



Predicción de fracturas naturales en la Fm Vaca Muerta

Por **Victoria Lazzari, Damián Hryb, René Manceda** y **Martín Foster** (YPF S.A.)

Este trabajo ha sido galardonado con la 2ª Mención Compartida del Simposio de Recursos No Convencionales en el IX Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos (Mendoza, 2014).

El presente trabajo pone de relieve la importancia de estudiar, caracterizar las unidades naturalmente fracturadas de la Fm. Vaca Muerta, y la interacción de estas fracturas preexistentes con las nuevas realizadas por fractura hidráulica.



En el desarrollo de reservorios no convencionales de tipo *shale*, el entendimiento de la propagación de las fracturas hidráulicas es de esencial importancia. Para ello, y en aquellas unidades naturalmente fracturadas como es el caso de la Fm. Vaca Muerta, la interacción entre el crecimiento de las fracturas hidráulicas y las fracturas preexistentes juega un rol primordial. Es por esta razón que las redes de fracturas naturales deben ser estudiadas y caracterizadas, identificando la intensidad, distribución y orientación asociada a cada evento tectónico a lo largo de la historia evolutiva de la cuenca neuquina.

En este estudio, la distribución de los esfuerzos fue calculada a partir de la interpretación estructural del área y de los esfuerzos remotos. Luego, los esfuerzos locales obtenidos fueron utilizados para construir mapas de probabilidad de fracturamiento. Posteriormente, y a partir de ensayos de laboratorio, se estableció un criterio de falla, a partir del cual las rocas de la Fm. Vaca Muerta se vuelven inestables y rompen de modo frágil; ya sea por cizallamiento

o por apertura tensional. Con estos datos se obtuvieron mapas probabilísticos para cada tipo de rotura a lo largo de la zona de estudio. La etapa final del flujo de trabajo consistió en efectuar la validación de los resultados con datos provenientes de imágenes de pozo.

Ubicación y marco geológico

La zona de estudio se encuentra ubicada en la porción central de la Cuenca Neuquina, dentro del ámbito conocido como Engolfamiento, a unos 100 km al NO de la ciudad de Neuquén (figura 1).

Desde el punto de vista estratigráfico, el intervalo de interés comprende la porción inferior del sistema Quintuco-Vaca Muerta. En el área de estudio, el mismo se encuentra representado por una sucesión mixta siliciclástica-carbonática depositada en un ambiente marino somero a profundo durante el Tithoniano-Valanginiano Inferior. El espesor total del sistema alcanza los 900 metros y su geometría se caracteriza por el desarrollo de clinofórmats progredientes desde el SE hacia el NO.

Dentro de este sistema, la Fm. Quintuco representa los depósitos marinos someros, predominantemente carbonáticos y con bajo contenido orgánico y la Fm. Vaca Muerta incluye a las facies distales, equivalentes en tiempo, y con alto contenido orgánico. El contacto entre ambas unidades es diacrónico, por lo que no sigue un reflector sísmico sino que se hace más joven al ir avanzando el sistema hacia el NO. Frecuentemente, el límite entre ambas unidades se define a partir de un umbral de contenido orgánico total (COT) medido en muestras de roca y/o a partir del método de Passey (2010).

De acuerdo a los principios de la estratigrafía secuencial, el sistema deposicional Quintuco-Vaca Muerta puede ser subdividido en dos supersecuencias de segundo orden: SS1 y SS2 (Massaferró *et al.*, 2009).

El presente trabajo se centrará en la supersecuencia más antigua (SS1) que, en la zona de estudio, alcanza 400 m de espesor, e incluye enteramente a la Fm. Vaca Muerta y a la porción inferior de la Fm. Quintuco. Tal como se mencionara anteriormente, esta Supersecuencia se caracteriza por el desarrollo de clinofórmats inclinados al NO. El límite superior de la SS1 corresponde a un reflector sísmico continuo en el este y SE del campo. Hacia el NO este reflector pierde continuidad y da lugar al desarrollo de una discordancia caracterizada por terminaciones estratales tipo *toplap* y truncación erosiva. En concordancia con su variación en el carácter sísmico, la respuesta observada en perfiles eléctricos de pozos también cambia a lo largo del campo (figura 2).

A partir de su geometría sísmica y respuesta eléctrica, la Fm. Vaca Muerta puede ser subdividida en dos secciones distintivas: Vaca Muerta Inferior se caracteriza por lecturas máximas de rayos gamma (GR) y sónico (DT) y reflexiones planas subhorizontales. Por su parte, Vaca Muerta Superior presenta una tendencia decreciente hacia arriba en GR y DT y desarrollo de clinofórmats de bajo ángulo. Litológicamente, Vaca Muerta Inferior se compone principalmente de pelitas orgánicas depositadas en un ambiente de cuenca, mientras que Vaca Muerta Superior comprende pelitas calcáreas, margas y calizas micríticas con un contenido

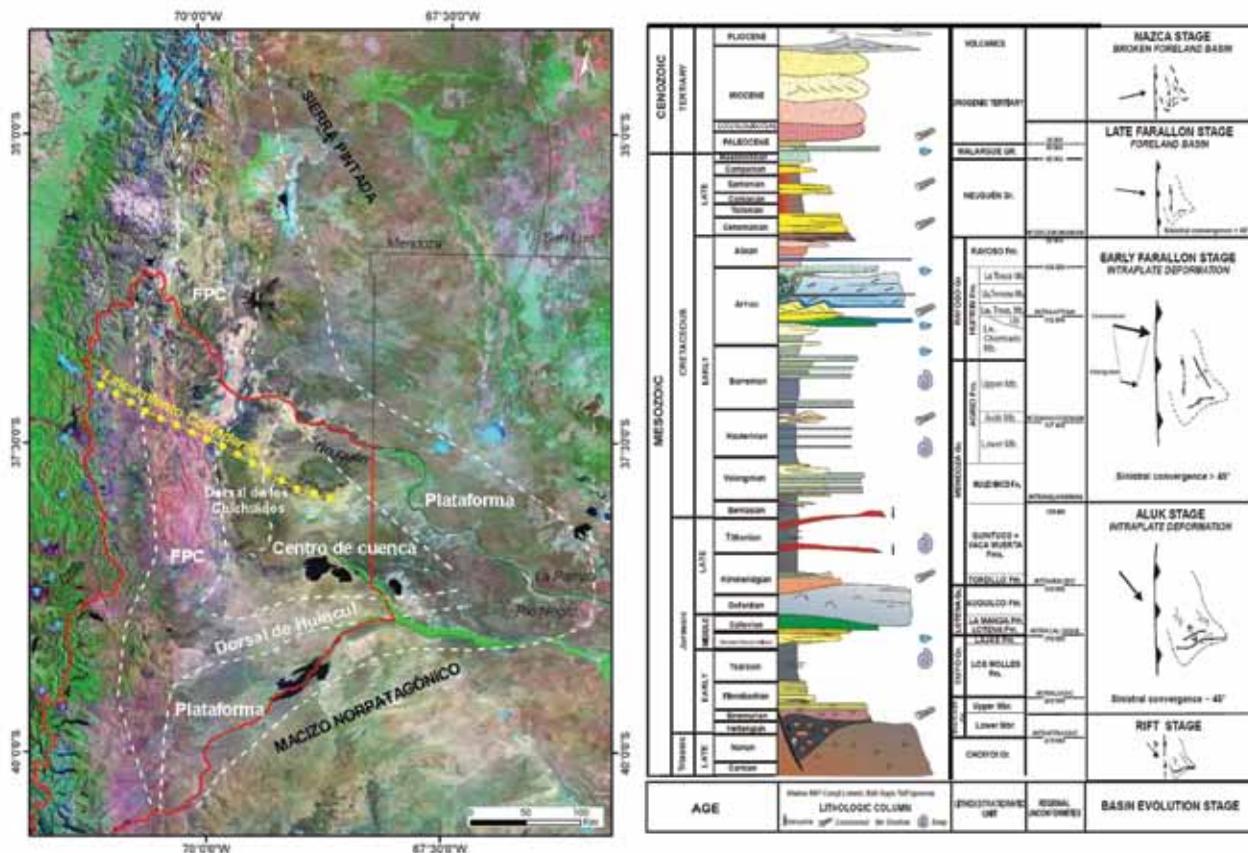


Figura 1. A la izquierda, mapa de ubicación de la zona de estudio. A la derecha, columna estratigráfica y evolución tectónica, mostrando la incidencia de la tectónica de placas en el margen Pacífico en los esfuerzos remotos del área en cuestión (Tomado de Mosquera y Ramos, 2005)

de COT variable, asociadas a un ambiente de rampa distal. Ocasionalmente, pueden encontrarse presentes capas de limo, areniscas muy finas y depósitos volcánoclasticos finos. La proporción y el patrón de apilamiento de estas facies varía desde el SE al NO, siguiendo la geometría del sistema deposicional.

