

La recompensa que yace bajo la sal

Las actividades de exploración y producción en las áreas de aguas profundas y ultraprofundas del norte del Golfo de México, mostraron el camino que condujo hacia la estructura subsalina descubierta recientemente. A su vez, las lecciones aprendidas a partir de esta estructura abren el camino a la exploración subsalina en otras cuencas del mundo.

John R. Dribus

Nueva Orleans, Luisiana, EUA

Martin P.A. Jackson

*Oficina de Geología Económica
Universidad de Texas en Austin
Austin, Texas, EUA*

Jerry Kapoor

Martiris F. Smith
Houston, Texas

Por su colaboración en la preparación de este artículo, se agradece a Joelle Fay y Mark Riding, Gattwick, Inglaterra; y a Chris García, Ciudad de México, México.

Q-Marine es una marca de Schlumberger.

1. Close F, McCavitt RD y Smith B: "Deepwater Gulf of Mexico Development Challenges Overview," artículo SPE 113011, presentado en la Conferencia y Exhibición Técnica de África Septentrional de la SPE, Marrakech, Marruecos, 12 al 14 de marzo de 2008.
2. El concepto de aguas profundas evolucionó considerablemente a través de los años. El Servicio de Administración de Minerales (MMS) del Departamento del Interior de EUA definió originalmente como aguas profundas aquellas en que el lecho marino se encuentra a 200 m [656 pies] de profundidad. Esta marca fue eclipsada posteriormente por las tendencias de perforación de la industria, y ahora el estándar de aguas profundas se ha fijado en 305 m [1,000 pies]. El MMS ha designado a las profundidades de más de 1,524 m [5,000 pies] como aguas ultraprofundas. En el Golfo de México, las aguas más profundas corresponden a la Fosa de Sigsbee, cuyas profundidades estimadas oscilan entre 3,750 m [12,303 pies] y 4,384 m [14,383 pies].



Los éxitos logrados en las áreas prospectivas de aguas profundas y ultraprofundas están generando un resurgimiento de la exploración en el Golfo de México. Los anuncios de descubrimientos significativos o de logros sin precedentes han despertado el interés en las actividades de los operadores de aguas profundas, como lo demuestra la competencia licitatoria manifestada en las ventas recientes de concesiones marinas. Las operaciones de perforación exploratoria confirmaron además la presencia de arenas de calidad yacimiento, que se encuentran mucho más lejos de la costa de lo previsto. El descubrimiento de hidrocarburos en muchas de estas arenas está alimentando la especulación en torno al potencial tentador que podría yacer por debajo de las aguas profundas del Golfo.

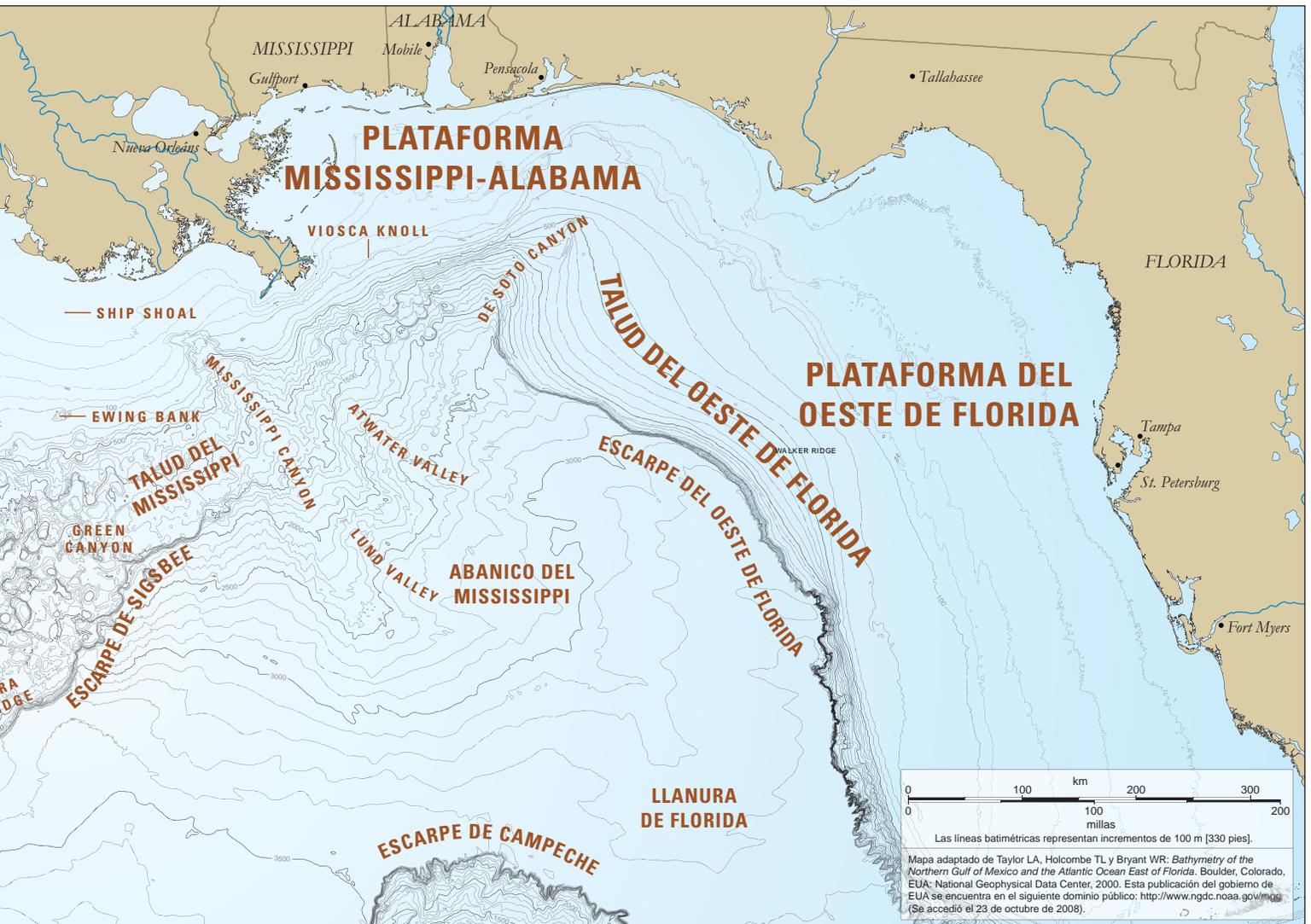
La especulación abunda. Los operadores de áreas marinas protegen diligentemente los secretos de las profundidades, conseguidos con esfuerzo y grandes inversiones, y sólo revelan los datos requeridos por mandato gubernamental.

Los comunicados de prensa se elaboran cuidadosamente para evitar la revelación del alcance completo de los descubrimientos en este ámbito altamente competitivo, donde los bloques de propiedades marinas escogidos pueden arrendarse por más de US\$ 100 millones, en una concesión por 10 años. Pero el silencio y la competencia no son los únicos impedimentos para la exploración en esta área.

Quizás el mayor desafío es el que plantean las espesas capas de sal presentes en el subsuelo. Numerosas áreas prospectivas de aguas profundas yacen por debajo de mantos de sal; algunos de los cuales poseen espesores de hasta 6,100 m [20,000 pies].¹ Como un domo ondulante y desgastado, los mantos salinos fusionados se extienden desde la Plataforma Continental de EUA hasta el Talud Continental de aguas profundas frente a las costas de Texas y Luisiana. Bien al sur, en aguas menos exploradas, se encuentra una provincia subsalina similar frente a la Península de Yucatán de México.

En busca de nuevos objetivos exploratorios, muchos operadores de áreas marinas han tenido que penetrar cientos o incluso miles de pies de sal para descubrir arenas productivas. Sus esfuerzos condujeron a descubrimientos subsalinos notables sobre la Plataforma, tal es el caso de Mahogany; o en el área de aguas más profundas, con los campos Gemini, Atlantis, Thunder Horse, Mad Dog y Pony; o en aguas ultraprofundas, con Tahiti, St. Malo, Jack y Kaskida.²

La sal constituye un desafío especial para los perforadores, que deben enfrentarse con inclusiones de sedimentos de alta presión o zonas trituradas a medida que penetran cuerpos salinos (véase "Respondiendo al desafío de explotar estructuras subsalinas," página 36). Además presenta dificultades considerables para los geofísicos cuando tratan de representar con imágenes las estructuras profundas que yacen por debajo de cuerpos salinos de forma irregular. En la sal, las ondas sísmicas pueden alcanzar velocidades que oscilan entre 4,400 y 4,600 m/s [14,500 y 15,100 pies/s];





^ La Tierra durante el período Triásico. La separación final del supercontinente de Pangea fue manifestada en parte por el hundimiento producido entre las placas continentales de África y las Américas, que con el tiempo condujo a la formación del Golfo de México.

en ciertos casos casi duplicando la velocidad con que viajarían en los sedimentos adyacentes. Este contraste de velocidad produce problemas de enervación de imágenes geofísicas que pueden enmascarar las estructuras infrayacentes e impedir que los geocientíficos determinen la localización o el alcance de los yacimientos potenciales.³ No obstante, los avances registrados en las técnicas de adquisición y procesamiento de datos sísmicos están ayudando a los geofísicos a resolver problemas que previamente impedían la obtención de imágenes de estructuras subsalinas (véase “Levantamientos sísmicos en círculos,” *página 20*).

El proceso de perforación y producción de un pozo subsalino requiere un grado significativo de planificación, capacidad operacional e inversión. Dadas las dificultades asociadas con las operaciones de perforación en aguas profundas, la decisión de asumir el desafío adicional de penetrar la sal debe ser justificada con repagos y retornos de las inversiones que ameriten el gasto y el riesgo adicional involucrado. Un artículo redactado en 1997, que se cita con frecuencia, mencionaba que las reservas subsalinas potenciales de 25 o más campos significativos, ubicados principalmente en la Plataforma Continental de la porción norte del Golfo de México, habían sido estimadas en 1,200 millones de bbl [190 millones de m³] de petróleo y 15 Tpc [435,000 millones de m³] de gas.⁴ Estas estimaciones no incluyen las reservas adicionales que desde entonces se han descubierto en el *play* de aguas profundas de edad Mioceno—incluyendo Mad Dog, Pony, Tahiti y otros cam-

pos—ni los descubrimientos subsalinos de aguas ultraprofundas, tales como los campos Jack, Kaskida, St. Malo y Thunder Horse.

Este artículo describe la evolución del *play* subsalino de la porción norte del Golfo de México. Se revisan brevemente los procesos geológicos que condujeron a la depositación de la Cuenca Louann Salt y el transporte de arenas de calidad yacimiento hacia las zonas más profundas de la cuenca. Además, se examina el rol de la movilización de la sal, y su efecto sobre el sedimento suprayacente, en la formación de las trampas y los trayectos de migración necesarios para conformar un sistema petrolero efectivo en el Golfo de México. También se analiza cómo las arenas depositadas originalmente por encima de la sal ahora la infrayacen. Si bien este artículo se centra principalmente en las aguas intensamente exploradas de EUA, en el sector norte del Golfo de México, algunos de los principios descriptos también son relevantes para otras cuencas del mundo.

Evolución de la Cuenca del Golfo de México

Los descubrimientos realizados en el Golfo de México desafiaron los conceptos previos acerca de la existencia de arenas con hidrocarburos debajo de grandes espesores de sal. Esta sal es en realidad más antigua que las arenas que la infrayacen. No obstante, la sal se ha desplazado y en ciertos casos ha creado sellos capaces de entrapar petróleo y gas. La comprensión de las complejidades geológicas de estos descubrimientos requiere un paso atrás en el tiempo.

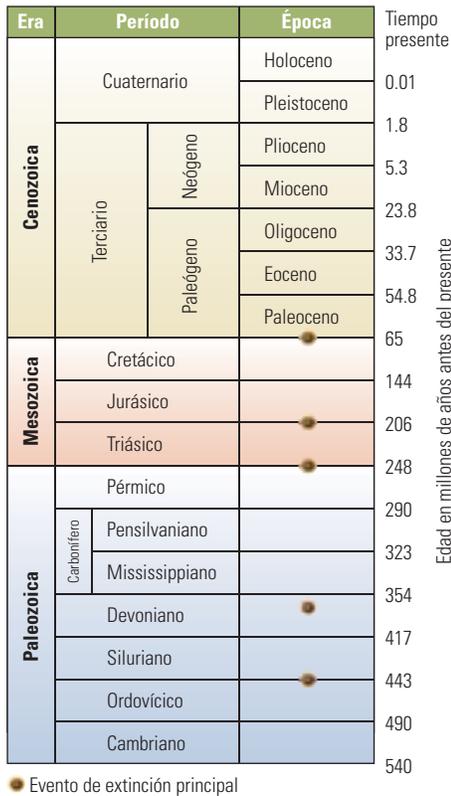
El *play* subsalino del Golfo de México, en proceso de evolución, se encuentra intrincadamente ligado a la historia geológica del Golfo en sí. Esta historia se remonta a miles de millones de años, antes de que existiera el Golfo de México, una época posterior al momento en que la mayoría de las placas continentales del mundo convergieron para formar un supercontinente conocido con el nombre de Pangea (*izquierda*). La actividad tectónica que sobrevino a esa etapa formaría la Cuenca del Golfo e incidiría en la distribución de los sedimentos que la rellenaron subsiguientemente.

