordillera Oriental. (Honor beloved wife, Estela Moreno Z.) (Figures 1, 2, 3, 4, and 5).

**4.1.2 Central-Middle Gran Estelar Volcanic-Magmatic Arc (Lower Jurassic-Middle Jurassic-168-189 ma):**

**Venezuela:** Ministerio de Minas e Hidrocarburos de Venezuela 1968. (Figures 2,5,6)  
**Cordillera de los Andes Mérida**

Granito El Baño sm 175+-2,5 (Location Anomaly - Refers to a value that is outside the general trend of the Arch, explained as a deviation from the general placement route of the main arch)

**Colombia:**

Southern Ibagué Batholith, Norosí and San Martín batholiths (U-Pb zircon, Ma) Ca. 189–182  
Sierra Nevada de Santa Marta batholiths (pueblo Bello-Patillal and Aracataca-central) Ca. 180  
Mocoa-Garzón trend batholiths Ca. 179–173. **Hildebrando Leal-Mejía et al 2019.**

**México:**

Durango U-Pb 184-168  
Sierra de Catorce-Charcas-Zacatecas U-Pb 179-168  
Tizapa Mine U-Pb 186  
Ayú Complex U-Pb 175-168  
Tlaxiaco Basin U-Pb 184-177  
Acapaulco U-Pb 179  
Islas Marias U-Pb 170

**Parolari M, Martini M. et al 2022., Elena Centeno García 2023.**

**Central-Middle Gran Estelar Volcanic-Magmatic Arc (Lower Jurassic-Middle Jurassic):** Composed of the extension of the Mexican Paleo Sierra Madre Oriental, Paleo Mesa Central, Sierra Nevada de Santa Marta, Serranía de San Lucas, and the Colombian Paleo Cordillera Central. (Honor beloved wife, Estela Moreno Z.) (Figures 1, 2, 3, 4, 5, and 6).

**4.1.3 Western Gran Estelar Volcanic-Magmatic Arc (Middle-Upper Jurassic-145-168 ma):**

**Colombia:**

Northern Ibagué Batholith Ca. 169–152  
Segovia Batholith Ca. 167–158. **Hildebrando Leal-Mejía et al 2019.**

**México:**

Different Magmatic Bodies West of the Arperos Suture, Terreno Guerrero 150-165 **Centeno García 2023.**

**Western Gran Estelar Volcanic-Magmatic Arc (Middle-Upper Jurassic):** Formed by the extension of the Mexican Paleo Sierra Madre Oriental-Occidental, Paleo Mesa Central, Sierra Nevada de Santa Marta, Serranía de San Lucas and the Paleo Cordillera Central of Colombia. (Honor beloved wife Estela Moreno Z.) (Figures 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8).

**4.2 Geological, geochemical, sedimentological, facial, structural, paleogeographic, paleontological, geochronological correlation, Laurentia (Mexico-USA)-Gondwana (Colombia-Venezuela):**

To further consolidate, strengthen and test our model presented to the international geoscientific community in article 5 of this series in December 2025 (<https://revistamaya.com/wp-content/uploads/2025/12/Revista-Maya-Geociencias-EDICION-ESPECIALXXVII-2025.pdf>), We will proceed to integrate the technical and scientific evidence that allows us to validate the geological and tectonic evolution model proposed in this work for the Gulf of Mexico. (Figures 9 y 10)

**4.2.1 Roll Back Model of the Farallones Plate (Triassic-Jurassic).**

In the important work of **Dra. Danny Yulimar Mejía Vélez 2019 (Master's Thesis Unal-Colombia)**, she summarizes:

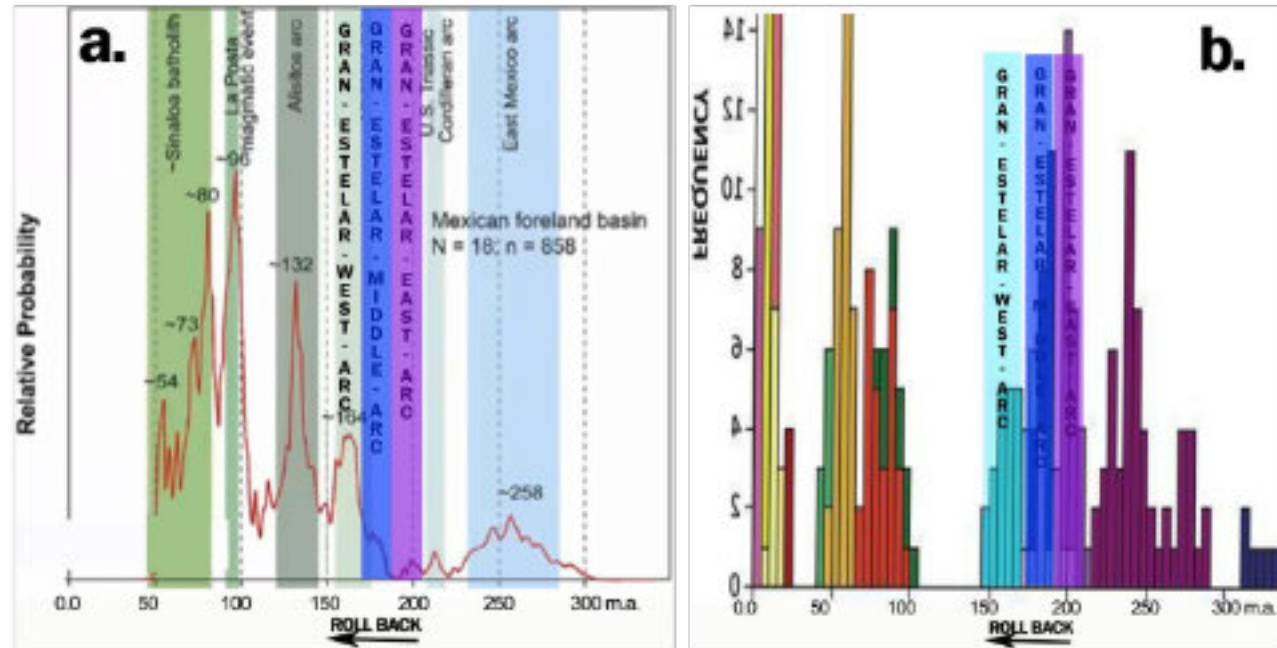
Los modelos más aceptados en la actualidad sobre la evolución de la margen noroccidental de Gondwana en el Jurásico defienden la existencia de un arco continuo desde el Jurásico inferior hasta el cretáceo superior construido en una margen sometida a un régimen extensional en una subducción tipo roll-back, esta hipótesis soporta su argumento en la migración del frente magmático desde el oriente sin considerar ningún tipo de influencia de desplazamientos en el rumbo durante la estructuración y evolución del arco (Villagomez et al. 2011; Cochrane et al 2014a, Cochrane et al. 2014b; Spikings et al. 2015, Spikings et al. 2016; Van der Lelij et al. 2016; Zapata et al. 2016; Spikings et al. 2019).

Similarly, **Dr. Elena Centeno García 2023**, Mexican site-UNAM points to the same conclusion for Laurentia. (Figures 9 y 10):

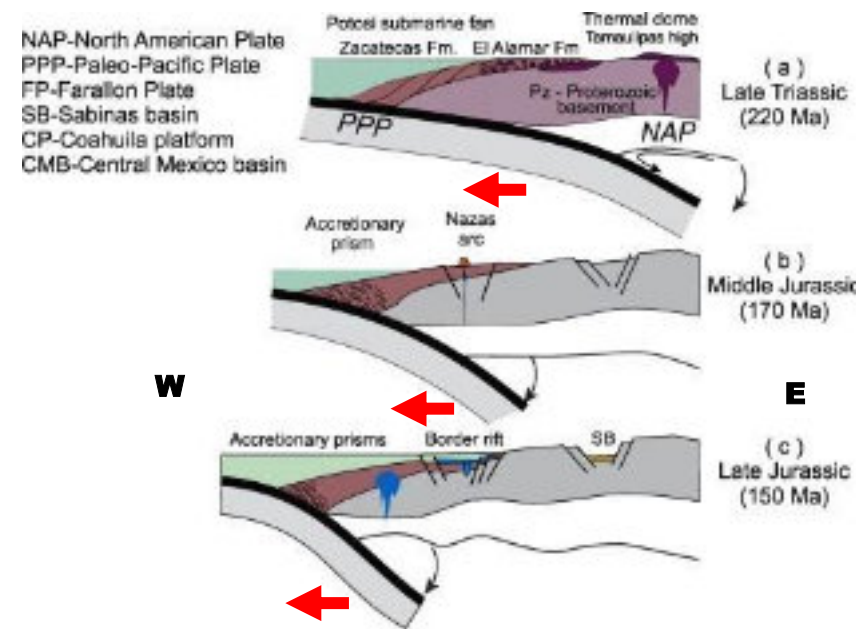
1. Magmatismo tiene una tendencia a migrar de E a W entre los 190 y 155 Ma

**4.2.2 Roll Back Model of the Farallones Plate (Triassic-Jurassic). Geochronology in Zircons, Laurentia (Mexico-USA)-Gondwana (Colombia-Venezuela):**

The Zircon geochronology results have been integrated from the work of Dra. Elisa Fitz et al 2020 y del Dr, Hildebrando Leal Mejía et al 2019 ( Figure 9).



**Figure 9.** a. Geochronological Analysis of U-Pb in Detrital Zircons in the Mexican Orogen. b. Granitoides Colombia. Modified from Elisa Fitz et al 2020 And Dr, Hildebrando Leal Mejía et al 2019. In both cases, the peaks corresponding to the formation dates of the East-Middle-West Gran Estelar Magmatic-Volcanic Arcs are observed.



**Figure 10.** Tectonic evolution of the Mexico Subduction Zone for the Late Triassic-Jurassic. Taken from Elisa Fitz et al 2018, showing the E-W rollback of the Farallones Plate. Images a. (to 210ma) and c.: the Gran Estelar Magmatic Arc are missing.

**4.2.3 Geological, geochemical, sedimentological, facial, structural, paleogeographic, paleontological, geochronological correlation, Laurentia (Mexico-USA)-Gondwana (Colombia-Venezuela):**

Dr. Claudio Bartolini et al. (2003) made a significant contribution to the geosciences of the Laurentian-Gondwanan Triassic and Jurassic periods with their extensive correlation between the Nazas Formation of Mexico and the Girón and La Quinta Formations in Colombia and Venezuela. This correlation has been extensively studied and proposed by other authors. However, the need to solidify and/or confirm this important analysis and postulate had remained unresolved. We are proud to have verified this 23 years later through the tectonic and geochronological reconstruction presented in this work. (Fig. 1,3).

Bartolini, C., H. Lang, and T. Spell, 2003.