Desde el punto de vista estratigráfico secuencial, Vaca Muerta Inferior representa la zona de máxima inundación, que incluye a la *Maximum Flooding Surface (MFS)*, y Vaca Muerta Superior corresponde al *Highstand System Tract (HST)*.

El análisis de detalle realizado en coronas y perfiles y las observaciones de campo (Sagasti *et al.*, 2014) sugieren variación de facies lateral y vertical en todo el intervalo de

la Fm. Vaca Muerta, lo cual se traduce en una gran heterogeneidad. El entendimiento de la heterogeneidad, tanto geográfica como estratigráfica, constituye un aspecto clave en la caracterización de este reservorio no convencional, dado que afecta a la calidad de reservorio tanto como a la calidad de completación.

Además de la heterogeneidad asociada a los cambios faciales, las discontinuidades geológicas tales como fracturas y fallas afectan de modo significativo la geometría y el tamaño de las fracturas hidráulicas (Warpinski y Teufel, 1987; Teufel y Clark, 1984). Es por ello que su entendimiento resulta clave para mejorar la capacidad predictiva de los modelos de propagación de fracturas hidráulicas y así optimizar el desarrollo de este tipo de reservorios.

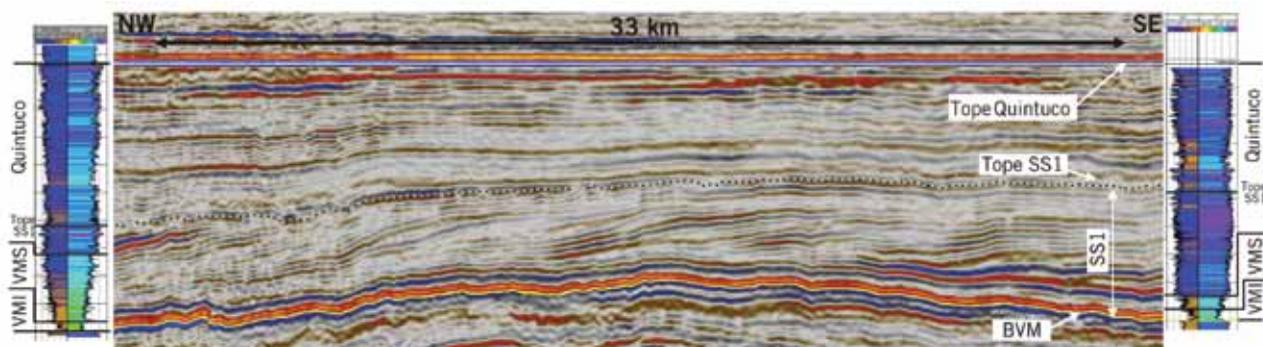


Figura 2. Sección sísmica de orientación NO-SE ilustrando la geometría y subdivisiones del sistema Quintuco-Vaca Muerta.



CONFERENCIA DE PETRÓLEO Y GAS
ARPEL 2015
AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE

7 al 9 de abril de 2015
Hotel Conrad
Punta del Este, Uruguay

COOPERACIÓN E INNOVACIÓN PARA
UN DESARROLLO ENERGÉTICO SOSTENIBLE

Foro de
Agencias de
Hidrocarburos



Encuentro de Presidentes
de Compañías de
Petróleo y Gas



Sesión de
Centros
de I+D

Algunos disertantes destacados:



Pierce Riemer
Director General - WPC



Pål Rasmussen
Secretario General - IGU



Miguel Galuccio
Presidente y CEO - YPF



Carlos Ormachea
CEO - Tecpetrol



Steve Crowell
Presidente y CEO -
Pluspetrol



Marcelo Tokman
CEO - ENAP

+ INFO

Por inscripciones, patrocinios o exhibición:
www.conferenciaarpel.org

infoconferencia@arpel.org.uy
(+598) 2410 6993 ext. 141
@ARPEL_Petroleo

Inscríbase
antes del
26 de marzo
para obtener
descuento

PATROCINADOR NACIONAL



PATROCINADORES PLATINO



Schlumberger



PATROCINADORES PLATA



Deloitte



PATROCINADORES BRONCE



Schuepbach Energy
International



DECLARADO DE
INTERÉS NACIONAL:



Contexto estructural

Desde un punto de vista estructural, la zona de estudio constituye para la Base de Vaca Muerta un homoclinal tendido que buza suavemente hacia el NE.

Hacia el este, se encuentra la zona menos compleja, representada por un sistema de fallas *en echelon* de rumbo predominante NNO. Por su parte, en la zona occidental el sistema de fallas NNO converge con otro, de orientación NNE y carácter predominantemente compresivo (figura 3). Ambas zonas se encuentran l mediante una zona de transferencia o acomodación submeridiana.

La evolución tectónica del área comenzó en el Triásico superior-Jurásico inferior con la generación de hemigrábenes desconectados, limitados por sistemas de fallas normales de basamento, cuya orientación es predominantemente ONO. Estos bajos estructurales controlaron la acumulación de los depósitos de *synrift* durante el Jurásico inferior y medio (Franzase y Spalletti, 2001). La interpretación sísmica llevada a cabo reveló que estos hemigrábenes se encuentran bien desarrollados en el este y centro del área, mientras que pierden expresión hacia el oeste, en donde Cristallini *et al.* (2005) y Cristallini y Bulher (2007) definen una zona de transferencia. Esta zona representa una franja de orientación NNE en donde las fallas precuyanas principales terminan o intercambian sus rechazos.

En el Jurásico inferior, y como producto de la oblicuidad resultante de un campo de esfuerzos de orientación NO y los lineamientos de basamento de rumbo ONO, las fallas profundas sufrieron reactivación e inversión oblicua. Es por esa razón que la deformación principal en la base de Vaca Muerta tuvo lugar como un sistema de rumbo dextral (Cristallini *et al.*, 2005, Silvestro y Zubiri, 2008). Consecuentemente, en la zona oriental se desarrolló un sistema de fallas escalonadas (*en echelon*) de orientación NO que se encuentra enraizado o nucleado sobre las fallas de basamento profundas (figuras 3b y c). El carácter y comportamiento de estas fallas es complejo, dado que las mismas presentan inflexiones a lo largo de su rumbo. Dichos cambios implican que una misma falla pueda comportarse como extensiva o contraccional de acuerdo a su orientación con respecto al esfuerzo máximo horizontal. Si bien se identificaron intervalos con desplazamiento inverso, a los efectos del presente trabajo se las consideró como un sistema de fallamiento de rumbo, de carácter convergente oblicuo. Se considera que estas fallas estuvieron activas hasta el Cretácico superior y afectaron la Fm. Vaca Muerta y, en algunos casos, a la Fm. Quintuco. Sin embargo, un análisis cinemático de detalle de las fallas se encuentra fuera del objetivo del presente trabajo; las mismas fueron analizadas mediante los diferentes campos de esfuerzo a las que fueron sometidas durante su evolución tectónica.