Además de los procesos tectónicos y depositacionales incesantemente graduales que tuvieron lugar en esta cuenca, operaron otras fuerzas. La historia inicial del Golfo de México se vio por momentos interrumpida abruptamente por la ocurrencia de eventos catastróficos que no sólo incidieron en la formación del Golfo sino que además cambiaron el mundo. Aunque notables en cuanto a escala, estos eventos no fueron únicos; uno de estos cataclismos tuvo lugar justo antes del comienzo de la apertura del Golfo de México.

Hace aproximadamente 250 millones de años, se extinguió gran parte de la vida existente sobre la Tierra. En tierra firme, la biodiversidad de los insectos se desplomó, y las pérdidas de animales y vegetales fueron aún más severas ya que desapareció el 70% de las especies terrestres. En los mares, los trilobites, los corales tabulados y rugosos, y casi todos los crinoideos se extinguieron, junto con aproximadamente el 90% de todas las especies marinas. Los niveles de oxígeno atmosférico cayeron, pasando del 30% a menos del 15%.

Ésta fue la gran extinción del Pérmico-Triásico (*próxima página, arriba*). La causa de esta extinción masiva es tema de debate. Si bien los descubrimientos recientes señalan el impacto de un asteroide, otras evidencias sustentan una diversidad de teorías, que incluyen la actividad volcánica masiva, la caída de los niveles de los mares ocasionada por la formación de mantos de hielo continentales, la anoxia causada por la circulación lenta de los océanos, un vertido masivo de metano proveniente de los hidratos del fondo marino, o una combinación de estos episodios. Sin importar la causa, esta extinción estableció un hito geológico destacado en los afloramientos de todo el mundo, proporcionando un patrón de medición con el cual establecer la secuencia cronológica de los procesos subsiguientes que condujeron a la formación de rasgos tales como el Golfo de México.

Después de esta extinción, el continente de Pangea comenzó a desplazarse como elemento precursor del desarrollo de la Cuenca del Golfo de México. En el Triásico Tardío, conforme la placa Norteamericana se separó de las placas Sudamericana y Africana, comenzaron a formarse zanjas



^ Escala de tiempo geológico. La convergencia de las placas continentales, durante los períodos Missisippiano y Pensilvaniano, condujo a la formación del supercontinente de Pangea. Hacia el Triásico Tardío, el manto ascendente separó el supercontinente y produjo la apertura de las cuencas ancestrales del Golfo de México y del Océano Atlántico.

de hundimiento (*rifts*) profundas. Estas zanjas de hundimiento fueron asociadas con el estiramiento de la corteza continental.⁵ Formando aún parte de la placa Norteamericana, el área que con el tiempo se convertiría en el Golfo de México estaba atravesada por fosas tectónicas, que se hundieron gradualmente al rellenarse con depósitos volcánicos y capas rojas no marinas, provenientes de sedimentos erosionados desde las áreas elevadas adyacentes.⁶ Estas capas rojas, que constituyen algunos de los primeros registros de la fase de *rifting* del Golfo de México, conforman una parte de la Formación Eagle Mills.

El tectonismo relacionado con los procesos de subducción a lo largo del margen oeste de la placa Norteamericana, permitió el avance esporádico del Océano Pacífico. Durante el Jurásico Medio, los maremotos del Pacífico se extendieron hacia el este a lo largo de México, para rellenar las depresiones someras del proto-Golfo; las expresiones superficiales de las fosas en proceso de subsidencia continua, activadas durante el Triásico Tardío. Entre los maremotos, la conexión con el Océano Pacífico se habría cerrado, dejando atrás cuerpos aislados de agua salada.

A lo largo de ciclos innumerables de reconstrucción y evaporación, la salinidad de estos cuerpos de agua se incrementó de manera constante.

Esto condujo a la precipitación de halita en el centro de las cuencas hipersalinas y a la precipitación de anhidrita a lo largo de ciertas partes de la periferia. La subsidencia local se adaptó al ritmo de la precipitación de halita, como lo evidencian los depósitos evaporíticos que poseen miles de pies de espesor. En la porción norte de la Cuenca del Golfo de México, estos depósitos salinos extensivos pasaron a conocerse con el nombre de Louann Salt, de edad Jurásico Medio.

En el Jurásico Tardío, durante lo que, según se infiere, corresponde a las etapas tardías del proceso de *rifting*, el estiramiento continuo de la corteza continental hizo que la plataforma de Yucatán se separara de la placa Norteamericana, llevando consigo una porción del cuerpo salino. Es probable que se haya abierto una conexión entre el Golfo de México, en sus primeras etapas, y el Océano Atlántico, a fines del Jurásico, cuando se estableció un corredor entre las plataformas de Florida y Yucatán, y la conexión con el Océano Pacífico se restringió.⁷ La plataforma de Yucatán rotó en sentido antihorario mientras continuaba su deriva hacia el sur.⁸ Finalmente, se asentó sobre el margen norte de la placa Sudamericana durante el Cretácico Temprano (*abajo*).

Los procesos tectónicos que tuvieron lugar más allá de la cuenca, incidieron considerablemente en la secuencia y la extensión areal de los depósitos sedimentarios que comenzaron a rellenar el Golfo y a sepultar las capas espesas de la estructura Louann Salt. Algunos de estos sedimentos se con-

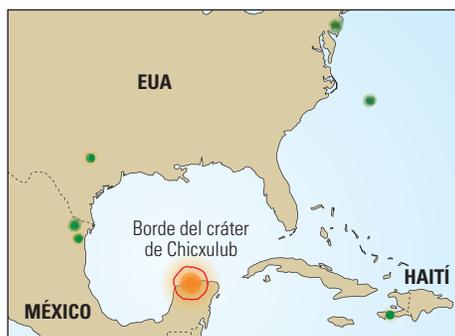
vertirían más tarde en generadores de hidrocarburos, mientras que otros se transformarían en posibles yacimientos de hidrocarburos a los que hoy se apunta como objetivos exploratorios.

El levantamiento Jurásico de las Montañas Apalaches fue acompañado por la erosión de materiales montañosos graníticos. Con su meteorización, el feldespato y los minerales de mica presentes dentro de estos granitos se desintegraron para producir depósitos clásticos ricos en arcillas,

- Farmer P, Miller D, Pieprzak A, Rutledge J y Woods R: "Exploring the Subsalt," *Oilfield Review* 8, no. 1 (Primavera de 1996): 50-64.
- Montgomery SL y Moore DC: "Subsalt Play, Gulf of Mexico: A Review," *AAPG Bulletin* 81, no. 6 (Junio de 1997): 871-896
- Salvador A: "Late Triassic-Jurassic Paleogeography and Origin of Gulf of Mexico Basin," *AAPG Bulletin* 71, no. 4 (Abril de 1987): 419-451.
- Una fosa tectónica (*graben*) es un bloque de falla hundido que se encuentra limitado a ambos lados por bloques de fallas normales levantados y opuestos. Las fosas tectónicas tienen lugar en áreas de *rifting* (hundimiento) o extensión, donde la corteza de la Tierra está siendo separada.
Las capas rojas son estratos sedimentarios rojizos, tales como la arenisca, la limolita o la lutita, que se han acumulado bajo condiciones de oxidación. El color rojo resulta de la presencia de manchas de minerales de óxido de hierro en los sedimentos. Las condiciones de oxidación son comunes en los ambientes áridos y con temperaturas elevadas, y en consecuencia implican que los sedimentos han sido expuestos a las mismas a través del fenómeno de meteorización superficial, como resultado del levantamiento o la erosión del sedimento suprayacente. Las capas rojas se asocian comúnmente con rocas de los períodos Pérmico y Triásico.
- Salvador, referencia 5.
- Pindell J y Kennan L: "Kinematic Evolution of the Gulf of Mexico and Caribbean," en Fillon RH, Rosen NC, Weimer P, Lowrie A, Pettinghill H, Phair RL, Roberts HH y van Hoorn B (ediciones): *Actas, 21a Conferencia Anual de Investigación Bob F. Perkins de la Fundación SEPM de la Sección de la Costa del Golfo* (2001): 193-220.



^ Movimiento de la microplaca de Yucatán. La Cuenca Louann Salt se separó cuando la microplaca de Yucatán (línea amarilla de guiones) rotó y se desplazó hacia el sur (flecha blanca). (Adaptado de Pindell y Kennan, referencia 8.)



Mapa del impacto del Chicxulub. Se han encontrado esférulas provenientes del impacto en lugares (círculos verdes) de la costa del Golfo y la costa noreste de EUA, en pozos perforados frente a la costa este de EUA y en afloramientos de México y Haití. Durante el impacto, que marcó el límite entre el Cretácico y el Terciario, Haití se localizaba a unos 700 km [435 millas] al sur de Chicxulub. (Adaptado de Olsson et al, referencia 14.)

que se conocen como areniscas feldespáticas. Localmente, los vientos áridos transportaron parte de los sedimentos clásticos, separando las arcillas de la fracción cuarzosa por procesos de cribado, lo que generó los depósitos eólicos de la arenisca Norphlet del Jurásico Superior.⁹ Entretanto, la Plataforma de Florida y la Plataforma de Yucatán se empobrecieron en sedimentos clásticos y fueron dominadas por la depositación de capas macizas de carbonatos químicos.

Luego de la depositación de la arenisca Norphlet, un aumento del nivel del mar produjo un período transgresivo durante el cual tuvo lugar la depositación localizada de evaporitas, clásticos marinos someros y carbonatos ricos en materia orgánica. La materia orgánica, proveniente de las algas, el plancton y otros materiales del ambiente marino, se mezcló y quedó sepultada dentro de capas de carbonatos y lutitas. Con el tiempo, al incrementarse la profundidad de sepultamiento de los sedimentos, el calor y la presión resultantes de la acumulación de los estratos de sobrecarga

transformaron la materia orgánica en kerógenos Tipo I y Tipo II, que son los precursores esenciales de la generación de hidrocarburos.¹⁰

En el Cretácico, se depositaron gruesos depósitos de intercalaciones de carbonatos, margas y lutitas marinas ricas en materia orgánica durante otra serie de transgresiones marinas. Como sus equivalentes jurásicos más profundos, estos depósitos ricos en materia orgánica se convertirían en rocas madre importantes, al ser sepultados a una profundidad suficiente para generar hidrocarburos. El fin del Cretácico—hace aproximadamente 65 millones de años—fue señalado por la llegada de un gran asteroide que anunció una nueva era en la historia geológica de la Tierra.

Este asteroide, de 8 a 10 km [5 a 6 millas] de diámetro, impactó cerca de la actual ciudad de Chicxulub Puerto, en la Península de Yucatán de México (izquierda). Al impactar, el asteroide produjo un cráter en la Plataforma carbonatada de Yucatán, con un diámetro mayor a 180 km [112 millas], y derritió la corteza terrestre hasta una profundidad de aproximadamente 29 km [18 millas].¹¹ La energía liberada en el momento del impacto superó a la que liberan 100 millones de megatoneladas de TNT.¹² En la Cuenca del Golfo, los sismos masivos indujeron el deslizamiento sinsedimentario de los sedimentos costeros, produciéndose a la vez tsunamis de 100 m [330 pies] que se irradiaron a lo largo de la Cuenca del Golfo de México y las cuencas del Proto-Caribe y del Atlántico.¹³

Como testimonio del efecto físico del impacto, existe una capa de esférulas fusionadas que se extiende a lo largo de Haití, Estados Unidos, Canadá, España y Nueva Zelanda. Estas esférulas fueron producidas como toneladas de proyecciones volcánicas fundidas que salieron disparadas del cráter, formando una pluma convectiva roja y caliente que circundó el globo y produjo una lluvia de vidrio fundido durante varios días, encendiendo fuegos en ciertos lugares de América del Norte y América del Sur, África Central, India y el Sudeste Asiático.

Como consecuencia, en los sedimentos de Europa y el oeste de EUA, se conserva un depósito de ceniza y hollín. Durante esta etapa, los gases de efecto invernadero se incrementaron más de cien veces, el contenido de azufre atmosférico aumentó en un factor de mil, y el gas de cloro destruyó el ozono, creando un ambiente que puso fin a la era de los dinosaurios y extinguió el 75% de las especies que habitaban la Tierra.¹⁴

Luego del cataclismo del Cretácico-Terciario, los sedimentos aportados por los episodios orogénicos, en el margen oeste del Golfo, comenzaron a rellenar la cuenca de subsidencia. A comienzos del Paleoceno, los detritos clásticos provenientes del oeste formaron un cono submarino de cuenca en la Formación Wilcox Inferior, que está compuesto por areniscas y limolitas arcósicas mal clasificadas y generadas por gravedad, con abundantes arcillas. Se sabe que estas areniscas turbidíticas arcósicas poseen permeabilidades que oscilan entre 1 y 10 mD y porosidades que varían del 14% al 18%.¹⁵

Conforme continuó el proceso de relleno de la cuenca durante el Eoceno Temprano, las secuencias amalgamadas de complejos de canal con albardón de aguas profundas sepultaron el complejo de conos submarinos de cuenca. Estos sedimentos de la Formación Wilcox Superior fueron depositados bajo condiciones de energía más alta que la de los sedimentos de la Formación Wilcox Inferior y están mejor clasificados que sus contrapartes de fondo de cuenca. En consecuencia, estas secuencias amalgamadas poseen menos fragmentos de roca, menos arcilla y mejores propiedades de yacimiento, como lo demuestran los rangos reportados de permeabilidad y porosidad que varían entre 50 y 200 mD, y 20 y 28%, respectivamente.

