

# Menor incertidumbre con el análisis de fallas que actúan como sello

Los yacimientos de petróleo y gas de formaciones siliciclásticas falladas son difíciles de explotar. Mediante la integración de datos sísmicos, información detallada de núcleos y datos de pozos y de producción, los geocientíficos ahora pueden modelar el comportamiento de las fallas e incorporar los resultados en simuladores de flujo de fluido de yacimientos. Este proceso integrado mejora la predicción del comportamiento de las fallas y reduce la incertidumbre y el riesgo asociados con la presencia de trampas complejas.

**Kip Cerveny**  
*BP Alaska*  
*Anchorage, Alaska, EUA*

**Russell Davies**  
*Rock Deformation Research (RDR) USA Inc.*  
*Dallas, Texas, EUA*

**Graham Dudley**  
**Richard Fox**  
*BP*  
*Aberdeen, Escocia*

**Peter Kaufman**  
*Cambridge, Massachusetts, EUA*

**Rob Knipe**  
*Rock Deformation Research Ltd.*  
*Universidad de Leeds*  
*Leeds, Inglaterra*

**Bob Krantz**  
*ConocoPhillips*  
*Houston, Texas*

---

Por su colaboración en la preparación de este artículo, se agradece a Karen Dawe, Asociación Geológica de Canadá, St. John's, Terranova, Canadá; Jayne Harnett, RDR, Leeds, Inglaterra; y David McCormick, Cambridge, Massachusetts, EUA.

FMI (herramienta de generación de Imágenes Microeléctricas de Cobertura Total), MDT (Probador Modular de la Dinámica de la Formación, OBMI (herramienta de generación de Imágenes Microeléctricas en Lodos Base Aceite), Petrel y RFT (Probador de Formación a Repetición) son marcas de Schlumberger.

Una falla puede ser un transmisor o una barrera para el flujo de fluido y la comunicación de la presión. La categorización del comportamiento de las fallas dentro de estos extremos es importante para la perforación, exploración y desarrollo de hidrocarburos. Los modernos métodos de análisis de fallas que actúan como sello utilizan datos sísmicos, información estructural y microestructural del análisis de núcleos de alta resolución, y datos de pozos y de producción para predecir el comportamiento de las fallas y reducir la incertidumbre y el riesgo asociados con la explotación de yacimientos siliciclásticos fallados.

Las fallas que actúan como sello pueden constituir un control primario sobre la trampa en muchos yacimientos de hidrocarburos pero también pueden transformar un yacimiento relativamente grande y continuo en compartimentos que luego se comportan como un grupo de yacimientos más pequeños. Cada compartimento puede tener sus propias características de presión y fluido, lo que obstaculiza el desarrollo eficaz y efectivo de los campos petroleros y la subsiguiente recuperación de hidrocarburos.

Las fallas que no forman sellos pueden impedir que se acumulen el petróleo y el gas en tanto los hidrocarburos se forman y migran a través de las estructuras presentes en el subsuelo. Las fallas abiertas y permeables de un yacimiento establecido también pueden causar problemas de pérdida de circulación graves durante las ope-

raciones de perforación. La pérdida de lodo de perforación puede resultar cara y peligrosa e incluso conducir al abandono de los pozos. Independientemente de que sean perjudiciales o beneficiosas, las fallas y su comportamiento deben ser comprendidos por los geólogos y los ingenieros para poder explorar y extraer las reservas de hidrocarburos en forma exitosa.

Los desarrollos registrados recientemente en materia de predicción de sellos por fallas se han concentrado en dos aspectos independientes, aunque interrelacionados, de la formación de fallas: la arquitectura de las fallas y las propiedades de las rocas de falla. La arquitectura de las fallas se refiere a la forma, tamaño, orientación e interconectividad de las mismas. Además comprende la distribución del desplazamiento general de las fallas que forman subfallas múltiples. La longitud de las fallas horizontales puede oscilar entre unos pocos milímetros, en el caso de las microfallas, hasta cientos de kilómetros. Por ejemplo, la falla de San Andrés en California, EUA, tiene más de 1,290 km [800 millas] de longitud. Los estudios detallados de núcleos y del subsuelo han demostrado que las fallas más largas normalmente comprenden fallas más cortas interconectadas. Los agrupamientos de fallas forman una zona de daño por fallas o un halo interconectado de fallas en un rango de escalas que puede tener un impacto acumulativo significativo sobre el comportamiento de los yacimientos. El desplazamiento de los segmen-



tos de fallas primarias y secundarias dentro del yacimiento se yuxtaponen al yacimiento a lo largo de la falla contra litologías disímiles, lo que puede impactar el flujo de fluido.

Las propiedades de las rocas que se encuentran dentro de las zonas de falla afectan la

capacidad de sello de una falla. Estas propiedades a su vez se ven afectadas por las facies locales, los tipos y saturaciones de los fluidos de yacimiento, las diferencias de presión registradas a lo largo de las fallas, las arquitecturas de las zonas de falla, las historias de sepultamiento

y fallamiento, y la yuxtaposición de las litologías a través de las fallas.<sup>1</sup> Además, los cambios de presión y fase de los fluidos producidos durante el desarrollo del yacimiento agravan la complejidad del análisis del comportamiento de los sellos por fallas.<sup>2</sup>

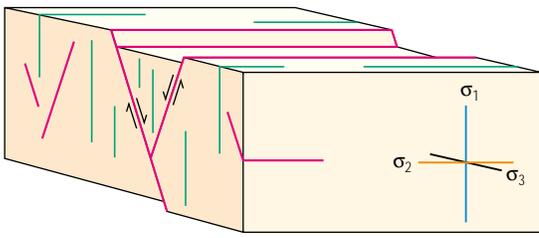
1. Las designaciones de las facies representan las características generales de una unidad de roca y reflejan su origen y diferencian la unidad de otras unidades adyacentes. Las facies se distinguen entre sí por la mineralogía y la fuente sedimentaria, el contenido en fósiles, las estructuras sedimentarias y la textura.

2. Davies RK y Handschy JW: "Introduction to AAPG Bulletin Thematic Issue on Fault Seals," *Boletín de la Asociación Americana de Geólogos de Petróleo* 87, no. 3 (Marzo de 2003): 377–380.  
Yielding G, Øverland JA y Byberg G: "Characterization of Fault Zones for Reservoir Modeling: An Example from the Gullfaks Field, Northern North Sea," *Boletín de la*

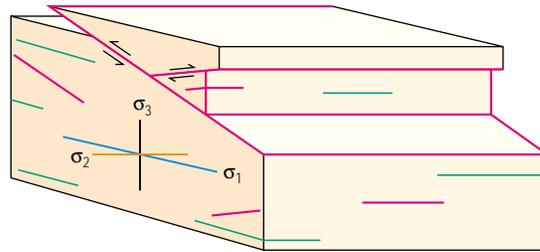
*Asociación Americana de Geólogos de Petróleo* 83, no. 6 (Junio de 1999): 925–951.

Jev BI, Kaars-Sijpesteijn CH, Peters MPAM, Watts NL y Wilkie JT: "Akaso Field, Nigeria: Use of Integrated 3-D Seismic, Fault Slicing, Clay Smearing and RFT Pressure Data on Fault Trapping and Dynamic Leakage," *Boletín de la Asociación Americana de Geólogos de Petróleo* 77, no. 8 (Agosto de 1993): 1389–1404.

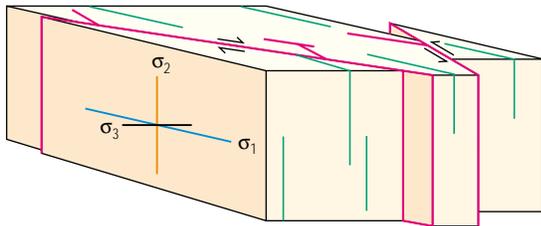
Régimen de esfuerzo relacionado con fallas normales



Régimen de esfuerzo relacionado con fallas inversas



Régimen de esfuerzo relacionado con fallas de desplazamiento



^ Relación de los tipos de fallas con la orientación de los esfuerzos. La teoría Andersoniana explica los tres tipos de fallas principales relacionados con la orientación del esfuerzo principal. Éstos son el tipo de fallas normales, en las que  $\sigma_1$ , el esfuerzo local más grande es vertical (*extremo superior*); el tipo de fallas inversas, en las que  $\sigma_1$  es horizontal y  $\sigma_3$ , el esfuerzo local más pequeño, es vertical (*centro*); y el tipo de fallas de desplazamiento en las que tanto  $\sigma_1$  como  $\sigma_3$  son horizontales (*extremo inferior*).

Los métodos modernos de análisis de sellos por fallas mejoran la predicción del comportamiento de las fallas en el subsuelo y reducen la incertidumbre asociada con la explotación de yacimientos siliciclásticos fallados. Este artículo sintetiza los métodos de predicción de sellos por fallas y las incertidumbres asociadas. Una breve introducción a la teoría de fallas básica ayuda a definir las causas, tipos y características fundamentales de las fallas antes de presentar una caracterización más detallada del comportamiento y predicción de los sellos por fallas. Además se examinan las tecnologías de campos petroleros utilizadas para medir y predecir las características de las fallas. Algunos ejemplos de campo de Hibernia, Terranova, Canadá, y la Bahía de Prudhoe, Alaska, EUA, demuestran cómo una mejor comprensión de la formación de sellos por fallas mejora la simulación y el desarrollo de los yacimientos clásticos, reduciendo en consecuencia la incertidumbre y el riesgo asociados.

### Mecánica, arquitectura y propiedades básicas de las fallas

Cuando las rocas o las capas de rocas son sometidas a esfuerzos tectónicos, se curvan o se rompen o experimentan ambos fenómenos al mismo tiempo. En su forma más simple, una falla es una discontinuidad laminar, o una superficie de ruptura, generada en la roca a través de la cual se produce un desplazamiento o deslizamiento observable. La contracción y la extensión inducen la ruptura por cizalladura en las rocas. La dirección de los esfuerzos principales determina la orientación del plano de ruptura o de la falla. La resistencia de la roca controla la magnitud del esfuerzo de corte necesario para romper la roca.

Aunque excesivamente simplificada, la teoría Andersoniana de formación de fallas, desarrollada por el geólogo E.M. Anderson en el año 1951, sigue siendo ampliamente utilizada como base para describir los fundamentos de la orientación de las fallas según la discontinuidad.<sup>3</sup>

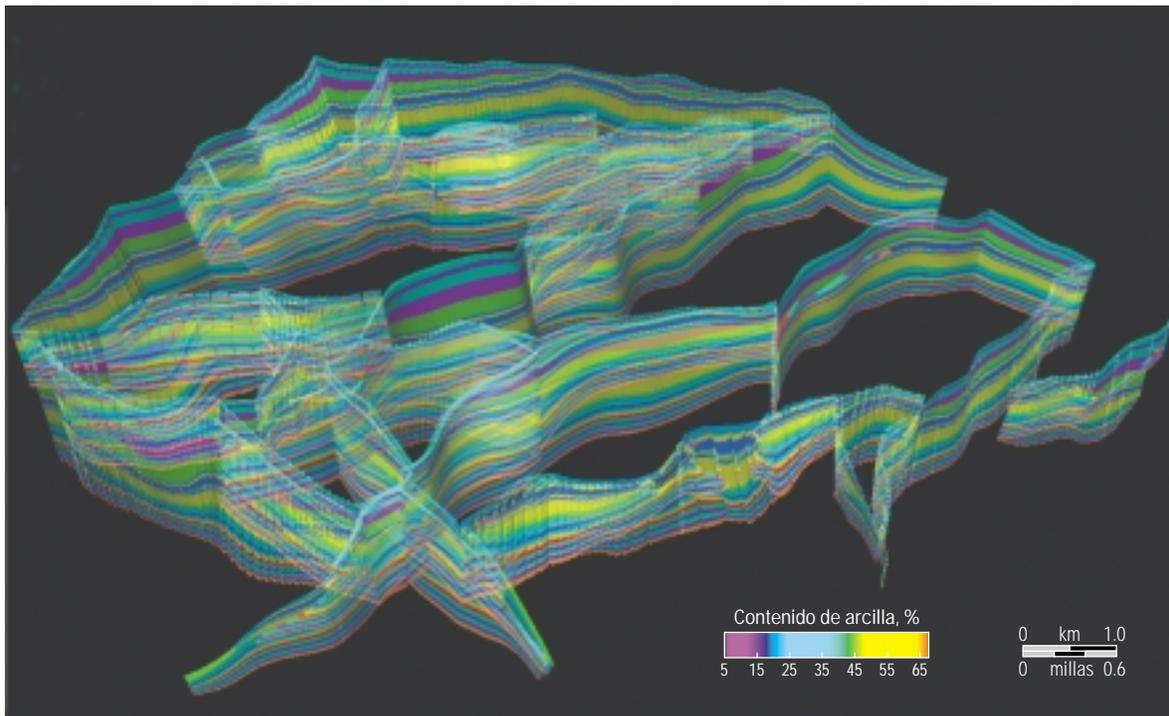
Anderson describió tres tipos de fallas básicas—normal, inversa y de desplazamiento—relativos a las orientaciones de los esfuerzos regionales máximos. Esta teoría asume que uno de los esfuerzos principales— $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  o  $\sigma_3$  en orden de magnitud decreciente—o la carga litostática, es siempre vertical, y que los otros esfuerzos son ortogonales y horizontales. Según esta teoría las fallas se forman como dos planos conjugados con las tres relaciones siguientes entre la orientación de las fallas y los esfuerzos principales:

- las fallas se forman con un ángulo de  $\pm 30^\circ$  respecto de la dirección  $\sigma_1$
- las fallas se forman con un ángulo de  $\pm 60^\circ$  respecto de la dirección  $\sigma_3$
- la línea formada por la intersección de los planos de fallas conjugados será paralela a  $\sigma_2$

Estas relaciones son significativas porque si los geólogos conocen las direcciones de los esfuerzos principales, pueden predecir las orientaciones de las fallas. Si además se conocen las magnitudes relativas de los esfuerzos principales, los geólogos pueden predecir los tipos de fallas (*izquierda*).