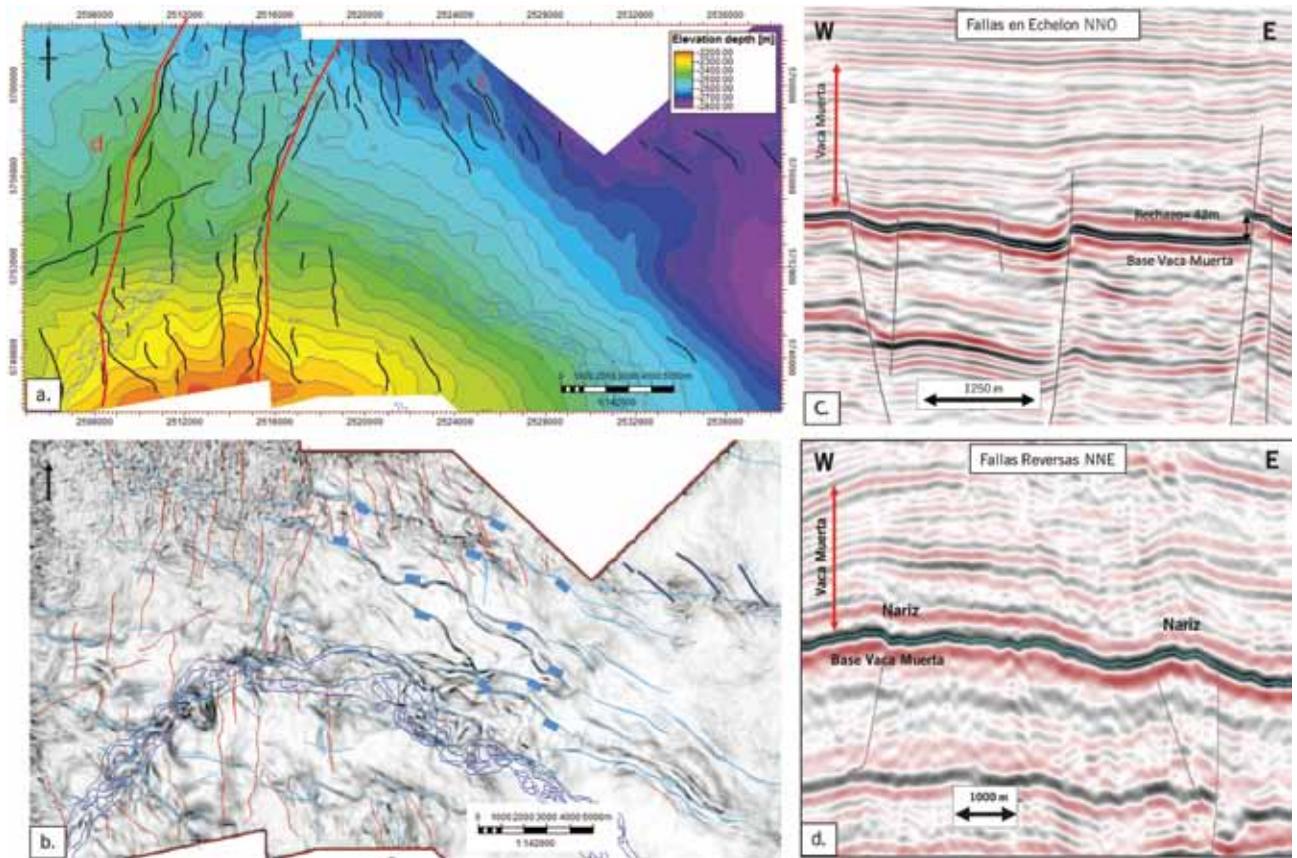


Figura 3. a) Mapa estructural a la base de la Fm. Vaca Muerta. Se indica en líneas puntuadas rojas los límites de la zona estructuralmente más compleja, limitada por la presencia de dos narices estructurales de orientación NNE. En rojo se ubican las secciones sísmicas; b) Depth slice de varianza a 4.500bnmm. Se indican en color celeste fallas de basamento de rumbo ONO. Superpuestas en azul se muestran las fallas en echelon cortando a la base de la Fm Vaca Muerta en el sector oriental y en rojo el sistema de orientación NNE, de carácter predominantemente compresivo, del área occidental. En verde se indica lineamiento de rumbo de orientación ENE. c) Sección sísmica de orientación O-E mostrando el carácter del sistema de fallas en echelon. d) Sección sísmica de detalle de orientación O-E en donde se pueden observar con una escala horizontal comprimida las narices estructurales de rumbo NNE asociadas al fallamiento compresivo del mismo rumbo.

Hacia el oeste de la zona de acomodación, en donde las fallas de basamento pierden rechazo y expresión, y por lo tanto también lo hacen los hemigrábenes precuianos, la deformación debió necesariamente acomodarse de otro modo. Es por esta razón que se interpreta se desarrolló un sistema de fallas de rumbo NNE de carácter predominantemente contraccional (figura 3d). Se trata de fallas sutiles, de escaso rechazo, frecuentemente por debajo de la resolución sísmica, o de simples flexuras. Los máximos rechazos se dan en la base misma de la Fm Vaca Muerta, alcanzando máximos de 40 m y decreciendo tanto hacia horizontes subyacentes como suprayacentes.

Un rasgo estructural importante a la base de Vaca Muerta se asocia con la presencia de dos “narices estructurales” de orientación NNE y genéticamente asociadas al sistema de fallas reverso de rumbo NNE (figura 3a). Dichos altos estructurales limitan la zona más compleja del área en donde se han interpretado, a partir de mediciones de *breakouts* en imágenes, variaciones en el máximo esfuerzo horizontal de hasta 30°. Estas variaciones de la orientación del máximo esfuerzo horizontal se deben a la interacción del esfuerzo remoto con las fallas descriptas, generando esfuerzos locales.

Finalmente, se reconoce en la zona occidental del área un lineamiento de rumbo ENE que puede ser seguido por varios kilómetros hacia el oeste de la zona de transferencia. La expresión de este rasgo en sección sísmica es una depresión o valle asociado con cambios en la inclinación de los reflectores y que puede ser asignado a una divergencia oblicua de una falla de rumbo del basamento de la cuenca. Fuera de la zona de estudio, este lineamiento fue reconocido como una falla de basamento normal y de alto ángulo. Algunos autores (Cristallini *et al.*, 2005 y Brinkworth *et al.*, 2011) describen a esta estructura como una falla de rumbo de desplazamiento dextral relacionada con el levantamiento de la Dorsal de Huincul.

Predicción de fracturas naturales

Las rocas han sufrido, a lo largo de su historia geológica, una serie de esfuerzos que han ido variando en intensidad y dirección durante la evolución de la cuenca. Cada uno de estos eventos tectónicos pudo haber contribuido de manera diferencial en la generación de fracturas naturales, y es necesario identificar la orientación y magnitud de este estrés remoto responsable de la generación de las fracturas identificables en los registros de pozos y/o coronas. El método utilizado consiste en calcular el campo de estrés responsable de la generación de las fracturas en la Fm. Vaca Muerta utilizando geomecánica. Cuando el campo de estrés supera la resistencia del material, representada por la envolvente de falla para un determinado material, la roca se romperá generando fracturas tensiles y fracturas por corte.

El modelo geomecánico utilizado calcula la distribución del campo de estrés a partir de la geometría de la estructura interpretada en la sísmica 3D del área y de las propiedades elásticas de las rocas. Este estrés local estimado, sumado a un criterio de fallamiento de roca utilizado, se usó para predecir fracturas.

El programa utilizado fue Poly-3D, que resuelve las ecuaciones lineales de elasticidad representando las super-

ficies de fallas y horizontes interpretados mediante una serie de elementos triangulares, cada uno de ellos de desplazamiento constante. El programa calcula el estrés, el tensor de esfuerzos y deformación en cada nodo de una grilla con elementos triangulares de la superficie de observación, que para el caso de estudio se trata de la Base de la Formación Vaca Muerta. Las propiedades elásticas asociadas al horizonte fueron la de un shale, asignándole valores consistentes con los obtenidos a partir de ensayos de laboratorio en coronas.

Metodología

Como se mencionó anteriormente, fue necesario correr las simulaciones del modelo para cada orientación de esfuerzo remoto que actuó sobre la Formación Vaca Muerta desde su depositación hasta la actualidad. Para ello, y como punto de partida, se recurrió a bibliografía específica; la cinemática de la tectónica de placas descrita por Zonenshayn *et al.* (1984, 1987), Jaillard *et al.* (1990), y Scheuber *et al.* (1994), demuestra importantes cambios en la orientación del vector convergente entre las placas oceánicas adyacentes y la placa Sudamericana, la cual es sintetizada en el trabajo de Mosquera y Ramos (2005) (ver figura 1).

Hace alrededor de 160 Ma, en el Jurásico inferior a medio, las placas sudamericana y norteamericana comenzaron a separarse, y tuvo lugar la formación de la placa Caribe. En este período, la convergencia relativa entre la placa Sudamericana y la de Aluk tenía una fuerte orientación oblicua NNO (N320°). Posteriormente, y durante gran parte del Cretácico, la convergencia de la nueva placa, denominada Farallón, produjo un vector casi ortogonal al margen oeste (N285°). La reconstrucción de Pardo-Casas y Molnar (1987) y Somoza (1998), permite detallar la convergencia de las Placas Nazca y sudamericana en el Terciario. Durante el Paleógeno, esta convergencia se caracterizó por su alta oblicuidad que fue disminuyendo progresivamente hacia el Neógeno. En el presente trabajo se utilizó para este período un esfuerzo horizontal de orientación N255°.

La dirección de convergencia actual está siendo estudiada, debido a que la cinemática de los eventos post-sísmicos registrados luego del terremoto de Chile en 2010, indican una dirección contraria a la dirección de los vectores del campo de velocidad de la placa previa al terremoto. Sin embargo, en la zona de estudio, la dirección de máximo esfuerzo pudo calibrarse con direcciones calculadas a partir de los *breakouts* interpretados en imágenes (N270°) en decenas de pozos perforados desde el 2011 en adelante.