Importantes sistemas de cañones atravesaron los márgenes de la Plataforma Cenozoica y canalizaron los clásticos de la Formación Wilcox lejos de la costa.¹⁶ Estos clásticos fueron transportados hasta el fondo de la cuenca de aguas profundas (próxima página). Ahora se está apuntando a los

9. Mink RM, Bearden BL y Mancini EA: "Regional Geologic Framework of the Norphlet Formation of the Onshore and Offshore Mississippi, Alabama and Florida Area," *Actas, Conferencia y Exposición Oceans '88 MTS-OES-IEEE* (1988): 762-767.

10. Después del sepultamiento hasta profundidades de 1 a 2 km [0.6 a 1.2 milla] y luego del calentamiento hasta temperaturas de 60°C [140°F], los kerógenos sirven como carga de alimentación primaria para la generación de hidrocarburos.

11. Kring DA: "Composition of Earth's Continental Crust as Inferred from the Compositions of Impact Melt Sheets," presentado en la 28a Conferencia de Ciencia Lunar y Planetaria, Houston, 17 al 21 de marzo de 1997, <http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc97/pdf/1084.PDF> (Se accedió el 21 de agosto de 2008).

12. Serie *Impact Cratering* del Centro de Imágenes Espaciales de la Universidad de Arizona/NASA http://www.lpl.arizona.edu/SIC/impact_cratering/Chicxulub/Discovering_crater.html (Se accedió el 11 de agosto de 2008).

13. Kring DA: "The Chicxulub Impact Event and Its Environmental Consequences at the Cretaceous-Tertiary Boundary," *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 255 (Noviembre de 2007): 4-21.

14. Para obtener más información sobre el impacto del Chicxulub y su relación con el límite entre el Cretácico y el Terciario, consulte: Pati JK y Reimold WU: "Impact Cratering—Fundamental Process in Geoscience and Planetary Science," *Journal of Earth System Science* 116, no. 2 (Abril de 2007): 81-98.

Simonson BM y Glass BP: "Spherule Layers—Records of Ancient Impacts," *Annual Review of Earth and Planetary Science* 32 (Mayo de 2004): 329-361.

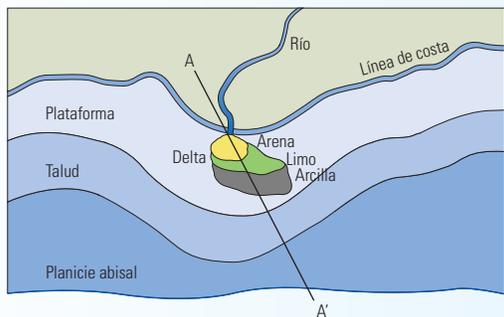
Smit J: "The Global Stratigraphy of the Cretaceous-Tertiary Boundary Impact Ejecta," *Annual Review of Earth and Planetary Science* 27 (Marzo de 1999): 75-113.

Olsson RK, Miller KG, Browning JV, Habib D y Sugarman PJ: "Ejecta Layer at the Cretaceous-Tertiary Boundary, Bass River, Nueva Jersey (Programa Internacional de Perforación Oceánica, Campaña 174AX)," *Geology* 25, no. 8 (Agosto de 1997): 759-762.

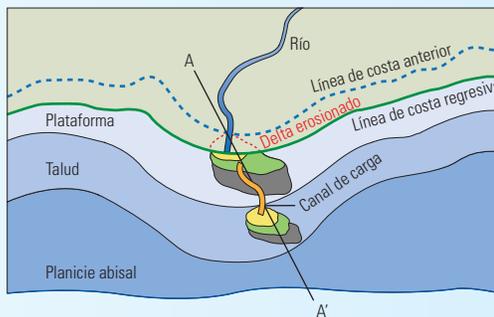
15. Meyer D, Zarra L y Yun J: "From BAH to Jack, Evolution of the Lower Tertiary Wilcox Trend in the Deepwater Gulf of Mexico," *The Sedimentary Record* 5, no. 3 (Septiembre de 2007): 4-9.

16. Según algunos autores, una colisión del Arco de Cuba contra los bloques de Yucatán y Florida, que tuvo lugar durante las edades Paleoceno y Eoceno, puede haber aislado el Golfo de México, induciendo una reducción regresiva significativa y a corto plazo del nivel del mar a través de la evaporación. Esto habría permitido la reelaboración de las arenas Wilcox depositadas previamente. Al caer el nivel del mar, estas arenas habrían sido redepositadas sobre el fondo profundo de la cuenca, conformando una serie de conos submarinos proximales de cuenca. Para obtener más información sobre este escenario, consulte: Rosenfeld JH y Blickwede JF: "Extreme Evaporative Drawdown of the Gulf of Mexico at the Paleocene-Eocene Boundary," presentado en la Convención Anual de la AAPG, Houston (9 al 12 de abril de 2006), <http://www.searchanddiscovery.com/documents/2006/06065rosenfeld/index.htm> (Se accedió el 30 de septiembre de 2008).

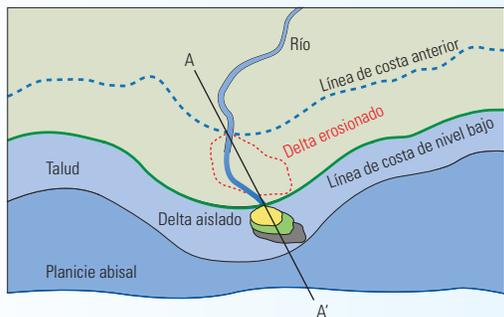
El río aporta sedimentos sobre la plataforma



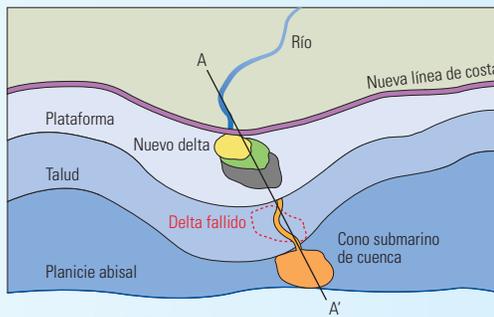
Sedimento transportado hasta el talud a medida que cae el nivel del mar



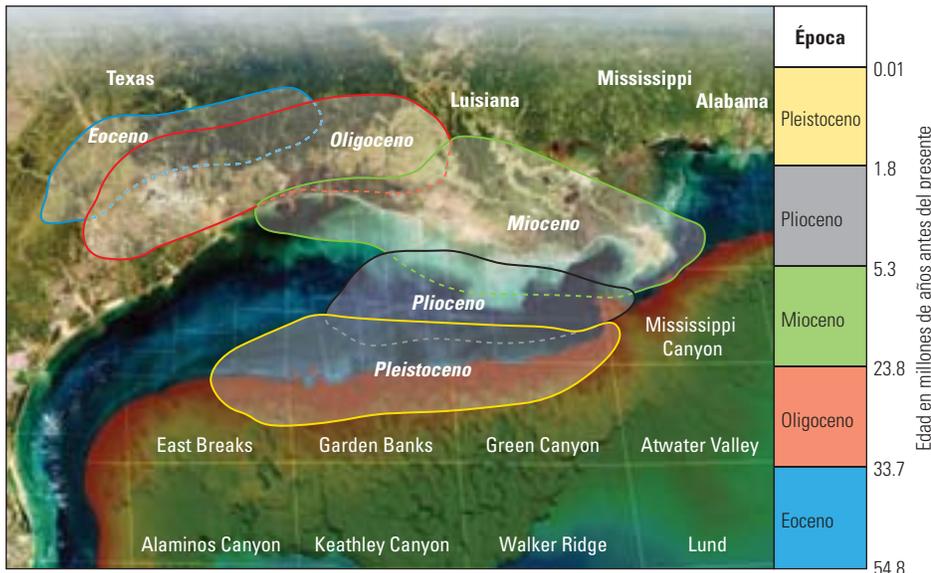
El delta de talud se vuelve sobreempinado con la depositación continua



Sedimentos del delta de talud depositados como un cono submarino de cuenca



^ Desplazamiento de las arenas hacia aguas más profundas. Cuando el río se encuentra con el océano, la velocidad del agua determina dónde depositará los sedimentos que transporta en suspensión. Los materiales más pesados—típicamente arenas de grano grueso a intermedio—se separan primero. Luego, a medida que la velocidad se reduce con la distancia a la costa, se depositan las arenas más finas y los limos, seguidos por las partículas muy finas que conforman las arcillas. Este tipo de progresión depositacional se observa en la formación de los deltas fluviales sobre las plataformas continentales (*vista en plano y sección transversal, extremo superior izquierdo*). No obstante, los niveles del agua ascienden y descienden—como resultado de la actividad glacial y de los ciclos de dispersión o colisión de las placas tectónicas—y esta variación produce un impacto sobre los procesos sedimentarios. Por consiguiente, durante los períodos de glaciación, el agua se inmoviliza formando mantos de hielo continental, lo que puede reducir drásticamente los niveles del mar. La regresión subsiguiente retira el agua de las líneas de costa y los deltas existentes hasta que alcanza un grado máximo de caída del nivel del mar, o estadio de bajo nivel del mar. Ante la exposición a las condiciones climáticas, estas líneas costeras y deltas se erosionan y revelan sucesivamente depósitos de arena, limo y arcilla cuando el mar retrocede. A medida que se erosionan, estos sedimentos son redepositados cuenca abajo—a mayor distancia de su fuente original—y algunos descansan temporalmente sobre la plataforma continental más empinada, lejos de la plataforma de inclinación más suave en la que fueron depositados originariamente (*extremo superior derecho*). Conforme continúa la depositación sobre el talud, estos depósitos de borde de plataforma, cargados de agua, se vuelven más empinados y más inestables (*extremo inferior izquierdo*). Tarde o temprano, el acaecimiento de un terremoto, una corriente de Loop (flujo cálido en el sentido de las agujas del reloj, que se extiende hacia el norte del Golfo de México y se une a la Corriente de Yucatán y a la Corriente de Florida) o un huracán importante puede disparar la liberación de estos sedimentos. Cuando retroceden, las corrientes de turbidez transportan los sedimentos hacia la planicie abisal, para ser depositados en conos submarinos de cuenca (*extremo inferior derecho*). En otros casos, bloques de fallas enteros pueden ser transportados echado abajo, intactos o con grados variables de traslación de masa. Con las condiciones glaciales o tectónicas cambiantes, el nivel del mar tarde o temprano avanzará sobre la tierra en lo que se conoce como transgresión. Durante este estadio de alto nivel del mar, puede formarse un nuevo delta en el lugar donde el río se une con el mar. (Utilizado con autorización de John R. Dribus.)



^ Depocentros migratorios. Los principales centros depositacionales de la porción norte de la Cuenca del Golfo de México exhiben cambios significativos con el tiempo, desplazándose gradualmente de oeste a este y extendiéndose en dirección hacia la cuenca de norte a sur. [Modificado de Seni SJ, Hentz TF, Kaiser WR y Wermund EG, Jr (ediciones): *Atlas of Northern Gulf of Mexico Gas and Oil Reservoirs, vol 1: Miocene and Older Reservoirs*. Austin: Oficina de Geología Económica, Universidad de Texas en Austin, 1997.]

gruesos depósitos de roca yacimiento clástica, resultantes de ese proceso, como objetivos de exploración, y los operadores de áreas marinas han anunciado la existencia de descubrimientos que contienen acumulaciones significativas de petróleo en zonas de los cinturones plegados Perdido y del Mississippi Canyon, así como por debajo del domo salino en las áreas prospectivas de los campos Jack, Kaskida y St. Malo.

Los depósitos de la Formación Wilcox Superior fueron sepultados por debajo de gruesas capas de lutitas marinas de aguas profundas durante el Eoceno Tardío. En el Oligoceno, otra afluencia de sedimentos clásticos fue aportada al oeste por una serie de deltas originados del levantamiento de la cadena montañosa de Sierra Madre. Los procesos erosivos subsiguientes generaron secuencias interstratificadas de sedimentos clásticos arcósicos deltaicos, lutitas marinas y sedimentos volcánico-clásticos.

Para el Mioceno Temprano a Medio, los clásticos de aguas profundas que ingresaron en la Cuenca del Golfo de México provinieron cada vez con más frecuencia de la porción norte del sistema del Río Mississippi, mientras el levantamiento y la erosión de las Montañas Rocallosas continuaba y el aporte de los sedimentos de Sierra Madre comenzaba a declinar. Con la disminución de estos sistemas originados en el oeste, los depósitos clásticos del Golfo se volvieron más cuarzosos y menos arcósicos, creándose así una roca yacimiento con menos arcilla y mejor potencial

prospectivo. En el Mioceno Medio, las turbiditas ricas en contenido de arena provenientes casi en su totalidad del sistema del Río Mississippi, formaron depósitos en manto en el fondo de la Cuenca del Golfo y, para el Mioceno Tardío, las contribuciones de los sistemas fluviales del oeste pasaron a ser insignificantes (arriba).

