

ANÁLISIS DE FRACTURAS NATURALES Y BANDAS DE DEFORMACIÓN EN CORONAS E IMÁGENES DE POZO, Y SU RELACIÓN CON LA ESTIMULACIÓN Y PRODUCTIVIDAD DE POZOS. GRUPO CUYO, YACIMIENTO RÍO NEUQUÉN. ARGENTINA

Emiliano Santiago^{1,2}, Ramiro López¹, Roberto Bach¹, Lucía Ciano¹, Estibalitz Ukar³

1: YPF S.A. emiliano.santiago@ypf.com, ramiro.lopez@ypf.com, roberto.bach@ypf.com, lucia.ciano@ypf.com

2: Universidad Nacional del Comahue, Neuquén, Argentina

3: Bureau of Economic Geology, The University of Texas at Austin, Austin, TX. esti.ukar@beg.utexas.edu

Palabras clave: Bandas de Deformación, Fracturas Naturales, Coronas, Imágenes de pozo, Tight Gas Sands

ABSTRACT

Since the beginning of tight-gas sandstone development in the Río Neuquén field, natural fractures have been suspected to influence production and hydraulic fracture stimulation. In this paper, we analyze available information regarding natural fractures using core, image logs, and outcrop analogs of the Punta Rosada and Lajas Formations to evaluate these possible effects. The Río Neuquén field is located in the Neuquén basin gulf and at the time of submission of this study, contained 50 wells (16 with image logs and 6 with core) targeting these two tight-gas sandstone reservoirs. The reservoirs consist mostly of low-porosity and permeability, overpressured, feldspathic litharenites and lesser conglomerates overlaying source rocks of Los Molles Fm. The reservoirs are ~3000 ft thick forming an anticline with closure in three directions that terminates against a fault to the NNE. Natural fractures usually show slickensides indicating shear and occur mostly in pelitic intervals, whereas sandstone and conglomeratic intervals are dominated by deformation bands. Deformation bands in core and outcrop analogs are mostly cataclastic, with abundant clay mineral and/or oxide cement, angular clasts, and important grain-size reduction resulting in barriers to fluid flow. Most deformation bands are subvertical, but in some cores several hundred, bed-parallel deformation bands have been observed arranged in meter-sized clusters that correspond with sand-dominated lithofacies. In some wells, the azimuth of natural fractures and deformation bands can be correlated with nearby faults, suggesting a genetic relationship. Because of their potential impact on reservoir permeability, being able to identify natural fractures and, specially, deformation bands in image logs is of utter importance. Although both types of structural discontinuities have been inferred in image logs, detecting and distinguishing between the two is challenging. Deformation bands typically show as conductive planes due to the presence of clay, oxides, pyrite and/or bitumen along them. Moreover, the differential presence of hydrocarbons on both sides of the bands can facilitate their detection. From a productivity standpoint, we conclude that natural fractures in pelites reactivate and cause fluid loss along hydraulic fractures during stimulation, whereas deformation bands are most likely responsible for the reduced fluid flow observed in some wells.

INTRODUCCIÓN

Las arenas tight de las Formaciones Punta Rosada y Lajas en el yacimiento Río Neuquén muestran una importante variación de productividad. Esta variación se relaciona de manera directa con la sobrepresión que en algunos casos supera el 50%, y ello responde a múltiples factores, entre los cuales se encuentra la distancia a las fallas principales (NNE-SSO) que habrían oficiado de *carriers*, el espesor de roca madre que podría mejorar la carga directa principalmente con la Fm. Lajas, la posición (paleo) estructural que podría haber favorecido la carga en ciertos sectores durante los principales períodos de expulsión de la Fm. Los Molles, y la existencia de discordancias internas que pueden haber obrado como sellos parciales (Berdini *et al.*, 2002, 2005, 2011; De La Cruz Olmos *et al.* 2018). Además de estos factores, desde el inicio del desarrollo del yacimiento ha habido indicios sobre la influencia de fracturas naturales tanto en la productividad como en el comportamiento de la estimulación por fracturas hidráulicas. El objetivo del presente trabajo fue la revisión de la información disponible relacionada a dichos planos estructurales para abordar su potencial relación con la productividad.

UBICACIÓN Y CARACTERÍSTICAS GENERALES

El yacimiento Río Neuquén se ubica a unos 25 km al NO de la ciudad de Neuquén sobre la terraza fluvial del río homónimo, en la región del engolfamiento de la Cuenca Neuquina (Figura 1).