A partir de esta información, se decidió generar simulaciones para cuatro estadios de deformación, representados por los siguientes eventos: un evento Jurásico cuyo campo de esfuerzo principal fue un S1 vertical, una dirección de máximo estrés horizontal S2 de N320° y un S3 perpendicular a ambos; un evento de edad cretácica de *strike slip* con un S1 horizontal de orientación N285°, un S2 vertical y un S3 perpendicular a ambos; un evento Terciario, también de *strike slip*, cuyo campo de esfuerzo principal se compone de un S1 en la dirección del máximo esfuerzo horizontal y de orientación N255°; y por último un estadio reciente, donde el S1 es vertical, el máximo esfuerzo horizontal, en este caso S2, de orientación N270° y el S3 perpendicular a ambos.

Para cada una de las simulaciones realizadas se seleccionaron únicamente las fallas interpretadas que estaban presentes para los estadios tectónicos mencionados. Asimismo, se adaptaron las propiedades elásticas obtenidas de laboratorio para Vaca Muerta (módulo de Young y relación de Poisson), a las condiciones de confinamiento supuestas para cada caso.

Como resultado de las simulaciones generadas con el modelo geomecánico propuesto, se obtuvieron mapas de probabilidad de ocurrencia de fracturas naturales en la Formación Vaca Muerta para cada uno de los 4 eventos, Jurásico, Cretácico, Terciario y Reciente. Estos mapas muestran en forma cualitativa, las variaciones en magnitud y orientación de los esfuerzos principales generados por las fallas. Se utilizó el máximo esfuerzo de cizalla de Coulomb (MCSS), como un indicador de la intensidad de fracturación, cuyo valor es determinado por:

$$MCSS = \left(\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2} \sqrt{1 + \mu^2} \right) - \mu \left(\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2} \right)$$

Donde σ_1 y σ_3 son los máximos y mínimos esfuerzos efectivos principales y μ es el coeficiente de fricción interna. La orientación de las fracturas es estimada al encontrarse en el plano $\sigma_1 - \sigma_2$, el esfuerzo efectivo compresivo

principal y el intermedio correspondientemente. El criterio de Coulomb también puede ser descripto por el círculo de Mohr, definido por:

$$\chi_{\text{shear}} = \tau_m - \sigma_m \sin \phi \quad \text{y} \quad \chi_{\text{tensile}} = \tau_m - \sigma_m$$

Donde ϕ es el ángulo de fricción interna,

$$\sigma_m = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2} \quad \text{y} \quad \tau_m = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2}$$

La distribución de intensidad de cizalla máxima de Coulomb (figura 4) está asociada en general a las fallas que afectan a Vaca Muerta; los valores intermedios a altos se encuentran cercanos a los tips de las fallas, debido al carácter de desplazamiento lateral de las mismas.

En una segunda etapa, se procedió a un análisis semi-cuantitativo a fin de determinar si las fracturas generadas serían tensionales o de cizalla; se utilizó el criterio de fractura de Griffith para las primeras y el criterio de fallamiento de Coulomb para las fracturas de corte. Se graficaron los puntos de esfuerzos efectivos resultantes de las simulaciones generadas para cada evento, donde en el eje de las abscisas se graficaron los valores de esfuerzo efectivo promedio $(\sigma_1 + \sigma_3)/2$, y en el eje de las ordenadas el máximo esfuerzo efectivo de corte $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$. Con los resultados de ensayos de tensión-deformación llevados a cabo en

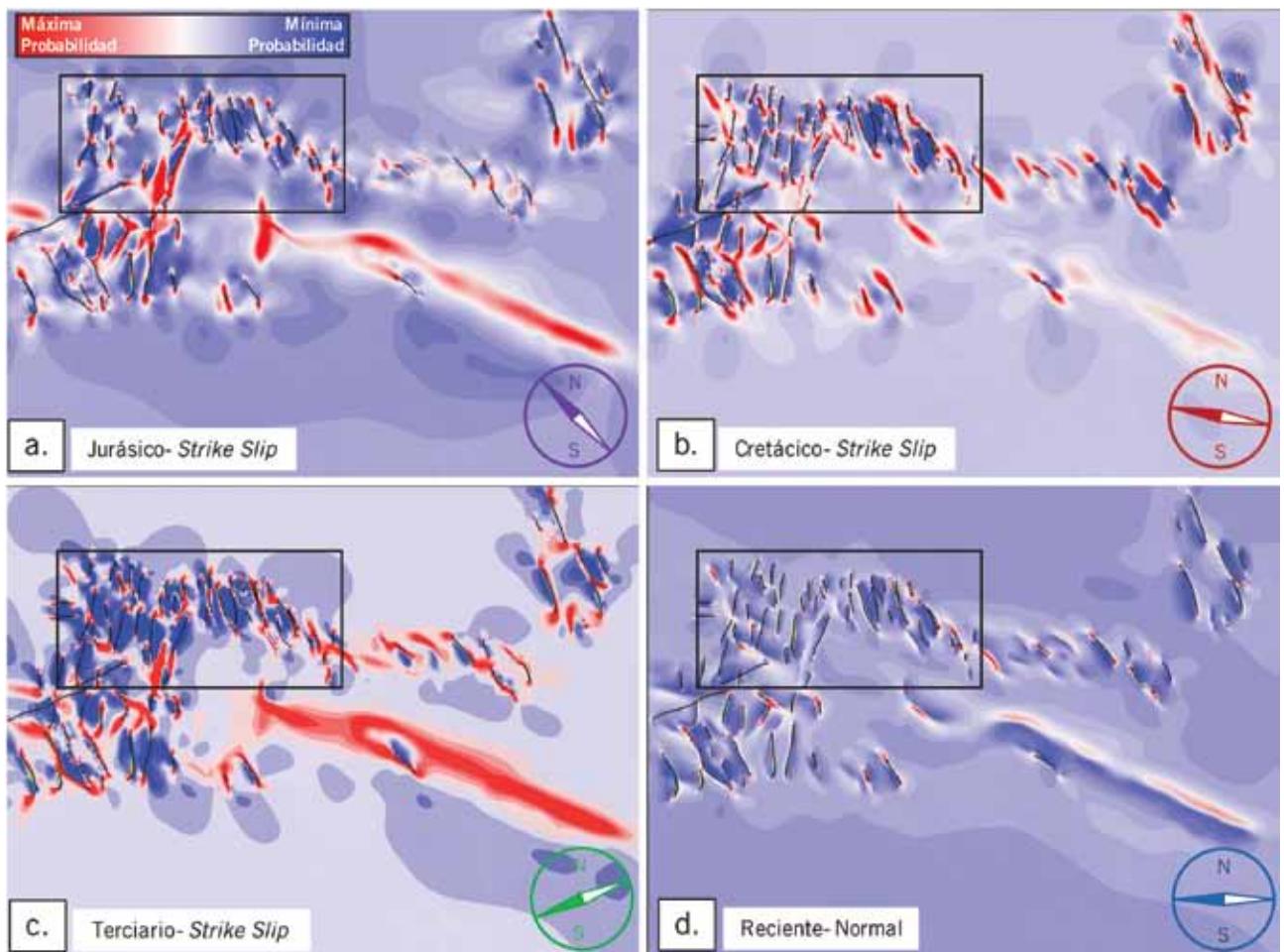


Figura 4. Mapas regionales de Cizalla Máxima de Coulomb, utilizada en el presente trabajo como un indicador de probabilidad de fracturamiento, para la Base de Vaca Muerta. a) Evento de deformación Jurásico N320°; b) Evento Cretácico N285°; c) deformación Terciaria N255° y d) Evento de deformación reciente N270°. En rectángulo negro se indica la zona en la cual se efectuaron corridas con mayor detalle (ver figura 6).

Digesto de Legislación Ambiental on line

Nuevo Digesto de Legislación Ambiental Argentina del IAPG

- La más completa recopilación, permanentemente actualizada, de todas las normas ambientales a nivel nacional, provincial y municipal aplicables a la actividad industrial. Incluye su interacción con las normas sobre Higiene y Seguridad.
- Todos los artículos de la Constitución Nacional y de las Constituciones Provinciales y de los Códigos Civil y Penal referidos a temas ambientales.
- Leyes y Decretos Nacionales, tratados internacionales, resoluciones, disposiciones, estatutos y convenios de Ministerios, Secretarías y Subsecretarías del Estado y de Direcciones Nacionales.
- Resoluciones y Disposiciones del ente Tripartito de ETOSS, ENHDS, Prefectura Naval Argentina, Administración de Parques Nacionales, CNTA y otros organismos reguladores.

La información se puede consultar por orden cronológico, materia o jurisdicción. El sistema permite búsquedas por tipo y número de norma, temática, palabras claves, etc.

Sistema de favoritos que permite al suscriptor seleccionar su conjunto de normas de uso frecuente.