A lo largo de los ciclos depositacionales transgresivos y regresivos, que abarcan el Jurásico y el Mioceno, la estructura Louann Salt respondió a la tectónica de placas y a los procesos de carga clástica resultantes de los deltas y los abanicos turbidíticos que continúan hasta nuestros días. La carga depositacional ha tenido efectos profundos sobre la sal y el potencial para la existencia de áreas prospectivas viables a través de gran parte del Golfo de México.

La tectónica salina

Para comprender cómo se formaron las trampas de hidrocarburos por encima de los depósitos de sal, es importante contar con un conocimiento básico de la tectónica salina y cómo estas mismas trampas fueron cubiertas posteriormente por capas de sal de gran espesor ubicadas tectónicamente. Las capas de sal de gran espesor, si son sepultadas y deformadas, generan rasgos estratigráficos y estructurales de márgenes continentales que son completamente diferentes a los presentes en los márgenes que carecen de sal. Estos efectos tectónicos son producto de las propiedades distintivas de la sal.

La sal de roca pura se compone de sodio y cloruro, que forman un mineral conocido como halita. Otros minerales formados por la evaporación del agua de mar, tales como el yeso y la anhidrita, suelen estar interstratificados con halita, y toda la acumulación de minerales evaporíticos se conoce simplemente como "sal." A medida que estos minerales precipitan a partir de la salmuera, forman una roca cristalina.

Una de las propiedades más importantes de la sal de roca es que es mucho más débil que las rocas sedimentarias adyacentes, tales como la arenisca o la lutita. Su resistencia se reduce con la reducción del tamaño de los granos cristalinos y con el incremento de la temperatura, o cuando entre los granos de sal quedan películas delgadas de agua de mar original.¹⁷ La rotura producida en la sal a menudo genera un flujo dúctil. Incluso a temperaturas y presiones ambiente, la sal puede fluir a una velocidad de algunos metros por año, según mediciones obtenidas en los glaciares salinos de Irán (próxima página, arriba).

La sal se distingue también por su baja densidad. El lodo y la arena recién depositados son menos densos que la sal. No obstante, estos sedimentos expulsan sus fluidos intersticiales y se compactan durante el sepultamiento, volviéndose finalmente más densos que la sal. Comparativamente, la sal se torna en consecuencia más flotante. En el Golfo de México, en general, la densidad promedio de una columna sedimentaria no excede la densidad de la sal hasta que el espesor de los estratos de sobrecarga alcanza 2 a 3 km [1 a 2 millas].¹⁸ Otra propiedad importante de la sal es su permeabilidad; es tan baja, que la sal actúa como un sello para los líquidos y los gases, y de ese modo puede detener la migración de fluidos y entrapar hidrocarburos.

La sal es mecánicamente estable si se comprime en igual medida desde todos los lados durante el proceso de sepultamiento. No obstante, la baja viscosidad de la sal permite que ésta fluya bajo la acción de fuerzas o cargas desbalanceadas, lo cual ocurre en la naturaleza principalmente bajo dos condiciones. La carga gravitacional tiene lugar cuando los sedimentos suprayacentes varían de espesor o densidad lateralmente, haciendo que la sal infrayacente fluya lateralmente hacia el estrato de sobrecarga más delgado o menos denso. La carga por desplazamiento es la segunda forma de inestabilidad. Este tipo de carga es dominado por las fuerzas tectónicas y actúa habitualmente en sentido horizontal.¹⁹ Si los sedimentos que bordean un cuerpo salino se apartan lateralmente, puede suceder que la sal se extienda y se hunda en el hueco resultante. Por el contrario, si esos sedimentos se aprisionan, cualquier cuerpo salino que se inter-



^ Sal alóctona que se extiende en forma subaérea. Kuh-e-Namak (que significa Montaña de Sal en idioma farsi o persa) es el diapiro salino más famoso de Irán. Este glaciar de sal (gris claro) emerge desde un anticlinal, cuya cima se eleva 1,400 m [4,593 pies] por sobre la planicie adyacente. Obsérvese el vehículo (encerrado en el círculo) en primer plano, para percibir la escala. Aquí, la sal Hormuz Infracámbrica se extiende sobre los estratos Jurásicos-Cretácicos mucho más modernos (tostado) que forman el anticlinal. El cuerpo principal de este glaciar salino avanza a una velocidad promedio de aproximadamente un metro por año. Una colisión entre las microplacas de Arabia e Irán creó las Montañas Zagros y mejoró el proceso de levantamiento y extrusión de la sal. (Fotografía, cortesía de Martin Jackson.)

ponga será comprimido, tendiendo a elevarse como la pasta de dientes que sale de un tubo.

No obstante, aunque se impongan fuerzas desbalanceadas sobre la sal débil, puede suceder que ésta no se deforme. Dos fuerzas importantes resisten el flujo de la sal. La primera es la resistencia de las capas de sedimentos suprayacentes. Para que la sal se eleve, debe penetrar o levantar

los sedimentos que la suprayacen. Si los sedimentos suprayacentes poseen un espesor suficiente, serán demasiado pesados para ser levantados y demasiado resistentes para ser penetrados por la sal a pesar de su flotabilidad. La segunda es el arrastre de los bordes, causado por la fricción contra el tope y la base de la capa de sal. Donde una capa de sal alimenta a una estructura salina cer-

cana, en proceso de crecimiento, es exponencialmente más difícil que esta capa de carga fluya lateralmente a medida que la fuente de la sal se agota y la capa se vuelve más delgada.

La sal es depositada originalmente en forma de estratos planos. Las fuerzas descritas anteriormente transforman estos estratos en cadenas montañosas subterráneas de sal—de algunos cientos de kilómetros de largo—que pueden alcanzar una altura mayor que la de las montañas más grandes del mundo.²⁰ Debido a que en un principio se creía que dichas masas salinas atravesaban los sedimentos suprayacentes, se las denominan diapiros, del Griego *diapirein*, que significa penetrar.

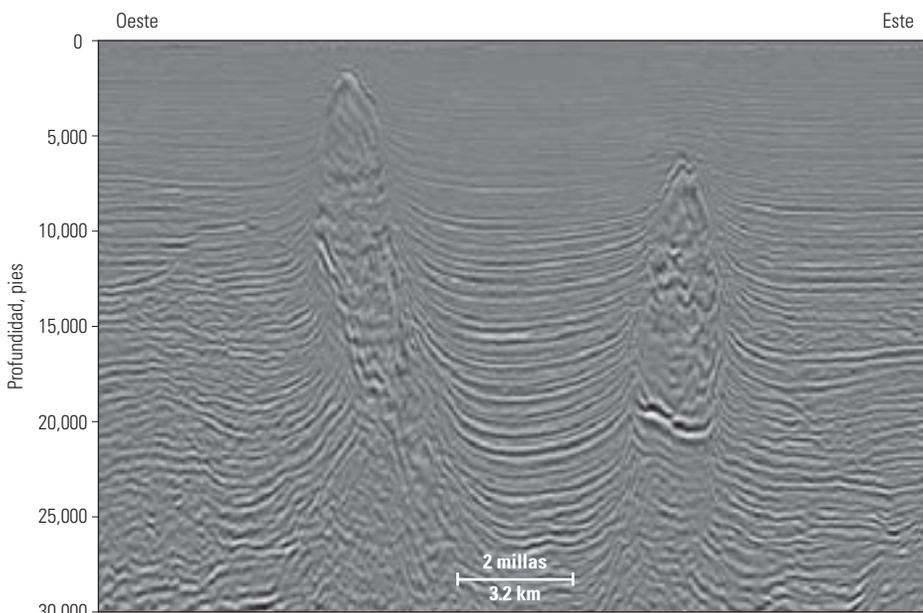
Los diapiros son, sin lugar a dudas, los más altos y espectaculares cuerpos salinos (izquierda). Las capas horizontales de sal pueden transformarse en diapiros montañosos subterráneos de

17. La granulometría es una función del ambiente químico sedimentario pero puede modificarse a través de la deformación.

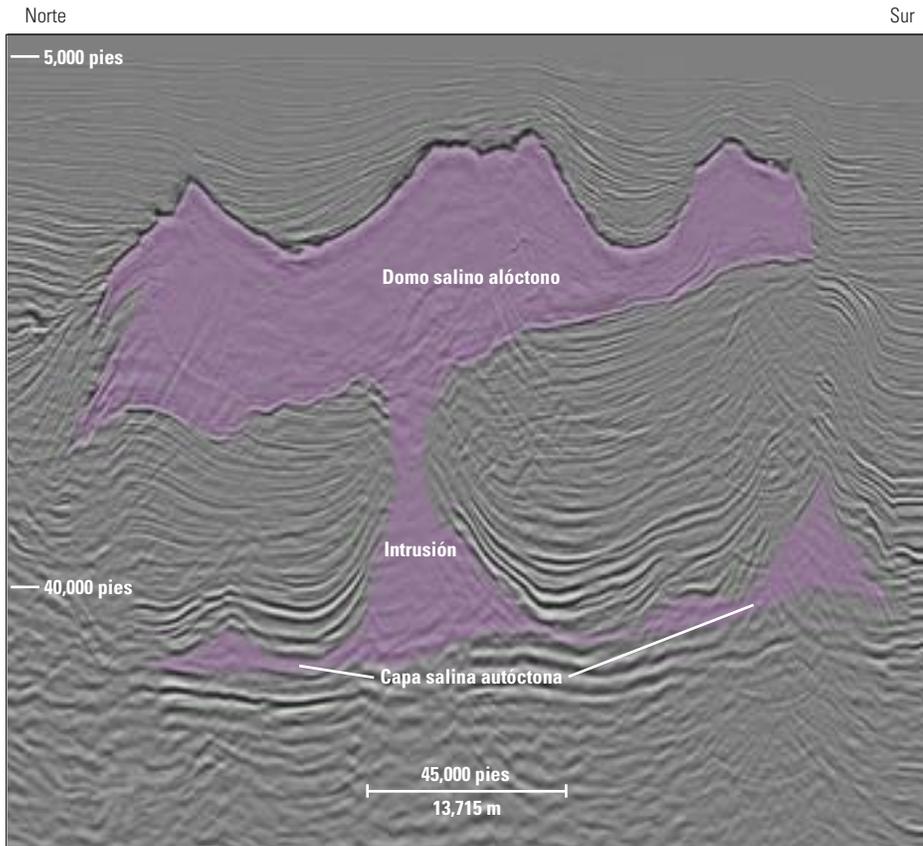
18. Hudec MR, Jackson MPA y Schultz-Ela DD: "The Paradox of Minibasin Subsidence into Salt: Clues to the Evolution of Crustal Basins," *Geological Society of America Bulletin* (en prensa).

19. En las aguas estadounidenses de la porción norte del Golfo de México, todas estas fuerzas son impuestas por la gravedad. En la porción sur, intervienen tanto la fuerza de gravedad como la fuerza de la tectónica de placas.

20. Gran parte de la montaña más grande del mundo yace en realidad debajo del Océano Pacífico. Mauna Kea, una de las cinco masas volcánicas que forman la isla de Hawái, en EUA, se levanta desde las profundidades del Océano Pacífico hasta una altura de 10,203 m [33,476 pies]. Dado que sólo unos 4,205 m [13,796 pies] se encuentran por encima del nivel del mar, comúnmente figura en primer puesto el Monte Everest, cuya altura es de 8,848 m [29,028 pies].



^ Elevación desde las profundidades. Esta representación sísmica muestra dos diapiros salinos por debajo de la Plataforma Continental, en el área marina de Luisiana. El diapiro de la izquierda, que se extiende hasta aproximadamente 366 m [1,200 pies] del fondo marino, exhibe un relieve vertical de más de 5,486 m [18,000 pies]. El adelgazamiento y el enderezamiento de los sedimentos contra los flancos salinos indican las diferentes fases de la historia de penetración de la sal.



^ Evolución de las estructuras salinas. Un domo salino alóctono de gran espesor se extiende lateralmente por debajo del Talud Continental, frente a Luisiana. Esta capa ha sido cargada por dos intrusiones que se elevan desde una capa infrayacente de sal autóctona que, a su vez, ha sido prácticamente agotada como resultado del retiro de la sal. La imagen de la base de una intrusión se observa claramente en el centro de la capa autóctona. A la derecha de esta estructura, la segunda intrusión se encuentra acuña-da en su mayor parte.

tres maneras. Primero, donde una cuenca sedimentaria se extiende, los diapiros *reactivos* pueden levantarse para crear fosas con crestas abruptas por debajo de estratos cuyo espesor se ha reducido como resultado de la presencia de fallas de extensión. En segundo lugar, los diapiros *activos* pueden fracturarse a través de pliegues de tipo anticlinal cuyas crestas han reducido su espesor como resultado de la erosión, especialmente en áreas en las que la compresión tectónica ha presionado la sal. En tercer lugar, pueden desa-

rollarse diapiros *pasivos* como “islas” de sal, expuestas en la superficie terrestre o en el fondo marino, mientras la base del diapiro y los sedimentos adyacentes se hundan a medida que se rellena la cuenca sedimentaria.