**THE NORTH-SOUTH AMERICA CONNECTION (?)**

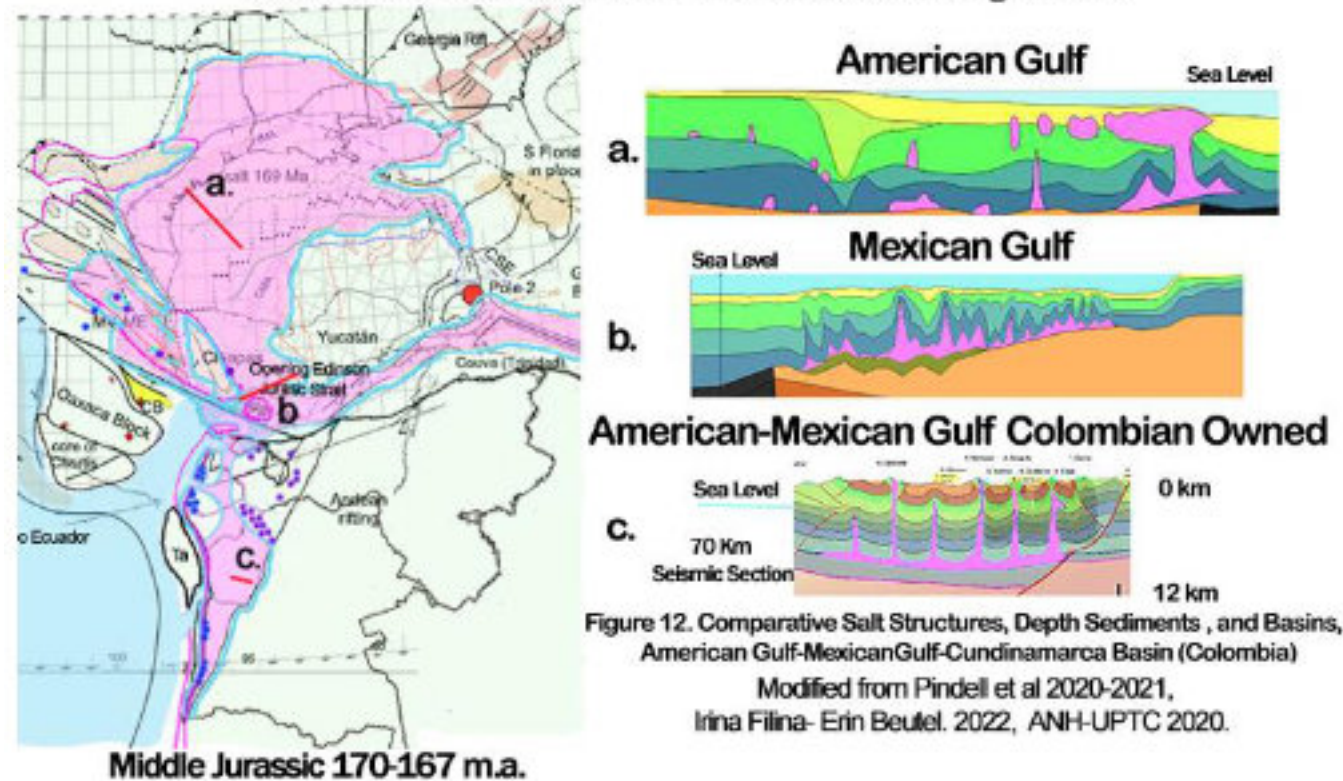
In Colombia and Venezuela, Jurassic volcanic, intrusive, and sedimentary rocks of La Quinta and Girón Formations share many of the characteristics of the Nazas Formation in Mexico, such as age, lithologies, geochemical affinity, environments of deposition, and tectonic setting. These similarities, along with the configuration of Pangea in the early Mesozoic, suggest that La Quinta, Girón and Nazas Formations were an integral part of a once-continuous Triassic-Jurassic continental-margin magmatic arc that may have existed along the western margin of Pangea supercontinent.

**Figure 3** of this article confirms the important theory postulated by Drs. Bartolini, C., H. Lang, and T. Spell, 2003. Great achievement and success of the present study.

Dr. Edinson Alvarez (Article 5 of this Series, 2025) makes a significant contribution to the geosciences of the Laurentian-Gondwanan Triassic and Jurassic periods with the extensive correlation between the Louant Salt Formation (Gulf of Mexico, America) and the Zipaquirá Salt Formation (Cundinamarca Basin, Colombia, 2025). He projects the existence of the Lower Jurassic Zipa Formation (Edinson Alvarez, 2025), which is correlated with marine formations and facies, such as the nearby Montebel Formation in the Eastern Cordillera of Colombia; the Morrocoyal Formation in the Middle Magdalena Valley and near the western part of the Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia; and the Werner Formation in the Gulf of Mexico. (Figure 11. Spatiotemporal correlation –tectonic-paleogeographic reconstruction–Salt Formation Gulf of Mexico, with the Sal of Colombia, Zipaquirá Formation Edinson Alvarez 2025–Complements to Article 5 of this Series).

## THE THIRD PART OF THE GULF OF MEXICO THAT BELONGS TO COLOMBIA

EDINSON ALVAREZ-GEOSCIENTIST 2025 - edinson.alvarez@gmail.com



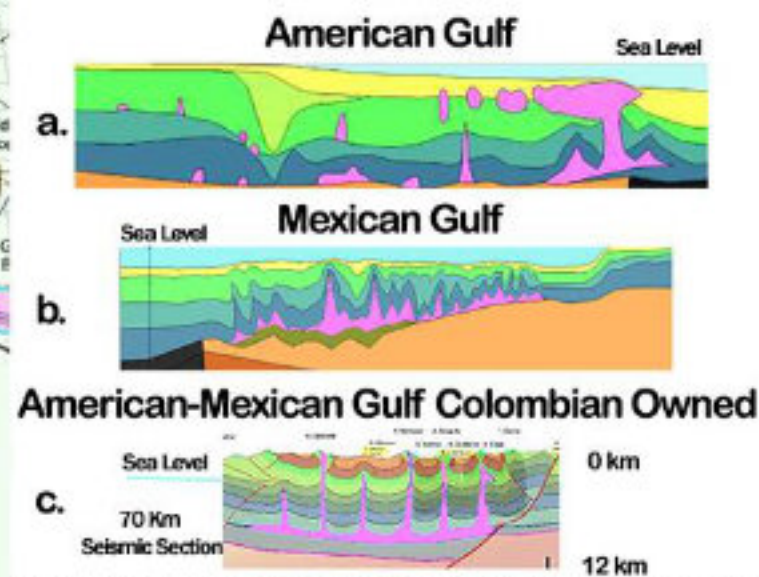
**Figure 11.** Correlation of Salt Formation in the Gulf of Mexico with the Salt of Colombia, Zapaquirá Salt Formation, Elevated to Formation Rank by Edinson Alvarez 2025.

### 4.3 The Five Giganuclear Geological and Tectonic Forces that Gave Rise to the Gulf of Mexico.

An Advanced Information Integration was performed, based on the principles of the **SCT Complex Source Theory (Edinson Alvarez 2025)**. Step to Determine the Origin and Evolution of the Gulf of Mexico. **Figure 2.**

#### 4.3.1 Mantle Plume

A mantle plume just beneath the Gulf of Mexico caused uplift, extension, and flow of mafic magmas, generating the central Gulf rift at the end of the Middle Jurassic and terminating the magmatic and/or lava flows at the lower Cretaceous. (Period estimated in Filina and Beutel 2022). (Supercontinent Fragmentation Requirements - Juan Pablo Lovecchio 2020 - Item 4.3.3) (Figure 2 - No. 1)



**Figure 12.** Comparative Salt Structures, Depth Sediments, and Basins, American Gulf-Mexican Gulf-Cundinamarca Basin (Colombia) Modified from Pindell et al 2020-2021, Irina Filina- Erin Beutel. 2022, ANH-UPTC 2020.

#### 4.3.2 Subduction with Roll Back Extension

The Roll Back in the Subduction of the Farrallones Plate over Mexican-American territory (Laurentia) and over Colombian-Venezuelan territory (Gondwana), fully studied and verified by the studies cited above. Dany Yuleimar Mejía Vélez 2019 (Tesis Maestría Unal-Colombia), Elena Centeno García 2023, Elisa Fitz et al 2018, entre otros. (Figura 2-No.3., a y b)

#### 4.3.3 Gravitational Collapse

The Gravitational Collapse of the volcanoclastic sequence of the Nazas Formation and overlying units, in the Oxfordian Late Jurassic 157-163 Ma (Bartolini et al 2003), Pindell 2020-2021, among others. (Figure 2-No. 4.)

The three above are consistent with the list presented by Dr. Juan Pablo Lovecchio in 2020, (Requirements for Supercontinent Fragmentation-)

### Continental breakup

#### Processes:

1. Mantle plume impingement
2. Orogenic gravitational collapse
3. Subduction-related extension (slab retreat, negative rollover, slab steepening)

However, with the **SCT Complex Source Theory (Edinson Alvarez 2025)**, two new forces have been added that participated in the origin, creation and evolution of the Gulf of Mexico-America.

#### 4.3.4 Transform Fault Movement Aligned with North Oaxaca Transfer, Mojave-Sonora and Tamaulipas Transfer.

The movement of Transform Faults in the Western Part of Laurentia was vital not only for the transport of Allochthonous Blocks such as Aoxaca and Chortis, etc... but also helped and facilitated the journey, transport and deformation of the Gravitational Collapse of the Nazas Formation, mentioned above. (Figura 2-No.2.)

#### 4.3.5 Continental Drift Movement of the North American Plate.

The Continental Drift Movement of the North American Plate, widely studied and also referred to by Dr. Elisa Fitz in 2020, moved towards the Southwest (SW), also contributing stress and deformation to the complex and varied geological and tectonic environment of the Gulf of Mexico.

The way in which the events, interaction and analysis of the five geological and tectonic forces mentioned above developed can be observed in the Sequence of Figures 1,2,3,4,5,6,7,8, together with the graphs and stratigraphic columns referred to in Article 5 of this Series.

DISCUSSION

This work unlocks several existing limitations in the geoscientific world related to the tectonic evolution of one of the main oil sources in the world, the Gulf of Mexico (Gulf of America-Gulf of Mexico) and in parallel the Jurassic petroleum system of the Colombian basins.

One of the main geological features is the **discovery of the Rudabet Great Fault System-Lineament (Honor to Ruben Dario Alvarez Betancourt (Father), Figures 1 and 3)**. This system controls the base of the large continental structural scarp of Laurentia (Figure 3). This discovery helps resolve several contemporary questions, which are central to this study, and which address uncertainties raised by leading geoscientists worldwide.: James Pindell, Diego Villagómez, Roberto Molina-Garza, Rod Graham and Bodo Weber 2020-2021; Mildred Del Carmen Zepeda Martinez - Tesis Doctoral UNAM. 2021; Alarcón CM, Clavijo-Torres J, Mantilla-Figueroa LC, Rodríguez JG.2020; Irina Filina, James Austin, Tony Dor´e, Elizabeth Johnson, Daniel Minguez, Ian Norton, John Snedden , Robert J. Stern. 2022. And others. This feature demonstrates that the **Restrepo and Toussaint 2020 Chibcha Terrane constitutes**, according to this study, the westernmost part of the large Laurentian structural escarpment (Figure 3). It occupies approximately one-third of the size of the basin that gave rise to the Gulf of Mexico-Gulf of America (including the Paleobasin of the Eastern Cordillera of Colombia) during the Triassic-Jurassic period.

Although improvements, refinements, and modifications can be made to the proposal presented in this study, the fact remains that the perfect tie-up obtained through the **Rudabet Fault-Lineament System (Honor Ruben Dario Alvarez Betancourt-Father., Figures 1 and 3)** is and will be the starting point for future reconstructions of tectonic evolution forward or backward from this tie-down point or constraint in geological time. The issue that still warrants review is determining whether this tie-down point corresponds to the 200 Ma age of the Dr. Pindell et al. 2020-2021 model, or to a slightly earlier age between 200 and 210 Ma. This would require considering the travel velocities of the Chortis-Oaxaca blocks and their implications for past reconstructions, a topic beyond the scope of this work.

Supporting the existence of a mountain-volcanic chain from the Upper Triassic to the Middle-Upper Jurassic, extending from Mexico (Laurentia) and Colombia (Gondwana), referred to in this work as the **Triassic-Jurassic Gran Estelar ProtoCordillera**: formed by the high-mountain terrain located adjacent to the west of the Paleo Sierra Madre Oriental of Mexico and the Proto Central Cordillera of Colombia, are the following elements:

1. According to the paleogeographic-tectonic reconstruction carried out in this work, a structural element is required to act as back retaining wall of the continental slope escarpment of the Gulf of Mexico, relative to the waters of the Pacific Ocean. (Honor beloved wife Estela Moreno Z.) (Figures 1, 2, 3, 4 y 5).