No obstante, a escala del mapa sísmico, las fallas raramente son laminares debido a las perturbaciones del campo de esfuerzos causadas por las heterogeneidades y la anisotropía de las rocas. Más comúnmente, las fallas están compuestas de segmentos independientes con extremos característicos definidos por líneas de desplazamiento cero. Los enlaces pueden producirse como enlaces completos donde los extremos de las fallas se conectan o como enlaces incompletos donde la geometría de los extremos de las fallas es afectada por una falla adyacente que carece de una conexión física.<sup>4</sup> El desplazamiento de la estratigrafía a través de una falla varía en forma sistemática, pasando de un desplazamiento cero en los extremos de la falla a un desplazamiento máximo cerca del centro de la falla. Las anomalías presentes en la distribución sistemática del rechazo vertical reflejan las complejidades en la litología y en los segmentos de fallas adyacentes.<sup>5</sup> Las complejidades de las fallas impiden una interpretación simple de su orientación, geometría y arquitectura.

Un paso fundamental en la evaluación del comportamiento de las fallas y de las propiedades de sello es el mapeo de las fallas y la construcción de mapas del rechazo sobre el plano de falla y la yuxtaposición a escala sísmica (*próxima página*).<sup>6</sup> No obstante, los límites de la resolución sísmica introducen incertidumbre en lo que respecta al rechazo vertical mapeado a través de la falla y no permiten el mapeo de las



^ Interpretación de fallas a partir de datos sísmicos y modelado mediante la utilización de herramientas de computación. La arquitectura de fallas complejas en los escenarios de exploración y desarrollo puede hacerse más comprensible con la utilización de programas poderosos de mapeo y generación de imágenes tales como la aplicación de las herramientas de secuencias de tareas Petrel. En este ejemplo, los intervalos estratigráficos codificados en color, en la pared colgante (techo) y la pared de base (yacente), se juxtaponen contra las superficies de falla modeladas, en tres dimensiones.

fallas cuyo rechazo vertical es menor que la resolución sísmica. El rechazo mapeado total a través de una falla a escala sísmica también puede incluir los rechazos sumados de numerosas fallas que son demasiado pequeñas para ser detectadas por separado a escala sísmica. El volumen de los segmentos de falla estrechamente espaciados se conoce como zona de daño por fallas.

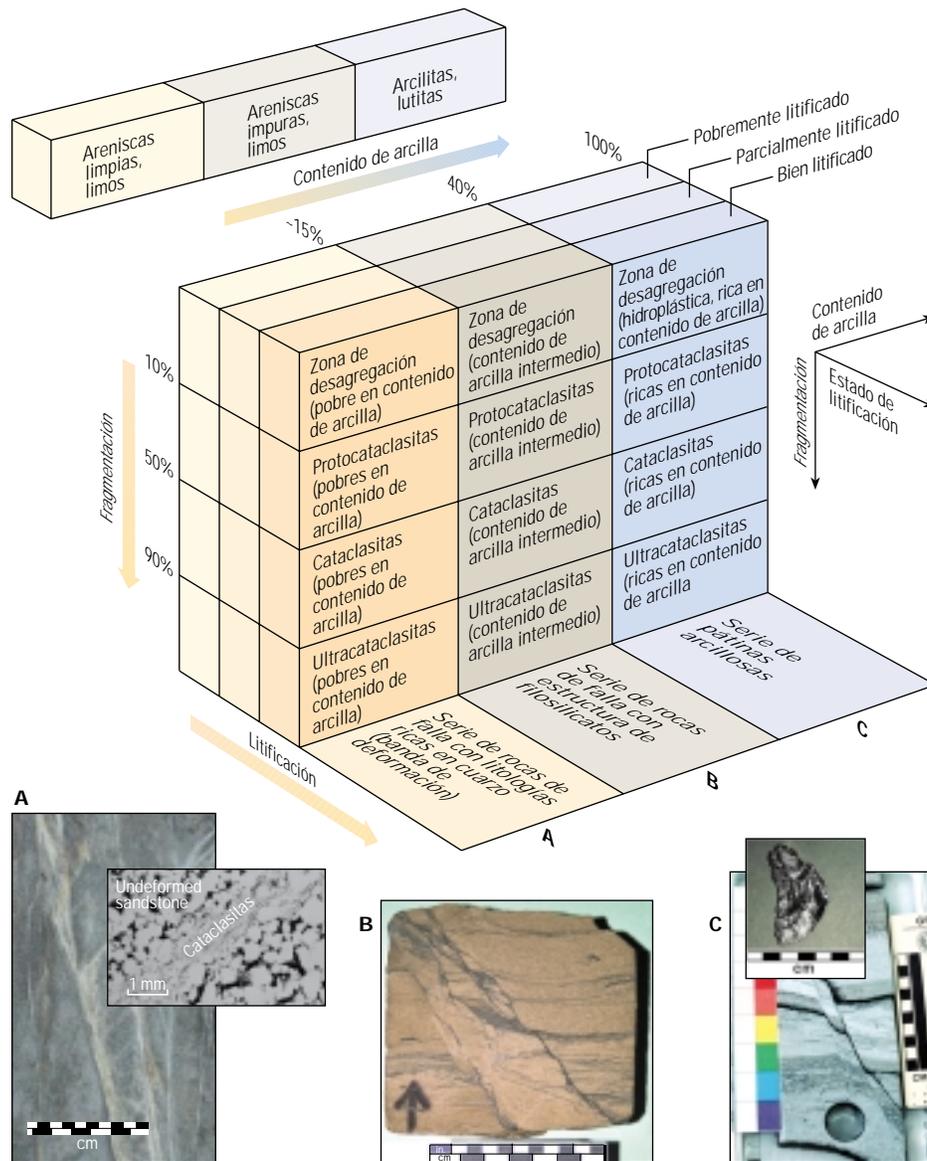
3. Anderson EM: *The Dynamics of Faulting and Dyke Formation with Applications to Britain*. Edinburgo, Escocia: Oliver y Boyd (1951): 206.  
Para mayor información sobre la orientación del plano de falla, consulte: <http://www.naturalfractures.com/1.1.3.htm> (examinado el 15 de enero de 2005).
4. Walsh JJ y Watterson J: "Geometric and Kinematic Coherence and Scale Effects in Normal Fault Systems," en Roberts AM, Yielding G y Freeman B (eds): *The Geometry of Normal Faults*, Sociedad Geológica de Londres, Publicación Especial 56. Bath, Inglaterra: The Geological Society Publishing House (1991): 193–203.
5. El rechazo vertical de una falla es la diferencia de elevación generalizada de la misma capa en los lados opuestos de la falla o la componente vertical de desplazamiento. El desplazamiento de una falla es la distancia total a lo largo de la cual una capa se encuentra separada a ambos lados de la falla y se define como: desplazamiento = rechazo vertical/seno (echado del plano de falla).
6. Knipe RJ: "Juxtaposition and Seal Diagrams to Help Analyze Fault Seals in Hydrocarbon Reservoirs," *Boletín de la Asociación Americana de Geólogos de Petróleo* 81, no. 2 (Febrero de 1997): 187–195.
7. Davies y Handschy, referencia 2.

El rechazo vertical mapeado a través de una falla a escala sísmica desplaza las capas de rocas sobre una falla unitaria o sobre un agrupamiento de fallas múltiples, cada una de las cuales se encuentra por debajo del nivel de resolución sísmica. La separación incide en la capacidad de sello de la falla y en las propiedades de las rocas de falla dentro de la zona de falla. Se puede formar una falla que actúa como sello, por ejemplo, si una falla que intersecta diferentes litologías produce el emplazamiento de rocas permeables de calidad de yacimiento contra rocas menos permeables tales como las lutitas. Esto se conoce como sello por yuxtaposición. También se puede formar un sello por falla si el yacimiento permanece yuxtapuesto contra sí mismo—donde el rechazo vertical es menor que el espesor del yacimiento—o contra otro yacimiento. Esto se produce porque la roca existente dentro de la zona de falla puede desarrollar una permeabilidad más baja.

Las diferentes rocas de falla se desarrollan bajo diferentes condiciones de deformación y sus propiedades de sello están relacionadas con las condiciones de deformación y los factores litológicos, tales como el contenido de arcilla.<sup>7</sup> Las fallas que cortan areniscas porosas con bajo

contenido de arcilla—menos del 15%—pueden generar sellos de baja permeabilidad a partir de la reducción de la permeabilidad asociada con la trituración mecánica de los granos de cuarzo. Éstos se conocen con el nombre de bandas cataclásticas o bandas de deformación. También pueden desarrollarse bandas de desagregación en areniscas limpias pero sin la reducción asociada con la porosidad y la trituración de granos.

Las fallas generadas en areniscas impuras forman rocas de falla con estructura de filosilicatos (PFFR, por sus siglas en inglés) con mayores contenidos de arcillas—entre 15 y 40%—que reducen la porosidad y la permeabilidad mediante la compactación y la mezcla de las partículas de arcilla y los granos de cuarzo. Aparecen pátinas arcillosas a lo largo de las fallas que cortan rocas con un contenido de arcillas superior al 40%. Las capas de arcilla o las lutitas son arrastradas y deformadas a lo largo del plano de falla formando una barrera de baja permeabilidad para el flujo de fluido. También puede producirse cementación a lo largo de un plano de falla, formando barreras casi impermeables para el flujo. No obstante, estas zonas cementadas raramente son continuas a menos que se asocien con un cambio regional, tal como



▲ Clasificación de rocas de falla que relaciona el contenido de arcilla, la fragmentación y la litificación. Las rocas almacén originales incluyen areniscas limpias con menos de 15% de contenido de arcilla, areniscas impuras con un contenido de arcilla que oscila entre 15 y 40% y arcillitas y lutitas con un contenido de arcilla superior al 40%. Los procesos de fragmentación y litificación tienen lugar a lo largo de toda la historia de una falla y producen uno de tres tipos de rocas de falla, a partir de cada una de las rocas almacén que se ilustran en la porción inferior del diagrama. Las fotografías del extremo inferior muestran diferentes formas de rocas de falla, incluyendo rocas de falla (A) desagregadas y cementadas (*izquierda*), (B) con estructura y pátinas de filosilicatos (*centro*) y (C) con pátinas arcillosas (*derecha*).

un aumento de la temperatura por encima de 90°C [194°F], temperatura a la que la tasa de precipitación del cuarzo aumenta (*arriba*).<sup>8</sup>