La recopilación se actualiza **diariamente** con las últimas novedades que se produzcan en las distintas jurisdicciones y por email se **avisa** a los suscriptores de la inclusión de las normas en el Digesto.

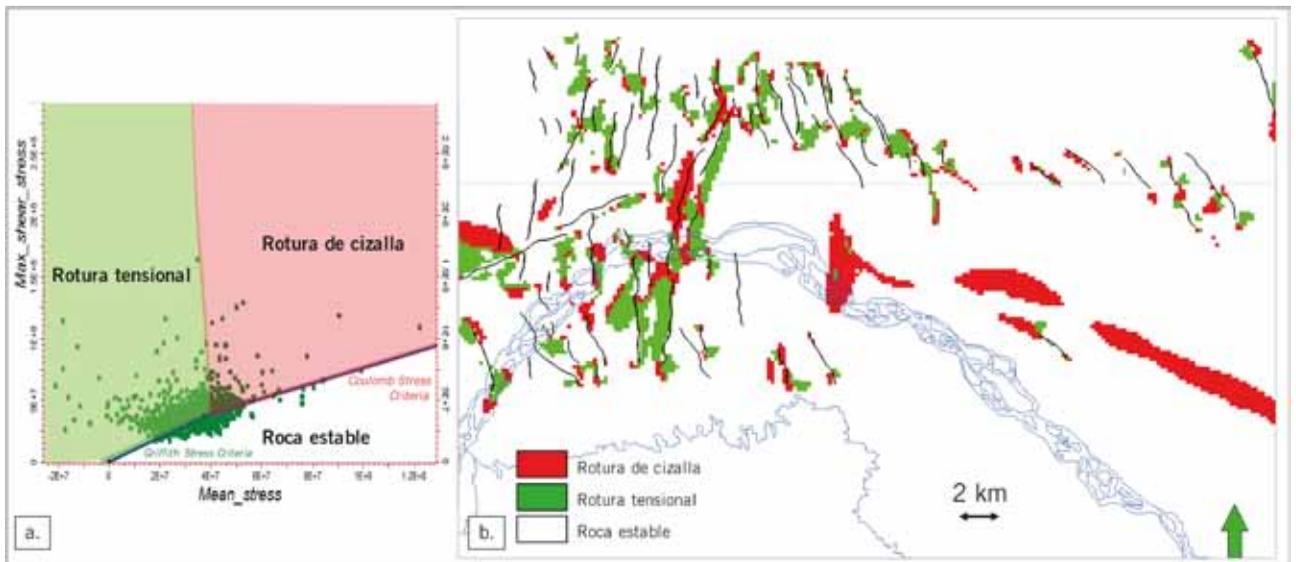


Figura 5. a) Criterio de falla extraído de ensayos de laboratorio para rocas de la Fm. Vaca Muerta. b) Mapa probabilístico de rotura de tipo tensional vs. de cizalla para el Cretácico.

laboratorio sobre coronas de Vaca Muerta, se extrajo la envolvente de falla. Aquellos puntos que quedan por sobre la recta pertenecen a rocas que se rompen, y los puntos que quedan por debajo de la recta pertenecen a roca estable. De este modo, se obtuvo un mapa probabilístico de cada tipo de rotura para cada evento simulado. En la figura 5 se muestra a modo de ejemplo el mapa correspondiente al evento cretácico N285°.

Es necesario aclarar que cualquiera sea el criterio de falla utilizado, la extensión lateral de las áreas fracturadas es difícil de predecir, debido a la incertidumbre existente tanto en la resistencia de la roca relativa al esfuerzo remoto como a las magnitudes de dichos esfuerzos. Cuanto mayor sea la resistencia de la roca menor será el área fracturada

y más restringida a las cercanías de las fallas. Sin embargo, la forma y la orientación que tienen los agrupamientos de fracturas es mucho menos incierta, ya que depende de factores conocidos como son la geometría de las fallas y la orientación del estrés remoto.

Calibración del modelo con datos de pozo

Calibración de las orientaciones

Para este trabajo se utilizaron 9 pozos verticales con imágenes acústicas o resistivas, que fueron interpretadas por el mismo operador a fin de eliminar el sesgo debido a diferentes criterios de interpretación.

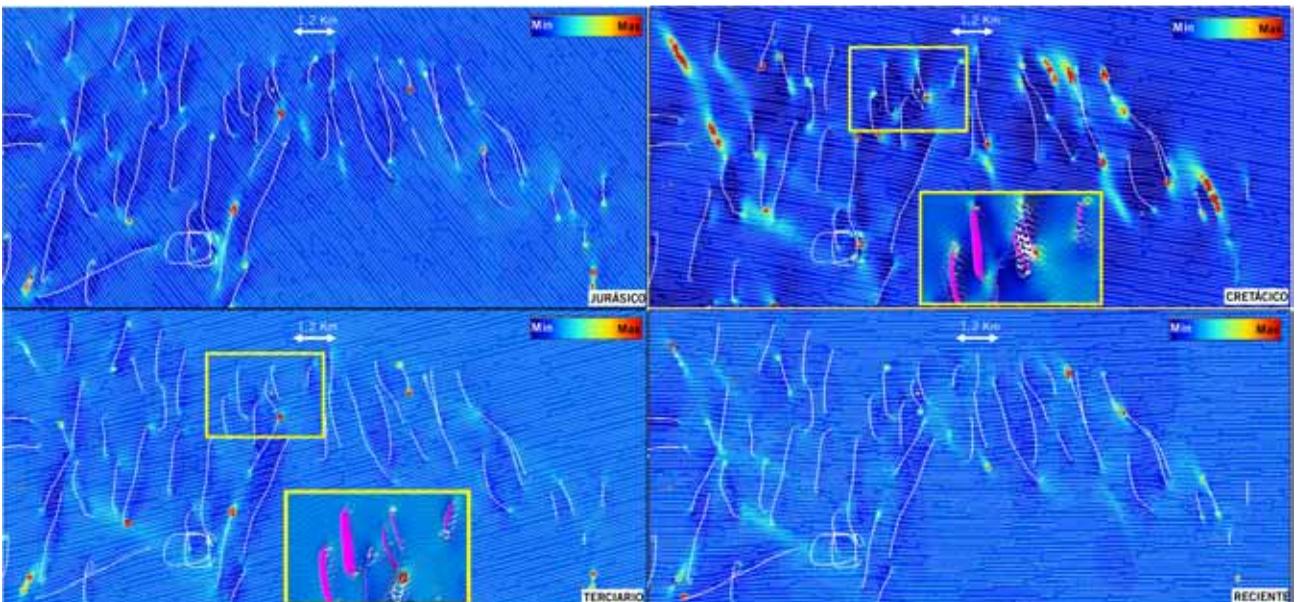


Figura 6. Cada cuadro representa un evento tectónico sobre la superficie de observación Base de Vaca Muerta. Los colores cálidos indican zonas de máxima densidad de fracturas. Nótese que las mismas se encuentran fundamentalmente en las terminaciones de las fallas, representadas por las líneas blancas de trazos gruesos. En líneas blancas de trazo fino se indica la orientación de las fracturas teóricas de tipo tensional (diaclasas). Los recuadros amarillos representan áreas magnificadas en las cuales se muestran los planos de falla (color fucsia) y las orientaciones de los pequeños planos de fracturas de cizalla, los cuales pueden rotar de manera drástica en cercanía a las fallas.