2. When analyzing the location and evolution during the Upper Triassic-Jurassic period of the Gran Estelar East, Middle and West Volcanic-Magmatic Arcs, it is observed, interpreted and analyzed that the area of intersection, overlap or crossing of these three magmatic arcs is located right in the area where the existence of this volcanic mountain range is projected. (Figures 1, 2, 3, 4 y 5).
3. A large part of the Upper Triassic-Upper Jurassic Gran Estelar protomountain underwent gravitational collapse and extension during the Middle-Late Jurassic in Mexico. Also with the separation of Laurentia and Gondwana, eroded, buried, and/or dissolved it across of Mexico, allowing the influx of Jurassic waters through the main opening, the **Edinson Alvarez Strait (Figure 6)** (located between the Chiapas Massif and the Guajira Peninsula (in the Middle Jurassic, the Serranía de Cosinas and Serranía de Macuirá)) (See Article 5 of this series). Meanwhile, in Colombia, the activity of the Middle and Western Gran Estelar Volcanic-Magmatic Arcs helped shape the Central Cordillera of Colombia.
4. Zircon detritus analyses carried out west of the proto-mountain range of the Upper Triassic-Upper Jurassic Great Stellar, in the Sierra Zacatecas area (Central Zone of Mexico), in the La Pimienta, Las Pilas and La Escondida Formations, reflect the existence of these volcanic units, as contributors of detrital material for the aforementioned formations. **Figure 12. Modified from Berlaine Ortega-Flores 2016.**

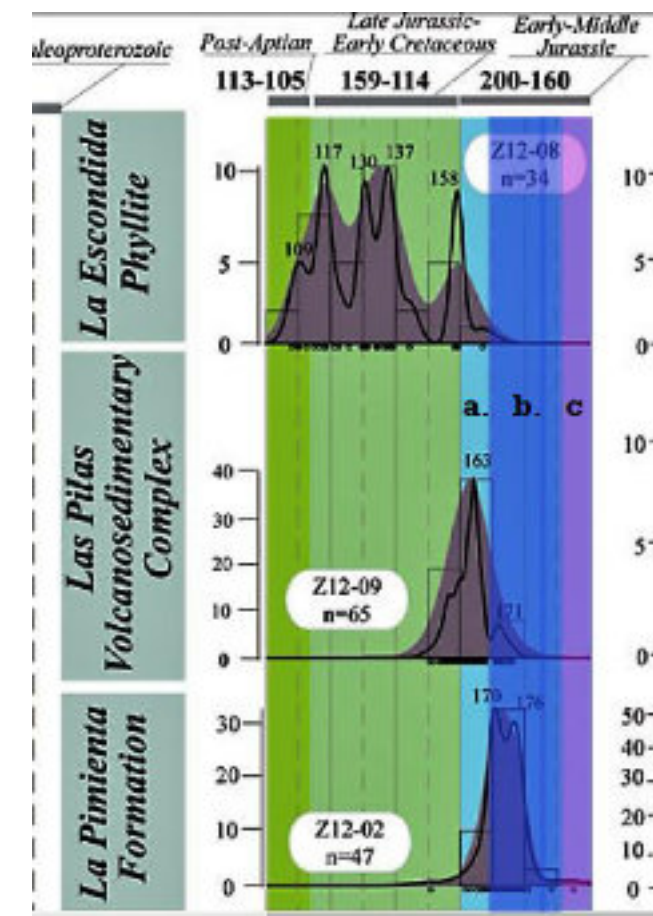


Figure 12. Detrital deposition corresponding to the Gran Estelar East(c), Middle(b), and West(a) volcanic arcs in the Sierra Zacatecas area of Mexico. Modified from Berlaine Ortega-Flores 2016.

In Colombia, the oil sector and the geoscientific community have traditionally assumed that the salt corresponds to Cretaceous deposition, as shown on all chronostratigraphic maps of the country up to 2025. However, there are several points that do not support this thesis and, on the contrary, contradict this theory, among them are (See Article 5 of this Series):

- 1- Since the Cretaceous play is one of the most studied and drilled in the country due to the interest in its petroleum systems, there is no significant report of salt or saline deformation in the Llanos basin, Catatumbo, upper-middle Magdalena valley, Maracaibo Basin, where Cretaceous deposition was also recorded.
- 2- The Jurassic paleobasin of the Eastern Cordillera of Colombia has been little studied and almost unexplored, according to ANH-UPTC 2020.
- 3- The few wells drilled in the Eastern Cordillera basin of Colombia mostly only reach the Cretaceous sequence, leaving the Jurassic record unknown. This is especially true in the Cundinamarca basin. (Figure 14- Article 5, this series).
- 4- The analysis of the facts, indications, evidence, and previous records clearly shows us that while the Cretaceous transgression to the South American continent has been widely studied and analyzed, we find that the entry of the sea or flooding into the territory was extensive and massive, that is, there was direct communication with the open sea, therefore there were normal salinity conditions unsuitable for the deposition of salt. While the analysis of the facts, clues, evidence, and records provided in this work demonstrates that during the Middle Jurassic period (**Bajocian-Bathonian, 166-170 Ma**), the Naza Arch of Mexico was in collision with the northwestern corner of South America (Gondwana), breaking the Jurassic Gran Estelar Ridge, creating the Edinson Strait (Edinson Strait-Noth, JhonEdi Strait-Center, and Floris Strait-South) entering the Pacific Ocean to flood the Gulf of Mexico (Gulf of America and Gulf of Mexico), also flooding the paleobasin of the Eastern Cordillera of Colombia, **Demonstrated by the marine corridors of the lower and middle Jurassic, defined from the stratigraphic columns 1,2,3,3a,3b,3d and 3d; 4, 4a, 3c, (later eroded), Figures 6,9,10,11,12,13,14,15,16.** This generated a restricted flow of seawater, causing low circulation and therefore hypersalinity, which, combined with the large extent of the Basin and the high atmospheric conditions of high temperatures, favored the rapid deposition of salt. (Filina et al 2022), which reached a thickness of 3 to 4 km. **We can clearly conclude that the salt from the Eastern Cordillera of Colombia is part of the same environment, time and conditions as those that formed in the Gulf of Mexico during the Middle Jurassic. (See Article 5 of this Series).**

#### Implications in Colombian Petroleum Systems.

We can conclude from the corresponding analysis of the items in section 4.0 of Article 5 of this Series, that we have identified two new unexplored plays and/or Hypothetical petroleum systems in the Cundinamarca Basin, belonging to the Jurassic paleobasin of the Eastern Cordillera of Colombia.

1. **Jurassic Play:** Formed by the deposition of organic shales from the Lower Jurassic - Hypothetical **Zipa Formation** of Edinson Alvarez 2025 (Source Rock) contemporaries with Morrocoyal and Montebel formations (Marine and Marines Facies). Interdigitated towards the edges of the Basin with detrital volcanosedimentary, slope deposits, debris flows, turbidites (Reservoir Rock) and a 3 to 4 km seal of salt deposited during the Middle Jurassic.

2. **Cretaceous play associated with salt seal:** Source Rock: Fόμεque Formation, Reservoir Rock: Une Formation, Seal Rock: Migrated Salt. The same applies to upper sequences.

The Regional Stratigraphic and Structural Analysis indicates that there is a possibility that, beneath the Jurassic Play described above, lies the Triassic sequence made up of the units and/or their equivalents (Figure 9,14- chapter 5 of this series, station 11):

On the east side, the Ibagué batholith intrudes another series of sedimentary and volcanic rocks of pre-Cretaceous age, formerly known as the **Payandé Group**, which consists of three clearly distinguishable units, chronostratigraphically ordered from youngest to oldest as follows (Alberto Nuñez 1986):

- **Saldaña Formation:** This is the uppermost unit; it is divided into two members, a lower, predominantly volcanic one, informally called the Volcanic Unit by Jimeno and Guevara (1976:19), and an upper, sedimentary one that lies unconformably on top of the former, called the Arkosic Unit by the same authors. Upper Triassic-Lower Jurassic age. (Bayona et al 2020).

- **Payandé Formation:** composed of two members, one calcareous and the other clastic; fossiliferous levels reported in this unit have confirmed a Late Triassic age (Karnian-Norian). (Bayona et al 2020).

- **Luisa Formation:** It consists of thick beds of sedimentary breccias and arkosic conglomerates, evidence of intense erosion. Because it is overlain by the fossiliferous Payandé Formation, it is assigned a Permian age. (Bayona et al 2020).

The integration of knowledge developed through the Complex Source Theory (CST) and its various advanced tools allows us to shed light on and answer all the questions that, for more than one hundred years (the contemporary era), have troubled geoscientists and petroleum explorers regarding the tectonic, sedimentary, stratigraphic, and structural evolution of the Gulf of Mexico (Gulf of America-Gulf of Mexico and the paleo-Eastern Cordillera of Colombia). **Figures 1 to 8. (The same treatment has been applied to all other oil and mining basins in Colombia.)**

The answers become logical, simple, and gain value in light of Complex Source Theory (CST) and its tools, as you will see in the concluding part of this study.

**If your company faces a highly complex geoscientific problem with significant economic implications, Complex Source Theory (CST) and its tools are here to solve it.** For a more detailed analysis and solution to complex tectonic, structural, and stratigraphic problems, please consult with the author of this article.

**CONCLUSION**

The SCT Complex Source Theory and its advanced tools demonstrate their value in this report, contributing to the knowledge and understanding of the tectonic evolution of the Gulf of Mexico (Gulf of America-Gulf of Mexico and the Paleobasin of the Eastern Cordillera of Colombia) during the Upper Triassic-Jurassic Period. This contributes to geoscientific knowledge and development, which will help guarantee the country's energy, economic, and social sustainability.

Through this analysis, we have demonstrated how the SCT's postulates have been corroborated and proven over time, revealing their predictive power. And in this article, dedicated to Miguel de Cervantes Saavedra and his work, **we verify the demolition of Six (6) giants in the field (we will refer to giants as: concepts, techniques, technologies, methodologies, procedures, tools, uncertainties, unanswered questions, etc.). Counting a total of 25 giants taken down in these 6 published articles.**

**5.1 Giant No. 1 ( Giant No. 20 Knocked Down this series):**

Directly related to the succession of events that generated or gave rise to the structural and sedimentary configuration of the Gulf of Mexico.

**Spikings, R. & Paul, A. 2019.**

The relationship between Triassic plate margin extension and the final fragmentation of Pangaea is unclear. However-

**Filina et al 2022.** (Irina Filina, James Austin, Tony Dor'e, Elizabeth Johnson, Daniel Minguez, Ian Norton, John Snedden , Robert J. Stern. 2022. )

exploration. However, the opening of the basin remains debated for two reasons: 1) the quality of data does not allow for reliable interpretations of crustal features beneath thick and complex overburden, and 2) most industry well and geophysical data are proprietary. The last concerted effort by industry and academia to summarize the

**Answer:** This study largely clarifies the spatio-temporal relationship of subduction processes, the generation of volcanic-plutonic arcs, rifting, and basin filling and deposition, providing the general framework for subsequent and prior processes in the tectono-stratigraphic formation and evolution of Mexican, American, and Colombian basins during the Jurassic Period and part of the Upper Triassic. **It also point out the processes that led to the extension and fragmentation of Pangaea, specifically. (Figures 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8)** (For further details regarding the events and implications in the oil, gas, and mineral exploration cycle, please consult the author of this article).

**5.2 Giant No. 2 ( Giant No. 21 Knocked Down this series):**

**Alarcón CM et al 2020.** (Alarcón CM, Clavijo-Torres J, Mantilla-Figueroa LC, Rodríguez JG. 2020).

de arcos magmáticos marginales (Rodríguez, et al., 2018). Uno de los retos actuales es la reconstrucción de la historia geológica del Jurásico en los Andes del norte, no solo desde el punto de vista geoquímico y geocronológico de las rocas plutónicas y volcánicas, sino porque deben entenderse de forma integral las relaciones del magmatismo con la formación de cuencas y la acumulación de sucesiones sedimentarias. Como lo sugieren Bayona,

**Camilo Bustamante Londoño 2020.** (Grupo de Investigación Tectónica-estratigráfica Egeo-Unal, Grupo Tectónica-Eafit)

- Relación entre cuencas sedimentarias, magmatismo y metamorfismo.

**Answer:** The spatiotemporal relationship of subduction processes, the generation of volcanic-plutonic arcs, rifting, basin filling and deposition is largely clarified, providing the general framework for subsequent and prior processes in the tectono-stratigraphic formation and evolution of Mexican, American, and Colombian basins during the Jurassic Period and the Upper Triassic. The tectonic-structural-sedimentary spatiotemporal framework is determined in order to establish the relationships between sedimentary basins, magmatism, and metamorphism. **(Figures 3, 4, 5, 6, 7, 8)** (For further details regarding the events and implications in the oil, gas, and mineral exploration cycle, please consult the author of this article).

**5.3 Giant No. 3 ( Giant No. 22 Knocked Down this series):**

**Camilo Bustamante Londoño 2020.** (Grupo de Investigación Tectónica-estratigráfica Egeo-Unal, Grupo Tectónica-Eafit)

- ¿Cómo fueron las variaciones de los espesores corticales durante el Jurásico?

**Answer:** The integration and interpretation of volcanic, magmatic, tectonic-structural events, sedimentation, paleogeographic and geochronological relationships, among others, allow us to infer, estimate, and establish the relationship of crustal thicknesses during the Upper Triassic-Jurassic period. **(Figures 3,4,5,6,7,8)** (For further details regarding the events and implications in the oil, gas, and mineral exploration cycle, please consult the author of this article).

**5.4 Giant No. 4** ( Giant No. 23 Knocked Down this series):

**Camilo Bustamante Londoño 2020.** (Grupo de Investigación Tectónica-estratigráfica Egeo-Unal, Grupo Tectónica-Eafit)

- ¿Cómo se comportó la margen convergente durante el Jurásico?

**Answer:** The integration and interpretation of volcanic, magmatic, tectonic-structural events, sedimentation, paleogeographic and geochronological relationships, among others, allow us to determine how the Convergent Margin behaved during the Upper Triassic-Jurassic period. **(Figures 3,4,5,6,7,8)** (For further details regarding the events and implications in the oil, gas, and mineral exploration cycle, please consult the author of this article).