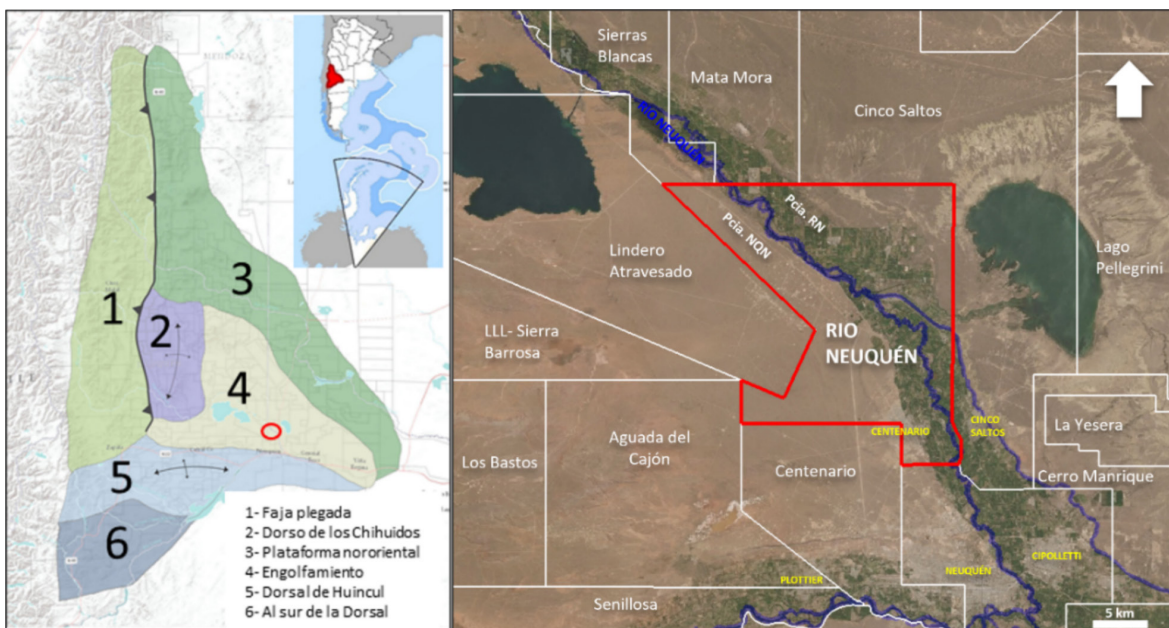


Figura 1. Yacimiento Río Neuquén, ubicación geográfica y morfoestructural.

Allí, YPF es el operador, asociado con Pampa Energía, Petrobras, y Edhpsa en Río Negro. Hasta la fecha del presente trabajo, en dicha área se perforaron más de 50 pozos con objetivo en las formaciones Punta Rosada y Lajas, donde las terminaciones se realizan mediante fracturas hidráulica de aproximadamente 12 a 16, con 2000 sacos cada una.

Aquí los reservorios del Grupo Cuyo (Dellape 1978) son depósitos de areniscas lítico-feldespáticas y conglomerados subordinados, de un ambiente deltaico fluvio-dominado que corresponden a la Fm. Lajas (Weaver, 1931), los cuales evolucionan lateralmente a depósitos estuarinos y fluviales pertenecientes a la Fm. Punta Rosada (Digregorio, 1972). Estos niveles suprayacen las margas y pelitas generadoras de la Fm. los Molles, (Weaver, 1931) (Figura 2). La Fm. Lajas posee un espesor disminuido por su ubicación marginal en esta región de la cuenca (Berdini *et al.* 2002, Hammar *et al.* 2018). La Fm. Punta Rosada se subdivide en cuatro tectonosecuencias (Berdini *et al.* 2002, De La Cruz *et al.* 2018) o miembros denominadas Inferior, Medio, Superior Basal y Superior. Ambas formaciones alcanzan un espesor total promedio de 1000 m, de los cuales un 30% suele estar mineralizado, estos reservorios presentan porosidades de entre 4 y 9% y permeabilidades de 0.1-0.0001mD, por lo que son considerados reservorios del tipo tight sand. La estructura responde a un anticlinal con cierre en 3 direcciones que limita al NNE con una falla relacionada a la estructura de Barda del Medio (Figura 3), cuya génesis responde a una inversión