Donde la capa generadora de sal original posee un espesor suficiente, las crestas de los diapiros más grandes pueden comenzar a extenderse lateralmente en el fondo marino o por debajo de éste, formando un manto salino somero. Se dice que la capa generadora de sal es autóctona, o for-

mada en el lugar (*izquierda*). La sal autóctona suprayace a las rocas más antiguas y, a su vez, sobre ella descansan estratos más modernos. Por el contrario, se dice que los mantos salinos más someros que se extienden desde el diapiro son alóctonos, o formados fuera del lugar y lejos de su capa generadora original. Los mantos salinos alóctonos suprayacen a los estratos más modernos. De este modo, mientras la estructura Louann Salts, de carácter autóctono, se remonta al período Jurásico, hace aproximadamente 160 millones de años, los mantos someros de sal alóctona provenientes de Louann Salt pueden suprayacer estratos de tan sólo 1 millón de años de edad.

Esos procesos fundamentales de la tectónica salina se combinan para crear márgenes continentales de gran complejidad, y no existe ningún margen divergente más complejo que el Golfo de México. Una forma de comprender mejor este margen consiste en dividir la región en provincias, cada una de las cuales posee una estructura dominante o una historia geológica distintiva. Este enfoque se ha refinado más con las mejoras introducidas en los métodos de adquisición y procesamiento de datos sísmicos que permiten una mejor visualización de las geometrías de la sal profunda.

Los geocientíficos investigaron inicialmente esta región utilizando datos de pozos vinculados mediante una cuadrícula de levantamientos sísmicos 2D. No obstante, las imágenes obtenidas de las regiones subsalinas tendían a ser pobres, de manera que las provincias estructurales se basaban en su mayor parte en el mapeo de las estructuras salinas someras.²¹ La introducción de la cobertura sísmica 3D general en la década de 1990, permitió a los geocientíficos comenzar a definir las provincias estructurales sobre la base de las estructuras salinas autóctonas profundas y las estructuras relacionadas.²² Estos refinamientos ayudaron a conformar el siguiente resumen de procesos y eventos clave, aproximadamente en orden cronológico, que muestra cómo la tectónica salina incidió en la evolución de la Cuenca del Golfo.

Los datos sísmicos indican que el espesor de la estructura Louann Salt variaba de casi cero a probablemente 4 km [2.5 millas], ya que se encontraba acumulada sobre una superficie que los procesos de formación de fallas, erosión y vulcanismo habían hecho irregular. Este espesor macizo de sal fue el resultado de innumerables ciclos de afluencia de agua marina y evaporación. Muchas de las estructuras corticales que controlan el espesor original de la sal están orientadas a lo largo de una tendencia noroeste-sudeste. Conectadas verticalmente por la sal, estas estructuras profundas parecen haber incidido en las estruc-

21. Diegel FA, Karlo JF, Schuster DC, Shoup RC y Tauvers PR: “Cenozoic Structural Evolution and Tectono-Stratigraphic Framework of the Northern Gulf Coast Continental Margin,” en Jackson MPA, Roberts DG y Snelson S (ediciones): *Salt Tectonics: A Global Perspective: AAPG Memoir 65*. Tulsa: AAPG (1995): 109–151.
Peel FJ, Travis CJ y Hossack JR: “Genetic Structural Provinces and Salt Tectonics of the Cenozoic Offshore U.S. Gulf of Mexico: A Preliminary Analysis,” en Jackson MPA, Roberts DG y Snelson S (ediciones): *Salt Tectonics: A Global Perspective: AAPG Memoir 65*. Tulsa: AAPG (1995): 153–175.

22. Hall SH: “The Role of Autochthonous Salt Inflation and Deflation in the Northern Gulf of Mexico,” *Marine and Petroleum Geology* 19, no. 6 (Junio de 2002): 649–682.

23. Peel F: “Emplacement, Inflation, and Folding of an Extensive Allochthonous Salt Sheet in the Late Mesozoic (Ultra-Deepwater Gulf of Mexico),” presentado en la Convención Anual de la AAPG, Denver, 3 al 6 de junio de 2001.

24. Peel FJ: “The Geometry and Emplacement History of the Major Allochthonous Salt Sheets in the Central US Gulf of Mexico Slope: A Regional Review,” presentado en la Reunión de la Asociación de Sociedades Geológicas de la Costa del Golfo, Austin, 30 de octubre al 1º de noviembre de 2002.

25. Galloway WE, Ganey-Curry PE, Li X y Buffer RT: “Cenozoic Depositional History of the Gulf of Mexico Basin,” *AAPG Bulletin* 84, no. 11 (Noviembre de 2000): 1743–1774.

turas mucho más someras, haciendo que su tendencia adoptara una dirección similar.

Los fenómenos de extensión cortical y *rifting* del centro de la cuenca separaron la Cuenca Louann Salt en una porción septentrional (EUA) y otra austral (México). Este episodio fue seguido por el enfriamiento de la corteza oceánica recién formada y exhumó el manto superior en el centro del Golfo en proceso de apertura, lo cual creó un incremento de la densidad que produjo el hundimiento del fondo de la cuenca. La inclinación resultante, en dirección a la cuenca, hizo que la sal separada fluyera hacia la porción central del Golfo. Al mismo tiempo, los sedimentos comenzaron a apilarse sobre la nueva corteza oceánica, por delante de la sal en expansión. Como resultado de esta sedimentación, la base de la sal en expansión trepó sobre los estratos acumulados, formando una cuña de sal autóctona que trepó en dirección hacia el mar, durante el Jurásico y el Cretácico Temprano.²³ La cuña formó una franja de sal de al menos 30 a 40 km [19 a 25 millas] de ancho por debajo del Escarpe de Sigsbee, entre las áreas del Mississippi Canyon y el Keathley Canyon, marcando el primero de una serie de emplazamientos de mantos salinos en el Golfo de México.

Durante el período que abarca desde el Jurásico Tardío hasta el Mioceno, comenzó el plegamiento de los estratos por encima de la sal, en el área de Walker Ridge, a lo largo del margen este del Escarpe de Sigsbee. Este plegamiento fue en parte el resultado del proceso de carga causado por la sedimentación clástica irregular producida a partir de los sistemas deltaicos, que obligaron a que la sal fluyera desde los depocentros de gran espesor hacia las áreas situadas por debajo de las capas de sedimentos de menor espesor. Además, la compresión lateral inducida por la inclinación de los estratos hizo que el estrato de sobrecarga salino se flexionara.

Algunas áreas, tales como la porción este del Mississippi Canyon, que originalmente contenían capas delgadas de sal autóctona, generaron sólo algunos diapiros esparcidos de gran altura. No obstante, en otros lugares, tales como en las áreas del Green Canyon y el Atwater Valley, el escaso espesor de los depósitos de sal fue aumentado subsiguientemente por el proceso de inflación salina que comenzó en el Jurásico Tardío. La inflación se produjo cuando los sedimentos aportados desde el continente norteamericano fueron depositados en la cuenca salina de gran espesor y desplazaron la sal autóctona infrayacente por delante de la carga sedimentaria en avance. La sal desplazada fluyó en sentido horizontal hacia las regiones periféricas, donde se habían depositado capas de sal más delgadas. A medida que la sal desplazada incre-

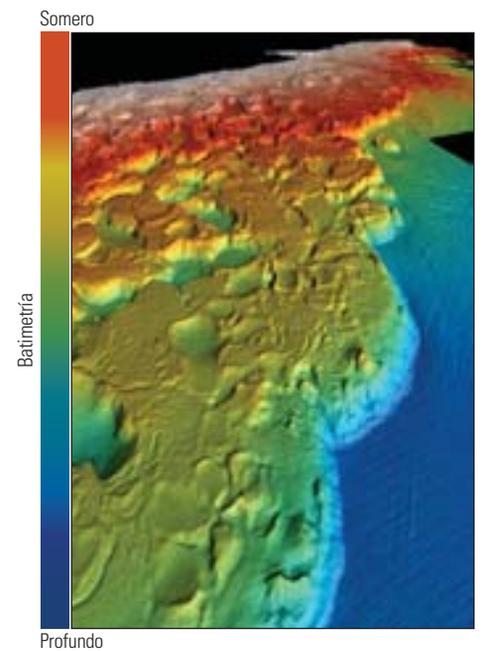
mentaba estos depósitos en la periferia, el proceso de inflación de la sal posibilitaba el desarrollo de diapiros y pliegues mucho más grandes de lo que habría sido posible de otro modo.

Durante el Cenozoico, los procesos de plegamiento y corrimiento comenzaron concretamente en el Talud Continental Inferior. Este plegamiento fue generado por la compresión inducida por gravedad y causada por la pendiente del fondo marino en dirección hacia la cuenca. El cinturón plegado Perdido, en el área del Alaminos Canyon, se desarrolló sobre un colchón de sal autóctona de gran espesor en el Oligoceno Tardío y el Mioceno Temprano. Hacia el este, durante el Mioceno Tardío, se formó el cinturón plegado del Abanico del Mississippi sobre la cuña profunda de la sal autóctona en el área del Atwater Valley. A través de una vasta área comprendida entre estos cinturones plegados, que se extendían desde el Keathley Canyon hasta la estructura Walker Ridge oeste, no se ha reconocido la presencia de cinturones plegados profundos porque se encuentran ubicados por debajo de la parte más profunda de la cuenca, donde las imágenes provenientes de los levantamientos sísmicos son pobres.

Coincidentemente con este plegamiento tuvo lugar el proceso más notable de todos. Desde el Mioceno hasta la actualidad, vastos mantos salinos se expandían lateralmente como pasta de panqueque cada vez que los aportes de sal provenientes de las profundidades eran suficientes para alimentar su expansión. Estos mantos se fusionaron luego para formar domos salinos someros. Algunos mantos salinos someros recibieron el aporte de los diapiros salinos macizos generados a partir de la capa autóctona profunda infrayacente. Otros mantos recibieron el aporte de los domos autóctonos suprayacentes y, sin embargo, ubicados a profundidad.

Esta expansión masiva de la sal fue altamente variable. En el área oriental del Mississippi Canyon, donde la sal autóctona era de poco espesor, sólo se formaron mantos salinos pequeños y dispersos. Hacia el oeste, en el área Green Canyon, donde la sal profunda era de mayor espesor, la mayoría de los diapiros se fusionaron para formar domos. Aún más hacia el oeste, desde la estructura Walker Ridge hasta el área del Alaminos Canyon, donde la sal autóctona alcanzó el espesor máximo, las paredes diapíricas macizas de la sal cargaron un domo gigante que se expandió hacia el sur, a lo largo de varias decenas de kilómetros.²⁴

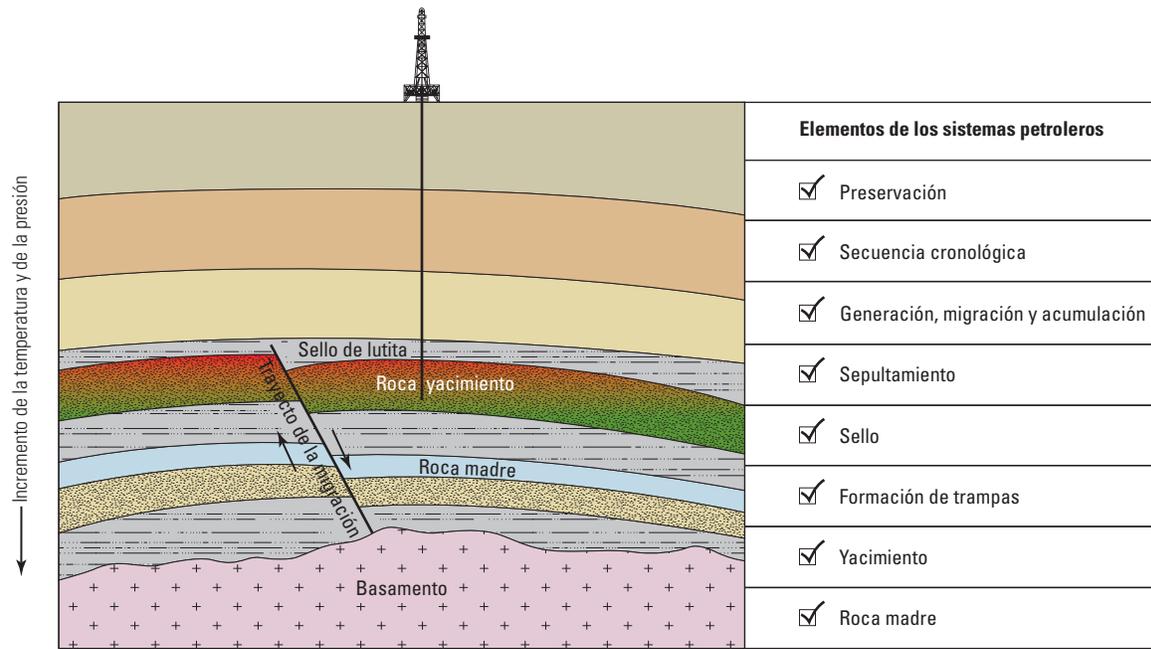
La sal autóctona se expandió a través de todo el Cenozoico, y su alcance lateral se incrementó con el tiempo. El impulsor principal para el fenómeno de expansión de los domos del Neógeno fue un cambio producido en las fuentes de sedimentos



^ Sal Sigsbee. Esta imagen batimétrica del domo salino de Sigsbee en el área marina de Brownsville, en Texas, está proyectada mirando al este, hacia Nueva Orleans. El límite, pendiente abajo, de este domo salino se conoce como Escarpe de Sigsbee. Esta sal autóctona y su techo sedimentario delgado están avanzando hacia el sur por medio de las fallas de cabalgamiento existentes en la base del escarpe. La superficie superior del domo se encuentra salpicada con minicuevas que se hunden en la sal. [Cortesía del Dr. Lincoln Pratson, Universidad de Duke, en Pratson LF y Haxby WF: "What Is the Slope of the U.S. Continental Slope?" *Geology* 24, no.1 (Enero de 1996): 3-6.]

continentales durante el Mioceno Medio, que se desplazaron desde el oeste y el noroeste hacia el margen norte del Golfo.²⁵ Este cambio incrementó la carga sedimentaria en las áreas en las que la sal autóctona seguía siendo de gran espesor. Cuando los mantos salinos someros se deslizaron hacia el sur, empujaron y recubrieron los mantos salinos más pequeños ubicados por delante o bien traslaparon los diapiros pequeños que recibieron el aporte local de la sal autóctona de escaso espesor.