**5.5 Giant No. 5** ( Giant No. 24 Knocked Down this series):

**Camilo Bustamante Londoño 2020.** (Grupo de Investigación Tectónica-estratigráfica Egeo-Unal, Grupo Tectónica-Eafit)

- Tres modelos de evolución:  
 - Slab roll-back  
 - Erosión por subducción  
 - Convergencia oblicua

**Answer:** It is clear that geoscientific researchers from both the North (Mexico-USA) and the South (Colombia-Venezuela), and the rest of the world, along with the results of this study (Edinson Alvarez 2025-26), confirm the Slab Roll Back model as one of the main triggers for the opening and evolution of the Gulf of Mexico-America-fragmentation of Pangaea. The other events are complementary and may or may not be due to particular local or regional situations within the evolutionary process. **(Figures 2, 3,4,5,6,7,8,10)** (For further details regarding the events and implications in the oil, gas, and mineral exploration cycle, please consult the author of this article).

**5.6 Giant No. 6** ( Giant No. 25 Knocked Down this series):

**Mildred Del Carmen Zepeda Martínez - Tesis Doctoral UNAM. 2021**

estas premisas, reconstruir la evolución de las cuencas del Jurásico Inferior-Medio de México no sólo enriquecería el debate sobre la dinámica de un proceso tectónico de escala global como es la fragmentación de un supercontinente, sino que también podría contribuir a la comprensión del origen y distribución de los reservorios de petróleo que existen en el país.

**Answer:** The contributions and geoscientific knowledge of this study clearly impact the processes of formation, generation and evolution of petroleum and mining systems, both in the Gulf of Mexico-America, the Eastern Cordillera of Colombia and the basins of Venezuela, as well as the mineral resources of the continental part of the aforementioned countries. **(Figures 1,2,3,4,5,6,7,8)** (For further details regarding the events and implications in the oil, gas, and mineral exploration cycle, please consult the author of this article).

**5.7 Implications in Colombian Petroleum Systems.**

We can conclude from the corresponding analysis of the items in section 4.0 of Article 5 of this Series, that we have identified two new unexplored plays and/or Hypothetical petroleum systems in the Cundinamarca Basin, belonging to the Jurassic paleobasin of the Eastern Cordillera of Colombia.

1. **Jurassic Play:** Formed by the deposition of organic shales from the Lower Jurassic - Hypothetical **Zipa Formation** of Edinson Alvarez 2025 (Source Rock) contemporaries with Morrocoyal and Montebel formations (Marine and Marines Facies). Interdigitated towards the edges of the Basin with detrital volcanosedimentary, slope deposits, debris flows, turbidites (Reservoir Rock) and a 3 to 4 km seal of salt deposited during the Middle Jurassic.
2. **Cretaceous play associated with salt seal:** Source Rock: Fómeque Formation, Reservoir Rock: Une Formation, Seal Rock: Migrated Salt. The same applies to upper sequences.

The Regional Stratigraphic and Structural Analysis indicates the possibility that, beneath the Jurassic Play described above, the Triassic sequence comprised of the **Saldaña, Payandé, and Luisa Formations and/or their equivalents may lie in the Cundinamarca Basin, Colombia.** This possibility must be confirmed or refuted through 2D-3D seismic analysis and interpretation, and deep drilling in the basin. **(Work for the ANH, Colombian Geological Survey, Ecopetrol, and/or Foreign Companies) (Figure 9,14, Article 5 of this series, station 11).**

**5.8** Through the interpretation of the intersection of the East-Middle and West Gran Estelar Magmatic-Volcanic Arcs, as well as the existence of detrital deposition of Upper Triassic-Jurassic zircons in sequences later than the western Sierra Zacatecas (Central Zone of Mexico), among others, they help to demonstrate the existence of the Proto Gran Estelar Cordillera of the Upper Triassic-Jurassic, of continental extent, encompassing from north-central Mexico to southern Colombia. **Figures 1,2,3,4,5,6,7,8,9,12.**

## 5.9 The Five Giganuclear Geological and Tectonic Forces that Gave Rise to the Gulf of Mexico-América.

This study identified the different events that gave rise to the Gulf of Mexico-America. Five major forces participated in its origin, creation, evolution, and development (**Figure 2.**):

### 5.9.1 Mantle Plume

A mantle plume just beneath the Gulf of Mexico caused uplift, extension, and flow of mafic magmas, generating the central Gulf rift at the end of the Middle Jurassic and terminating the magmatic and/or lava flows at the lower Cretaceous. (**Period estimated in Filina and Beutel 2022**). (**Supercontinent Fragmentation Requirements - Juan Pablo Lovecchio 2020 - Item 4.3.3**) (**Figure 2 - No. 1**)

### 5.9.2 Subduction with Roll Back Extension

The Roll Back in the Subduction of the Farrallones Plate over Mexican-American territory (Laurentia) and over Colombian-Venezuelan territory (Gondwana), fully studied and verified by the studies cited above. Dany Yuleimar Mejía Vélez 2019 (Tesis Maestría Unal-Colombia), Elena Centeno García 2023, Elisa Fitz et al 2018, entre otros. (Figura 2-a,b, 2-No3).

### 5.9.3 Gravitational Collapse

The Gravitational Collapse of the volcanosedimentary sequence of the Nazas Formation and overlying units, in the Oxfordian Late Jurassic 157-163 Ma (Bartolini et al 2003), Pindell 2020-2021, among others. (Figure 2-No. 4.)

The three above are consistent with the list presented by Dr. Juan Pablo Lovecchio in 2020, (Requirements for Supercontinent Fragmentation-Item 4.3.3)

However, with the SCT Complex Source Theory (Edinson Alvarez 2025), two new forces have been added that participated in the origin, creation and evolution of the Gulf of Mexico-America.

### 5.9.4 Transform Fault Movement Aligned with North Oaxaca Transfer, Mojave-Sonora and Tamaulipas Transfer.

The movement of Transform Faults in the Western Part of Laurentia was vital not only for the transport of Allochthonous Blocks such as Aoxaca and Chortis, etc... but also helped and facilitated the journey, transport and deformation of the Gravitational Collapse of the Nazas Formation, mentioned above. (Figure 2-No.2.)

### 5.9.5 Continental Drift Movement of the North American Plate.

The Continental Drift Movement of the North American Plate, widely studied and also referred to by Dr. Elisa Fitz in 2020, moved towards the Southwest (SW), also contributing stress and deformation to the complex and varied geological and tectonic environment of the Gulf of Mexico. (Figure 2-No5)

The way in which the events, interaction and analysis of the five geological and tectonic forces mentioned above developed can be observed in the Sequence of Figures 1,2,3,4,5,6,7,8, together with the graphs and stratigraphic columns referred to in Article 5 of this Series.

## 5.10 Considerations for the Nobel Prize in Science-Geosciences

According to the report **HISTORY OF OIL EXPLORATION IN MEXICO**, <https://www.facebook.com/groups/tampicoantiguo/posts/2373490346009997/> : The beginning of the global oil industry took place with the success of the Drake well, in Oil Creek, Pennsylvania, in the year 1859. (approximately 170 years ago).

And according to Google.com, the first mobile offshore drilling rig (MODU) to drill in the Gulf of Mexico was the Mr. Charlie in 1954, near Louisiana, USA, a global pioneer of offshore drilling. (Approximately 70 years ago).

In the important contributions of Dr. Josh Rosenfeld. 2002. He states:

Muchos geocientíficos y empresas han gastado energía y recursos para proveer los datos e interpretaciones que apoyan el entendimiento actual del Bloque de Yucatán.

The above indicates that despite having made important contributions to the knowledge of the Basin, by more than Ten Thousand (10.000) Geoscientists from around the world, in more than 100 years of History (Public-Private-Independent-Academic); uncertainties still persist about the Origin and Tectonostratigraphic Evolution of the Gulf of Mexico (Related as Giants in Articles 5 and 6 of this Series):

**This is a topic that we have happily resolved through the Advanced Tools of Complex Source Theory (SCT- Edinson Alvarez 2025), with important implications for the global oil, gas and mining production exploration cycle. (Figures 1,2,3,4,5,6,7,8,13,14,15).**

A question with nearly 500 years of history has been successfully answered, along with 24 other questions, most of them over 100 years old, through a series of articles 1 through 6. These articles respond to questions posed by the world's leading contemporary geoscientists. This valuable and important work, a significant contribution to the global geosciences, allows us to humbly put forward for consideration the nomination and awarding of the Nobel Prize in Science, Based on the discoveries made in this study...

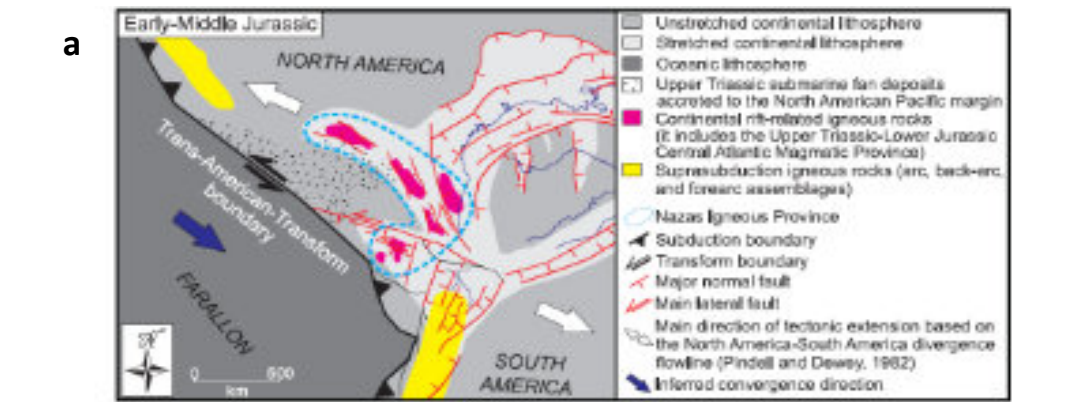


Fig. 13. (Colour online) Geotectonic reconstruction of the North America-South America divergent boundary during Early-Middle Jurassic time (~196-170 Ma, after Souchon et al. 2014; Bayona et al. 2020; Erlich & Pindell, 2022 and Pindell et al. 2021). The reconstruction shows the novel interpretation of the Nazas province as a magmatic province related to the continental rift between North and South America. In this new scenario, we propose that the Mexican segment of the North American margin was a transform boundary.

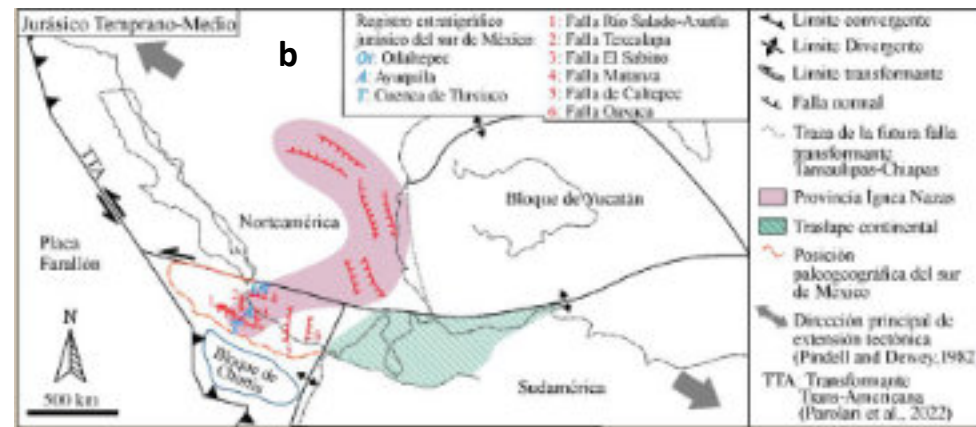


Figura 2. Reconstrucción paleogeográfica del margen este ecuatorial de Pangea durante el Jurásico Temprano-Medio, mostrando la posición paleogeográfica del sur de México en una posición más noroccidental y la localización de las fallas mayores que delimitaron las cuencas desarrolladas durante el desarrollo del rift de Pangea. Adaptado de Parolari et al. (2022) y Zepeda-Martínez et al. (2021).