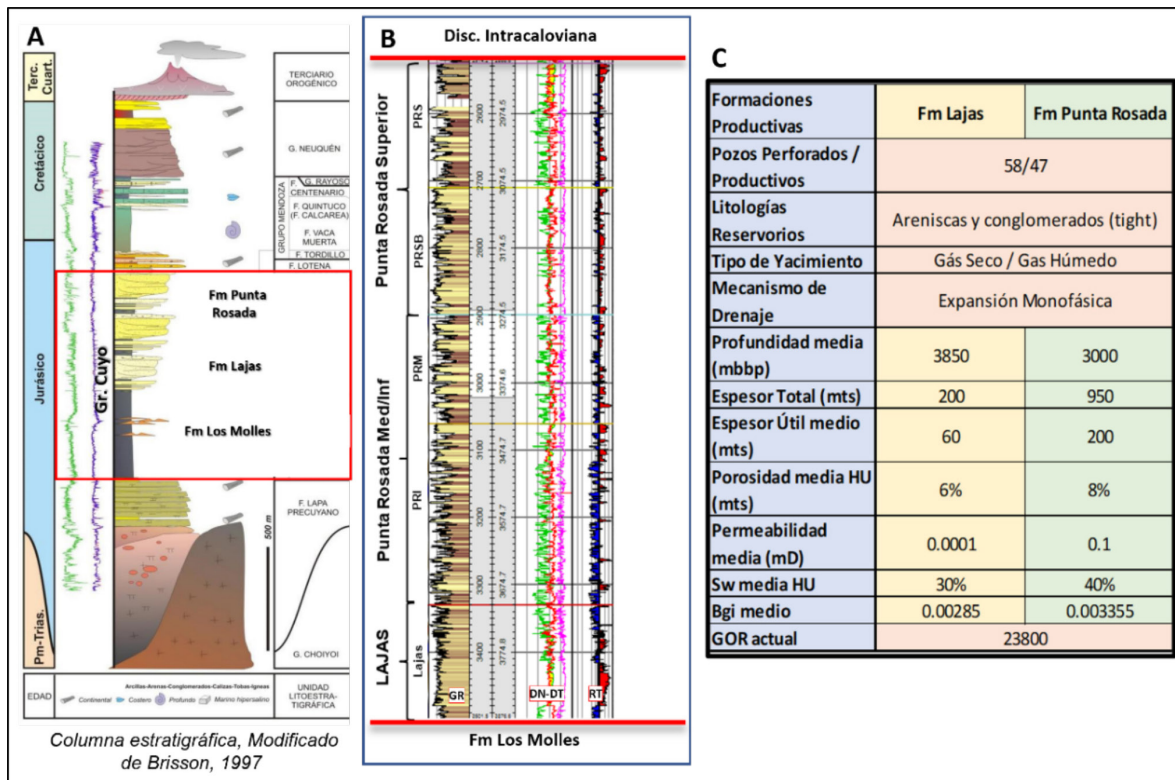


Figura 2. A) Columna de la Cuenca Neuquina en el área de estudio modificada de Brisson, 1997. B) Pozo tipo de Yacimiento Río Neuquén y principales características de los reservorios (C).

tectónica multiepisódica, controlado por reactivaciones de antiguas estructuras precuycanas, que comienza a insinuarse durante la depositación de la Fm. Lajas (Hammar, 2022) y se mantiene activa hasta la base de la Fm. Vaca Muerta. Estos procesos estarían directamente relacionados a la evolución de la Dorsal de Huincul que controló la sedimentación durante estos períodos (Berdini *et al.*, 2005 y 2011; Silvestro y Subiri, 2008; Cristallini E., 2016).

INFORMACIÓN DISPONIBLE

Testigos corona e imágenes de pozo

En el yacimiento Río Neuquén se cuenta con 450 mts de testigos corona para las Fms. Lajas y Punta Rosada distribuidos en 6 pozos, y registro de imágenes de pozo en 16 de ellos (Figura 3). Estos registros fueron tomados por diferentes compañías en sucesivas campañas entre 1998 y 2018, los primeros años con lodo base agua y en los últimos con lodos base petróleo. Lamentablemente en algunos pozos con coronas no pudieron registrarse perfiles de imagen debido a problemas operativos. Un total de 3.900 planos estructurales fueron revisados/interpretados en las 16 imágenes observadas. Debido a que sólo la combinación de la imagen microresistiva con la sónica (tiempo de tránsito) permite caracterizar una fractura como abierta con certeza, y que las interpretaciones fueron realizadas por diferentes intérpretes de distintas compañías, en este trabajo no se utilizó la diferenciación entre fracturas abiertas, cerradas, parcialmente abiertas, etc.

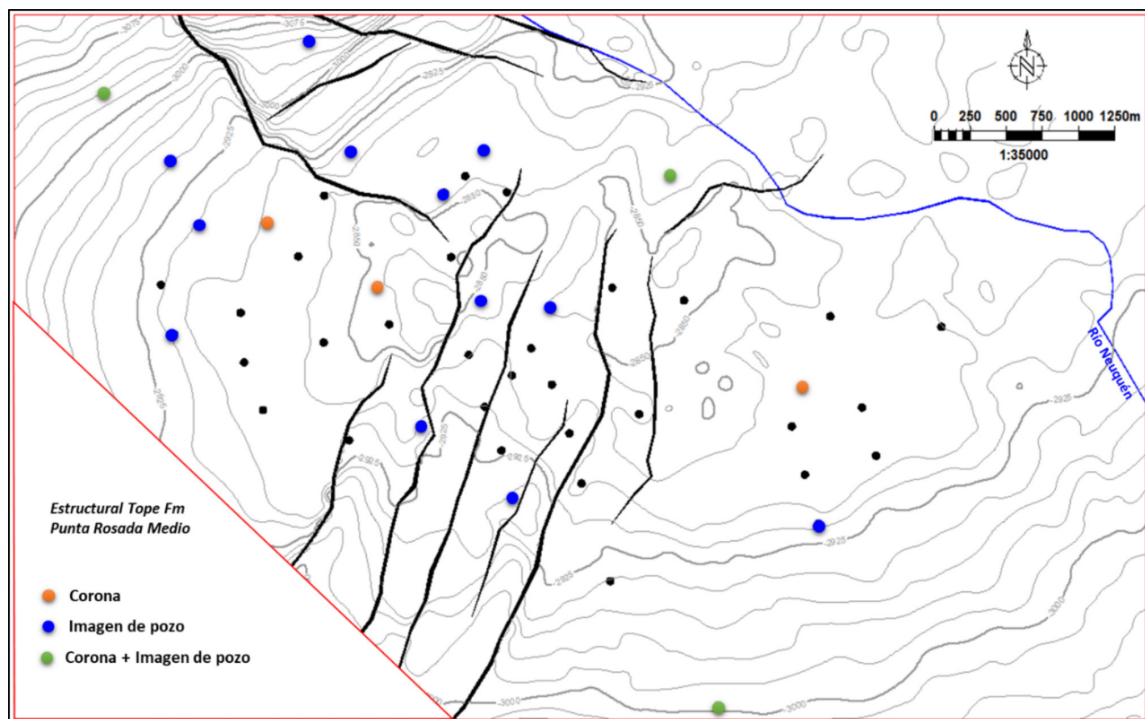


Figura 3. Mapa al tope de la Fm. Punta Rosada Media. Pozos con coronas y perfiles de imagen.