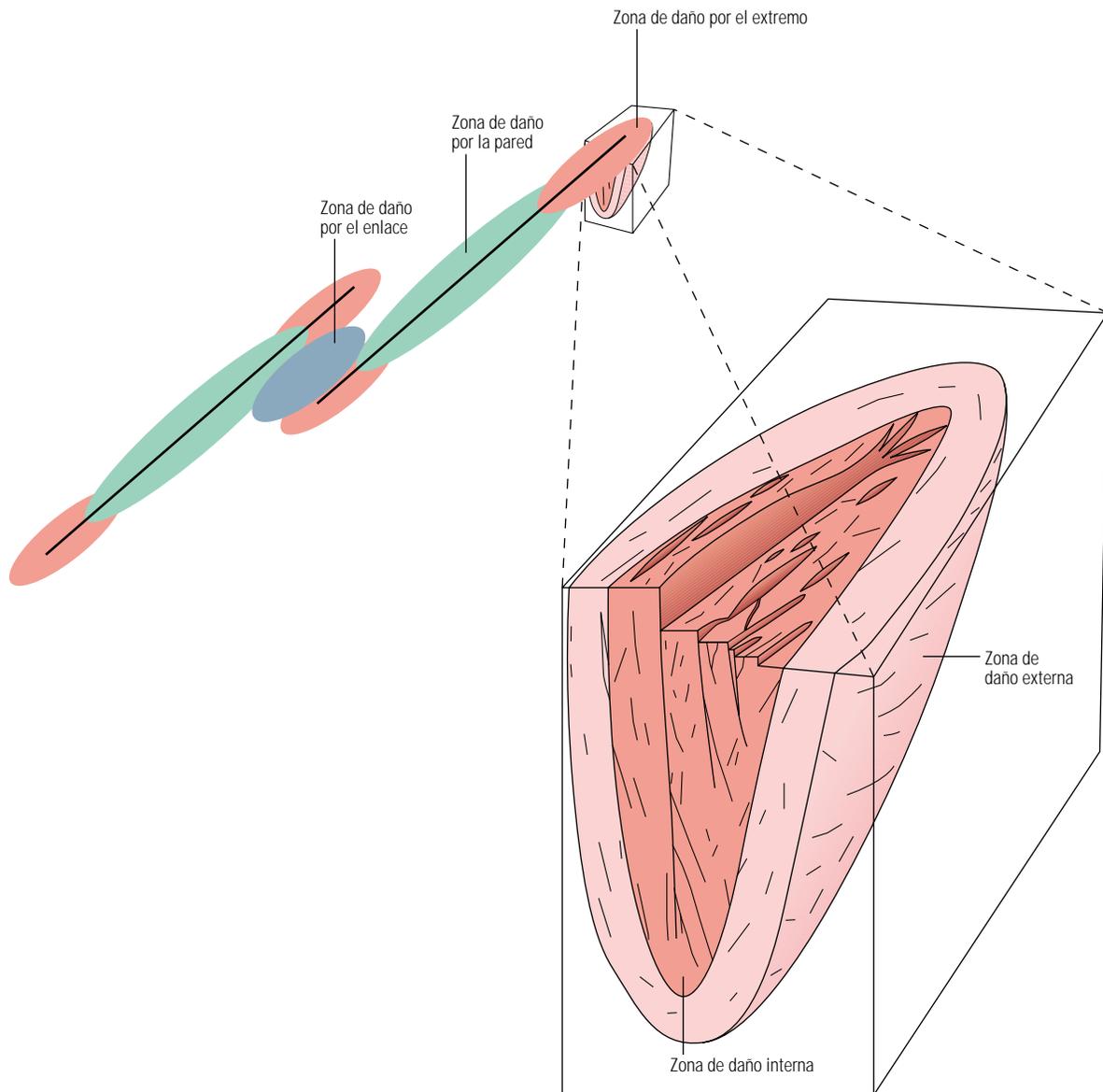
Las fallas más comunes observadas en los campos de petróleo y gas son las fallas normales, que poseen en su mayor parte cierto componente de movimiento oblicuo. Las geometrías de fallas tridimensionales (3D) complejas surgen a partir de la nucleación, crecimiento y enlace de las fallas y dan origen a zonas de daño. La comprensión de las zonas de daño por fallas es

crucial para el modelado del comportamiento de las fallas y su impacto sobre el desempeño del yacimiento.

#### Características de la arquitectura de las zonas de falla

Es posible obtener una apreciación de la complejidad de una zona de daño por fallas a través de un estudio cuidadoso de las fallas en afloramientos. Las exposiciones superficiales permiten a los geocientíficos observar la arqui-

tectura de las fallas en detalle y en un contexto y escala espacial 3D no proporcionados por la investigación del subsuelo. Es importante destacar que gran parte de lo que determina las propiedades de sello de las fallas tiene lugar a escala subsísmica y dentro de la zona de daño por fallas. En consecuencia, el estudio de las zonas de daño en afloramientos se ha vuelto crucial para el modelado de los sellos por fallas y la predicción de la forma en que afectan el flujo de fluido de superficie.



^ Clasificaciones de zonas de falla. Un diagrama conceptual 3D ilustra los volúmenes de daño internos y externos asociados con las fallas. El calco de la vista en plano de la propagación de la falla a través de las rocas almacén indica tres zonas características que son la zona de daño por el extremo (rojo), la zona de daño por el enlace (azul claro) y la zona de daño por la pared (verde). Las líneas correspondientes a los extremos de la falla se muestran en negro.

La zona de daño es el volumen de rocas deformadas existentes en torno a una falla principal que se ha originado a partir de la iniciación, propagación, interacción y desarrollo del deslizamiento a lo largo de las fallas pequeñas presentes entre bloques de fallas.<sup>9</sup> El volumen deformado que irradia desde un segmento

de falla principal puede dividirse en una zona de daño interna y una zona de daño externa. La zona de daño interna consiste habitualmente de rocas de falla intensamente deformadas que resultan difíciles de mapear en forma discreta, mientras que la zona externa posee una alta densidad de fallas de escaso rechazo vertical que a menudo mantienen una orientación similar al segmento de falla principal.

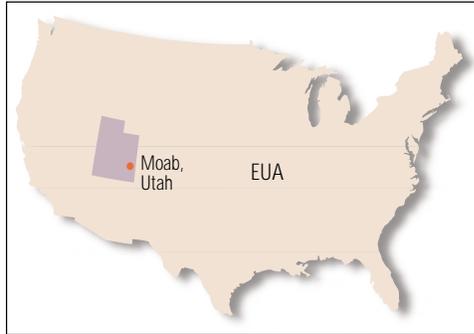
La geometría de la zona de falla también puede ser definida a lo largo del rumbo de una falla, o fallas, como tres zonas características (arriba). La primera zona se denomina zona de daño por el extremo y se asocia con la concentración de esfuerzos en el extremo del segmento de

la falla principal donde el desplazamiento se convierte en cero. La segunda zona se denomina zona de daño por enlace y se refiere al volumen afectado por la interacción entre dos segmentos de falla no coplanares subparalelos. La zona de daño por la pared, es decir la tercera zona, se ubica a lo largo de la superficie de falla y constituye el resultado del daño producido por el deslizamiento continuo de la falla o del daño ocasionado por los extremos de fallas abandonadas previamente al continuar el proceso de propagación de fallas a través del tiempo.<sup>10</sup> En las tres zonas pueden producirse fallas de escala subsísmica secundarias, fracturas naturales y cementación.

8. Fisher OJ y Knipe RJ: "Fault Sealing Processes in Siliciclastic Sediments," en Jones G, Fisher OJ y Knipe RJ (eds): *Faulting, Fault Sealing and Fluid Flow in Hydrocarbon Reservoirs: Publicación Especial de la Sociedad Geológica 147*. Bath, Inglaterra: The Geological Society Publishing House (1998): 117-134.

9. Kim Y-S, Peacock DCP y Sanderson DJ: "Fault-Damage Zones," *Journal of Structural Geology* 26 (2004): 503-517.

10. Kim et al, referencia 9.



▲ Área de estudio Bartlett Wash, Moab, Utah, EUA. Una sección transversal fotográfica a lo largo de la falla Moab provee vistas que iluminan la arquitectura de la zona de falla compleja dentro del área de mapeo detallado (*extremo superior*). Una vista aérea (*extremo inferior*) que abarca desde la pared de base hasta la pared colgante muestra otra perspectiva del contacto neto formado por la falla Moab.

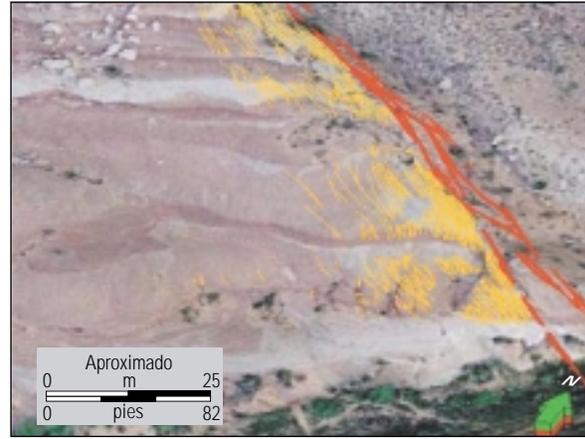
La investigación intensiva de las exposiciones de fallas, como la falla Moab del sudeste de Utah, EUA, ha permitido a los geocientíficos caracterizar zonas de daño por fallas y efectuar analogías con las fallas principales existentes en el subsuelo. La falla Moab ha sido extensivamente estudiada por los geocientíficos, incluyendo científicos del Centro de Investigaciones Doll de Schlumberger (SDR) en Ridgefield, Connecticut, EUA, y del grupo Rock Deformation Research (RDR) Ltd., Leeds, Inglaterra.<sup>11</sup> Ubicada en la porción noreste de la Cuenca de Paradox, la falla Moab es una falla normal de aproximadamente 45 km [28 millas] de largo con rumbo noroeste a sudeste. Esta falla comprende varios segmentos enlazados. El segmento más largo tiene un rechazo vertical de 960 m [3,150 pies] al sur, como se observa a partir del desplazamiento en

superficie y la erosión de las rocas sedimentarias de edad Pensilvaniano a Cretácico.<sup>12</sup> La falla Moab se mantuvo activa desde el período Triásico hasta mediados del Cretácico como mínimo. El paisaje de cañones que rodea a la falla Moab es ideal para mapear la exposición de la falla en tres dimensiones (*arriba*).

Los científicos de SDR y RDR comenzaron a almacenar datos de afloramientos detallados a lo largo de un segmento de la zona de daño de la falla Moab, en Bartlett Wash, como analogía con estructuras similares esperadas, aunque no representadas, en el subsuelo. Dentro del área de estudio, el rechazo vertical a lo largo del segmento de falla principal es de 210 m [690 pies]. El miembro Slick Rock Jurásico, más antiguo, correspondiente a la arenisca Entrada está bien expuesto en la pared de base (yacente) y exhibe

una densa red de fallas de escaso rechazo vertical en una zona angosta adyacente al segmento de falla principal.

Los geocientíficos emplearon una técnica de mapeo sofisticada, que utiliza un sistema de posicionamiento global (GPS, por sus siglas en inglés) de alta precisión y unidades remotas para mapear los rasgos discretos con precisión de 2 cm [0.8 pulgadas] (*próxima página, abajo*). Las coordenadas de los datos fueron identificadas con atributos geológicos clave en diversas estaciones para captar la complejidad y la escala de la zona de daño por fallas. También se registraron las posiciones y las geometrías de los elementos estructurales principales y secundarios, tales como fallas y fracturas naturales. Los científicos crearon un modelo geológico digital para utilizar como analogía para la interpreta-



^ Mapeo de la zona de la falla Moab. En el sitio Bartlett Wash se mapearon más de 70,000 rasgos estructurales para poblar un modelo analógico de la zona de daño por fallas (*izquierda*). La densidad de las fallas pequeñas dentro de la zona de daño del segmento principal de la falla Moab disminuye al aumentar la distancia a la falla principal. Las trazas de fallas rojas se encuentran dentro de la zona de daño interna, mientras que los rasgos amarillos se ubican dentro de la zona de daño externa (*derecha*). Las poderosas herramientas de computación permiten a los geólogos utilizar técnicas innovadoras como las visitas de observación virtuales, captando el conocimiento y las experiencias de los miembros de los equipos en el sitio.

ción de las fallas del subsuelo a fin de facilitar la visualización a través de técnicas innovadoras, tales como visitas de observación virtuales, y utilizar la distribución de la población de fallas como datos de entrada para los modelos de flujo (*arriba*).