Las claves para comprender cómo se expandieron los domos salinos se encuentran en el Escarpe de Sigsbee, donde una película de sedimentos del Pleistoceno cubre el borde de avance de la sal somera en expansión (arriba). El Escarpe de Sigsbee es la estructura de deformación más grande que afecta el fondo marino en el Golfo de México y la estructura salina expuesta más vasta del mundo. El escarpe alcanza una altura de casi 1,250 m [4,100 pies]. Posee una longitud de círculo máximo de unos 560 km [350 millas] y una longitud sinuosa y sepultada de más de 1,000 km [620 millas].



^ Sistema petrolero. Para evaluar la viabilidad de un sistema petrolero, los geocientíficos deben determinar si existen todos los elementos críticos, tales como roca madre, ruta de migración, roca yacimiento, trampa y sello. Estos elementos deben ser considerados en función de la secuencia cronológica de los procesos claves, incluyendo la generación de hidrocarburos y su expulsión, migración, acumulación y preservación.

Los domos salinos continúan avanzando en nuestros días a lo largo de aproximadamente 60% del escarpe, ocultando gradualmente gran parte de la geología subsalina.

Inicialmente, los mantos salinos se derraman a través del fondo marino como glaciares salinos, y buena parte de la sal soluble se disuelve en el agua de mar. No obstante, la sal en expansión es protegida parcialmente por la arcilla marina profunda que se ha asentado como una película lamosa. Por otro lado, a medida que se disuelven los minerales más solubles de la sal, queda una capa blanda de minerales menos solubles como cubierta de protección que aumenta de espesor. Hoy, los sedimentos sepultan casi todo el Escarpe de Sigsbee, obstaculizando la extrusión de la sal. Por ende, la sal y su techo deben avanzar juntos sobre la planicie abisal, produciendo el fenómeno de corrimiento a lo largo de la base del escarpe. Los sedimentos comprimidos, que se encuentran por delante de la sal en avance, se fracturan en forma neta como una sola falla de cabalgamiento, o bien son demolidos formando un prisma ahusado de superficies de cabalgamiento.

Los mantos salinos más modernos se encuentran ahora en su forma primitiva a lo largo del Escarpe de Sigsbee, al pie del Talud Continental. Avanzando hacia tierra por el Talud, los sedimentos que actúan como cobertura aumentan de espesor.

Esta carga sedimentaria creciente, que se impone sobre los mantos, hace que la sal que se encuentra en su interior sea expulsada inexorablemente hacia el mar.

La sedimentación es significativamente irregular y crea típicamente minicuevas en la parte superior de la superficie de la sal. Algunas minicuevas comienzan como meras lentillas, en la parte superior de los mantos salinos, y luego se profundizan formando cubetas rellenas de sedimentos de 10 a 40 km [6 a 25 millas] de ancho. Una vez que el espesor de las minicuevas supera 1 o 2 millas, su densidad compactada es suficiente para producir su hundimiento, haciendo que la sal diapírica fluya a su alrededor. Otras minicuevas se forman de manera totalmente diferente.

En el Talud inferior, el proceso de compresión inducido por gravedad pliega la película sedimentaria e inicia la formación de las minicuevas. En el Talud intermedio, se han propuesto muchos otros mecanismos.²⁶ El esquema de sedimentación controla dónde es mayor la subsidencia y de ese modo moldea el tope de los domos salinos. Este relieve estructural, a su vez, crea la batimetría local, que constituye la principal influencia con respecto a dónde se desplaza y dónde se acumula el sedimento. Aquí, causa y efecto se confunden porque la tectónica salina y la sedimentación se afectan mutuamente.

El sedimento se abre camino hacia abajo, por el Talud Continental, siguiendo un trayecto sinuoso creado por las minicuevas parcialmente fusionadas, a la vez que evita las flexiones presentes sobre las estructuras salinas. Algunos trayectos terminan en *cul-de-sacs* temporarios o permanentes, donde el sedimento es entrampado en minicuevas. Las minicuevas continúan hundiéndose hasta que toda la sal infrayacente es expulsada lateralmente. En este momento, se forma una estructura salina amalgamada cuando los sedimentos, que antes se encontraban por encima y por debajo de la sal, se agrupan durante su expulsión. Como una embarcación que encalla por la bajamar, una minicueva descansa sobre el sedimento inflexible en lugar de hacerlo sobre la sal móvil desplazada.

Los esquemas de subsidencia de minicuevas, adelgazamiento y aglutinamiento de las estructuras salinas son complejos; sin embargo, en general, se consideran como combinaciones de tres miembros extremos: los sistemas de domos salinos, los sistemas *roho* (término acuñado aproximadamente en 1970, por un geofísico en Shell Oil Co.) y los sistemas contra-regionales escalonados.

- Los sistemas de domos salinos se caracterizan por la presencia de grupos evacuados de diapiros salinos en forma de embudo que se han fusionado.

- Los sistemas *roho* se caracterizan por la presencia de sedimentos estirados que se extienden sobre largas manchas de sal alóctona aglutinada. Un sistema *roho* está compuesto por un grupo de fallas de crecimiento lístricas, que se inclinan hacia la base de la cuenca y sobre un manto o estructura salina aglutinada de carácter alóctono. (Las fallas lístricas son fallas directas (normales) curvas que exhiben un echado decreciente con la profundidad). Las cuñas sedimentarias en los bloques de fallas inclinan y aumentan de espesor en dirección hacia la tierra pero se vuelven más modernas en dirección hacia el mar.
- Los sistemas contra-regionales escalonados se distinguen por la presencia de sedimentos de hundimiento sobre mantos salinos alóctonos cortos y aglutinados. Un sistema contra-regional escalonado está compuesto por una “falla” de crecimiento lístrica primaria, que inclina hacia la tierra, o un diapiro salino inclinado. Esta falla es en realidad una estructura salina aglutinada que inclina hacia la tierra y grada, hacia abajo, a una estructura salina aglutinada plana, y, aún a mayor profundidad, a otra estructura salina aglutinada que inclina hacia la tierra y se arraiga en la capa madre plana. Las cuñas sedimentarias inclinan y aumentan de espesor hacia el mar.

En estas formas variadas, los mantos salinos de gran espesor pueden convertirse en una red tridimensional de cuerpos salinos irregulares parcialmente conectados por manchas delgadas de sal y asociaciones de fallas.

El sistema petrolero

Los análisis previos sobre la tectónica y la deposición ayudan a identificar los elementos clave requeridos para la creación y la acumulación de hidrocarburos. Estos elementos, reconocidos hace mucho tiempo por la industria del petróleo y el gas, han sido codificados para conformar un solo concepto, conocido como sistema petrolero ([página anterior](#)). Un sistema petrolero efectivo comprende los siguientes elementos:

- la roca madre (roca generadora) que contiene materia orgánica de calidad y cantidad suficientes para la generación de hidrocarburos

- la envolvente de temperatura y presión (lograda a través del sepultamiento) adecuada para convertir la materia orgánica en hidrocarburos
- el proceso y el trayecto de migración de los hidrocarburos
- la roca yacimiento con porosidad suficiente para acumular y almacenar hidrocarburos y con permeabilidad suficiente como para producir finalmente los hidrocarburos
- la trampa y el sello para detener el proceso de migración y proveer contención dentro del yacimiento
- la secuencia cronológica que asegure que la formación y la migración de los hidrocarburos se produzca mientras estén presentes la trampa y el sello para retener los hidrocarburos a medida que migran a través del sistema
- la preservación para evitar la destrucción a través de la erosión, la tectónica o la temperatura.

La ausencia de cualquiera de estos elementos condenará la viabilidad de un área prospectiva. Hasta mediados de la década de 1980, la búsqueda de yacimientos, trampas y sellos en la Cuenca del Golfo de México se centró en los estratos que yacían por encima del domo salino. Si bien con cada descubrimiento realizado por encima de la sal se había confirmado la presencia de un sistema petrolero efectivo, no existía ninguna evidencia que indicara que por debajo de la sal se dieran las condiciones requeridas.

Este modo de pensar fue desafiado en 1983, cuando Placid Oil Company perforó un pozo a través de dos mantos salinos delgados, antes de verse obligada a taponarlo y abandonarlo en el tercer cuerpo salino que encontró.²⁷ Si bien el pozo penetró sólo 90 m [295 pies] de sedimento subsalino, sin ninguna indicación de la presencia de zona productiva, atravesó completamente dos mantos; más que diapiros. Esto despertó el interés de otros operadores que ayudaron a crear el marco para la ejecución de operaciones adicionales de perforación por debajo de la sal. Luego, en 1986, Diamond Shamrock penetró 302 m [990 pies] de sal antes de ingresar en una sección arenosa de calidad yacimiento de 305 m [1,000 pies]. Si bien no se encontraron hidrocarburos en este pozo del Bloque 200 de South Marsh Island, los resultados de la perforación confirmaron que por debajo de la sal podía encontrarse una arenisca de porosidad y permeabilidad suficientes. Cuatro años más tarde, Exxon hizo un descubrimiento comercial en un tirante de agua de 1,326 m [4,350 pies] de profundidad en su área prospectiva Mica, en el Bloque 211 del Mississippi Canyon. Exxon perforó este pozo de aguas profundas a través de 1,021 m [3,300 pies] de sal

antes de descubrir un yacimiento respecto del cual se estimaba que contenía entre 100 y 200 millones de bbl [15.9 y 31.8 millones de m³] de petróleo equivalente; demostrando que realmente podía existir un sistema petrolero efectivo por debajo de la sal.²⁸

Hoy, las compañías de E&P poseen un conocimiento mucho más amplio de la región subsalina, gracias en gran medida a los datos y la experiencia obtenidos a través de las operaciones de perforación en aguas profundas y por debajo de la sal, además del mejoramiento de las técnicas de adquisición, procesamiento y generación de imágenes sísmicas.²⁹ Ya no existen dudas acerca del hecho de que todos los elementos del sistema petrolero pueden encontrarse por encima y por debajo de la sal. A través de la exploración de la región subsalina, las compañías de E&P están aprendiendo cómo la sal afecta la estructura y la depositación, y cómo las interacciones entre la sal y los estratos de sobrecarga incidieron en el desarrollo de los sistemas petroleros de la Cuenca del Golfo de México.

Los geocientíficos han llegado a comprender que, a medida que la cuenca evolucionaba y continuaba hundiéndose, el sepultamiento y el calentamiento subsiguiente de las rocas madre ricas en materia orgánica de edad Jurásico—y quizás Cretácico—crearon un sistema excelente para la generación de hidrocarburos. La deformación de la estructura autóctona Louann Salt, en el fondo de la cuenca, por debajo de las rocas madre, y la deformación subsiguiente de la sal que formó estructuras de tipo colchón, diapiros y cuerpos salinos alóctonos, generó numerosas trampas estructurales. Las fallas formadas durante la extensión de la sal y los sedimentos suprayacentes, en muchos casos constituirían conductos para la migración de hidrocarburos hacia las rocas yacimiento potenciales ubicadas por encima. En otros casos, el fallamiento yuxtapuso las arenas permeables contra las lutitas impermeables para crear trampas y sellos. Los sedimentos deltaicos y clásticos turbidíticos de gran espesor crearon rocas yacimiento potenciales de calidad variable durante todo el Terciario; desde areniscas cuarzosas de alta permeabilidad y alta porosidad en las rocas más modernas, hasta areniscas arcólicas menos permeables en las rocas más antiguas. Los estudios de la historia de la cuenca indicaron además la secuencia cronológica favorable de expulsión de fluidos y migración de hidrocarburos. Por consiguiente, el *play* subsalino del norte del Golfo de México parece poseer todos los elementos necesarios para la existencia de un sistema petrolero efectivo.