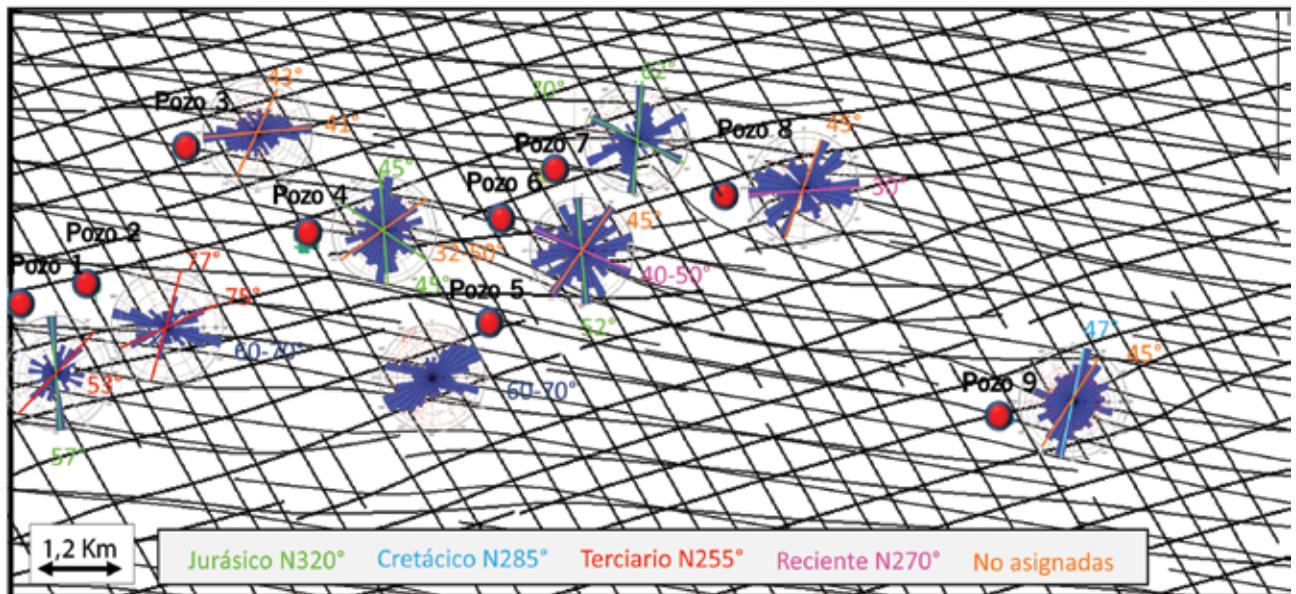


Figura 7. En trazos color negro se superponen las direcciones de rotura tensional (díaclasas) para cada evento tectónico, y los diagramas de rosa con las fracturas naturales interpretadas en imágenes para cada pozo analizado. Se observa coincidencia en las orientaciones de los planos de díaclasas, mientras que las orientaciones coloreadas se interpretan como planos de fallas (cizalla) correspondiente a distintas corridas según el siguiente esquema de colores: Verde-Jurásico; celeste-cretácico; rojo-Terciario y Fucsia-Reciente. En naranja se resaltan aquellas familias que podrían asignarse a pequeñas fallas con desplazamiento de rumbo. Se indican además los ángulos de buzamiento promedio para cada familia.

En este trabajo no se diferenciarán las fracturas abiertas de las cerradas, ya que no se cuenta con un método efectivo para hacerlo. Algunas publicaciones recientes (Astesiano *et al.*, 2013), mencionan formas de detectar fracturas naturales abiertas a través de perfiles sísmicos y de temperatura, y comprueban con mediciones de perfiles de producción o PLT que dichas fracturas aportan hidrocarburo, aunque no se menciona el impacto en el volumen total producido.

En una primera instancia se realizó la calibración de las orientaciones de las fracturas a fin de identificar qué evento tectónico resultaría responsable de cada orientación, tanto de fallas como de díaclasas. Para esto, se buscó correlacionar en cada uno de los cuatro mapas de probabilidad de fracturas calculados, la orientación de los planos de fallas por corte y por tensión en los nodos de la grilla atravesados por los pozos utilizados.

En la figura 6 se observan las orientaciones de fracturas y fallas sobreimpuestas a los mapas de densidad de fracturas para cada evento tectónico. En este caso, se extrajo un área del total para visualizar mejor la complejidad de la red de fracturas naturales en Vaca Muerta. La grilla utilizada fue de 150 metros, lo que permitió una optimización del tiempo máquina para cada modelo. Obviamente, modelos más detallados requieren una grilla menor aunque los tiempos de procesamiento son enormes.

En la figura 7 se sobreimpusieron las orientaciones de cada evento y los sondeos que tienen información de imágenes de pozos para la unidad Vaca Muerta. Cada roseta incluye todas las orientaciones de fracturas y fallas de cada sondeo. Como se observa en el gráfico, la red teórica de fracturas naturales es compleja y, aun así, se observa gran coincidencia con los datos de imágenes de pozos. En algunos casos, las desviaciones se asignan a las pequeñas fallas de corte o cizalla que se visualizan en la figura 6. Las mismas fueron asociadas a distintos eventos mediante el uso

de un código colorimétrico. En el caso de los planos de falla asociados al evento reciente, y dado que el S1 es vertical y el S2 de orientación N270°, el rumbo de las díaclasas es coincidente con el rumbo de las fallas normales asociadas a este régimen. El único elemento que permite discriminar un tipo de plano de otro es el ángulo de buzamiento. Sin embargo, el sesgo natural en pozos verticales será la ausencia o escasez de fracturas subverticales, por lo cual la separación resulta aún más compleja. Las orientaciones con color naranja de los Pozos 3, 6 y 9 que tienen valores de N20° y una orientación en el pozo 3 de N85°, podrían asignarse a pequeñas fallas, y en el caso particular del pozo 3 a un sistema conjugado, con desplazamiento de rumbo.

Asimismo, a partir de algunas microsísmicas registradas en la zona de estudio, se observan fundamentalmente tres direcciones predominantes de crecimiento de las fracturas. La más conspicua (N280°-290°) coincide con la dirección esperable de crecimiento de la fractura hidráulica correspondiente a la dirección del máximo esfuerzo horizontal. Las direcciones restantes (N210° y N240°) pueden ser explicadas por algunas de las familias de fracturas naturales observadas en las imágenes de pozos cercanos (figura 8). Otro dato relevante consiste en reiteradas conexiones de pozos observadas, tanto durante la estimulación como la producción, coincidentes con esas mismas direcciones. Es decir que se comprueba la existencia de una red de fracturas.

Un último elemento de calibración fueron las direcciones de máximo esfuerzo horizontal, calculadas en decenas de pozos a partir de los *breakouts* interpretados en imágenes. Las perturbaciones generadas en los esfuerzos principales debido a la presencia de fallas han sido identificadas en los *breakouts* con rotaciones de hasta 30° en SHmax y se han podido reproducir en la corrida para tiempos recientes efectuada en Poly3D. Este hecho le confiere confiabilidad a los resultados obtenidos (figura 9).

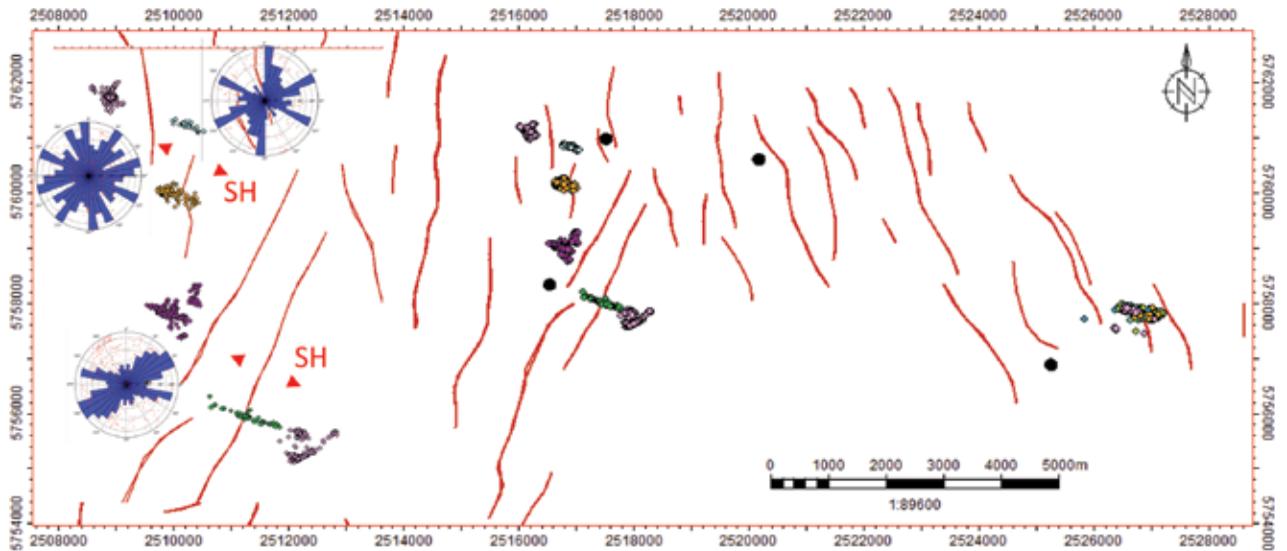


Figura 8. Direcciones de crecimiento de fracturas hidráulicas a partir de microsísmica. Se observa coincidencia en las orientaciones con fracturas interpretadas en imágenes de pozo y la dirección del esfuerzo máximo horizontal local.