En coronas, el relevamiento de fracturas naturales se realizó con la metodología de scanline (López *et al.*, 2022), registrando cada plano encontrado a lo largo de una línea de medición, de base a techo del testigo corona, describiendo sus características: largo, ángulo respecto al eje de la corona, apertura cinemática, porcentaje de cemento, ancho, terminaciones, forma (planar, curvada, irregular), rugosidad, desplazamiento y sentido (en caso de observarse), litología hospedante, composición y textura del cemento (cuarzo, calcita, etc y fibroso, amorfo, etc. respectivamente) (Figura 4).

Tabla para toma sistemática de datos de fracturas naturales en coronas																										
Nombre del pozo		Formación							Tope		Base							Fecha		Observador						
Carrera (P)	Box	Tirno	# Fractura	Muestra	Profundidad de la terminación superior de la fractura [m]	Altura aparente (paralela al eje) [cm]	Ángulo de la fractura respecto al eje de la corona	Ángulo del estrato respecto al eje de la corona	Apertura cinemática P1 [mm]	Ancho D8 [mm]	Descripción terminal superior	Descripción terminal inferior	Forma de la fractura	Rugosidad de fractura	Características superficiales de la fractura	Magnitud del desplazamiento [cm]	Sentido del desplazamiento	Rate de las estrías (0-90) en relación al plano	Litología	Tipo de mineralización	Características mineral	Porcentaje de llenado de la fractura (%)	Origen de la fractura	Cantidad de fracturas en esta profundidad	Espaciamiento entre fracturas (si son paralelas)	Edad relativa de la fractura respecto a otras

Figura 4. Planilla para confección de scanline (Modificación de Fracture Research and Application Consortium, FRAC, Bureau of Economic Geology, 2018)

Afloramientos

El trabajo realizado en los afloramientos de Río Covunco y Rincón del Águila permitió el análisis de fracturas naturales y otras discontinuidades (Ej. bandas de deformación, Figura 5) en la Fm. Lajas en 3D (Figura 6A). Aunque el presente trabajo se basa principalmente en las observaciones de corona y pozo, los afloramientos sirven como análogos que permiten establecer la distribución lateral y vertical de las discontinuidades observadas, así como las relaciones entre litología, estratigrafía mecánica y fracturas a una escala entre varios cientos de metros a kilómetros cuadrados. Los resultados de campo han sido parcialmente publicados en Ukar *et al.* (2022) y una descripción más detallada está actualmente en preparación (Ukar *et al.*, in prep).

FRACTURAS Y BANDAS DE DEFORMACIÓN EN CORONA

Además de Fracturas Naturales de modo 1 (apertura por tensión) las areniscas de las Fm. Punta Rosada y Lajas contienen un gran número de bandas de deformación, visibles tanto en afloramiento como en corona (Figura 6A y Figura 7B). El termino bandas de deformación (de ahora en más BdD), se utiliza desde los años 70 y se refiere a un tipo de discontinuidad (plano)

estructural que se forma típicamente en rocas granuladas y porosas, especialmente en areniscas, en estadios tempranos durante la conformación de las rocas (Fossen, 2007). Generalmente, las BdD producen disminución de la porosidad y permeabilidad de hasta 5 órdenes de magnitud, aunque esto depende del proceso de deformación involucrado (rotación y/o traslación de granos con o sin molienda de los mismos, Figura 5) (Fossen *et al.*, 2007, 2010).

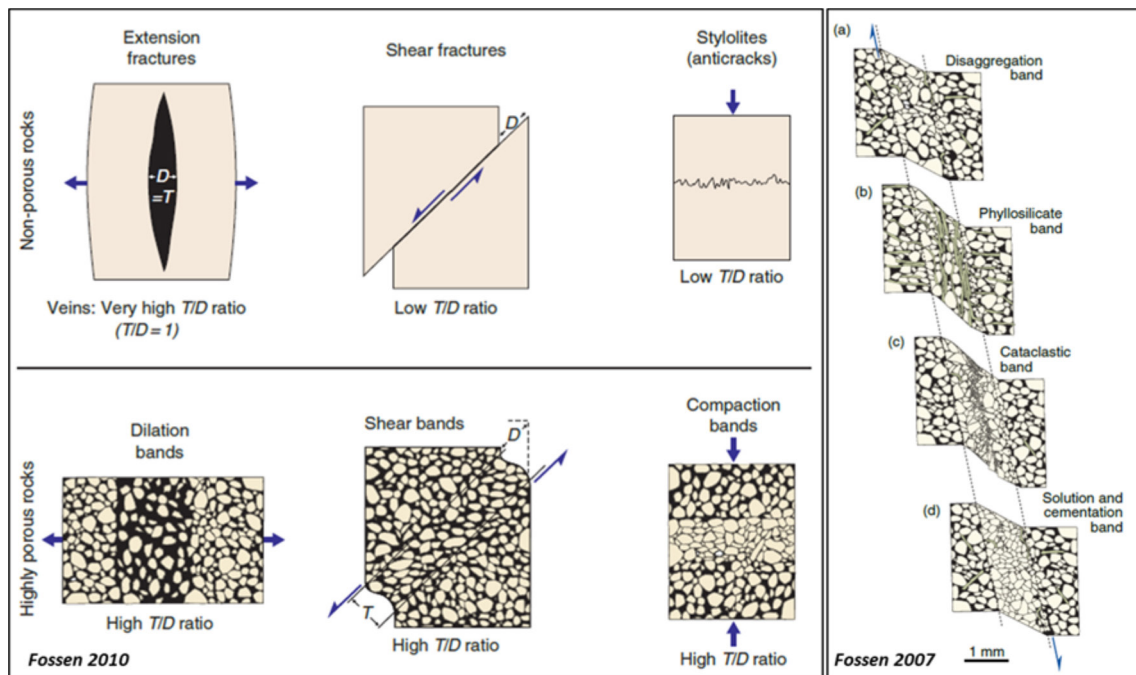


Figura 5. Clasificación de bandas de deformación, izq.: Cinemática y su correlato con las fracturas naturales (Fossen 2010); der.: mecanismo de deformación (Fossen *et al.*, 2007)