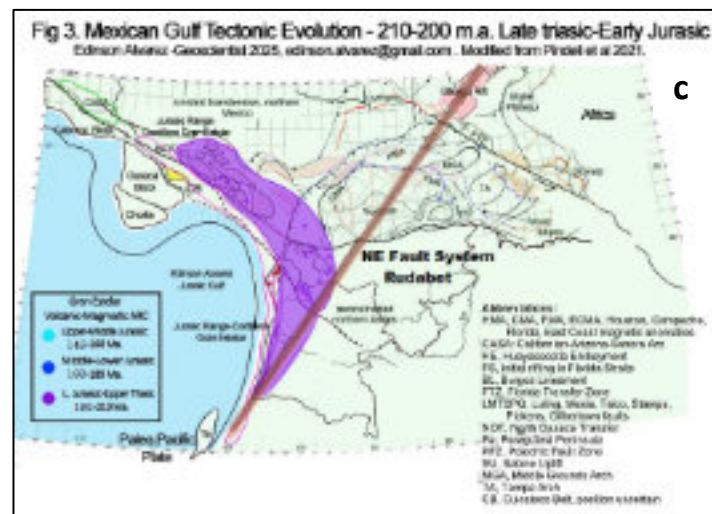


Figure 13. Comparison of the model presented in this work Edinson Alvarez 2025-26, with tie down structural, tectonic, geochronological, geochemical, stratigraphic, sedimentological, petrographic, paleontological, volcanological, among others, with respect to recent models published in a. Parolari M, Martini M. et al 2022. b. María Patricia Velasco de León 2024. c. Edinson Alvarez 2025-2026.

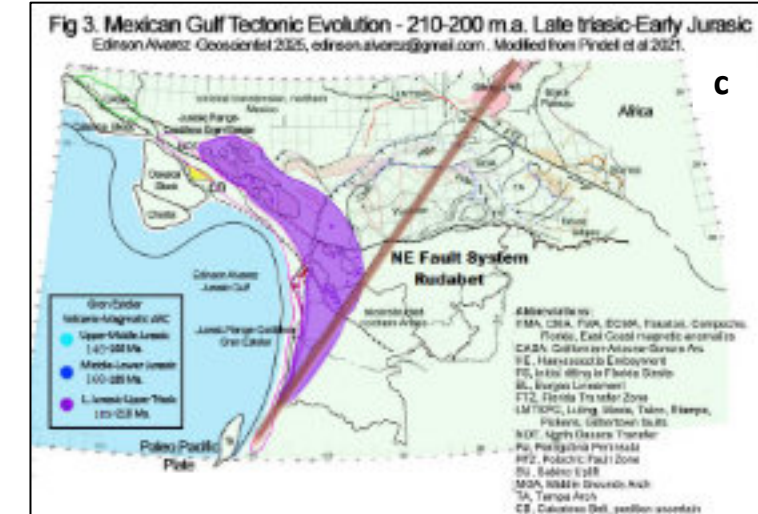
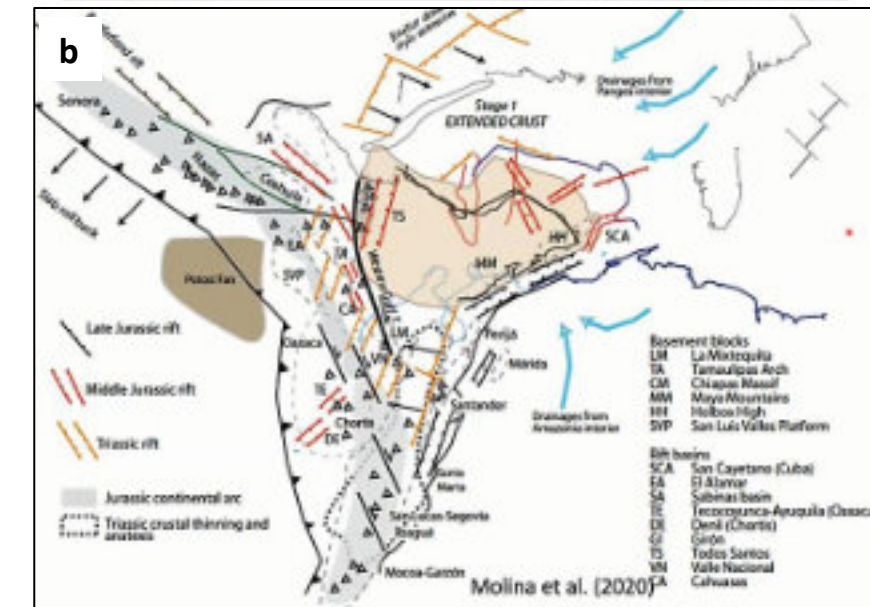
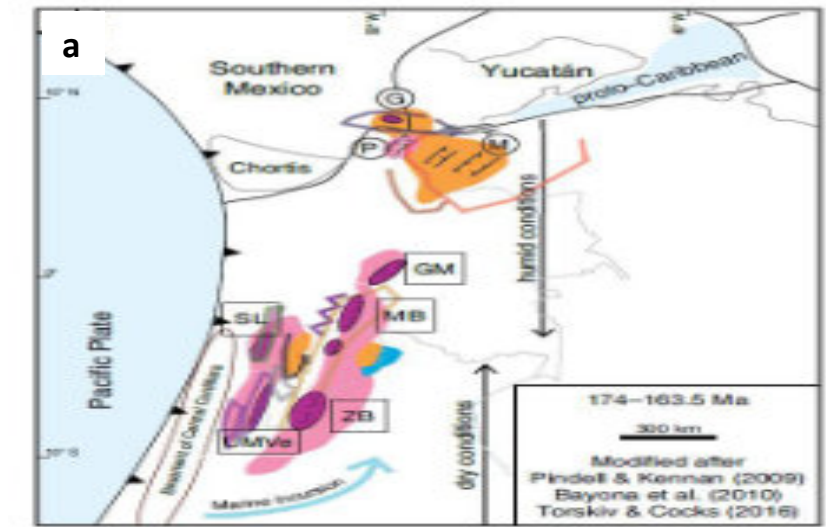
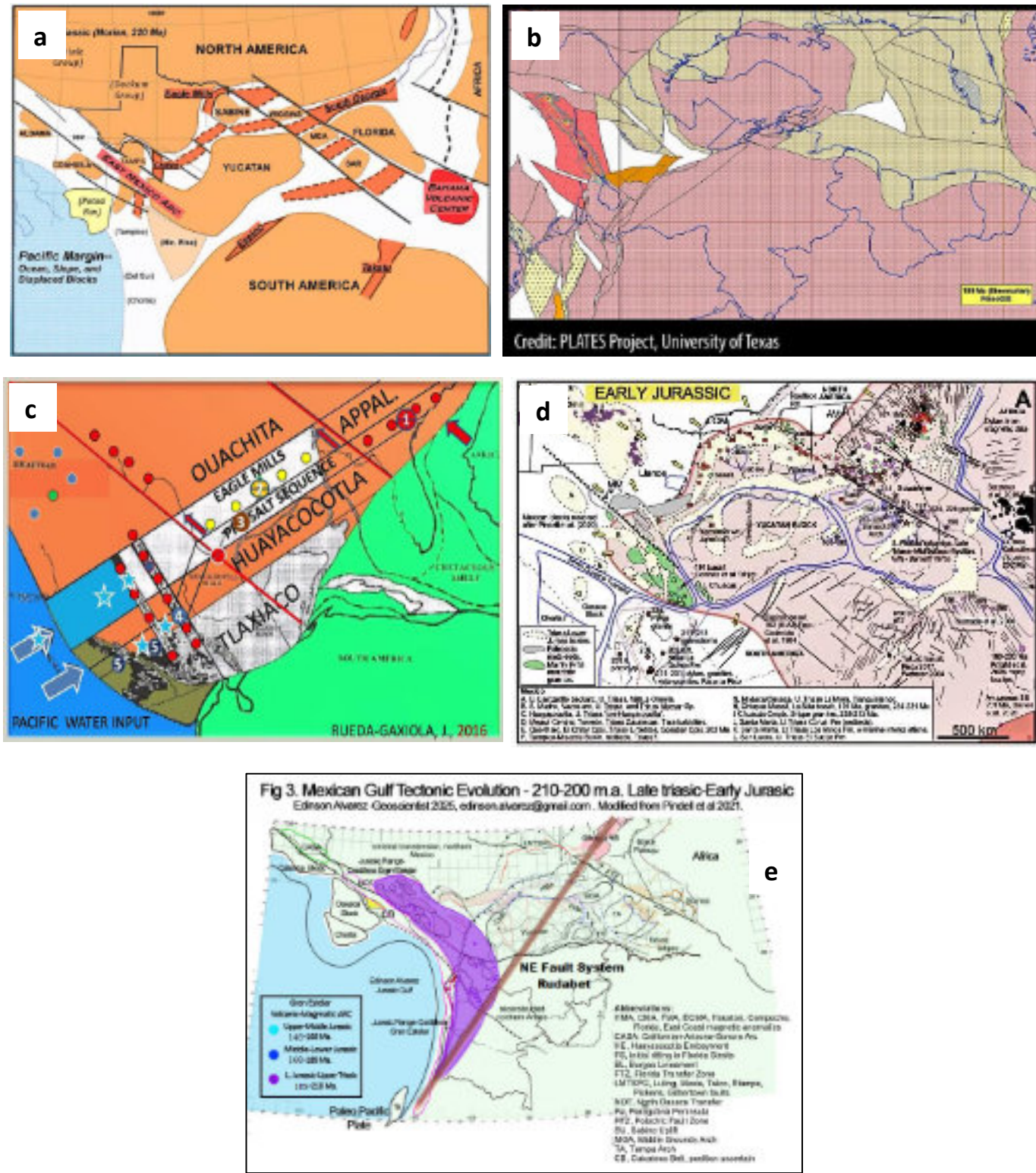


Figure 14. Comparison of the model presented in this work Edinson Alvarez 2025-26, with tie down structural, tectonic, geochronological, geochemical, stratigraphic, sedimentological, petrographic, paleontological, volcanological, among others, with respect to recent models published in a. Modified from Bayona et al 2019-20. b. Molina et al 2020, taken from Bayona 2021. c. Edinson Alvarez 2025-2026.



**Figure 15.** Comparison of the model presented in this work Edinson Alvarez 2025-26, with tie down structural, tectonic, geochronological, geochemical, stratigraphic, sedimentological, petrographic, paleontological, volcanological, among others, with respect to recent models published in a. Tom Ewing- 2016. b. Plates Project Texas University, taken from Robert J. Stern and Randy Keller 2018. c. Rueda-Gaxiola J. 2016-2019 d. Pindell and Heyn 2022 e. Edinson Alvarez 2025-2026, Upper Triassic-Lower Jurassic.

This methodology is also applicable to complex areas such as pre-salt belts, the Gulf of Mexico, Gulf of America, Brazilian coast, African coast, Mediterranean, the coasts of Alaska and Canada, the mountain ranges and foothills of the Rocky Mountains, Andes, Atlas Mountains, Himalayas, and the Arabian Peninsula, among others, as well as areas of low or minimal tectonic structural complexity. **It also helps increase production in complex reservoirs by confirming and refining the geological and geomechanical models of reservoirs that present this problem of double or even triple interpretations and models.**

Some of the tools of the SCT Complex Source Theory, such as the SCT EAST-P method, were proposed to Ecopetrol in April 2024, for a value comparable to the transactions of large technology companies. This value logically exceeded the company's economic and financial capacity; **therefore, we invite to @Pötus, Forbes List and giant Companies to participate in this development.**

**If your company faces a highly complex geoscientific problem with significant economic implications, Complex Source Theory (CST) and its tools are here to solve it.** For a more detailed analysis and solution to complex tectonic, structural, and stratigraphic problems, please consult with the author of this article.

Analysis of the technical support has deserved him recognition for his contributions to geoscientific knowledge of Colombia by important personalities and entities..(Maya journal of geosciences September edition 2025, pag. 154, Art-1/10 ), <https://revistamaya.com/wp-content/uploads/2025/08/Revista-Maya-Geociencias-Septiembre-2025.pdf>.