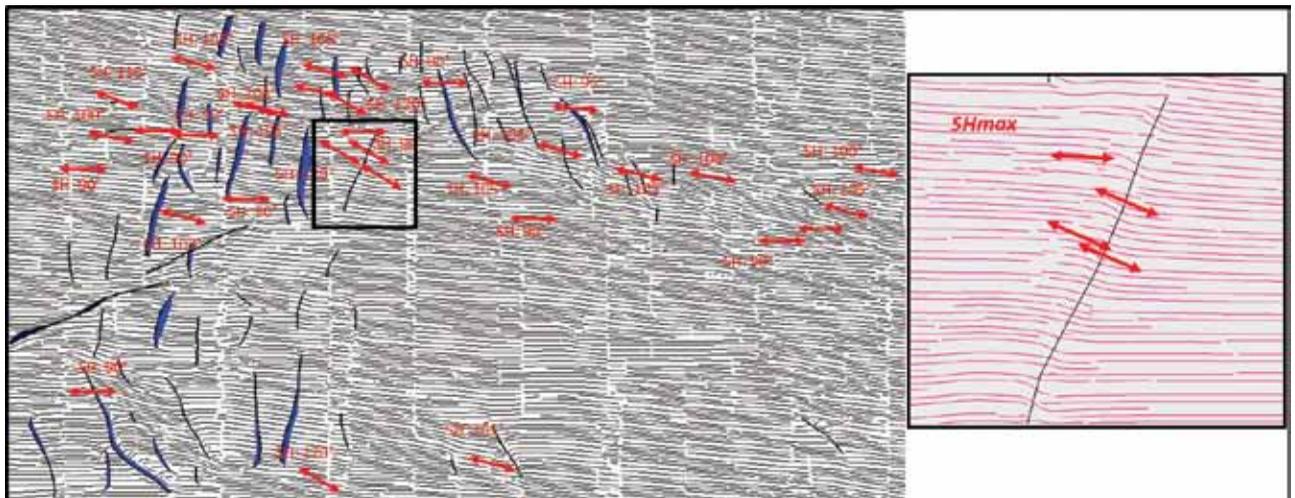


Figura 9. Mapa de Máximo esfuerzo horizontal para la simulación de evento reciente con superposición de direcciones de *breakouts* extraídas de imágenes de pozos a lo largo de la zona de estudio.

Calibración de las intensidades de fracturamiento

En la figura 10 se observa la misma zona reducida que en las figuras 6 y 7. En la misma, se ve con claridad qué zonas fueron afectadas por un mayor cizallamiento y, en consecuencia, se consideran zonas de mayor probabilidad de fracturación, generalmente asociadas a las terminaciones de fallas. Esto indicaría procesos de desplazamiento lateral en la mayor parte de la evolución tectónica. Los colores cálidos implican zonas máximas de acuerdo al código de colores.

Evidentemente, las áreas de mayor intensidad de fracturas están asociadas a la geometría de las fallas y a la interacción de las mismas, lo que produce una rotación de los esfuerzos y la modificación de los planos de fallas y diaclasas. Las densidades de fracturas de los sondeos están relacionadas a la magnitud de la reactivación de cada falla y a la interacción entre las mismas.

Futuras calibraciones involucrarán la relación entre productividad de los pozos y zonas de mayor o menor in-

tensidad de fracturamiento. Esta relación es muy compleja debido a los distintos factores que controlan el comportamiento dinámico de los pozos, como ser:

- 1) Número de etapas de fracturas hidráulicas en cada sondeo.
- 2) Interacción entre las fracturas naturales e hidráulicas.
- 3) Distribución y tipo de cementos en las fracturas naturales.
- 4) Orientación de las fracturas naturales respecto del esfuerzo "in situ" que controla la orientación de las fracturas hidráulicas.
- 5) Variaciones estratigráficas y geomecánicas, variaciones en espesor útil, propiedades petrofísicas, distribución de facies y patrones de apilamiento.
- 6) Variaciones en la complejidad estructural.
- 7) Distribución de zonas sobrepresurizadas.
- 8) Problemas operativos y gerenciamiento de la producción.

Capacitación técnica
profesional para
la industria del
petróleo y del gas

PROGRAMA

ESPECIALIZADO

EN SUPPLY CHAIN

MANAGEMENT



El Instituto Argentino del Petróleo y del Gas conjuntamente con Aden International Business School han desarrollado este nuevo Programa Especializado de Supply Chain Management. Con innovadores sistemas de transferencias

de conocimiento, este Programa se enfoca en la formación de profesionales y directivos, para que comprendan y planifiquen los procesos logísticos inherentes a la Industria del Petróleo y del Gas, utilizándolos para aumentar la competitividad de la empresa.

Vacantes limitadas. Para más información: cursos@iapg.org.ar

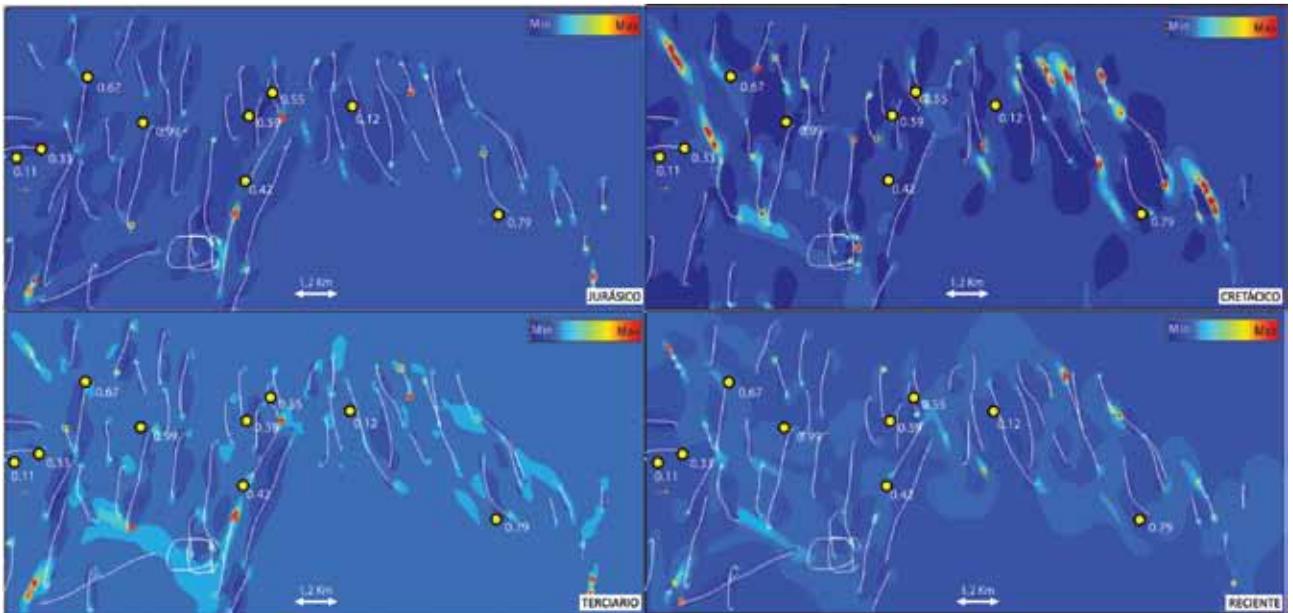


Figura 10. Zonas de máxima cizalla de Coulomb para cada evento tectónico. Los máximos esfuerzos se indican en colores cálidos. Los puntos rojos representan sondeos y los números indican densidad de fracturas (fracturas/metro).

Discusión

La metodología descrita implica que se deban realizar hipótesis sobre ciertos parámetros de entrada. Las propiedades elásticas de las rocas a lo largo de su historia geológica, el régimen de esfuerzos remoto y su magnitud para cada régimen de deformación son algunos de ellos, siendo los últimos los que más impacto generan en los resultados de cada simulación.

La orientación de los esfuerzos que sirvieron de entrada a cada corrida, con la excepción del campo de esfuerzos reciente que pudo ser calibrada con datos de imágenes de pozo, fue inferida a partir de la bibliografía consultada.

Las orientaciones del esfuerzo remoto tomadas para los diferentes eventos tectónicos pueden generar reactivaciones de las fallas y fracturas generadas, de manera que las mismas se pueden reactivar con procesos de cizallamiento o de compresión simple.

La interpretación de las fallas y la orientación del esfuerzo remoto seleccionado pueden generar una dispersión del dato entre 10-15°, con el cual se asigna una determinada familia de fracturas o fallas a cada evento. Una de las metodologías para determinar fehacientemente las familias de fracturas y fallas subsísmicas es el análisis de diagénesis estructural, es decir cuáles son los tipos de cementos de cada una de esas familias, complementado con el análisis de inclusión de fluidos en los cementos de las fracturas para determinar la edad de las mismas (Fall *et al.* 2012).

La interacción de fracturas hidráulicas con fracturas naturales puede involucrar una reactivación de las fracturas naturales dependiendo de la relación de las orientaciones y los tipos de cementos que se encuentran en las fracturas naturales, debido a que, por ejemplo, los cementos carbonáticos son más fáciles de reactivar que los cementos cuarzosos.