Las BdD más comúnmente encontradas en las Fms. Lajas y Punta Rosada, tanto en coronas como afloramientos son cataclásticas, con importante rotura de granos, reducción del tamaño de los mismos, granos angulosos, y disminución significativa del espacio poral respecto a la zona periférica (roca hospedante) (Fig. 5 y 7C). Esta situación probablemente se deba en parte a la litología, ya que las BdD cataclásticas serían más comunes en areniscas lítico-feldespáticas que en areniscas cuarzosas (Rawling *et al.*, 2003); y por otro lado a la profundidad a la que fueron sometidas, junto con la baja presencia de filosilicatos (Fig. 6B).

En coronas y afloramientos, las BdD se reconocen a simple vista por su coloración distintiva (claras u oscuras), producto de la presencia de arcillas, óxidos y/o pirita, e impregnación diferencial de hidrocarburos (Fig. 6A, 7, 11A, B, C y D); y a escala microscópica, por una reducción del tamaño de grano y de la porosidad respecto a la roca hospedante (Fig. 7C). El rasgo más característico observado es la presencia de granos rotos angulosos de menor tamaño que los granos de la roca hospedante. Presentan un alto contenido de matriz arcillosa, la cual se encuentra orientada a

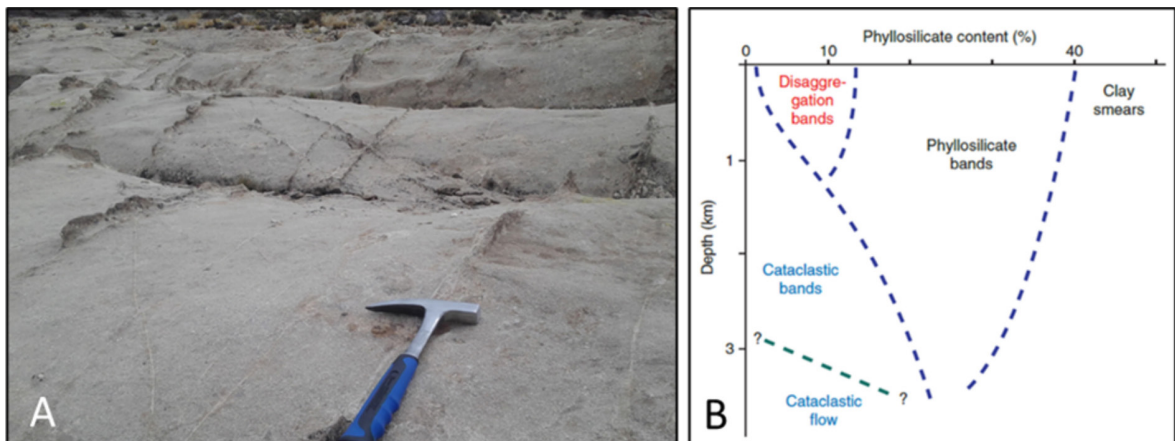


Figura 6. A) Bandas de deformación en afloramientos de la localidad Rincón del Águila. B) Tipos de bandas de deformación en función de la profundidad y presencia de filosilicatos (Fossen *et al.*, 2007).

levemente orientada, evidenciando una reorganización producto de la concentración de esfuerzos. También se observan granos angulosos orientados tamaño limo a arena fina “flotando” en la matriz, y del análisis con microscopio electrónico de barrido se reconocen microcristales de cuarzo en la matriz. En algunos casos, las BdD cataclásticas se reactivan en fracturas de Modo I (*Opening Mode*) y se encuentran rellenas por ankerita, en ocasiones seguida por baritina.

Además de BdD, en coronas se observan fracturas naturales (de ahora en más FN), en su mayoría con estrías producidas por deslizamiento (*slikenside*), asociadas de forma exclusiva a las facies finas (fangolitas, limolitas y arenas finas intercaladas con fangolitas) (Fig. 7A). En una misma corona es posible observar en función de la litología, cómo los dos tipos de mecanismos de deformación mencionados se resuelven en BdD y FN, para psamitas y pelitas respectivamente (Fig. 8). Para la misma corona, esto puede ser observado de manera estadística contabilizando los planos de BdD y en función de las litofacies descriptas (Fig. 9).