**Article-1(Páginas-150-154):** Alvarez Serrato Edinson Dario, 2025. Predictive Corridor Model O&G prospects, Lower Magdalena Valley and SSJ 2025. P 150-154. <https://revistamaya.com/wp-content/uploads/2025/08/Revista-Maya-Geociencias-Septiembre-2025.pdf>

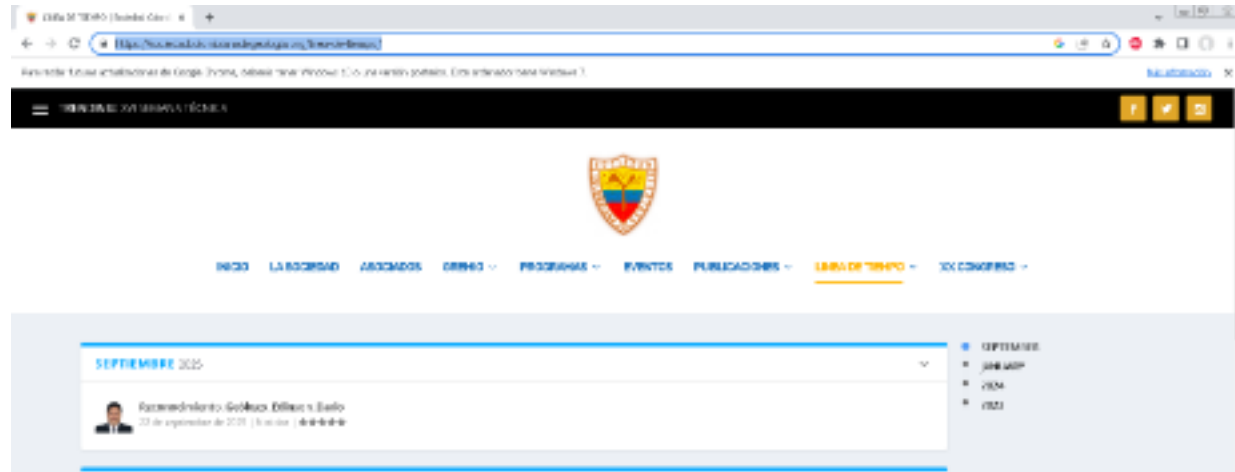
**Article -2(Páginas-37-47):** Alvarez Serrato Edinson Dario, 2025. Structural Seismic Interpretation of SSJ (2003-2025) Vs East-P Method Solution by Edinson Alvarez-2025. P-37-47. <https://revistamaya.com/wp-content/uploads/2025/09/Revista-Maya-Geociencias-EDICION-ESPECIAL-XXV-2025.pdf> <https://revistamaya.com/wp-content/uploads/2025/09/Revista-Maya-Geociencias-EDICION-ESPECIAL-XXV-2025.pdf>.

**Article -3(páginas-76-98):** Alvarez Serrato Edinson Dario, 2025. Regional Integration, complex seismic interpretation and Petroleum systems. of VIM- SSJ - SinuOFF, Guajira OFF. And Urabá.2025. P 79-98. : <https://revistamaya.com/wp-content/uploads/2025/10/Revista-Maya-Geociencias-EDICION-ESPECIAL-XXVI-2025.pdf> <https://revistamaya.com/wp-content/uploads/2025/10/Revista-Maya-Geociencias-EDICION-ESPECIAL-XXVI-2025.pdf>

**Article -4(páginas-169-180):** Alvarez Serrato Edinson Dario, 2025. Solution to Uncertainty Volcanic Arc Of The Subduction Zone, Over The Central Cordillera, Colombian Andes. 2025. P 169-180. <https://revistamaya.com/wp-content/uploads/2025/11/Revista-Maya-Geociencias-Diciembre-2025.pdf> <https://revistamaya.com/wp-content/uploads/2025/11/Revista-Maya-Geociencias-Diciembre-2025.pdf>

**Article -5(páginas-169-180):** Alvarez Serrato Edinson Dario, 2025. The third part of the Gulf of Mexico that belongs to Colombia. A Marvelous, Magical, And Cinematic Journey Through The Jurassic Period, Told By Edinson Alvarez.2025. Cordillera Oriental de Colombia. Importantes Contribuciones En Geociencias Prometen Revolucionar La Exploración O&G&M. No 5/10.Revista Maya Diciembre 2025. 39 p. <https://revistamaya.com/wp-content/uploads/2025/12/Revista-Maya-Geociencias-EDICION-ESPECIALXXVII-2025.pdf>

The prestigious **Colombian Geological Society (SCG)** has joined in disseminating the recognition and results of the research work through publication on its website. [https://sociedadcolombianadegeologia.org/reconocimiento\\_edinson\\_dario/](https://sociedadcolombianadegeologia.org/reconocimiento_edinson_dario/)



**Note1: The Colombian Geological Society (SCG) and the Colombian Association of Petroleum Geologists and Geophysicists (ACGGP)** are private organizations that fulfill a similar social function - public functions: To disseminate, publicize, and support everything related to knowledge of Geosciences and Earth Sciences.

We reject the institutional blockade and censorship applied to this research work by **Jaime Gonzalo Checa Jimenez, President of ACGGP, and Flover Rodriguez Portillo, Executive Director**, who have on three occasions denied the publication of both the recognition granted by prestigious entities for the research work in geosciences and the informative articles presenting the results of the work classified as being of national interest. **In addition to denying the recognition granted for contributions to the country's geosciences, they are arbitrarily attempting to impose a prior review of the informative articles, which is prohibited by law and international agreements and treaties, violating freedom of expression and freedom of information, fundamental and supreme values in a democracy. (Art 20 Constitución Nacional Colombia, Art 13 CADH- Convención Americana Derechos Humanos)**

**“Censorship is inherently discriminatory(...)” (Judgment T 539 of 1994).** Based on the premise, the application of censorship discriminates against the affected person, by the same way Furthermore, through their actions, **Mr. Jaime Gonzalo Checa Jimenez, President of the ACGGP, and Mr. Flover Rodriguez Portillo, Executive Director**, would be discriminating against the President of the United States of America, who is one of the many individuals and audience members to whom this informational message is directed. In addition, they are concealing information of national interest from the Colombian people by obstructing the free flow of information and public debate regarding the results of this geoscience research. **(Art 20 Constitución Nacional Colombia , Art 13 Convención Americana Derechos Humanos).**

**ACKNOWLEDGMENTS:**

Sincere thanks to **Drs. Claudio Bartolini, Josh Rosenfeld, and the entire team of editors, assistants, and members of the Maya Journal of Geosciences** for their support in publishing and disseminating the results of this research. And to all those who contributed to its development.

**REFERENCES**

- Alarcón Gómez, C. M., Gómez-Coronado, J. S., Lizarazo Pabón, J. A., Díaz Villamizar, J. S. & Patarroyo, G. D. 2019. Nuevo Reporte De Plantas Fósiles En La Formación Girón Sobre El Cañón Del Río Lebrija, Santander. Estratos-Uis-2019. 2p. Boletín No 375.
- Alberto Nuñez Tello. 1986. Petrogénesis Del Batolito De Ibaguè. Ingeominas. Geología Colombiana No. 15.1986. Pp.35-45. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6560058>
- Alarcón CM, Clavijo-Torres J, Mantilla-Figueroa LC, Rodríguez JG. 2020. Nueva propuesta de edades para el registro sedimentario de las formaciones Bocas y Jordán y su relación con el desarrollo de la actividad magmática del Grupo Plutónico de Santander (cordillera Oriental, Colombia). Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 44(173):1137-1151, octubre-diciembre de 2020. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1208>
- Alejandro Piraquive Bermudez 2017. Structural Framework, deformation and exhumation of the Santa Marta Schists: accretion and deformational history of a Caribbean Terrane at the north of the Sierra Nevada de Santa Marta. Tesis Doctoral Universidad Nacional de Colombia Facultad de Ciencias, Departamento de Geociencias Bogota, Colombia 2017. 394 p
- Andreína García Reyes 2018, Thesis Doctoral-Sorbonne University. Magnetic anomalies and plate tectonic history of the caribbean plate and Mexican Gulf. 218p.
- Andreína García-Reyes, Jérôme Dymont. 2021. Structure, age, and origin of the Caribbean Plate unraveled. Earth and Planetary Science Letters, 2021, 571, pp.117100. 10.1016/j.epsl.2021.117100 .hal-03452889 29 p.
- Andrés Sebastián Martin Ravelo. 2020. Mineralogía, Aspectos geoquímicos y petrogénesis de las esmeraldas en el modelo colombiano. Charla Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=15gZ7AVww84>
- ANH-UIS 2008. Evolución Térmica De La Subcuenca De La Baja Guajira. Contrato N° 56 De 2008. UIS-ANH INFORME FINAL 144 p.
- ANH-Universidad Nacional de Colombia 2020. Evaluación del potencial Exploratorio de las Unidades Cenozoicas del Valle Superior del Magdalena. 800 p. <https://experience.arcgis.com/experience/b4cebb9e9f8743e5b0d75264121d93bc/>
- ANH-UPTC 2020, Integración Geológica, Evaluación De Los Sistemas Petrolíferos Y Prospectividad De Las Cuencas Frontera De Colombia. Cuenca Cordillera Oriental. Sogamoso, Diciembre de 2020. 441p
- ANH-UPTC 2024. Atlas De Áreas De Interés Para La Exploración De H2 En El Norte De Colombia- 104 p.
- Aurora Zavala-Monsiváis1,\*, José Rafael Barboza-Gudiño2, Fernando Velasco-Tapia3, María Elena García-Arreola2. 2012. Sucesión volcánica Jurásica en el área de Charcas, San Luis Potosí: Contribución al entendimiento del Arco Nazas en el noreste de México. 28 p. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana Volumen 64, núm. 3, 2012, p. 277-293 <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2012v6>
- BAQUERO Marvin, VISCARRET Patxo; VALENCIA Víctor; TAZZO-RANGEL María Daniela; ANDARA José; URBANI Franco; SIFONTES Ramón; CENTENO José 2015. Petrografía, Geoquímica Y Geocronología U-Pb En Zircón De Rocas Granitoides Pertenecientes Al Domo De Mifafí Y La Culata, Estado Mérida, Venezuela (Petrography, geochemistry and geochronology U-Pb zircon of granitoid rocks from Domo de Mifafí and La Culata, Mérida State, Venezuela). VI Simposio Venezolano de Geociencias de Rocas Ígneas y Metamórficas 4p.