^ Mapeo de alta precisión de la zona de daño de la falla Moab. Se utilizaron sistemas de posicionamiento global (GPS, por sus siglas en inglés) y unidades remotas, que determinan las ubicaciones exactas de los levantamientos, para registrar los rasgos discretos y ubicarlos con alta precisión. Los elementos estructurales secundarios, tales como fallas y fracturas, fueron identificados con atributos geológicos clave para captar la complejidad y escala del daño producido por la falla.

Si bien la geometría estática y las propiedades de las rocas de falla constituyen los controles principales sobre el flujo de fallas transversales en el subsuelo, la reactivación de las fallas es otro fenómeno que incide en las propiedades de flujo a lo largo de la falla. Los cambios producidos en los regímenes de esfuerzos tectónicos a través del tiempo geológico, por ejemplo, pueden reactivar una falla abriendo trayectorias que no existían previamente y permitiendo la filtración de hidrocarburos. A escala de tiempo de producción del yacimiento, los cambios producidos en los regímenes de presión de poro como resultado de la producción o la inyección actual en los sistemas de fallas y sus adyacencias, pueden iniciar la reactivación de las fallas y causar la pérdida del sello.

Los incrementos de la presión local producidos cerca o dentro del plano de falla como resultado de la inyección reducen el esfuerzo

normal efectivo, lo cual puede causar la reactivación de la falla.<sup>13</sup> Además, los cambios de presión producidos en las rocas adyacentes a las fallas, por ejemplo a partir del agotamiento de un yacimiento, alteran los esfuerzos locales que actúan sobre los planos de fallas y, dependiendo de la alineación de la falla respecto de los esfuerzos principales, pueden conducir a una reactivación con la subsiguiente ruptura del sello. Este comportamiento ha sido documentado en áreas tales como el Mar del Norte, el Golfo de México y la Cuenca de Bight en Australia.<sup>14</sup>

Estos cambios de presión tienen grandes implicaciones en lo que respecta a producción, recuperación mejorada de petróleo (EOR, por sus siglas en inglés) y mantenimiento de la presión, y en el almacenamiento subterráneo de gas, incluyendo el almacenamiento de dióxido de carbono [CO<sub>2</sub>] para la reducción de las emisiones de gas de efecto invernadero.<sup>15</sup>

11. Kaufman PS, McAllister E y Smallshire R: "Collection and Visualization of 3D Digital Geologic Data Sets: An Example from the Moab Fault Zone, UT," presentado en la Reunión Anual de la Asociación Americana de Geólogos de Petróleo, Nueva Orleans, 16 al 19 de abril de 2000. McAllister E, Smallshire R, Knipe R y Kaufman P: "Geometry of Fault-Damage Zones from High Resolution Mapping of the Moab Fault Zone, UT," presentado en la Reunión Anual de la Asociación Americana de Geólogos de Petróleo, Nueva Orleans, 16 al 19 de abril de 2000.
12. "Quantification of Fault-Related Diagenetic Variation of Reservoir Properties at Outcrop," <http://www.faultanalysis-group.ucd.ie/Projects/UTAH.html> (examinado el 15 de enero de 2005).
13. Hsieh PA y Bredehoeft JD: "A Reservoir Analysis of the Denver Earthquakes: A Case of Induced Seismicity," *Journal of Geophysical Research* 86 (1981): 903-920.
14. Wiprut D y Zoback MD: "Fault Reactivation and Fluid Flow Along a Previously Dormant Normal Fault in the Northern North Sea," *Geology* 28, no. 7 (2001): 595-598. Zoback MD y Zinke JC: "Production-Induced Normal Faulting in the Valhall and Ekofisk Oil Fields,"

- [http://www.geomi.com/images/PDFs/MDZ-Zinke\\_PAG\\_2002.pdf](http://www.geomi.com/images/PDFs/MDZ-Zinke_PAG_2002.pdf) (examinado el 15 de enero de 2005).
- "Wetland Subsidence, Fault Reactivation, and Hydrocarbon Production in the U.S. Gulf Coast Region," Hoja de Datos del USGS FS-091-01, <http://pubs.usgs.gov/fs/fs091-01/> (examinado el 15 de enero de 2005).
- Hillis RR y Reynolds SD: "In Situ Stress Field, Fault Reactivation and Seal Integrity in the Bight Basin," [http://ftp.petroleum.pir.sa.gov.au/products/data/rb2003\\_2.pdf](http://ftp.petroleum.pir.sa.gov.au/products/data/rb2003_2.pdf) (examinado el 15 de enero de 2005).
15. Bennaceur K, Gupta N, Monea M, Ramakrishnan TS, Randen T, Sakurai S y Whittaker S: "Captación y almacenamiento de CO<sub>2</sub>: Una solución al alcance de la mano," *Oilfield Review* 16, no. 3 (Invierno de 2004/2005): 48-65. Hawkes CD, McLellan PJ, Zimmer U y Bachu S: "Geomechanical Factors Affecting Geological Storage of CO<sub>2</sub> in Depleted Oil and Gas Reservoirs," artículo 2004-258, presentado en la 55a Reunión Técnica Anual de la Sociedad Canadiense del Petróleo, Calgary, 8 al 10 de junio de 2004.

La reactivación de las fallas que limitan el yacimiento compromete los mecanismos de sello de las fallas, cizalla las tuberías de revestimiento de los pozos y genera compactación y subsidencia. La integración de las propiedades de resistencia de las rocas de falla, la geometría de las fallas y las condiciones de los esfuerzos locales, proporcionan valiosos datos de entrada para el modelado y la evaluación del riesgo de reactivación.<sup>16</sup> Las orientaciones de los esfuerzos locales son interpretadas con dispositivos de generación de imágenes de pozos, tales como la herramienta de generación de Imágenes Microeléctricas de Cobertura Total FMI o la herramienta de generación de Imágenes Microeléctricas en Lodos Base Aceite OBMI, y a partir de la adquisición de datos de presión de poro utilizando herramientas de medición y muestreo tales como el Probador Modular de la Dinámica de la Formación MDT o el Probador de Formación a Repetición RFT.

### Los roles de la presión y la secuencia cronológica en la formación de sellos por fallas

Un concepto importante para la estimación de la capacidad de sello de las fallas es el relacionado con la presión umbral ( $P_t$ ). En rocas humedecidas con agua,  $P_t$  es la presión capilar más baja ( $P_c$ ) a la que los hidrocarburos forman una trayectoria continua a través de las gargantas de poros interconectadas más grandes de la roca de falla.<sup>17</sup> El conocimiento del valor de  $P_t$  de las diferentes rocas de falla, generadas bajo diferentes condiciones, permite a los geocientíficos calcular la altura máxima de la columna de petróleo ( $H_t$ ) o la capacidad de sello de la roca de falla que impide la migración de hidrocarburos a través de la falla. La presión capilar de los hidrocarburos bajo condiciones hidrostáticas contra un sello por falla aumenta en sentido ascendente a partir de cero en el nivel de agua libre (FWL, por sus siglas en inglés), que se encuentra en la base de la columna de hidrocarburos. Un sello capilar o sello de membrana impide la migración de hidrocarburos a través de la falla para una altura de la columna de hidrocarburos medida desde el FWL hasta donde el valor de  $P_c$  es igual al valor de  $P_t$ . El sello de membrana se forma debido a la tensión superficial entre el agua y el hidrocarburo, de manera que la permeabilidad efectiva al hidrocarburo es cero cuando  $P_c$  es menor que  $P_t$  (arriba).

Una columna de hidrocarburos con un valor de  $P_c$  mayor que el valor de  $P_t$  de la roca de falla migrará lentamente a través de la falla. El flujo es retardado por la capacidad de sello de resistencia hidráulica de la roca de falla. El sello de resistencia hidráulica se forma cuando la permeabilidad relativa al hidrocarburo es baja debido a la

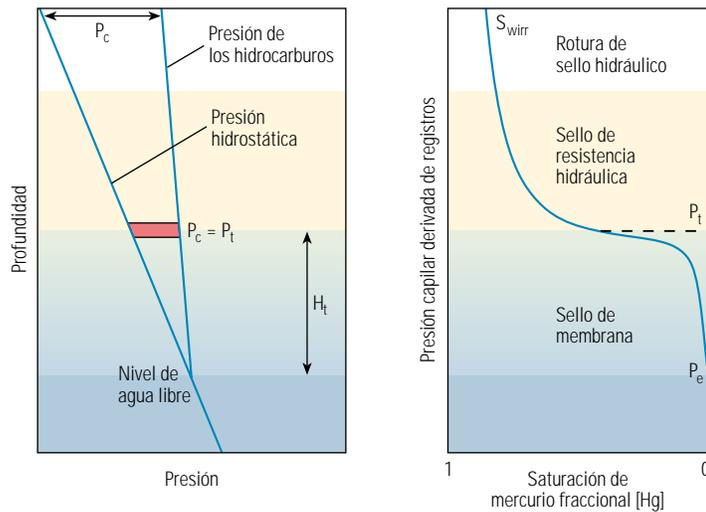


Diagrama de presión capilar. La gráfica de presión en función de la profundidad (izquierda) muestra la presión capilar,  $P_c$ , como la diferencia entre las presiones del agua y los hidrocarburos con la profundidad. El hidrocarburo tiene un gradiente de presión más pronunciado que el agua, de manera que la presión capilar se incrementa por encima del nivel de agua libre (FWL, por sus siglas en inglés) donde la misma es cero. La gráfica de la derecha muestra una curva típica de presión capilar por inyección de mercurio como se mide en el laboratorio. La presión de entrada,  $P_e$ , es la presión a la cual los hidrocarburos ingresan primero en la muestra. Una altura de la columna de hidrocarburos,  $H_t$ , puede ser atrapada por debajo de la presión capilar umbral,  $P_t$ , formando un sello de membrana. Las geometrías de la trampa quizás permitan que las columnas de hidrocarburos excedan esta altura. Es posible el flujo de hidrocarburos a través del sello que se encuentra por encima de la altura  $H_t$  a una velocidad que depende de la permeabilidad relativa del sello.

de falla humedecida con agua y al potencial de baja presión existente a través de la falla para columnas de hidrocarburo pequeñas. Los hidrocarburos pueden migrar lentamente pero el sello de resistencia hidráulica provee una obturación efectiva a lo largo del tiempo geológico. En la base de la zona de resistencia hidráulica,  $P_c$  es igual a  $P_t$ . La permeabilidad relativa a los hidrocarburos a esta altura es cero pero aumenta por encima de este punto en una zona de transición que pasa de un sello de membrana a una filtración geológicamente significativa debido al incremento de la permeabilidad relativa. Los geólogos consideran significativa la rotura del sello de resistencia hidráulica una vez que la tasa de fuga excede la tasa de carga de hidrocarburos, momento en el cual los hidrocarburos dejan de acumularse.

Las diferencias de presión del agua presentes en el yacimiento a través de una falla o en el relleno de la falla inciden en la altura de la columna de hidrocarburos resultante. La presión de agua más alta existente en el acuífero, en la parte externa de la trampa, por ejemplo, conduce al flujo de agua dentro del yacimiento si la saturación de hidrocarburos en la zona de falla es menor que la saturación de agua irreducible,  $S_{wirr}$ . Estas condiciones mejoran el potencial de sellos por fallas y aumentan la altura de la

columna de hidrocarburos. Las presiones más bajas existentes en el acuífero, en el exterior de la trampa, y en el relleno de la falla a una saturación de agua irreducible conducirán a una reducción de las alturas de las columnas de hidrocarburos en la trampa. Estas interrelaciones entre fluidos, presiones y propiedades de las rocas constituyen controles importantes para la predicción del comportamiento de las fallas y las capacidades de sello.

La arquitectura de las fallas, las distribuciones de los rechazos, las litologías, las distribuciones y propiedades de las rocas de falla en su totalidad inciden en las propiedades de flujo de las fallas. No obstante, la historia de las fallas es igualmente importante a la hora de considerar el potencial de sello de las trampas por fallas en exploración y producción. La historia de sepultamiento, la distribución cronológica de la deformación y la historia de la carga de hidrocarburos inciden en las propiedades de las rocas de falla y en su impacto sobre la capacidad de sello de las fallas.