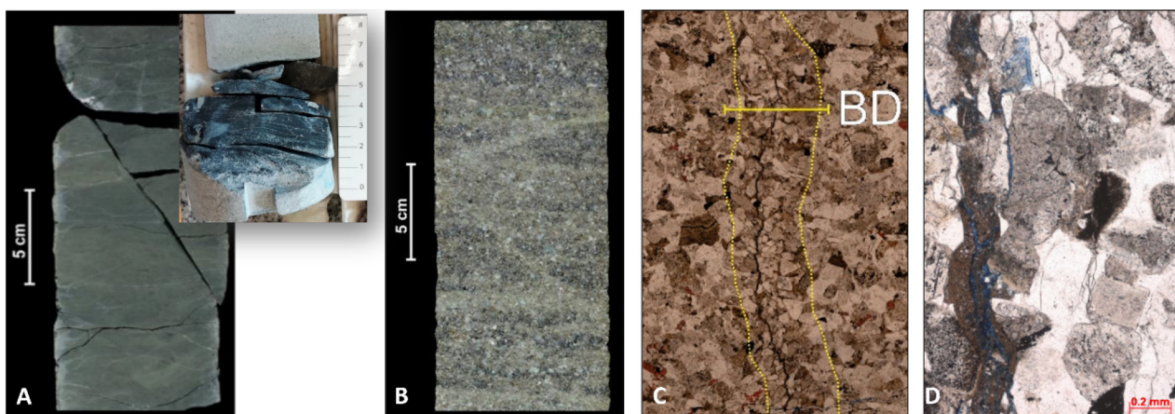


Figura 7. A) Detalle de fracturas naturales con espejos de fricción en pelitas B) BdD en areniscas (der.). (Valdés *et al.*, 2018) C) BdD por compactación con reducción de tamaño de grano en corte delgado, Fm. Lajas (Monti *et al.*, 2019). D) Reducción de tamaño grano y alto contenido en arcilla a lo largo de una BdD en comparación con la roca hospedante.

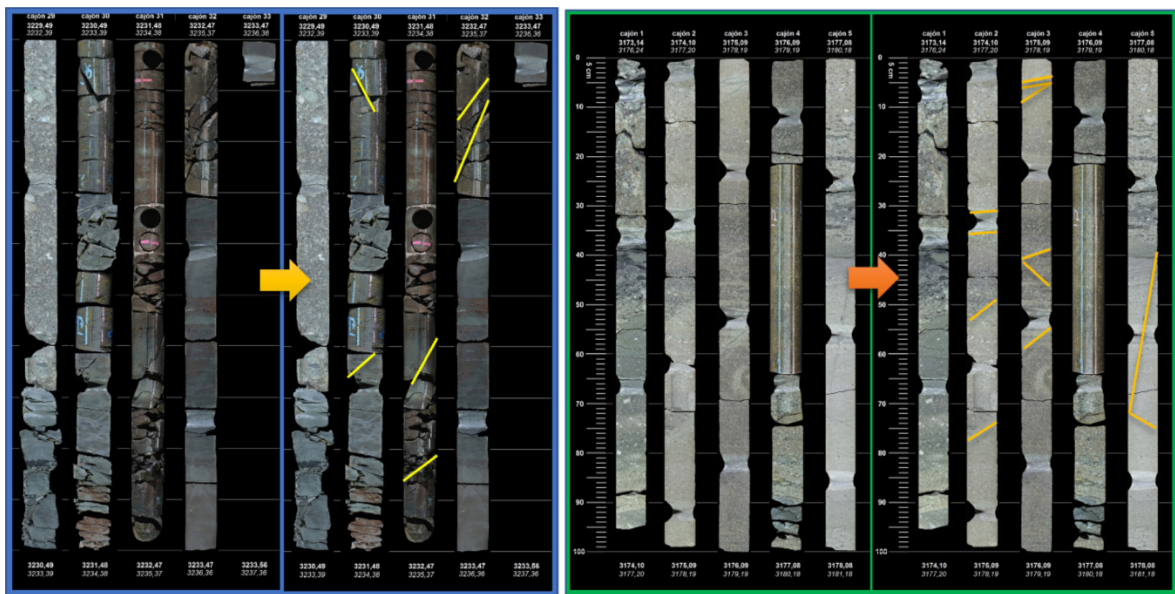


Figura 8. FN con slickenside en pelitas (fondo azul, trazo amarillo), y BdD en areniscas (fondo verde, trazo naranja), corona representativa (Valdés *et al.*, 2018).

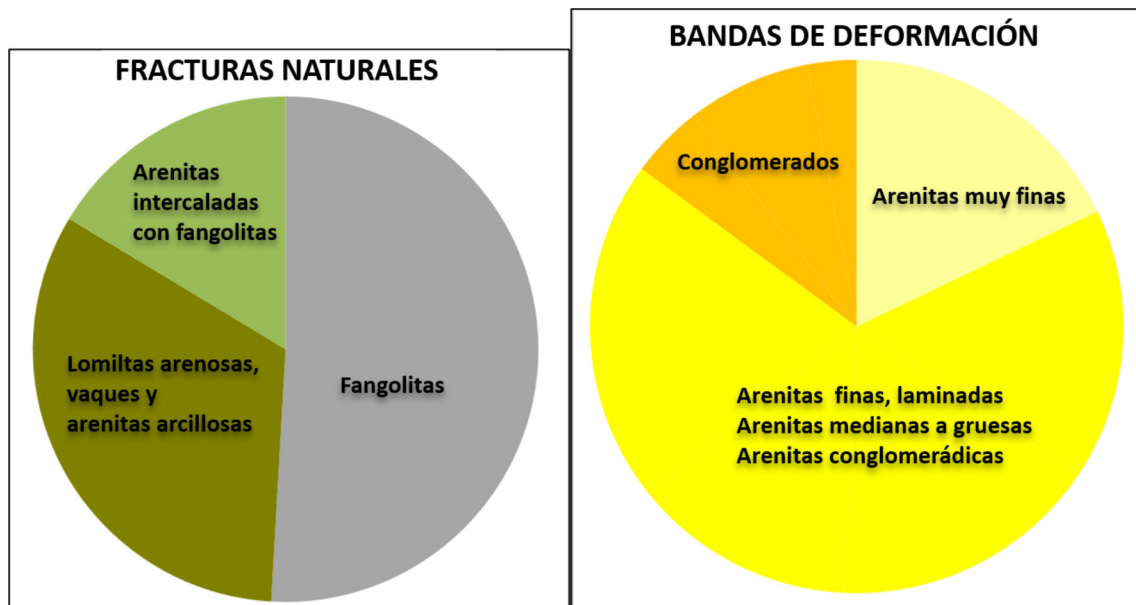


Figura 9. BdD y FN observadas en una corona de 180mts, en función de las litofacies.