Para todos los eventos simulados se constata que, en cercanía de las fallas, los planos de rotura, tanto tensiles como de cizalla, rotan en forma compleja, pudiendo afectar la propagación de las fracturas hidráulicas.

Conclusiones

1. El análisis de la red de fracturas naturales y las zonas de intensidad de fracturas es un elemento de primer orden en la caracterización de reservorios no convencionales.
2. La metodología geomecánica, aun con sus limitaciones, es la más indicada para caracterizar la red de fracturas naturales en reservorios no convencionales.
3. En los sondeos analizados se identificaron fracturas naturales que podrían asociarse a los distintos eventos tectónicos que actuaron en la zona de edad Jurásico, Cretácico, Terciario y Reciente o Cuaternario, comprobándose la existencia de una red discreta de fracturas de gran complejidad.
4. Fue posible identificar zonas de máxima probabilidad de encontrarse fracturadas y las mismas mostraron una calibración aceptable con los datos de pozo utilizados.
5. A partir de direcciones de propagación de fracturas hidráulicas evidenciadas en microsísmica y de conexiones de pozos durante la estimulación y producción, se constató la existencia de orientaciones preferenciales coincidentes con las fracturas naturales modeladas.
6. A partir de los resultados obtenidos en las distintas simulaciones numéricas llevadas a cabo, se observa que el área de estudio es estructuralmente muy compleja debido a una evolución tectónica con una rotación del esfuerzo máximo horizontal de aproximadamente 90 grados desde el Jurásico hasta el presente. Uno de los efectos preponderantes es la rotación de esfuerzos locales que, junto a los cambios de magnitud, afectan la eficiencia de la estimulación hidráulica.
7. El modelado geomecánico de fracturas naturales, sumado a otras técnicas como la diagénesis estructural, permitiría definir mejor la extensión y la optimización del volumen de roca estimulado de pozos horizontales de producción. ■

Agradecimientos

Los autores agradecen a las autoridades de YPF S.A. por permitir la publicación de este trabajo, y a Sebastián Galeazzi por los aportes y lectura crítica del manuscrito.

Referencias citadas

1. Astesiano, D., A. Ortiz y M. C. Rodríguez, 2013. *An unconventional approach to determine the presence of natural open fractures from openhole logs in the Quintuco-Vaca Muerta unconventional play, Loma La Lata field, Neuquén Basin, Argentina*. Paper presented at the SPWLA 54th Annual Logging Symposium, junio 22-26, 2013.
2. Bourne, S.J., F. Brauckmann, L. Rijkels, B. J. Stephenson, A. Weber y E. J. M. Willemse, 2000. *Predictive modelling of naturally fractured reservoirs using geomechanics and flow simulation*. Presentado en la 9ª Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference. ADIPEC 0911.
3. Brinkworth, W., F. A. Pose y A. Gangui, 2011. *Rasgos Estructurales del subsuelo en el área Aguda Pichana, provincia de Neuquén, Argentina*. VIII Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Actas Digitales. Mar del Plata, Buenos Aires.
4. Cristallini, E. O., J. M. Martínez, E. Sánchez, S. Periale Gómez, y A. Loncarich, 2005. Evaluación estructural del bloque Bandurria (Provincia de Neuquén, Argentina). YPF, (inédito), 73 págs., Buenos Aires.
5. Cristallini, E. y M. Buhler, 2007. Revisión del esquema estructural del área Loma La Lata. Informe interno YPF.
6. Fall, P., P. Eichhubl, S. P. Cumella, R. J. Bodnar, S. E. Laubach, y S. P. Becker, 2012. *Testing the basin-centered gas accumulation model using fluid-inclusion observations: Southern Piceance Basin, Colorado*. AAPG Bulletin, v. 96, nro. 12 (diciembre de 2012), págs. 2297–2318.
7. Franzese J. y L. A. Spalletti, 2001. *Late Triassic – Early Jurassic continental extension in southwestern Gondwana: Tectonic segmentation and break-up rifting*. En: El Sevier (Eds.) Journal of South American Earth Sciences, 14: 257-270. ISSN 0895-9811.
8. Jaillard, E., P. Soler, C. Carlier y T. Mourier, 1990. *Geodynamic Evolution of the northern and central Andes during the middle Mesozoic times; a Tethyan model*. Journal of the Geological Society, v. 147, págs. 1009-1022, Londres.
9. Jorgensen, L., R. Coppo, F. Raggio y V. Martínez Cal, 2012. Caracterización de las fracturas naturales de la Formación Lajas en el ámbito de Cupén Mahuida, Cuenca Neuquina, Argentina. Informe interno YPF.
10. Leanza, H., F. Sattler, R. Martínez y O. Carbone, 2011. La formación Vaca Muerta y equivalentes (Jurásico Tardío – Cretácico Temprano) en la Cuenca Neuquina. En: Leanza, H., Arregui, C., Carbone, O., Danieli, J. C. y Valles, J.M., Geología y recursos naturales de la provincia de Neuquén: Relatorio del XVII Congreso Geológico Argentino, págs. 113-130.
11. Massafferro, J. L., E. Morettini, G. Sagasti, R. Weger, M. Bonora, B. Dros, y J. Pozo, 2009. *Multidisciplinary study for prediction, characterization and modeling of carbonate reservoirs: Quintuco Formation, Loma La Lata field, Neuquén basin, Onshore Argentina*. YPF (inédito), 258 páginas, Buenos Aires.
12. Maretto, H. y F. Pángaro, 2005. Edad de formación de algunas de las grandes estructuras del engolfamiento de la Cuenca Neuquina: Actividad tectónica durante la depositación de la Fm. Quintuco. VI Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Actas.
13. Mitchum, R. M y M. A. Uliana, 1985. *Seismic stratigraphy of carbonate depositional sequences, Upper Jurassic - Lower Cretaceous, Neuquén Basin, Argentina*, en: Bero, B.R., y Woolverton, D.G. (eds), *Seismic Stratigraphy: An Integrated Approach to Hydrocarbon Exploration*. AAPG Memoir 39, págs. 255–275.
14. Mosquera, A., y V.A. Ramos, 2005. *Intraplate deformation in the Neuquén embayment*. XVI Congreso Geológico Argentino II, págs. 193-202.
15. Pardo-Casas, F. y P. Molnar, 1987. *Relative motion of the Nazca (Farallon) and South American plates since Late Cretaceous time*. Tectonics, 6, págs. 233–248.
16. Passey, Q. R., K. Bohacs, W. L. Esch, R., Klimentidis, y S. Sinha, 2010. *From Oil-Prone Source Rock to Gas-Producing Shale Reservoir - Geologic and Petrophysical Characterization of Unconventional Shale Gas Reservoirs*. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/131350-MS.
17. Sagasti, G., A. Ortiz, D. Hryb, M. Foster y V. Lazzari, 2014. *Understanding Geological Heterogeneity to Customize Field Development: An example from the Vaca Muerta Unconventional Play, Argentina*. Unconventional Resources Technology Conference held in Denver, Colorado, USA, 25-27 de agosto de 2014. URTEC: 1923357.
18. Scheuber, E., T. Bogdanic, A. Jensen y K.-J. Reutter, 1994. *Tectonic development of the North Chilean Andes in relation to plate convergence and magmatism since the Jurassic*. En Reutter, K.-J., Scheuber, E., Wigger, P.J. (eds.), *Tectonics of the Southern Central Andes, Structure and evolution of an active continental margin*, págs. 121-139, Springer-Verlag.
19. Somoza, R., 1998. *Updated Nazca (Farallon)-South America relative motions during the last 40 My: implications for mountain building in the central Andean region*. Journal of South American Earth Sciences, 11, págs. 211–215.
20. Teufel, L. W., & J. A. Clark, 1984. *Hydraulic Fracture Propagation in Layered Rock: Experimental Studies of Fracture Containment*. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/9878-PA.
21. Vergani, G. D., A. J. Tankard, H. J. Belotti & H. J., Welsink, 1995. *Tectonic evolution and paleogeography of the Neuquén Basin, Argentina*. En: Tankard, A. J., Suárez, S., Welsink, H. J., *Petroleum basin of South America*, AAPG Memoir, N° 62, 1995, págs. 383-402.
22. Warpinski, N. R., y L. W. Teufel, 1987. *Influence of Geologic Discontinuities on Hydraulic Fracture Propagation* (includes associated papers 17011 and 17074). Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/13224-PA.
23. Zonenshayn, L.P., L.A. Savostin y A.P. Sedov, 1984. *Global paleogeodynamic reconstructions for the last 160 Million Years*. Geotectonics v. 18(3), págs. 181-195.