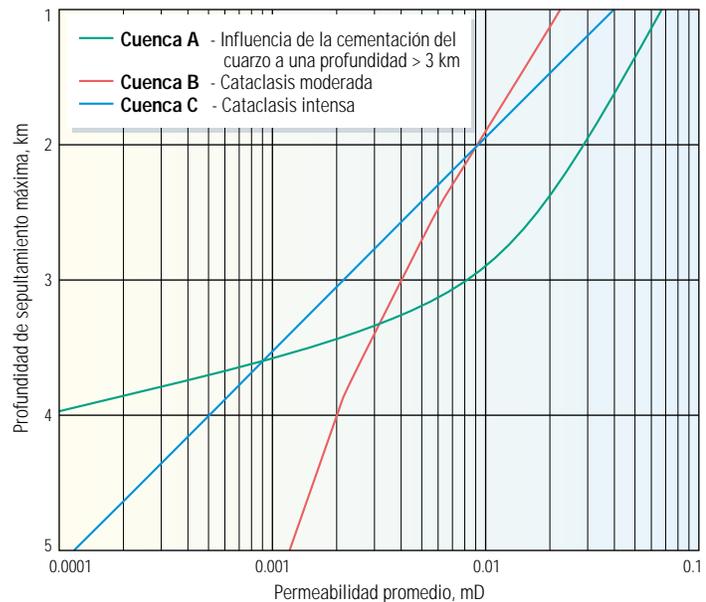
Las estrategias de desarrollo de yacimientos exitosas deben incorporar la historia de fallamiento y sepultamiento para predecir en forma más exacta el riesgo que plantean los sellos por fallas. Por ejemplo, los eventos tectónicos independientes crean fallas nuevas y reactivan las

fallas existentes. Las fracturas pueden propagarse, modificando potencialmente las características de permeabilidad del yacimiento. Las propiedades de las rocas de falla también cambian con el sepultamiento y levantamiento. La permeabilidad a lo largo de las fallas y en las rocas adyacentes generalmente disminuye con la profundidad de sepultamiento (derecha). Los aumentos de la temperatura incrementan la tasa de precipitación del cuarzo, lo que puede reducir significativamente la transmisividad a través de una falla.

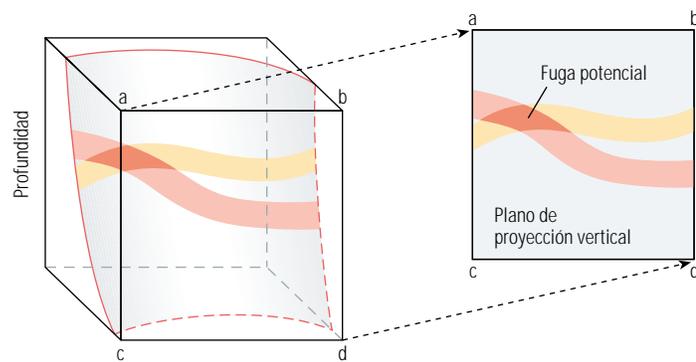
Los mapas de actividades de fallas que codifican en color la cronología geológica del desarrollo estructural ayudan a los equipos a cargo de los activos petroleros a cuantificar el riesgo de desarrollar un área prospectiva o de implementar los pasos de desarrollo subsiguientes, tal como la puesta en marcha de un proceso de EOR. El conocimiento de la historia geológica y su impacto también es importante a la hora de predecir las propiedades de sello de las fallas.

### Métodos de análisis de sellos por fallas

Los métodos de análisis de sellos por fallas exitosos integran información fundamental sobre la arquitectura de la zona de falla, las propiedades de las rocas de falla y los datos de presión. Una herramienta importante para evaluar el potencial de flujo a través de una falla es una vista del rumbo o mapa del plano de falla con las intersecciones de la pared colgante y la pared de base superpuestas sobre la superficie de falla modelada.<sup>16</sup> Los diagramas de Allan utilizan esta técnica para mostrar posibles trayectorias de migración de fluidos, puntos de fuga o áreas de sello a través de la falla, y además han ayudado a explicar la ubicación de los contactos hidrocarburo-agua en diversos campos petroleros de todo el mundo. Los diagramas de Allan habitualmente utilizan los horizontes interpretados sísmicamente para definir la separación entre la pared colgante y la pared de base a través de la falla y la litología interpretada en base a los registros de pozos para identificar los cambios estratigráficos producidos entre los horizontes sísmicos. Las herramientas de mapeo sofisticadas permiten el desarrollo de los diagramas de Allan como modelos 3D. Estos modelos requie-



^ Reducción de la permeabilidad en una zona de falla cataclástica con el aumento de la profundidad de sepultamiento en tres ejemplos de cuencas diferentes. La permeabilidad se reduce en las zonas de fallas cataclásticas debido principalmente a la trituración mecánica de los granos y al incremento de la cementación del cuarzo a mayor profundidad. En cuencas con grandes esfuerzos efectivos medios, es probable el desarrollo de un proceso de cataclasis intenso en las zonas de falla (azul), con la consiguiente reducción de la permeabilidad al aumentar la profundidad de sepultamiento. En cuencas con esfuerzos efectivos medios menores, es factible que se produzca un proceso de cataclasis moderada en las zonas de falla (rojo), que hace que la permeabilidad sea más alta en esas zonas de falla. Las cuencas con procesos de cementación de cuarzo en las zonas de falla (verde) exhiben permeabilidades en las zonas de falla que aumentan a medida que las profundidades de sepultamiento se hacen más someras pero se vuelven muy impermeables por debajo de los 3 km [9,840 pies] de profundidad debido al aumento de la cementación del cuarzo. Otros factores, tales como la historia geológica y la litología de las rocas almacén, desempeñan un rol significativo en lo que respecta a la determinación de los procesos que imponen la permeabilidad de la zona de falla.

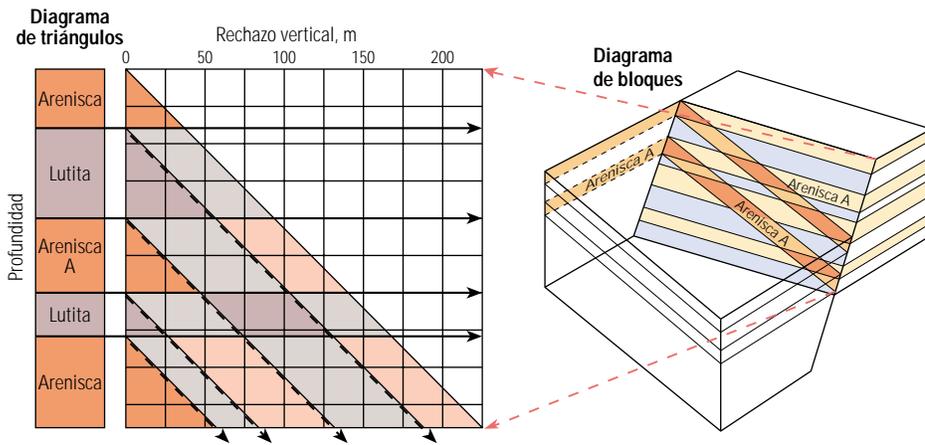


^ Diagrama de Allan. Basados en datos sísmicos e información de pozos, los diagramas de Allan demuestran las relaciones de yuxtaposición a través de un plano de falla. Estos diagramas se utilizan a menudo para identificar puntos de fuga de petróleo potenciales (rojo) a lo largo del rumbo de una falla.

16. Jones RM y Hillis RR: "An Integrated, Quantitative Approach to Assessing Fault-Seal Risk," *Boletín de la Asociación Americana de Geólogos de Petróleo* 87, no. 3 (Marzo de 2003): 507-524.  
 17. Brown A: "Capillary Effects on Fault-Fill Sealing," *Boletín de la Asociación Americana de Geólogos de Petróleo* 87, no. 3 (Marzo de 2003): 381-395.  
 18. Allan US: "Model for Hydrocarbon Migration and Entrapment Within Faulted Structures," *Boletín de la Asociación Americana de Geólogos de Petróleo* 73, no. 7 (Julio de 1989): 803-811.

ren cantidades significativas de datos y su desarrollo puede resultar lento aunque los nuevos programas de computación, tales como la aplicación de las herramientas de secuencias de tareas Petrel, han reducido sustancialmente el tiempo de procesamiento (arriba).

Una alternativa con respecto a la complicada evaluación de la distribución de la estratigrafía a través del plano de falla, que se utiliza en los diagramas de Allan, es un diagrama de triángulos de yuxtaposición simplificado, que posibilita un examen inicial rápido y la predicción de la



▲ Análisis de la yuxtaposición. Una diagrama de triángulos de yuxtaposición (*izquierda*) permite la evaluación simple y rápida de los escenarios de yuxtaposición estratigráfica; por ejemplo, cuando un yacimiento, la Arenisca A, se yuxtapone contra una lutita impermeable que provee un sello. Otro escenario podría identificar el emplazamiento de una arenisca contra otra arenisca que no logra proveer un sello adecuado para el entrapamiento de hidrocarburos. La litología se muestra a la izquierda; el eje horizontal muestra la magnitud del rechazo vertical y las flechas de guiones diagonales muestran el escenario de yuxtaposición en un rechazo y una capa específicos. El diagrama de bloques (*derecha*) se muestra para ilustrar una representación 3D.

capacidad de sello por fallas. Esta técnica permite representar la pared colgante y las yuxtaposiciones para diversos rechazos verticales y posibilita una evaluación de los intervalos estratigráficos yuxtapuestos para un rechazo vertical dado (*arriba*). Estos diagramas simplifican el análisis de la yuxtaposición para un plano de falla unitario. Además, utilizando estos diagramas se pueden evaluar rápidamente los efectos de fallas múltiples con escasos rechazos verticales. La yuxtaposición se evalúa simplemente en los rechazos verticales más pequeños para cada falla.

En el análisis inicial, los diagramas de triángulos muestran la yuxtaposición de la estratigrafía a través de la falla. Los yacimientos yuxtapuestos contra rocas de baja permeabilidad, tales como las lutitas, tienden a actuar como sellos, mientras que las yuxtaposiciones entre yacimientos a través de la falla probablemente produzcan fugas. Los diagramas de yuxtaposición también pueden ser utilizados para evaluar las rocas de falla presentes y sus propiedades asociadas que se desarrollan dentro de la zona de falla. Por ejemplo, se puede determinar la distribución de las pátinas arcillosas provenientes de las capas ricas en arcilla presentes en la zona de falla y cuantificar sus efectos sobre el sello. Además, es posible evaluar los rechazos verticales críticos cuando las fallas cataclásticas de permeabilidad más alta pueden representar un riesgo para el flujo de fallas transversales. Esto se produce cuando dos yacimientos siliciclásticos permeables se yuxtaponen a través de la falla—uno en la pared colgante (HW, por sus siglas en inglés) y otro en

la pared de base (FW, por sus siglas en inglés) (*próxima página*).

Se han desarrollado varios métodos para estimar la distribución de las rocas de falla dentro de una zona de falla. Dos de los métodos más aplicados son la relación lutita-jaboncillo (SGR, por sus siglas en inglés) y las pátinas arcillosas.<sup>19</sup> Además, los investigadores del RDR introdujeron recientemente un método SGR modificado, o relación lutita-jaboncillo efectiva (ESGR, por sus siglas en inglés), que posibilita un mayor control sobre la arquitectura y distribución de las rocas de falla a lo largo de la superficie de falla durante el análisis.

El método SGR estima el porcentaje de arcilla en base a la litología dominante mezclada con la zona de falla. El algoritmo calcula el contenido neto de arcilla dentro de la litología que es desplazada más allá de cada punto de la falla mediante el producto de la suma del espesor de la capa por el porcentaje de arcilla dividido por el rechazo vertical de la falla. Este cálculo se obtiene a través de una superficie de falla modelada con una distribución de los rechazos verticales calculada y con estimaciones del porcentaje de arcilla derivadas de los registros de pozos. El método ESGR utiliza un SGR ponderado que permite una distribución no uniforme de las arcillas dentro de la sección arrastrada más allá de cada punto de la superficie de falla para modelar un proceso más complejo de la zona de falla.