Aunque menos comunes que las FN y BdD de ángulo alto frente a la estratificación, se observaron BdD subhorizontales (paralelas a los estratos) en algunas coronas y sus características comunes con las BdD subverticales (reducción de tamaño de grano, alto contenido en arcillas y óxidos) fueron confirmadas mediante petrografía óptica y microscopía de barrido (Figura 10). En una corona de la Fm. Lajas de 75 mts, se describieron unas 340 BdD subhorizontales frente a la ausencia de BdD subverticales. Su relación de corte con estilolitas indica que las BdD son posteriores.

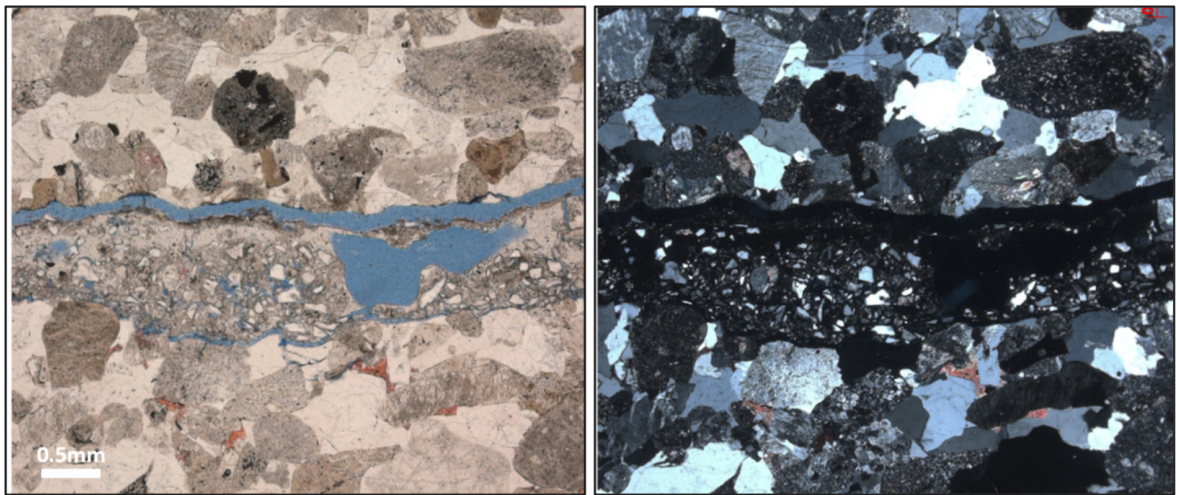


Figura 10. Ejemplo de BdD subhorizontal en una arenisca lítico-feldespática de la Fm. Lajas. Nótese la angularidad y disminución del tamaño de grano a lo largo de la BdD. El color azul indica porosidad secundaria, producida por artefactos introducidos durante la extracción de la corona y/o preparación de la lámina delgada.