- Bartolini, C., H. Lang, and T. Spell, 2003, Geochronology, geochemistry, and tectonic setting of the Mesozoic Nazas arc in north-central Mexico, and its continuation to northern South America, in C. Bartolini, R. T. Buffler, and J. Blickwede, eds., The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon habitats, basin formation, and plate tectonics: AAPG Memoir 79, p. 427– 461.
- Bayona, G., Rapalini, A. and Costanzo-Alvarez, V. 2006. Paleomagnetism in Mesozoic rocks of the northern Andes and its implications in Mesozoic tectonics of northwestern South America. *Earth, Planets and Space*, 58, 1255–1272, <https://doi.org/10.1186/BF03352621>
- Bayona, G., Jiménez, G., Silva, C., Cardona, A., Montes, C., Roncancio, J. and Cordani, U. 2010. Paleomagnetic data and K–Ar ages from Mesozoic units of the Santa Marta massif: a preliminary interpretation for block rotation and translations. *Journal of South American Earth Sciences*, 29, 817–831, <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2009.10.005>
- Bayona, G., Bustamante, C., Nova, G. and Salazar–Franco, A.M. 2020. Jurassic evolution of the northwestern corner of Gondwana: Present knowledge and future challenges in studying Colombian Jurassic rocks. *Publicaciones Geológicas Especiales*, 36, <https://doi.org/10.32685/pub.esp.36.2019.05>
- Berlaine Ortega-Flores, Luigi A. Solari & Felipe De Jesús Escalona-Alcázar. 2015. The Mesozoic successions of western Sierra de Zcatecas, Central Mexico: provenance and tectonic implications. 22 p. *Geol. Mag.* 153 (4), 2016, pp. 696–717. c\_ Cambridge University Press 2015 696 doi:10.1017/S0016756815000977.
- Blanco-Quintero, I.F., García-Casco, A. et al. 2014. Late Jurassic terrane collision in the northwestern margin of Gondwana (Cajamarca Complex, eastern flank of the Central Cordillera, Colombia). *International Geology Review*, 56, 1852–1872, <https://doi.org/10.1080/00206814.2014.963710>
- Blickwede, J.F. 2001. The Nazas Formation: A detailed look at the early Mesozoic convergent margin along the western rim of the Gulf of Mexico Basin. *AAPG Memoirs*, 75, 317–342.
- Boschman, L.M., van Hinsbergen, D.J., Torsvik, T.H., Spakman, W. and Pindell, J.L. 2014. Kinematic reconstruction of the Caribbean region since the Early Jurassic. *Earth-Science Reviews*, 138, 102–136, <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.08.007>
- Camilo Londoño Bustamante 2020. Universidad Eafit. El registro Jurásico de la Cordillera Central: certezas, problemas y retos. Cuarentena con Geociencias. <https://www.youtube.com/watch?v=rocXysx7PRA>
- Carlos A. Vargas and Paul Mann 2013. Tearing and Breaking Off of Subducted Slabs as the Result of Collision of the Panama Arc-Indenter with Northwestern South America. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 103, No. 3, pp. 2025–2046, June 2013, 22p. <https://doi.org/10.1785/0120120328>
- Carlos Alberto Vargas, Carlos A. Zuluaga, Mathias Bernet, and Sergio Amaya. 2025. Surficial serpentinite emplacements and their potential links with the mantle wedge in NW South America. 12 p. <https://www.lyellcollection.org/doi/full/10.1144/SP558-2023-120>
- Carlos A. Zuluaga and Julián A. López. 2019. Ordovician Orogeny and Jurassic Low-Lying Orogen in the Santander Massif, Northern Andes (Colombia). Chapter 4.
- Cediel, F., R. P. Shaw, and C. Cáceres, 2003, Tectonic assembly of the Northern Andean Block, in C. Bartolini, R. T. Buffler, and J. Blickwede, eds., The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon habitats, basin formation, and plate tectonics: AAPG Memoir 79, p. 815– 848. 34 p.
- Clasificación de Rocas Magmáticas. <https://post.geoxnet.com/rocas-magmaticas-clasificacion-de-los-magmas/>
- Definición de Batolito. <https://petroigne.wordpress.com/formas-de-yacimiento/formas-plutonicas-y-filonianas/plutones/batolitos/>
- C.J. Busby<sup>1</sup> and E. Centeno-García<sup>2</sup>. 2022. The “Nazas Arc” is a continental rift province: Implications for Mesozoic tectonic reconstructions of the southwest Cordillera, U.S. and Mexico. 1 Department of Earth and Planetary Sciences, University of California, Davis, California 95616, USA 2 Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Avenida Universidad 3000, Ciudad Universitaria, México D.F. 04510, México 23p 2022 the geological society of america.
- Coombs, H.E., Kerr, A.C., Pindell, J., Buchs, D., Weber, B., and Solari, L., 2020, Petrogenesis of the crystalline basement along the western Gulf of Mexico: Postcollisional magmatism during the formation of Pangea, in Martens, U., and Molina Garza, R.S., eds., Southern and Central Mexico: Basement Framework, Tectonic Evolution, and Provenance of Mesozoic–Cenozoic Basins: Geological Society of America Special Paper 546, p. 1–24, [https://doi.org/10.1130/2020.2546\(02\)](https://doi.org/10.1130/2020.2546(02)).
- Dany Yuleimar Mejía Vélez. 2019. Metamorfismo Jurásico En Los Andes Colombianos: ¿Respuesta Del Arco A La Transición De Un Régimen De Subducción Extensional A Uno Transpresivo? . Universidad Nacional de Colombia Facultad de Minas, Departamento de Materiales y Minerales, Área Curricular de Recursos Minerales Medellín, Colombia 2019. 85 p. Tesis Maestría.
- Diego Osorio-Afanador, Francisco Velandia. 2021. Late Jurassic syn-extensional sedimentary deposition and Cenozoic basin inversion as recorded in The Girón Formation, northern Andes of Colombia 30p. *Andean Geology* 48 (2):237-266. May, 2021 doi: 10.5027/andgeoV48n2-3264
- D. F. Jaramillo-Minorta, et al, "Modelo sedimentario-deposicional de la formación Girón en la sección del km 42 vía Girón-Zapatoca, Santander, Colombia" *Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo*, vol. 23 (2), pp. 37-49, julio. 2023. DOI: <https://doi.org/10.19053/1900771X.v23.n2.2023.16147> 13p.
- D. Tamara, E. Rojas, L. Quintero, F. Lascarro, D. Manco. Aspectos tectónicos en la génesis de la Formación La Quinta y su relación con los depósitos minerales de cobre en la serranía del Perijá, Colombia. *Tecnura*, 28(79), 123-139. <https://doi.org/10.14483/22487638.2082417> p.
- Elena Centeno García 2023. GeoSeminario "Evolución Tectónica de México" - Geolatinas.org. Conferencia Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=v4LcthCmkBE>.
- Elisa Fitz Díaz. 2020- Geología de México- Cátedra selecta-UNAM Conferencia Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=HDI2D-6uXd8>
- Fabio Cediel, Robert Peter Shaw 2019. Geology and Tectonics of Northwestern South America The Pacific-Caribbean-Andean Junction. 1010 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-76132-9> .
- Gómez, J., Montes, N.E. & Marín, E., compiladores. 2023. Mapa Geológico de Colombia 2023. Escala 1:1 500 000. Servicio Geológico Colombiano. Bogotá. [https://www2.sgc.gov.co/MGC/Paginas/mgc\\_1\\_5M2023.aspx](https://www2.sgc.gov.co/MGC/Paginas/mgc_1_5M2023.aspx)
- Guerra Roel, R., Pastor Galán, D., Chavez-Cabello, G., Ramirez-Pena, C. F., ArandaGomez, J. J., Patino Méndez, G., et al. (2024). The Sierra Madre Oriental Orocline: Paleomagnetism of the Nazas province in NE Mexico. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 129, e2024JB029239. <https://doi.org/10.1029/2024JB029239> 24p.

- Hildebrando Leal-Mejía, Robert P. Shaw, and Joan Carles Melgarejo i Draper. 2019. Spatial-Temporal Migration of Granitoid Magmatism and the Phanerozoic Tectono- Magmatic Evolution of the Colombian Andes. Chapter 5.
- Historia De La Exploración Petrolera En Mexico-2025.  
<https://www.facebook.com/groups/tampicoantiguo/posts/2373490346009997/>
- Horton, B.K., Parra, M. & Mora, A. 2020. Construction of the Eastern Cordillera of Colombia: Insights from the sedimentary record. In: Gómez, J. & Mateus-Zabala, D. (editors), The Geology of Colombia, Volume 3 Paleogene – Neogene. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 37, p. 67–88. Bogotá. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.37.2019.03>
- Ian Davison, James Pindell & Johnny Hull 2018. The Basins, Orogens and Evolution of the southern Gulf of Mexico and northern Caribbean. 52 p. Published by The Geological Society of London.
- Instituto Nacional de Investigaciones Geologico-Mineras 1970. Economic Geology Of The Zipaquirá Quadrangle And. Adjoining Area, 141 p.
- Ingeominas. 1985. compilación-y-diagnóstico-de-la-información-geoquímica-histórica-en-la-parte-central-de-la-cordillera-oriental-36-638.
- Irina Filina , James Austin, Tony Doré , Elizabeth Johnson , Daniel Minguez , Ian Norton , John Snedden , Robert J. Stern. 2022. Opening of the Gulf of Mexico: What we know, what questions remain, and how we might answer them. 30 p. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2021.229150>
- Irina Filina and Erin Beutel. 2022. Geological and Geophysical Constraints Guide New Tectonic Reconstruction of the Gulf of Mexico. University of Nebraska – Lincoln College of Charleston. November 22, 2022. 36p.
- James Lawrence Pindell. 1981. Permo-Triassic reconstruction of Western Pangea and the evolution of the Gulf of Mexico-Caribbean región. University at Albany, State University of New York. 133p Master thesis.
- James L. Pindell 1985. Alleghenian Reconstruction And Subsequent Evolution Of The Gulf Of Mexico, Bahamas, And P Roto-Cari B Bean James L. Pindell. Exploration Research Division, Pennzoil Company, Houston, Texas. 39p 210ma Tectonics, Vol. 4, No. 1, Pages 1-39, January 1985.
- James Pindell and Lorcan Kennan 2001. Kinematic Evolution of the Gulf of Mexico and Caribbean. Tectonic Analysis, Ltd., Dept. Earth Science, Rice University, Houston, Texas, USA. 51 p.
- J. Pindell L. Kennan K.P. Stanek W.V. Maresch And G. Draper 2009. Foundations of Gulf of Mexico and Caribbean evolution: eight controversies resolved. Tectonic Analysis Ltd. Department of Earth Science, Rice University 39 p.
- James Pindell & Lorcan Kennan 2009. Tectonic evolution of the Gulf of Mexico, Caribbean and northern South America in the mantle reference frame: an update. In: James, K., Lorente, M. A. & Pindell, J. (eds) The geology and evolution of the region between North and South America, Geological Society of London, Special Publication.
- James Pindell 2013. Origin of the Caribbean? Look Toward the Pacific. 7p. Explorer Newsletter.
- James Pindell, Diego Villagómez, Roberto Molina-Garza, Rod Graham and Bodo Weber. 2020. A revised synthesis of the rift and drift history of the Gulf of Mexico and surrounding regions in the light of improved age dating of the Middle Jurassic salt. 2020. Geological Society, London, Special Publications, 504, <https://doi.org/10.1144/SP504-2020-43>
- James Pindell , Diego Villagómez , Roberto Molina Garza , Alejandro Beltrán , Daniel F. Stockli , Mark Wildman . 2022 Late Cretaceous–Miocene depositional evolution of Chiapas, Mexico: A foreland controlled by collision of Greater Antilles arc and the subsequent relative migration of the Chortís Block. 29 p.

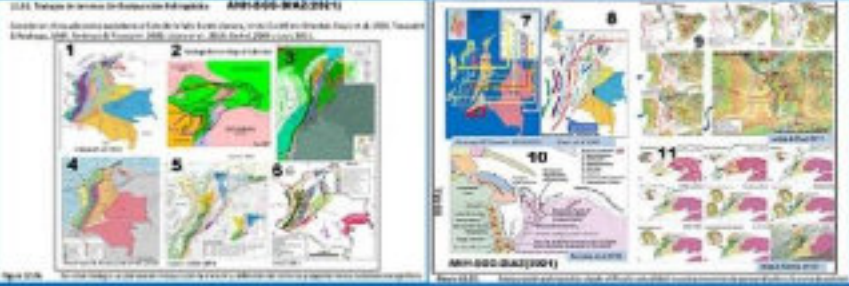
- James Pindell 2021. Cátedra Selecta – Tectonic evolution Mexican Gulf-Conferencia Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=8CAhxGbnL9w>
- James Pindell 2022. 52.2 James Pindell - Dynamo-thermal subsidence and sag–salt section deposition-Conferencia Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=sM5ykC-p9dU>.
- Jaime Rueda Glaxiola 2019. Geodynamic Evoluton Of The Gulf Of Mexico. Youtube Conference. <https://www.youtube.com/watch?v=mb11VZO46Lw>
- Jose Rafael Barboza-Gudino ., Maria Teresa Orozco-Esquivel , Martin Gómez-Anguiano c, Aurora Zavala-Monsivais. 2008. The Early Mesozoic volcanic arc of western North America in northeastern Mexico. 15p. 2008 Journal of South American Earth Sciences 25 (2008) 49–63.
- Joshua H. Rosenfeld. 2002. El potencial económico del Bloque de Yucatán en México, Guatemala y Bélize. Boletín De La Sociedad Geológica Mexicana, Tomo Lv, Núm. 1, 2002, Veritas Exploration Services. P. 30-37. 8p.
- Juan Camilo Ruiz Amaya. 2021. Modelamiento estructural entre el Páramo de Sumapaz y la Sabana de Bogotá. Charla youtube ACGGP. 2021.
- Juan Pablo Lovecchio 2020. Rifting: Cómo la Ruptura de Continentes Puede Crear Oportunidades de Exploración. AAPG Latin America & Caribbean Region. Conferencia Youtube <https://www.youtube.com/watch?v=Pp7bUFGDaLM>
- López-Isaza, J.A. & Zuluaga, C.A. 2020. Late Triassic to Jurassic magmatism in Colombia: Implications for the evolution of the northern margin of South America. In: Gómez, J. & Pinilla-Pachon, A.O. (editors), The Geology of Colombia, Volume 2 Mesozoic. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 36, p. 77–116. Bogotá. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.36.2019.03> 40 p.
- María Patricia Velasco de León 2024. Paleobiota y Geología del Jurásico del Sur de México Universidad Nacional Autónoma de México. 292 p.
- M. B. I. Weber, A. Cardona, F. Paniagua, U. Cordani, L. Sepulveda & R. Wilson. 2009 The Cabo de la Vela Mafic–Ultramafic Complex, Northeastern Colombian Caribbean region: a record of Multistage evolution of a late Cretaceous intra-oceanic arc. 20 p- From: JAMES, K. H., LORENTE, M. A. & PINDELL, J. L. (eds) The Origin and Evolution of the Caribbean Plate. Geological Society, London, Special Publications, 328, 547–566. DOI: 10.1144/SP328.22 0305-8719/09/\$15.00 # The Geological Society of London 2009.
- Maria Luisa Monsalve-Bustamante\*, Harold Avila-Vallejo, Ivan Darío Ortiz-Martin and Susana Osorio-Ocampo. 2022. Characterization and space–time distribution of Plio-Quaternary volcanism NE of Caldas, Colombia. 23p. [https://www.researchgate.net/publication/389622981\\_Characterization\\_and\\_space-time\\_distribution\\_of\\_Plio-Quaternary\\_volcanism\\_in\\_the\\_Northeast\\_of\\_Caldas\\_Colombia](https://www.researchgate.net/publication/389622981_Characterization_and_space-time_distribution_of_Plio-Quaternary_volcanism_in_the_Northeast_of_Caldas_Colombia)
- Ministerio de Minas e Hidrocarburos de Venezuela 1968. Edades Isotópica de Rocas Venezolanas. Dirección de Geología. 17 p.
- Martin Reyes<sup>1,2</sup> · Jonas Kley<sup>1</sup> · Andrés Mora<sup>3</sup> · István Dunkl<sup>4</sup> · Juan Carvajal-Torres<sup>2,5</sup> 2024. Age and tectonic setting of Mesozoic extension constrained by the first volcanic events in the Eastern Cordillera and Middle Magdalena Valley, Colombia. Received: 6 June 2021 / Accepted: 20 June 2024 © The Author(s) 2024 International Journal of Earth Sciences <https://doi.org/10.1007/s00531-024-02441-7> 27 p.
- Mildred Del Carmen Zepeda Martínez - Tesis Doctoral UNAM. 2021. Reconstrucción de la Evolución tectono sedimentaria del jurásico temprano-medio de la cuenca Tlaxiaco, Sur de México. Implicaciones en la Historia de Atenuación continental del margen occidental de Pangea. 213 p.