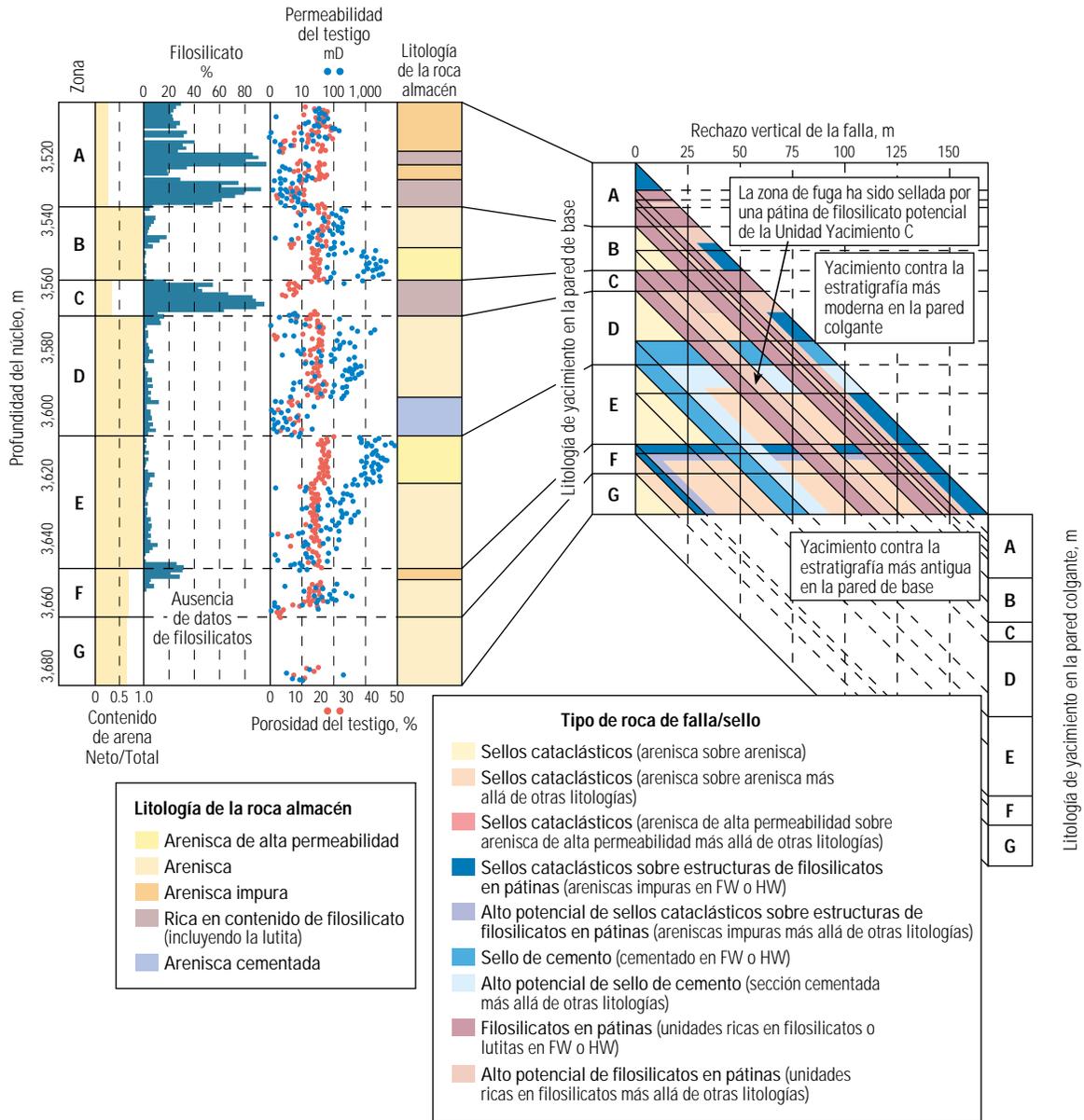
Los estudios de afloramientos de zonas de falla también han demostrado que la presencia de pátinas arcillosas constituye un proceso común de la zona de falla en el que la arcilla

forma una pátina a lo largo de la zona de falla de acuerdo con la presencia de un banco arcilloso local. El espesor de la pátina arcillosa a lo largo de la falla aumenta con el espesor de la capa arcillosa original y disminuye con la distancia hasta dicha capa. Múltiples capas arcillosas tienden a combinarse para producir una pátina continua, lo que mejora la capacidad de sello por falla.

El método básico de modelado de las distribuciones de las rocas de falla consiste en calcular la distribución de los rechazos verticales en una superficie de falla grillada a partir de las intersecciones de los horizontes sobre la falla, rellenando la estratigrafía detallada con los espesores y los contenidos de arcilla estimados y trazando las curvas de contorno correspondientes a las propiedades de los sellos por fallas obtenidas, sobre la superficie de la falla. Las curvas de contorno de la presión capilar medida a lo largo de la falla proporcionan una calibración con la capacidad de sello para las propiedades de las rocas de falla estimadas. Estos datos de presión suelen adquirirse a agujero descubierto utilizando herramientas de muestreo de la formación tales como las herramientas MDT o RFT.

Si bien el cálculo del potencial de sellos por fallas presente a lo largo de una falla parece directo, quizás se trate de una simplificación excesiva. En base a estudios de afloramientos y fallas exhumadas, los geocientíficos observan que las pátinas arcillosas no se distribuyen en forma uniforme en las zonas de falla sino que pueden ser interrumpidas creando múltiples discontinuidades que reducen el efecto de sello a través de las escalas de tiempo geológico. Un estudio de la falla normal Calabacillas, situada en Nuevo México, EUA, demostró que las pátinas arcillosas tienden a ser continuas a lo largo de una distancia entre dos y seis veces superior al espesor de la capa de arcilla original, pero luego se adelgazan significativamente al alejarse de la base de la capa de arcilla original en la pared de base.<sup>20</sup> Además, las pátinas son fracturadas frecuentemente por fallas de escaso rechazo vertical. En consecuencia, las técnicas de estimación de pátinas y calibración de sellos pueden sobrestimar el potencial de sellos por fallas, especialmente cerca de la base de una capa de arcilla original.

La calibración de las curvas de contorno de la presión capilar y de las estimaciones de las propiedades de las rocas de falla sobre una superficie de falla es insuficiente si se utilizan los métodos descriptos. Un análisis más preciso debería incluir la calibración de las propiedades de las rocas de falla estimadas a partir de mediciones de núcleos. La presión umbral y la



^ Análisis de la yuxtaposición. Una diagrama de triángulos de yuxtaposición (*izquierda*) permite la evaluación simple y rápida de los escenarios de yuxtaposición estratigráfica, por ejemplo, cuando un yacimiento, la Arenisca A, se yuxtapone contra una lutita impermeable que provee un sello. Otro escenario podría identificar el emplazamiento de una arenisca contra otra arenisca que no logra proveer un sello adecuado para el entrapamiento de hidrocarburos. La litología se muestra a la izquierda; el eje horizontal muestra la magnitud del rechazo vertical y las flechas de guiones diagonales muestran el escenario de yuxtaposición en un rechazo y una capa específicos. El diagrama de bloques (*derecha*) se muestra para ilustrar una representación 3D.

permeabilidad medidas a través de fallas pequeñas en núcleos ayudan a predecir la capacidad de sello y las propiedades de flujo de la distribución de rocas de falla estimada. Las rocas de falla

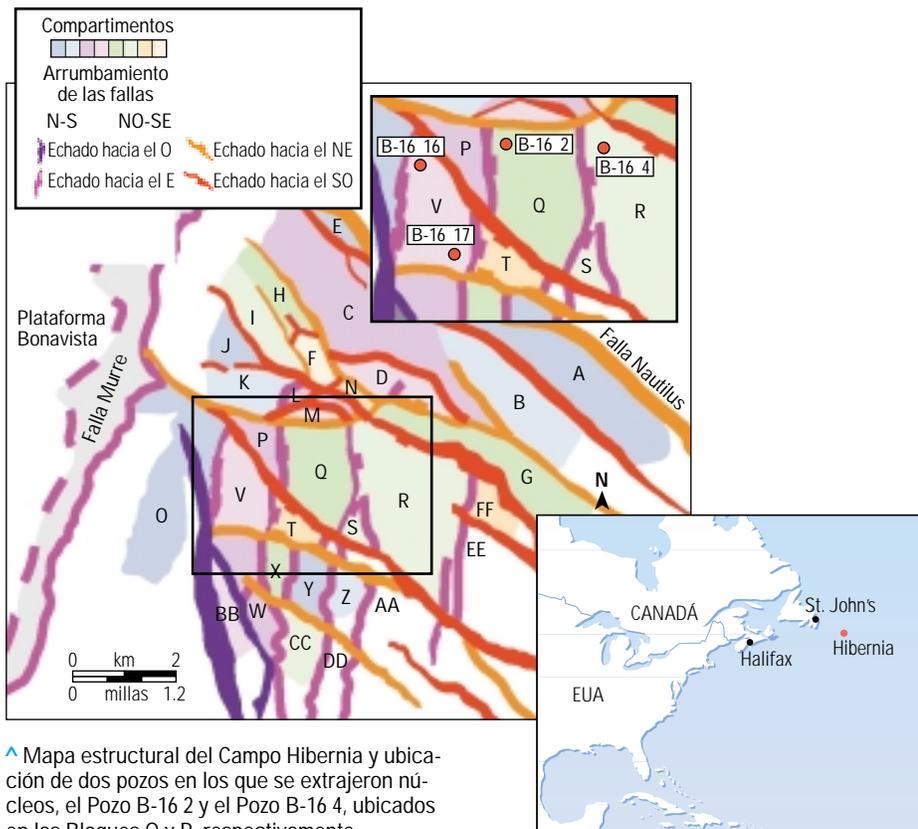
en núcleos también definen la gama de tipos de rocas de falla creadas por procesos tales como la cataclisis o la trituración de granos y permiten la evaluación del impacto de la historia geológica y de la secuencia cronológica de las fallas.

pozos, registros y estudios de núcleos y datos de presión de campo. Estos datos también son importantes para reducir el riesgo asociado con un ambiente de exploración en donde puede haber mucha menos información disponible.

19. Yielding G, Freeman B y Needham DT: "Quantitative Fault Seal Prediction," *Boletín de la Asociación Americana de Geólogos de Petróleo* 81, no. 6 (Junio de 1997): 897-917.  
 Bretan P, Yielding G y Jones H: "Using Calibrated Shale Gouge Ratio to Estimate Hydrocarbon Column Heights," *Boletín de la Asociación Americana de Geólogos de Petróleo* 87, no. 3 (Marzo de 2003): 397-413.  
 Yielding et al, referencia 2.  
 20. Doughty PT: "Clay Smear Seals and Fault Sealing Potential of an Exhumed Growth Fault, Rio Grande Rift, New Mexico," *Boletín de la Asociación Americana de Geólogos de Petróleo* 87, no. 3 (Marzo de 2003): 427-444.

Las bases de datos de rocas de falla correspondientes a determinadas cuencas son clave para la calibración del potencial de sello de las rocas de falla. Los datos de rocas de falla representan una información crucial para la obtención de simulaciones de yacimientos exitosas que además utilizan datos de campo, incluyendo levantamientos sísmicos, registros de

**Más conocimiento, menos incertidumbre**  
 Las fallas en núcleos no sólo posibilitan la calibración de las propiedades de las rocas de falla, tales como porosidad, permeabilidad y presiones umbrales, sino que proveen la distribución y la densidad de las fallas a una escala que está por debajo de la escala de resolución sísmica. Los



Mapa estructural del Campo Hibernia y ubicación de dos pozos en los que se extrajeron núcleos, el Pozo B-16 2 y el Pozo B-16 4, ubicados en los Bloques Q y R, respectivamente.

avances introducidos recientemente en los métodos de interpretación sísmica, tales como los programas de picado de fallas y mapeo de atributos automáticos, ayudan a los geofísicos a interpretar grandes volúmenes sísmicos en menos tiempo y con mayor detalle que los métodos manuales. Sin embargo, gran parte del detalle de las fallas todavía existe a una escala que está por debajo de la resolución sísmica, de modo que para la detección de estas fallas pequeñas se debe hacer uso de herramientas de generación de imágenes de pozo de alta resolución y del estudio detallado de núcleos de diámetro completo.

El Campo Hibernia altamente compartimentalizado, situado en la Cuenca Jeanne d'Arc, en el área marina de Terranova, Canadá, demuestra la importancia de los exámenes de núcleos detallados.<sup>21</sup> El Campo Hibernia se encuentra ubicado en una cuenca sedimentaria contenida dentro de la Cuenca Jeanne d'Arc que ha experimentado múltiples eventos de *rifting* asociados con la separación del supercontinente Pangea y con la formación del Océano Atlántico que tuvieron lugar entre el Triásico tardío y el Cretácico temprano.