26. Hudec et al, referencia 18.

27. Moore DC y Brooks RO: “The Evolving Exploration of the Subsalt Play in the Offshore Gulf of Mexico,” *Transcripciones, Asociación de Sociedades Geológicas de la Costa del Golfo* 45 (1995): 7–12.

28. DeLuca M: “Forty-Six Wells Designated Subsalt in the Gulf of Mexico,” *Offshore Magazine* 59, no. 1 (Enero de 1999): 50, 52, 145.

29. Camaro Alfaro J, Corcoran C, Davies K, González Pineda F, Hampson G, Hill D, Howard M, Kapoor J, Moldoveanu N y Kragh E: “Reducción del riesgo exploratorio,” *Oilfield Review* 19, no. 1 (Verano de 2007): 26–43.

Pozos notables del *play* subsalino

Área de prolongación	Número de bloque	Profundidad total		Tirante de agua		Año de perforación	Nombre del campo	Observaciones
		pies	metros	pies	metros			
Ship Shoal	366	8,203	2,500	453	138	1983	—	Pozo seco. Apuntó a un indicador directo de presencia de hidrocarburos (DHI) como objetivo; penetró la sal.
South Marsh Island	200	13,500	4,115	475	145	1986	—	Pozo seco. El objetivo DHI resultó ser sal; no obstante, por debajo del mismo yacían 305 m [1,000 pies] de arena húmeda de calidad yacimiento.
Mississippi Canyon	211	12,763	3,890	4,356	1,328	1990	Mica	Primera muestra significativa de hidrocarburos en cinco zonas productivas delgadas, ubicadas debajo de la sal.
Ship Shoal	349	16,563	5,048	372	113	1993	Mahogany	Puesto en producción antes que Mica. Se convirtió en el primer desarrollo comercial del <i>play</i> subsalino del Golfo de México.
Garden Banks	128	18,454	5,625	705	215	1994	Enchilada	Descubrimiento de estructura salina amalgamada.
Garden Banks	127	14,730	4,490	630	192	1995	Chimichanga	Segundo descubrimiento subsalino comercial; se perforaron 396 m [1,300 pies] de sal. En las pruebas produjo 2,100 bbl/d [334 m ³ /d] de petróleo y 20 MMpc/d [566,337 m ³ /d] de gas.
Mississippi Canyon	292	17,976	5,479	3,405	1,038	1995	Gemini	Tercer descubrimiento comercial del <i>play</i> , en las arenas del Plioceno-Mioceno.
Green Canyon	699	19,525	5,951	6,133	1,869	1998	Atlantis	Instalación flotante amarrada de producción de petróleo y gas más profunda del mundo y además una de las más grandes.
Grand Isle	116	21,600	6,584	323	98	1998	Hickory	Penetró 2,438 m [8,000 pies] de sal.
Eugene Island	346	11,833	3,607	314	96	1998	Tanzanite	En las pruebas el primer pozo produjo 1,917 bbl/d [305 m ³ /d] de petróleo y 29.7 MMpc/d [841,100 m ³ /d] de gas, uno de los regímenes de producción más altos del área de aguas someras del Golfo de México.
Mississippi Canyon	778	23,531	7,172	6,050	1,844	1999	Thunder Horse	El campo más grande del Golfo de México.
Garden Banks	783	16,867	5,141	4,668	1,423	1999	Magnolia	Plataforma de cables tensados (TLP) instalada a un tirante de agua (profundidad del lecho marino) récord para las plataformas TLP.
Green Canyon	562	25,624	7,810	3,979	1,213	1999	K2	Penetró 3,048 m [10,000 pies] de un domo salino de la tendencia de plegamiento de edad Mioceno.
Green Canyon	782	22,826	6,957	4,420	1,347	2001	Mad Dog	91 m [300 pies] de zona productiva neta descubierta en el cinturón plegado del abanico del Mississippi.
Garden Banks	877	23,500	7,163	5,300	1,615	2001	Redhawk	Produjo desde la primera instalación con una pértiga armada (<i>truss spar</i>) del mundo.
Green Canyon	640	26,804	8,170	4,017	1,224	2002	Tahiti	Trampa de edad Mioceno Medio debajo de un domo salino de 3,353 m [11,000 pies].
Walker Ridge	678	29,066	8,859	7,036	2,145	2003	St. Malo	Primer pozo subsalino de la tendencia Wilcox que penetró 3,048 m [10,000 pies] del domo salino de Sigsbee, con 137 m [450 pies] de zona productiva neta.
Walker Ridge	759	28,175	8,588	6,850	2,088	2004	Jack	Prueba de Wilcox: la prueba de formación extendida efectuada a través de la columna de perforación (DST) colocada a mayor profundidad en la historia de aguas profundas del Golfo de México.
Keathley Canyon	292	32,500	9,906	5,860	1,786	2006	Kaskida	Primer pozo exploratorio subsalino del área de Wilcox perforado dentro del Escarpe de Sigsbee, en la frontera norte de las áreas prospectivas de Wilcox. Encontró 244 m [800 pies] de zona productiva neta.
Green Canyon	726	25,680	7,827	4,700	1,433	2007	West Tonga	Descubrió 107 m [350 pies] de espesor neto en tres arenas petrolíferas del Mioceno.

^ Pozos subsalinos. Los pozos destacados que se perforaron por debajo de la sal alóctona muestran un rango de tirantes de agua y objetivos. (Compilado a partir de comunicados de prensa y del Servicio de Administración de Minerales del Departamento del Interior de EUA, referencia 31.)

La revolución en el Golfo

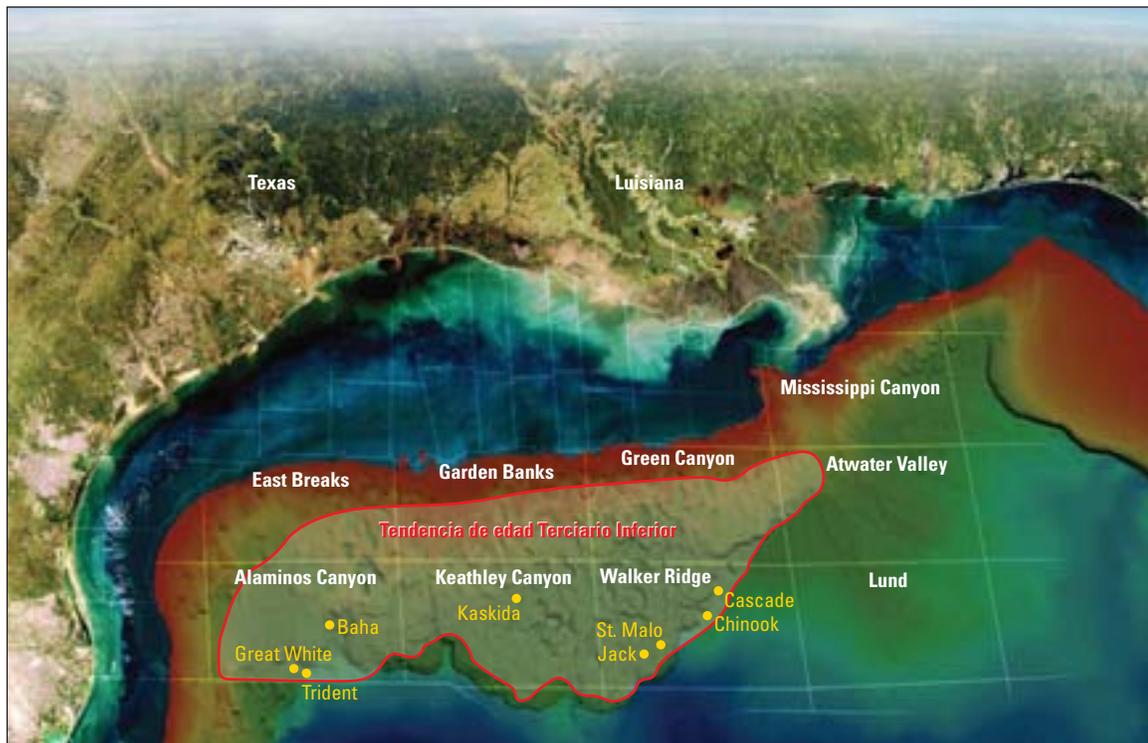
Durante los primeros 40 años de perforación en el Golfo de México, no era inusual que los perforadores no alcanzaran la profundidad prevista una vez que encontraban sal. Estos encuentros eran impredecibles; la cobertura sísmica a menudo era escasa, y no era inusual que se perforaran pozos exploratorios exclusivamente sobre la base de unas pocas líneas de datos sísmicos 2D. Por otro lado, la cobertura insuficiente y las técnicas de procesamiento iniciales a veces llevaban a los operadores a apuntar como objetivos a estructuras sísmicas o anomalías sísmicas (puntos brillantes),

conocidas como indicadores directos de presencia de hidrocarburos (DHI). No obstante, estos objetivos sísmicos a veces resultaban corresponder al tope de la sal. Habiendo perforado hasta la profundidad prevista sin encontrar ninguna zona productiva, salvo su propia barrena en la sal, la mayoría de los operadores se resistían a continuar la perforación.

Un supuesto objetivo DHI ayudó a iniciar la tendencia subsalina en la porción norte del Golfo de México. El Pozo No. 2 de Placid Oil Company, situado en el Bloque 366 de Ship Shoal, fue

perforado hasta un objetivo DHI que en cambio encontró tres cuerpos salinos antes de ser tapado y abandonado.³⁰ Muchos otros pozos subsalinos perforados en las décadas de 1980 y 1990, también encontraron sal mientras buscaban indicadores DHI.

En los 20 años posteriores a la perforación del pozo seco de Ship Shoal, se perforaron más de 140 pozos subsalinos en el Golfo de México.³¹ Si bien algunos no fueron comerciales, muchos se destacaron en su momento por extender la tendencia y establecer récords ([arriba](#)).



^ La tendencia del Terciario Inferior. En busca de los objetivos del Terciario Inferior, los operadores se han desplazado más lejos de la Plataforma Continental, hacia aguas sustancialmente más profundas. (Modificado de Richardson GE, Nixon LD, Bohannon CM, Kazanis EG, Montgomery TM y Gravois MP: "Deepwater Gulf of Mexico 2008: America's Offshore Energy Future, OCS Report MMS 2008-013." Nueva Orleans: Servicio de Administración de Minerales del Departamento del Interior de EUA, Región OCS de Golfo de México, 2008.)

De estos pozos, sólo 50 fueron perforados en las aguas relativamente someras de la Plataforma Continental Externa; sus tirantes de agua oscilaban entre 28 y 171 m [93 y 560 pies]. Los demás pozos fueron perforados en el Talud Continental, en tirantes de agua que variaban de 192 a 2,260 m [630 a 7,416 pies]. No hubo ningún desplazamiento gradual y deliberado de las aguas someras a las aguas más profundas; en el año siguiente a la perforación del pozo seco en el Bloque 366 de Ship Shoal, Placid perforó otro pozo subsalino en un tirante de agua de 610 m [2,004 pies].³²

Las campañas de perforación por debajo de la sal, de las décadas de 1980 y 1990, apuntaron principalmente como objetivos a los depósitos turbidíticos de edad Plioceno, con algunas arenas de edad Pleistoceno y Mioceno.³³ No obstante, hoy en día, en una cuenca donde el 99% de las reservas comprobadas de petróleo son producidas de formaciones de edad Mioceno o más modernas, la tendencia subsalina del Golfo de México está siendo rejuvenecida a partir de los descubrimientos de aguas profundas y ultraprofundas, en arenas mucho más antiguas de edad Eoceno y Paleoceno (arriba). Los descubrimientos realizados en los sistemas de canales turbidíticos y abanicos, el equivalente en términos de cuencas

profundas de los depósitos terrestres de la Formación Wilcox en Texas y Luisiana, están ayudando a extender el *play* subsalino. Estos yacimientos turbidíticos han sido descubiertos a más de 400 km [250 millas] echado abajo de los sistemas deltaicos de la Formación Wilcox.³⁴

Esta tendencia de aguas profundas de la Formación Wilcox yace en tirantes de agua de 1,200 a 3,050 m [4,000 a 10,000 pies] y se cree que cubre unos 77,670 km² [30,000 millas²]. Algunas áreas prospectivas se encuentran por debajo de domos salinos cuyo espesor oscila entre 2,130 y 6,100 m [7,000 y 20,000 pies]. No obstante, es interesante observar que los primeros descubrimientos realizados en esta tendencia nunca penetraron estructuras salinas. Al principio, los operadores trataban de evitar la sal desplazándose a aguas más profundas para perforar esquivando la sal. Allí, la generación de imágenes sísmicas no era distorsionada por la presencia de sal y los perforadores sólo tenían que luchar con los desafíos conocidos que se asocian con las operaciones de perforación en aguas profundas. No obstante, una vez que establecieron la viabilidad de esta tendencia Wilcox de aguas profundas, los equipos de exploración comenzaron a ir en busca de sus áreas prospectivas echado arriba, por debajo de la sal, lo que se tra-

dujo en descubrimientos tales como los campos St. Malo y Jack.