- Moreno-Sanchez, M., and A. Pardo-Trujillo, 2003, Stratigraphical and sedimentological constraints on western Colombia: Implications on the evolution of the Caribbean plate, in C. Bartolini, R. T. Buffler, and J. Blickwede, eds., The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon habitats, basin formation, and plate tectonics: AAPG Memoir 79, p. 891– 924. 34 p.
- Oswaldo Ordoñez C. 2020. ORO EN COLOMBIA: HISTORIA, PRESENTE Y POTENCIAL. Charla Youtube, [https://www.youtube.com/watch?v=R0VCM1KU-\\_0](https://www.youtube.com/watch?v=R0VCM1KU-_0)
- Parolari M, Martini M, Gómez-Tuena A, Ortega-Gutiérrez F, Errázuriz-Henao C, and Cavazos-Tovar JG (2022) The petrogenesis of Early–Middle Jurassic magmatism in southern and central Mexico and its role during the break-up of Western Pangaea. Geological Magazine 159: 873–892. <https://doi.org/10.1017/S0016756822000061> 20p.
- Patarroyo, P. 2020. Barremian deposits of Colombia: A special emphasis on marine successions. In: Gómez, J. & Pinilla–Pachón, A.O. (editors), The Geology of Colombia, Volume 2 Mesozoic. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 36, p. 403–439. Bogotá. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.36.2019.12> 38 p.
- Pemex 2010. Provincias geológicas de México. Pemex Exploración y Producción, Subdirección Técnica de Exploración. 18p.
- Pindell, James Lawrence (1985) Plate-tectonic evolution of the Gulf of Mexico and Caribbean region, 302 p. Durham Doctoral theses, Durham University. Available at Durham E-Theses Online: <http://etheses.dur.ac.uk/7042/>
- Pindell, J., Kennan, L., Maresch, W.V., Stanek, K.-P., Draper, G., and Higgs, R., 2005, Plate-kinematics and crustal dynamics of circum-Caribbean arc-continent interactions: Tectonic controls on basin development in Proto-Caribbean margins, in Avé Lallemant, H.G., and Sisson, V.B. eds., Caribbean–South American plate interactions, Venezuela: Geological Society of America Special Paper 394, p. 7–52, doi: 10.1130/2005.2394(01). 46 p.
- Rogelio Hernández-Vergara, Elisa Fitz-Díaz, Gilles Brocard and Dante Jaime Morán-Zenteno. 2020. Illite 40Ar–39Ar dating of Eocene deformation in the Q1 Chiapas Fold and Thrust Belt, southern Mexico. DOI: 10.1144/SP504-2020-75. 30 p.
- Rodríguez-García, G.; Zapata, J.P.; Correa-Martínez, A.M.; Ramírez, D.A.; Obando, G. (2020). Aportes al conocimiento del plutonismo del Arco Mocoa-Santa Marta durante el Jurásico Temprano-Medio, en la margen noroccidental de los Andes, Colombia. Boletín de Geología, 42(3), 15-50. <https://doi.org/10.18273/revbol.v42n3-2020001> 36 p.
- Rodríguez García, G., Correa Martínez, A. M., Zapata, J. P., Ramírez, D. A., & Sábrica, C. A. (2022). Evolution of arc magmatic cycles from the Carboniferous to the Early Cretaceous in the western paleomargin of Gondwana, north of the Andes. Boletín Geológico, 49(2). <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bol.geol.49.2.2022.663> 29 p.
- Rodríguez–García, G., Correa–Martínez, A.M., Zapata–García, G., Arango–Mejía, M.I., Obando–Erazo, G., Zapata–Villada, J.P. & Bermúdez, J.G. 2020. Diverse Jurassic magmatic arcs of the Colombian Andes: Constraints from petrography, geochronology, and geochemistry. In: Gómez, J. & Pinilla–Pachón, A.O. (editors), The Geology of Colombia, Volume 2 Mesozoic. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 36, 54 p. Bogotá. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.36.2019.04> 54p.

- Restrepo, J.J. & Toussaint, J.F. 2020. Tectonostratigraphic terranes in Colombia: An update. First part: Continental terranes. In: Gómez, J. & Mateus–Zabala, D. (editors), The Geology of Colombia, Volume 1 Proterozoic – Paleozoic. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 35, p. 37–63. Bogotá. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.35.2019.03> 28p.
- Robert J. Stern and Randy Keller 2018. New Strategies For Studying The Crust, Lithosphere, And Tectonics Of The Gulf Of Mexico Region. The University of Texas at Dallas The University of Oklahoma. Youtube Conference <https://www.youtube.com/watch?v=tMbCGOWUMcl>
- Sanchez, Javier and Paul Mann, 2015, Integrated structural and basinal analysis of the Cesar-Rancheria Basin, Colombia: Implications for it's tectonic history and petroleum systems, in C. Bartolini and P. Mann, eds., Petroleum geology and potential of the Colombian Caribbean Margin: AAPG Memoir 108, p. 431–470.
- SGM 2014. Formación Nazas. 4p. Ficha de Unidad litoestratigráfica-Formación.
- Sonia Güiza González, Geoquímica Sénior. (2020-21). Alcance de la geoquímica en la Cordillera Oriental para el potencial de metales estratégicos. DOI: 10.13140/RG.2.2.34907.69927.50 p.
- Spikings, R. & Paul, A. 2019. The Permian – Triassic history of magmatic rocks of the northern Andes (Colombia and Ecuador): Supercontinent assembly and disassembly. In: Gómez, J. & Pinilla–Pachón, A.O. (editors), The Geology of Colombia, Volume 2 Mesozoic. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 36, p. 1–43. Bogotá. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.36.2019.01> 44 p.
- Spikings, R.; Van der Lelij, R. The Geochemical and Isotopic Record of Wilson Cycles in Northwestern South America: From the Iapetus to the Caribbean. Geosciences 2022, 12, 5. <https://doi.org/10.3390/geosciences12010005> 32 p.
- Timoleón Garzón 2021. Potencial mineral y algunos proyectos mineros colombianos. Charla Youtube: <https://www.youtube.com/watch?v=0-5meQFa3As>
- Tom Ewing- 2016. Texas Geologic History Quick Overview. Conference Youtube <https://www.youtube.com/watch?v=A1zGgOktFQ8&>
- Toussaint, J.F. & Restrepo, J.J. 2020. Tectonostratigraphic terranes in Colombia: An update. Second part: Oceanic terranes. In: Gómez, J. & Pinilla–Pachón, A.O. (editors), The Geology of Colombia, Volume 2 Mesozoic. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 36, p. 237–260. Bogotá. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.36.2019.07> 24p.
- Vargas, C.A. 2020. Subduction geometries in northwestern South America. In: Gómez, J. & Pinilla–Pachón, A.O. (editors), The Geology of Colombia, Volume 4 Quaternary. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 38, p. 397–422. Bogotá. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.38.2019.11>
- Victor Ramos 2021. Nuevos paradigmas de la Tectónica Andina. Charla Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=9IfGdXKlQY>
- Victor Ramos 2022. La tectónica mesozoica en los Andes Colombianos. Charla Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=VimLTqmB7y4>
- Villagómez, D., Steffensen, C., Pindell, J., Molina-Garza, R.S., Gray, G., Graham, R., O'Sullivan, P., Stockli, D., Spikings, R. 2006. Tectono-sedimentary evolution of Southern Mexico. Implications for Cretaceous and younger source-to-sink systems in the Mexican foreland basins and the Gulf of Mexico. 64 p.

**God's grace allows us to solve mystery that has lasted more than 60 - 90 years.**

**11 proposed models, fail to answer all the questions that still exist.**



**Complex Source Theory** will generate a revolution, a radical transformation of the mining and energy industry, giving different solutions for increase O&G&M discoveries, reserves and production, in complex and normal areas.

Contact: [edinson.alvarez@gmail.com](mailto:edinson.alvarez@gmail.com)  
O&G and Mining Geoscientist Exploration Specialist

I invite @RealDonaldTrump to mediate with the big companies and VIP.

- \* New concepts
- \* Interdisciplinary teams
- \* New Technologies
- \* New methodologies
- \* New science
- \* New Results



[edinson.alvarez@gmail.com](mailto:edinson.alvarez@gmail.com)

Exploration Geologist Specialist - Geophysicist, expert in O-&G-Mining integrated studies (Colombia, Perú and México), Giving solutions to geoscientific problems, which have been in uncertainty for more than 5 decades. With important + economic implications.

The God's grace guide us to develop the "Complex Source Theory", a new mechanism that allow us increasing traditional O&G&M discoveries, production, reserves, as new energies and CCUS.

Geological mapping, surveys design, acquisition, processor PSTM (Conv-3C-4C-TZ-OBC), geomodeller, seismic interpreter and reservoir characterization (Conventional-and-Unconventional Reservoirs). Stratigraphic sequence, seismic attributes, AVO analysis, fluids substitution, seismic inversion, risk and uncertainty, leads and prospects, reserves.

Discovery of New prospective corridors and O&G prospects, in Foothills, Llanos, Putumayo, VIM, VMM, VSM, COR, CR, CAT, GuajiraOff-Guajira, SSJFB, Sinú-Sinu Off, Cayos basin, Colombia basin.

# Foro de discusión Discussion Forum

A sugerencia de uno de nuestros lectores, estaremos incluyendo las opiniones y discusiones de nuestros lectores en relación a las Notas Geológicas publicadas, lo que permitirá la participación activa de los interesados. En definitiva, este foro de discusión será de gran valor para mantener el interés en una gran variedad de temas geológicos, y creará un ambiente de colaboración cordial entre nuestras comunidades de Geociencias.

Por favor envíen sus observaciones, comentarios y sugerencias a cualquiera de los Editores de la Revista Maya de Geociencias.

At the suggestion of one of our readers, beginning with this August issue we will be including opinions and discussions from our readers relating to the published geological notes. This will permit active participation by interested parties. This discussion forum will certainly have great value for maintaining interest in a wide variety of geological themes, and will create a cordial, collaborative atmosphere among our geoscience community.

Please send your observations, comments and suggestions to any of the Editors of the Revista Maya de Geociencias.

Como parte de las actividades de difusión de nuestra revista de geociencias, Tenemos una relación de buena fe y amistad con las Escuelas, sociedades y asociaciones geológicas en otros países del mundo.

Instituto Nacional de Geoquímica (México). <https://www.inageq.com/>



Sociedad Venezolana de Historia de las Geociencias.  
[SVHGc@yahoo.com](mailto:SVHGc@yahoo.com)



Universidad Tecnológica de la Habana, - <https://cujae.edu.cu/>

Escuela de Geofísica: <https://t.me/ConoceGeofisicaCujae.edu.cu/>



Geología Médica

<http://www.medgeomx.com/>



Sociedad Geológica de España

<https://sociedadgeologica.org/>



Sociedad Cubana de Geología

<http://www.scg.cu/>



GeoLatinas

<https://geolatinas.org/>



Sociedad Dominicana de Geología

<http://sodogeo.org/>



Universidad Tecnológica del Cibao Oriental, República Dominicana

<https://uteco.edu.do/>



<http://cbth.uh.edu/>



Pieza de Mayapán, Yucatán. INAH. MUSEO REGIONAL DE ANTROPOLOGÍA



¿QUIERES COLABORAR CON NOSOTROS?

ENVÍANOS UN CORREO A:

[luis.valencia.11@outlook.com](mailto:luis.valencia.11@outlook.com); [bernardo.garcia@ingenieria.unam.edu](mailto:bernardo.garcia@ingenieria.unam.edu)