Desde la primera producción que tuvo lugar en 1997, los geólogos e ingenieros de la compañía Hibernia Management and Development Company supieron que los dos yacimientos prin-

cipales del Campo Hibernia se encontraban compartimentalizados por la presencia de fallas. A partir de las variaciones observadas en las alturas de los contactos de fluidos y en las presiones, se identificó un total estimado de 30 bloques de fallas. A medida que se continuaba con el desarrollo del campo, se obtuvieron indicaciones de que el mismo podría estar aún más compartimentalizado de lo que se pensaba originalmente.<sup>22</sup> Sin embargo, el equipo a cargo de los activos de la compañía no estaba seguro acerca del grado en que las fallas estaban reduciendo la producción de los pozos individuales y el desempeño de la inyección.

Para caracterizar la deformación y la arquitectura de la zona de falla, se extrajeron núcleos de diámetro completo del yacimiento inferior de la sección de pared colgante de dos pozos, el Pozo B-16 2 situado en el Bloque Q y el Pozo B-16 4 situado en el Bloque R. (arriba). Los núcleos fueron examinados a efectos de identificar las estructuras geológicas y se tomaron muestras para el análisis de las propiedades microestructurales y petrofísicas. Las rocas de falla fueron clasificadas de acuerdo con el contenido de arcilla.

Las rocas de falla con un contenido de arcilla inferior al 15% exhibían tanto bandas de desagregación, que son zonas localizadas de flujo de partículas con escaso fracturamiento de granos,

como bandas de deformación con filones cataclásticos con magnitudes variables de reducción del tamaño de los granos debido a su trituración mecánica. A pesar de la ausencia de arcilla, estas rocas de falla poseen una permeabilidad promedio de 0.06 mD, lo que equivale a casi cinco órdenes de magnitud menos que la permeabilidad de la roca almacén. Las rocas de falla que contienen una cantidad intermedia de arcilla—entre 15 y 40%—son clasificadas como rocas de falla con estructura de filosilicatos y en este caso exhibían permeabilidades aún más bajas que las de sus contrapartes con bajo contenido de arcilla. Las rocas ricas en arcilla, caracterizadas por un contenido de arcilla superior al 40%, formaban pátinas arcillosas. Estas rocas de falla poseen típicamente permeabilidades de menos de 0.001 mD, equivalentes a las propiedades de las rocas almacén. El análisis de las rocas de falla en núcleos demostró que los distintos tipos de rocas de falla son capaces de reducir significativamente la permeabilidad a lo largo de las fallas existentes en el Campo Hibernia.

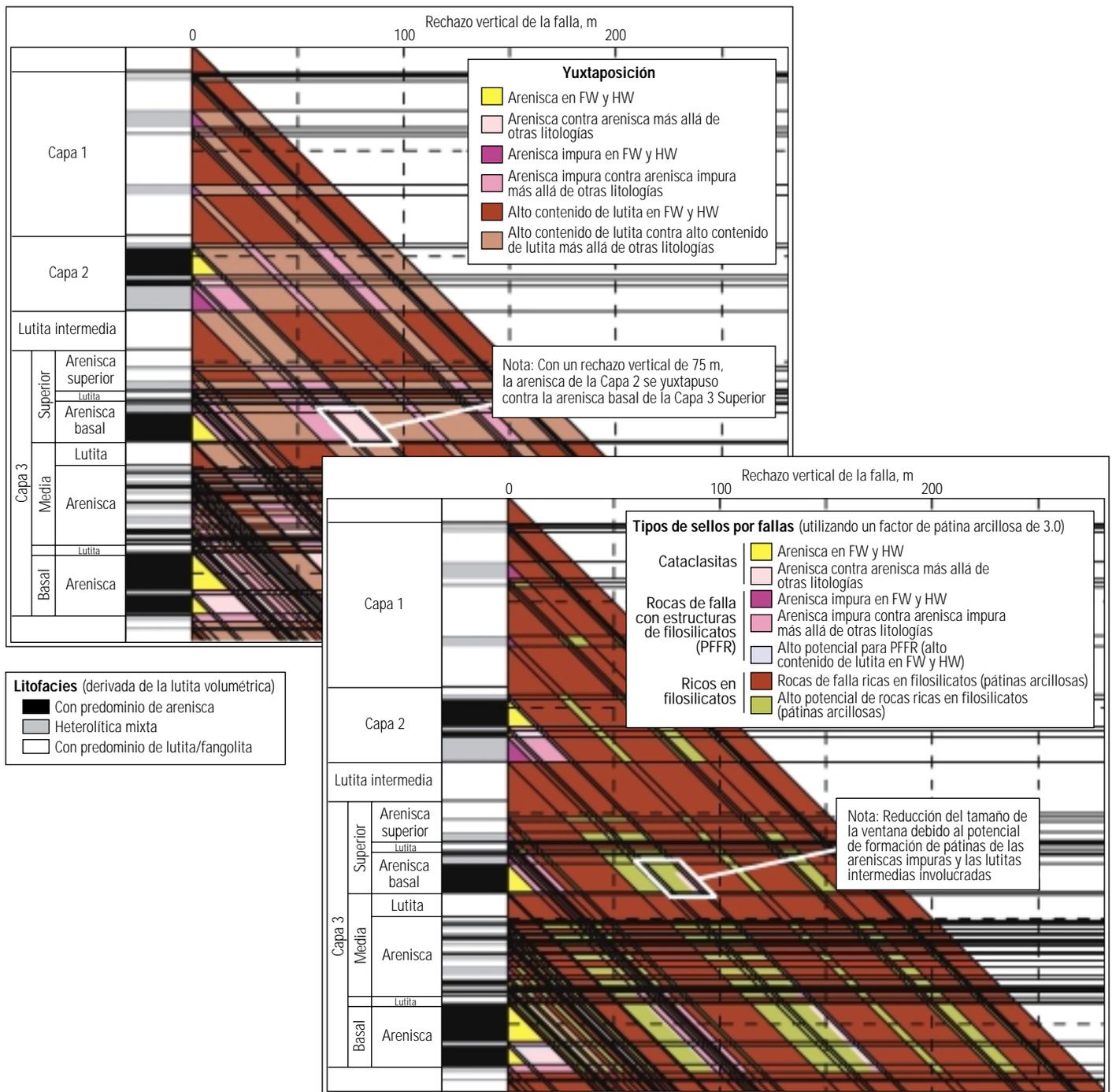
Para evaluar el potencial de sello de las fallas que compartimentalizan el yacimiento, los tipos y las propiedades de las rocas de falla se integran con las estimaciones de la distribución de las rocas de falla obtenidas de los diagramas de yuxtaposición. Estos diagramas demuestran que cuando el rechazo vertical de la falla es menor que el espesor de las capas individuales y el yacimiento se yuxtapone contra sí mismo, las propiedades de sello quedan determinadas por las propiedades de las rocas de falla cataclásticas. Contrariamente, cuando el rechazo vertical de la falla excede el espesor de las capas individuales el sello por yuxtaposición del yacimiento contra la roca no yacimiento constituye el sello principal.

Un diagrama de triángulos de yuxtaposición de la Formación Hibernia en el Pozo B-16 2 demuestra las distribuciones de las rocas de falla pronosticadas y los efectos interpretados de las mismas sobre el flujo de fluido (próxima página).

Este diagrama muestra que para rechazos verticales de menos de 30 m [98 pies], las rocas de falla son predominantemente cataclásitas o zonas de trituración de granos. Por el contrario,

21. Porter JR, McAllister E, Fisher OJ, Knipe RJ, Condliffe DM, Kay MA, Stylianides G y Sinclair IK: "Impact of Fault-Damage Zones on Reservoir Performance in the Hibernia Oilfield (Cuenca Jeanne d'Arc, Terranova): An Analysis of Structural, Petrophysical and Dynamic Well Test Data," artículo especial 43 en Hiscott R y Pulham A (eds): *Petroleum Resources and Reservoirs of the Grand Banks, Eastern Canadian Margin*. St. John's, Terranova, Canadá: Asociación Geológica de Canadá (2004): 129–142.

22. Gormley JR, Andrews RJ, Baskin DK y Stokes R: "An Integrated Study of Reservoir Compartmentalization in the Hibernia Formation, Hibernia Field," *Resúmenes*, Vol. 26. Asociación Geológica de Canadá, Reunión Anual de la Asociación Mineralógica de Canadá, St. John's, Terranova (2001): 52–53.

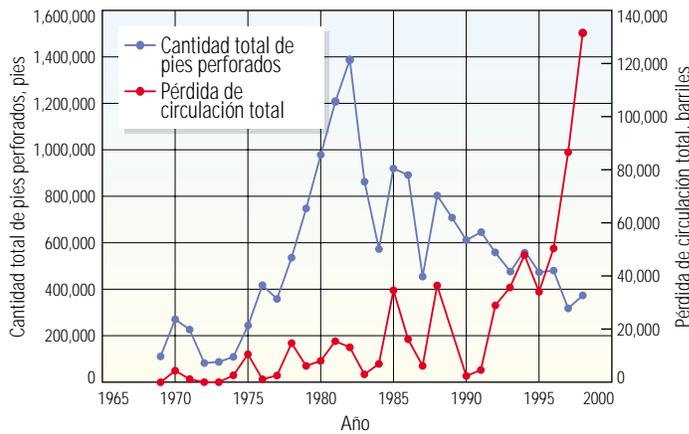


^ Diagramas de yuxtaposición (*extremo superior*) y de sellos por fallas (*extremo inferior*) correspondientes al Pozo B-16 2 del Campo Hibernia. El diagrama de yuxtaposición identifica una yuxtaposición de tipo arenisca contra arenisca en un rechazo vertical de 75 m [246 pies]. En este escenario, una arenisca de la Capa 2 presente en la pared colgante (HW, por sus siglas en inglés) es arrastrada más allá de otras litologías—areniscas impuras y una lutita intermedia—presentes en la pared de base (FW, por sus siglas en inglés) y se yuxtapone contra la arenisca basal en el intervalo superior de la Capa 3. Esta representa una posible área de fuga. No obstante, cuando se toma en cuenta la pátina arcillosa, el área de fuga potencial predicha se reduce considerablemente.

cuando los rechazos verticales superan los 30 m, aparecen las rocas de falla ricas en filosilicatos y ricas en arcillas de permeabilidad más baja. Estos resultados indican que las rocas de falla presentes en el Campo Hibernia tienen el potencial de degradar el desempeño de los pozos de producción y de los pozos de inyección por igual.

Combinado con modelos de ajuste de la historia de producción, que arrojan soluciones no únicas a partir de los diversos escenarios geológicos posibles, el análisis de sellos por fallas calibrado con los datos de fallas obtenidos de núcleos apoyó la interpretación de la forma en que las fallas afectan el flujo de fluido en el

campo. Esto condujo a la perforación del pozo inyector B-16 21, que fue emplazado de manera tal de sortear las zonas de daño por fallas peligrosas. El nuevo pozo inyector mejoró el barrido del yacimiento y proporcionó soporte de presión adicional para los pozos productores adyacentes.



^ Aumento de los problemas de pérdida de circulación en el Campo de la Bahía de Prudhoe. Junto con la declinación de la cantidad total de pies perforados (azul) acaecida en las dos últimas décadas, los problemas de pérdida de circulación (rojo) se agravaron y se volvieron más costosos. Al perforar bloques de fallas más pequeños utilizando pozos horizontales, se atravesaban más fallas que durante las primeras etapas de la perforación de desarrollo. Se observó que el incremento de la cantidad de pies horizontales perforados a fines de la década de 1990 se correlacionaba directamente con pérdidas de lodo, identificándose a las fallas como fuente predominante de los problemas de perforación.

### El análisis de sellos por fallas asiste en las operaciones de perforación

Los sistemas de fallas conductivas abiertas pueden ser tan desafiantes como las fallas que forman sellos para el desarrollo de un campo petrolero, especialmente donde esos sistemas plantean un peligro de perforación serio. Desde el comienzo de la perforación de desarrollo en el año 1970, el Campo de la Bahía de Prudhoe intensamente fallado, situado en Alaska, EUA, ha producido más de 10,000 millones de barriles [1,600 millones de m<sup>3</sup>] de petróleo. A lo largo de toda la historia del campo, los problemas de pérdida de circulación han sido comunes y han estado relacionados directamente con la cantidad de fallas atravesadas durante la perforación de los pozos. Con el volumen sustancial de reservas recuperables remanentes, el desarrollo continuo por parte de BP y ConocoPhillips requiere que se perfore penetrando bloques de fallas más pequeños y atravesando más fallas con el consiguiente aumento dramático de los problemas de pérdida de circulación y la reducción de la cantidad total de pies perforados registrada en los últimos años (arriba).