El *play* Wilcox de edad Terciario Inferior fue iniciado por el segundo pozo de Baha, perforado en el Bloque 557 del Alaminos Canyon, un área prospectiva que originalmente apuntó a los carbonatos fracturados de edad Mesozoico como objetivo. En 1996, los problemas de perforación obligaron a abandonar el Pozo No. 1 antes de que alcanzara la profundidad total, pero el pozo encontró efectivamente 4.6 m [15 pies] de zona productiva en una arena de edad Eoceno Superior, lo que sugirió que a mayor profundidad en la estructura podía existir un sistema petrolero viable y quizás un descubrimiento comercial. En el año 2001, el

30. Moore y Brooks, referencia 27.

31. Tabla de Pozos Subsalmos del Servicio de Administración de Minerales (MMS), Departamento del Interior de EUA, http://www.gomr.mms.gov/homepg/offshore/gulfocs/subsalt/data/Subsalt_Wells.xls (Se accedió el 11 de agosto de 2008).

32. MMS, referencia 31.

33. Moore y Brooks, referencia 27.

34. Lewis J, Clinch S, Meyer D, Richards M, Skirius C, Stokes R y Zarra L: "Exploration and Appraisal Challenges in the Gulf of Mexico Deep-Water Wilcox: Part 1—Exploration Overview, Reservoir Quality, and Seismic Imaging," en Kennan L, Pindell J y Rosen NC (ediciones): *Actas, 27a Conferencia Anual de Investigación Bob F. Perkins de la Fundación SEPM de la Sección de la Costa del Golfo* (2007): 398-414.



^ Preparación para la prueba. El Pozo Jack 2, perforado con la embarcación de perforación *Discoverer Deep Seas*, fue entubado y suspendido antes de que el equipo de perforación semisumergible *Cajun Express* fuera transportado a la localización del pozo para efectuar una prueba de pozo de largo alcance. También se llevaron barcasas a la localización del pozo para recolectar los fluidos producidos en la prueba.

Pozo No. 2 de Baha fue perforado con éxito hasta 5,841 m [19,164 pies] y mostró que los carbonatos Mesozoicos originales no eran porosos. Si bien este pozo seco encontró sólo 3.7 m [12 pies] de petróleo, en una arena de edad Eoceno, también identificó posibles arenas de calidad yacimiento contenidas en más de 1,219 m [4,000 pies] de una sección turbidítica de la Formación Wilcox.³⁵

Poco tiempo después, los pozos ubicados al sur de Baha, tales como el área prospectiva Trident (Bloque 903 del Alaminos Canyon) y el área prospectiva Great White (Bloque 857 del Alaminos Canyon), descubrieron arenas productivas Wilcox en el cinturón plegado Perdido del sector occidental del Golfo de México. Las operaciones de perforación subsiguientes, llevadas a cabo al este, condujeron a los descubrimientos, en la

Formación Wilcox, de las áreas prospectivas Cascade, Chinook, St. Malo y Jack en el área Walker Ridge. El descubrimiento del Campo Kaskida y de los pozos no comerciales Sardinia y Hadrian, en el Keathley Canyon, ayudó a reducir la brecha existente entre el oeste y el este. Los datos de estos pozos permitieron a los geólogos inferir que las arenas Wilcox se extienden más de 480 km [300 millas] a través de la Cuenca del Golfo de México. Para el año 2007, al menos 20 pozos exploratorios habían sido perforados en esta tendencia, lo que se tradujo en 12 descubrimientos. Las reservas recuperables estimadas para cada descubrimiento se encontraban entre 40 y 500 millones de bbl [6.4 y 79.5 millones de m³] de petróleo.³⁶

El descubrimiento de St. Malo, en el Bloque 678 de Walker Ridge, se distingue como el primer pozo

que alcanzó las arenas Wilcox por debajo de la sal alóctona. Otro pozo subsalino del área de Wilcox fue perforado en el Bloque 759 de Walker Ridge; el descubrimiento tan anunciado del Campo Jack.³⁷ Un segundo pozo fue perforado para evaluar la estructura. Este pozo—el único de la estructura Wilcox subsalina ensayado—arrojó resultados alentadores: según lo reportado, el Pozo Jack produjo durante 23 días con un régimen sostenido de 6,000 bbl/d [953 m³/d] de petróleo durante la prueba del 40% del intervalo productivo neto total (arriba). Al noroeste, el pozo Kaskida marca la frontera septentrional extrema de los descubrimientos subsalinos Wilcox realizados hasta la fecha y se encuentra ubicado a mayor distancia del margen del Escarpe de Sigsbee que otros pozos de esta tendencia.

35. Lewis et al, referencia 34.

36. Lewis et al, referencia 34.

37. Para obtener más información sobre el programa de pruebas para el descubrimiento del Campo Jack, consulte: Aghar H, Carie M, Elshahawi H, Gomez JR, Saeedi J, Young C, Pinguet B, Swainson K, Takla E y Theuveny B: "Nuevos alcances en pruebas de pozos," *Oilfield Review* 19, no. 1 (Verano de 2007): 44–59.

38. Camaro Alfaro et al, referencia 29.

Las reflexiones múltiples, conocidas comúnmente como múltiples, son causadas por la energía sísmica que se

repite cuando es reflejada más de una vez desde un límite. Las múltiples a menudo complican los intentos para discernir la imagen del subsuelo, y se invierte mucho esfuerzo en el procesamiento de los datos sísmicos cuando se trata de diferenciar la energía primaria de la energía de las múltiples para luego eliminar las reflexiones múltiples.

39. Hudec MR y Jackson MPA: "Advance of Allochthonous Salt Sheets in Passive Margins and Orogens," *AAPG Bulletin* 90, no. 10 (Octubre de 2006): 1535–1564.

40. Hudec y Jackson, referencia 39.

41. Mukhopadhyay PK, Harvey PJ y Kendall K: "Genetic Relationship Between Salt Mobilization and Petroleum System Parameters: Possible Solution of Finding Commercial Oil and Gas Within Offshore Nova Scotia, Canada, During the Next Phase of Deep-Water Exploration," *Transcripciones*, Asociación de Sociedades Geológicas de la Costa del Golfo 56 (2006): 627–638.

42. Lowrie A y Kozlov E: "Similarities and Differences in Salt Tectonics Between the Precaspian Basin, Russia, and the Northern Gulf of Mexico, USA," *Transcripciones*, Asociación de Sociedades Geológicas de la Costa del Golfo 54 (2004): 393–407.

¿Cuántas tendencias y campos más serán descubiertos con el tiempo por debajo de la extensión del domo salino de Sigsbee? Alguna vez obstaculizada por la obtención de imágenes pobres, la exploración subsalina ha extraído provecho de los procedimientos revolucionarios de medición de las propiedades de las formaciones profundas. Las nuevas técnicas de adquisición de datos sísmicos, junto con los modelos de velocidad y los algoritmos de migración más precisos, están ayudando a resolver el desafío que plantea la generación de imágenes por debajo de la sal. En particular, las técnicas de levantamientos sísmicos de cobertura azimutal amplia y cobertura azimutal rica obtienen relaciones señal-ruido mejoradas en ambientes geológicos subsalinos complejos y proveen la atenuación natural de ciertos tipos de señales que causan reflexiones múltiples.³⁸ El sistema Q-Marine capitaliza las frecuencias bajas, menos atenuadas, para generar mejores imágenes del subsuelo. Además, provee arreglos de fuentes calibradas, grandes y direccionales, para un mejor registro de la energía subsalina, con un sensor unitario, tendiente a mejorar el muestreo y la atenuación del ruido, y la capacidad para registrar durante los virajes en que la embarcación adopta un rumbo diferente.

Con la ayuda de las tecnologías no sísmicas complementarias, que miden las diferentes propiedades del terreno subterráneo, los geocientíficos e ingenieros están construyendo modelos más globales para ayudar a las compañías de E&P a determinar la viabilidad de un área prospectiva e identificar los riesgos de perforación antes de movilizar un equipo de perforación a la localización. Además de los datos sísmicos, los geocientíficos están recurriendo a los levantamientos magnetotéluricos, gravimétricos y electromagnéticos marinos. Estos levantamientos han avanzado mucho más allá de la primera o la segunda generación, y todos son adquiridos utilizando embarcaciones para levantamientos marinos.

Se han utilizado tecnologías complementarias para mejorar la delineación de las áreas prospectivas situadas por encima de la sal, donde los datos provistos por los levantamientos magnetotéluricos marinos ayudan a ajustar el procesamiento sísmico a través de la identificación y la medición de la profundidad y el espesor de los estratos resistivos, y el pronóstico de las propiedades de los fluidos de yacimiento. Las estructuras del subsuelo también pueden ser identificadas mediante la combinación de levantamientos gravimétricos, levantamientos de perfiles del fondo oceánico y datos sísmicos 3D

para destacar los domos salinos y los rasgos deposicionales, tales como los canales sepultados ricos en contenido de arena. Los levantamientos con fuente electromagnética controlada (CSEM) identifican los resistores del subsuelo y pueden integrarse con los levantamientos sísmicos para proporcionar una imagen más completa de las trampas de hidrocarburos. Después de la operación de perforación, se pueden correr levantamientos sísmicos utilizando la técnica de repetición (técnica de lapsos de tiempo) para rastrear la producción y evaluar la eficiencia de barrido del yacimiento. Reconociendo el valor de dichas técnicas complementarias en las aplicaciones suprasalinas, los geocientíficos ahora están tratando de adaptarlas al régimen subsalino.

Estos avances ayudarán a los geocientíficos a generar imágenes de las nuevas áreas prospectivas y, a su vez, incentivarán nuevos desarrollos en las tecnologías de perforación, adquisición de registros y producción. La tendencia de edad Terciario Inferior, una nueva faceta del *play* subsalino, es justamente la última ola de rejuvenecimiento que barrerá el Golfo de México. De este modo, la actividad de exploración continúa evolucionando conforme los avances tecnológicos revelan nuevos objetivos y abren más fronteras en una provincia de perforación supuestamente madura.

Con el impulso de la sal

Las tecnologías desarrolladas para explorar la provincia subsalina del área de aguas profundas del Golfo de México, sumadas a la experiencia adquirida en el proceso, serán de utilidad para el desarrollo de los *plays* subsalinos futuros. Después de todo, el Golfo de México es sólo una de las 35 cuencas del mundo que contienen cuerpos salinos alóctonos.³⁹ Estos cuerpos salinos pueden encontrarse en el área marina de Angola, Brasil, Canadá, Madagascar, México, Marruecos y Yemen. Algunas cuencas comparten similitudes notables con otras cuencas del mundo.

Por ejemplo, se observa una analogía estrecha del Escarpe de Sigsbee en la Cuenca Kwanza de aguas ultraprofundas, frente a la costa de Angola. El Escarpe de Angola posee una longitud de aproximadamente 1,100 km [685 millas] y marca el límite, en dirección hacia el mar, de una franja salina alóctona, si bien la franja exhibe típicamente menos de 20 km [12 millas] de ancho.⁴⁰ La Cuenca de Scotia, frente a la costa de Nueva Escocia, en Canadá, también posee semejanzas, tales como la depositación turbidítica de edad

Cretácico y Terciario, junto con las trampas controladas por el movimiento lateral y vertical de la sal Triásica-Jurásica.⁴¹

No todos los cuerpos salinos se encuentran en aguas marinas; algunos están alojados en cinturones orogénicos que marcan episodios de orogénesis, o se encuentran de otro modo rodeados de tierra. Estos cuerpos salinos pueden observarse en Argelia, Canadá, Colombia, Alemania, Irán, Kazajistán, Perú, España y Ucrania. De modo que, si bien la sal de la Cuenca del Golfo de México ha sido explorada con barrenas de perforación y embarcaciones sísmicas, la sal de las cadenas montañosas se ha estudiado extensivamente en afloramientos y se ha explorado en forma práctica. Los geocientíficos están reconociendo las semejanzas de cada caso y los estudios de las estructuras salinas en el campo proveen conocimientos acerca de las estructuras que se encuentran por debajo del mar.

Se han hecho comparaciones entre la Cuenca del Golfo de México y la Cuenca Precaspiense de Kazajistán y Rusia.⁴² La Cuenca Precaspiense se formó en el período Pérmico como resultado de la orogenia Uraliana. Más allá de las diferencias de edades, las dos cuencas experimentaron un proceso rápido de depositación de sal y fueron dominadas por una fuente de sedimentación principal (los ríos Mississippi y Volga). Ambas exhiben además extensiones laterales de la sal que penetran mantos salinos alóctonos. El reconocimiento de las diferencias existentes entre las cuencas también es útil, como sucede con el *play* presalino de Brasil. En la Cuenca de Santos, intervienen diferentes procesos. En dicha cuenca, los descubrimientos grandes logrados en yacimientos carbonatados se encuentran ubicados por debajo de estructuras salinas autóctonas y no son afectados estructural y estratigráficamente por la tectónica salina.

La identificación de dichas semejanzas o diferencias ayuda a las compañías de E&P a reconocer la presencia de características en una cuenca que pueden señalar rasgos correspondientes, aunque previamente no descubiertos, en cuencas análogas. Por consiguiente, los afloramientos explorados intensamente—tales como los glaciares salinos de Irán—o las cuencas exploradas extensivamente—tales como la Cuenca del Golfo de México, la Cuenca Precaspiense o la Cuenca de África Occidental—se complementan entre sí para ayudar a revelar los hidrocarburos potenciales en otras cuencas del mundo. —MV