Los problemas alcanzaron niveles críticos en el año 1998, cuando 66 de 120 pozos y re-entradas experimentaron problemas de pérdida de circulación, lo que se tradujo en un costo de más de US\$ 10 millones. Los costos por tiempo insumido en resolver problemas incrementaron entre un 50% y un 100% los costos de construcción de pozos. En algunos casos, las tasas de pérdida superaron los 1000 bbl/h [159 m<sup>3</sup>/h], lo que suscitó serias pro-

cupaciones respecto de la seguridad y puso en riesgo la pérdida de los pozos. BP y ConocoPhillips, en ese momento Arco Alaska, consideraron diversas opciones para encarar los problemas de pérdida de circulación relacionados con la presencia de fallas. El equipo a cargo de los activos del Campo de la Bahía de Prudhoe podía optar por no perforar los objetivos que planteaban riesgos, reduciendo las opciones de desarrollo y las reservas recuperables, o bien emplear elevadas erogaciones imprevistas de perforación que habrían mitigado el problema pero a costa del conocimiento de su causa.

Las compañías socias que operan el Campo de la Bahía de Prudhoe, junto con RDR, decidieron investigar la causa de los problemas de pérdida de circulación—las fallas que actúan como conductos para el lodo de perforación. En el Campo de la Bahía de Prudhoe, se han interpretado más de 5,400 fallas mediante levantamientos sísmicos. Las fallas oscilan en lo que respecta a longitud del rumbo entre 152 y 4,570 m [500 y 15,000 pies] con rechazos verticales que varían de 6 a 60 m [20 a 200 pies] (próxima página, extremo superior). Primero se reprocesaron los datos sísmicos existentes para mejorar la interpretación de las fallas. Luego, se incorporaron las fallas mapeadas a una base de datos que incluía parámetros de fallas tales como orientación y longitud. Junto con los datos geológicos, se compilaban datos de perforación para todos los pozos del campo, incluyendo los volúmenes y las tasas de pérdida de circulación, y la ubicación de las pérdidas. Los datos de pozos y el ajuste de la historia de pro-

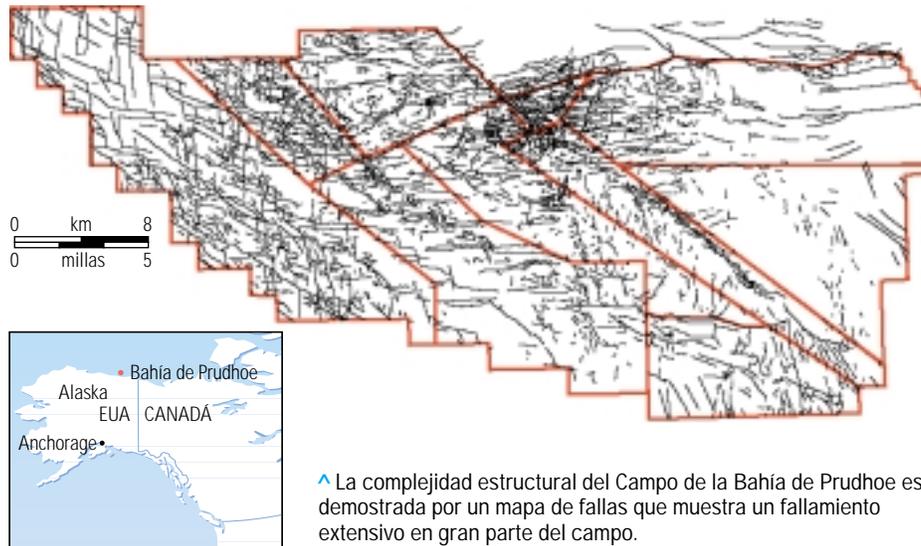
ducción también se utilizaron para adquirir un mayor conocimiento del comportamiento de las fallas, los fluidos y los yacimientos. Si bien este análisis ayudó a explicar el 80% de los problemas de pérdida de circulación, también demostró que se justificaba una exploración más detallada de las propiedades de las rocas de falla a lo largo del Campo de la Bahía de Prudhoe.

El análisis de distribuciones de fallas y propiedades de rocas de falla basado en miles de pies de núcleos extraídos de 14 pozos proporcionó la calibración necesaria para evaluar el comportamiento de las fallas. La presencia de fracturas vacuolares abiertas en los núcleos permitió identificar zonas conductivas que podrían plantear riesgos de perforación potenciales. El modelado de campo completo y de los esfuerzos locales, integrado con la historia tectónica, mostró una orientación preferencial de las fallas conductivas paralelas a la dirección del esfuerzo local máximo. Una base de datos integrada de estilos y arquitectura de fallas, propiedades de rocas de falla y datos de pérdida de circulación facilitó el estudio de las zonas de daño por fallas y el análisis de los sellos por fallas.

Las propiedades de la base de datos calibradas con las yuxtaposiciones y las distribuciones de las rocas de falla basadas en el contenido de arcilla de las fallas individuales ayudaron a reducir el riesgo de perforar pozos de desarrollo en el Campo de la Bahía de Prudhoe. La planeación de pozos previa a las operaciones de perforación ahora incorpora los datos de la base de datos para evitar áreas de perforación peligrosas (próxima página, extremo inferior).

Un año después de implementado este proyecto de caracterización de fallas integrado, se perforaron 65 pozos y re-entradas. La cantidad de pozos problemáticos, con más de 16 m<sup>3</sup> [100 bbl] de pérdida de fluido de perforación, se redujo de un 32 a un 16% de los pozos totales. Las zonas de pérdida de circulación fueron anticipadas y explicadas, lo que redujo el tiempo insumido en la resolución de problemas y permitió bajar los costos de perforación en 2 a 5 millones de dólares estadounidenses durante ese año. Sólo dos pozos experimentaron problemas significativos. El conocimiento más acabado de las fallas presentes en el Campo de la Bahía de Prudhoe permitió reducir el riesgo de perforación, mejorar la planeación de pozos y aumentar la confianza del equipo a cargo de los activos en lo atinente a continuar con el desarrollo. La reducción sustancial del riesgo de perforación ha planteado objetivos de perforación que alguna vez fueron considerados demasiado riesgosos, incrementando potencialmente el volumen de reservas recuperables.

Mapa de fallas del Campo de la Bahía de Prudhoe



^ La complejidad estructural del Campo de la Bahía de Prudhoe es demostrada por un mapa de fallas que muestra un fallamiento extensivo en gran parte del campo.

### Problema complejo, respuesta simple

Las fallas y sus influencias sobre el flujo de fluido en los yacimientos constituyen una problemática compleja. Los avances tecnológicos han mejorado nuestra capacidad de medir estas influencias, tanto directa como indirectamente. Las técnicas de ejecución de pruebas de pozos, el ajuste de la historia de producción y la inyección de trazadores radioactivos, por ejemplo, ayudan a evaluar si existen compartimentos en el yacimiento y, en ese caso, si los compartimentos se encuentran comunicados o aislados. Además se utilizan herramientas de adquisición de registros de pozos y herramientas de muestreo para evaluar rocas, fluidos y presiones de yacimiento a fin de determinar la compartimen-

talización. Recientemente, los ingenieros lograron identificar con éxito las variaciones composicionales de los fluidos relacionadas con la compartimentalización mediante la utilización la herramienta MDT de Schlumberger.<sup>23</sup> La evaluación, calibración y predicción de las fallas que compartimentalizan los yacimientos requieren un análisis sistemático que debe incluir la integración de conjuntos de datos de propiedades medidas en núcleos convencionales con datos de pozos del subsuelo y datos de producción, interpretaciones sísmicas y analogías en afloramientos y en el subsuelo.

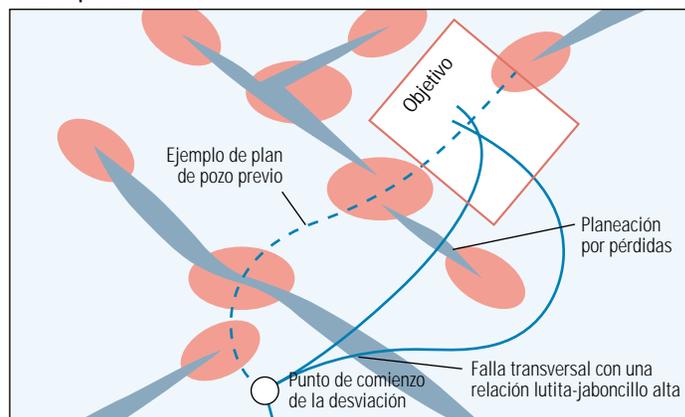
Las complejidades de fallas del subsuelo pobremente resueltas pueden ser incorporadas en simuladores de flujo de fluido de yacimientos

utilizando los resultados de estudios detallados de analogías con afloramientos. En los simuladores, los efectos de las fallas son representados como factores de transmisividad efectiva a través de secciones definidas. La transmisividad relacionada con las fallas depende de la cantidad de fallas, el espesor de las zonas de daño asociadas y las propiedades de las fallas, tales como la permeabilidad de las rocas de falla y las presiones umbrales.

La incorporación de las propiedades de las rocas de falla provenientes de las bases de datos ha permitido mejorar el ajuste histórico y el modelado del flujo de fluido a lo largo de las fallas.<sup>24</sup> Estos resultados aún contienen riesgo e incertidumbre. En el análisis de sellos por fallas, siempre habrá cierta incertidumbre relacionada con la arquitectura interna de las fallas, las propiedades de las rocas almacén, la definición de las unidades estratigráficas a partir de los levantamientos sísmicos, los efectos de la presión capilar y el alcance de la proyección del modelo dada la cantidad limitada de datos de pozos. Las bases de datos de propiedades de rocas de falla proveen el rango y la magnitud de la incertidumbre que pueden incorporarse en el modelado del riesgo, por ejemplo, mediante la utilización de las técnicas de Monte Carlo.

En el análisis de sellos por fallas se debe capturar y modelar la complejidad de las fallas, pero la respuesta ha de ser suficientemente simple como para ser utilizada efectivamente en las simulaciones de yacimientos y así reducir la incertidumbre asociada a la exploración y el desarrollo de yacimientos siliciclásticos fallados enigmáticos. —MGG

Vista en planta



^ Mejoramiento de la planeación de pozos. Con el mayor conocimiento del comportamiento de las fallas en el Campo de la Bahía de Prudhoe, las áreas con pérdidas considerables ahora pueden ser evitadas o previstas durante la perforación para alcanzar el objetivo. La información específica, tal como la relación lutita-jaboncillo a lo largo de fallas individuales, permite al equipo a cargo de los activos de las compañías identificar los puntos óptimos en los cuales atravesar las fallas para minimizar las pérdidas de lodo y reducir los costos de perforación.

23. Mullins OC, Hashem M, Elshahawi H, Fujisawa G, Dong C, Betancourt S y Terabayashi T: "Hydrocarbon Compositional Analysis In Situ in Openhole Wireline Logging," *Transcripciones del 45° Simposio Anual de Adquisición de Registros de la SPWLA*, Noordwijk, Países Bajos, 6 al 9 de junio de 2004, artículo FFF.

Fujisawa G, Betancourt SS, Mullins OC, Torgerson T, O'Keefe M, Terabayashi T, Dong C y Eriksen KO: "Large Hydrocarbon Compositional Gradient Revealed by In-Situ Optical Spectroscopy," artículo de la SPE 89704, presentado en la Conferencia y Exhibición Técnica Anual de la SPE, Houston, 26 al 29 de septiembre de 2004.

Elshahawi H, Hashem M, Mullins OC, Fujisawa G, Dong C, Betancourt S y Hegeman P: "In-Situ Characterization of Formation Fluid Samples: Case Studies," artículo de la SPE 90932, presentado en la Conferencia y Exhibición Técnica Anual de la SPE, Houston, 26 al 29 de septiembre de 2004.

Betancourt S, Fujisawa G, Mullins O, Carnegie A, Dong C, Kurkjian A, Eriksen KO, Haggag M, Jaramillo AR y Terabayashi H: "Análisis de hidrocarburos en el pozo," *Oilfield Review* 15, no. 3 (Invierno de 2003/2004): 60-69.

24. Knai TA y Knipe RJ: "The Impact of Faults on Fluid Flow in the Heidrun Field," en Jones G, Fisher QJ y Knipe RJ (eds): *Faulting, Fault Sealing and Fluid Flow in Hydrocarbon Reservoirs: Publicación Especial de la Sociedad Geológica 147*. Bath, Inglaterra: The Geological Society Publishing House (1998): 269-282.