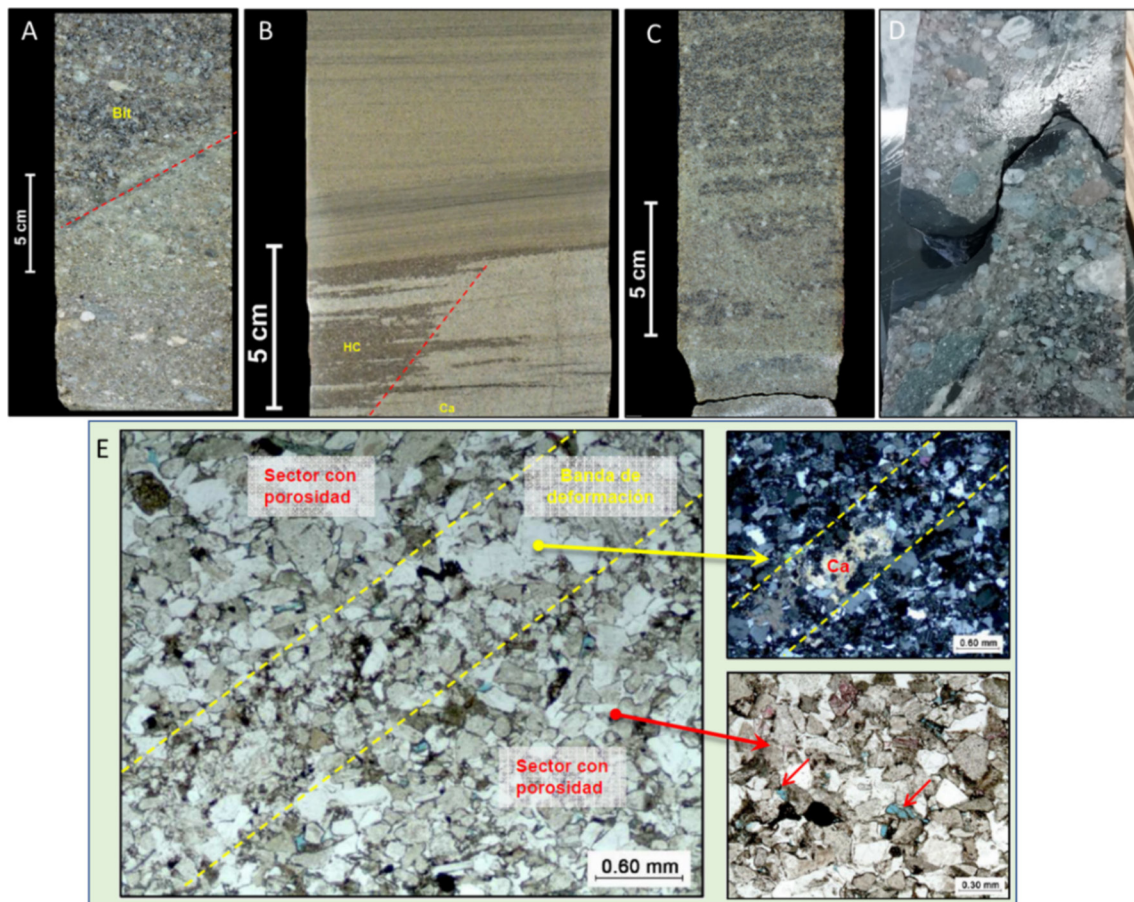


Figura 11. A, B y C) BdD en areniscas con presencia y ausencia de bitumen a un lado y otro de la misma (modificado de Valdés *et al.*, 2018). D) BdD con “arrastre”, evidenciado por la deformación de un clasto de arcilla, podría también oficial de barrera hidráulica. E) BdD en la Fm. Punta Rosada que presenta hidrocarburos, muestra reorientación de granos y cementación diferencial de calcita; se observa que su porosidad disminuye, siendo prácticamente nula en comparación con la roca hospedante.

Efecto sobre la permeabilidad

Las BdD encontradas en las coronas de Río Neuquén, al igual que la mayoría de las BdD descritas en la bibliografía (Fossen *et al.*, 2007 entre otros), se caracterizan por presentar porosidad baja a ausente debido a la reorientación de granos y cementación diferencial, normalmente por calcita, óxidos, y/o arcillas; generando barreras hidráulicas efectivas que afectan la migración de hidrocarburos. Esto queda manifestado por numerosos ejemplos encontrados en coronas de este yacimiento, donde es posible observar la presencia y ausencia de hidrocarburos a ambos lados de la BdD (Figura 11).

Distribución de las bandas de deformación

Las BdD observadas en diferentes coronas normalmente se presentan agrupadas en forma de clusters o conjuntos de 25 a 30 bandas separadas 1 cm aproximadamente (Fig. 12). Un análisis del tipo de distribución utilizando la técnica de *Normalized Correlation Count* (NCC, Marrett *et al.*, 2018) confirma la clusterización y demuestra que el espesor de las capas con dichos clusters es aproximadamente de 1.25 m, y que el espaciado vertical promedio entre los niveles que muestran clusterización es de 2 m aproximadamente (Fig. 13).

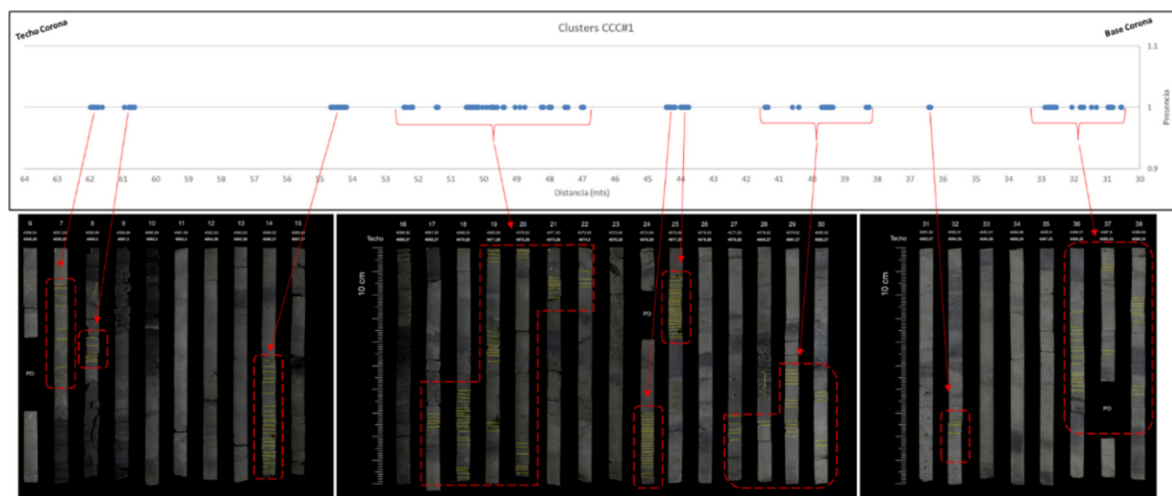


Figura 12. Fm. Lajas. Bandas de deformación agrupadas en clusters.

Se compararon las zonas de *clusters* de las BdD con el ensayo de scratching test para resistencia mecánica de la roca (Figura 14), y con las litofacies descritas en la misma corona (Figura 15).

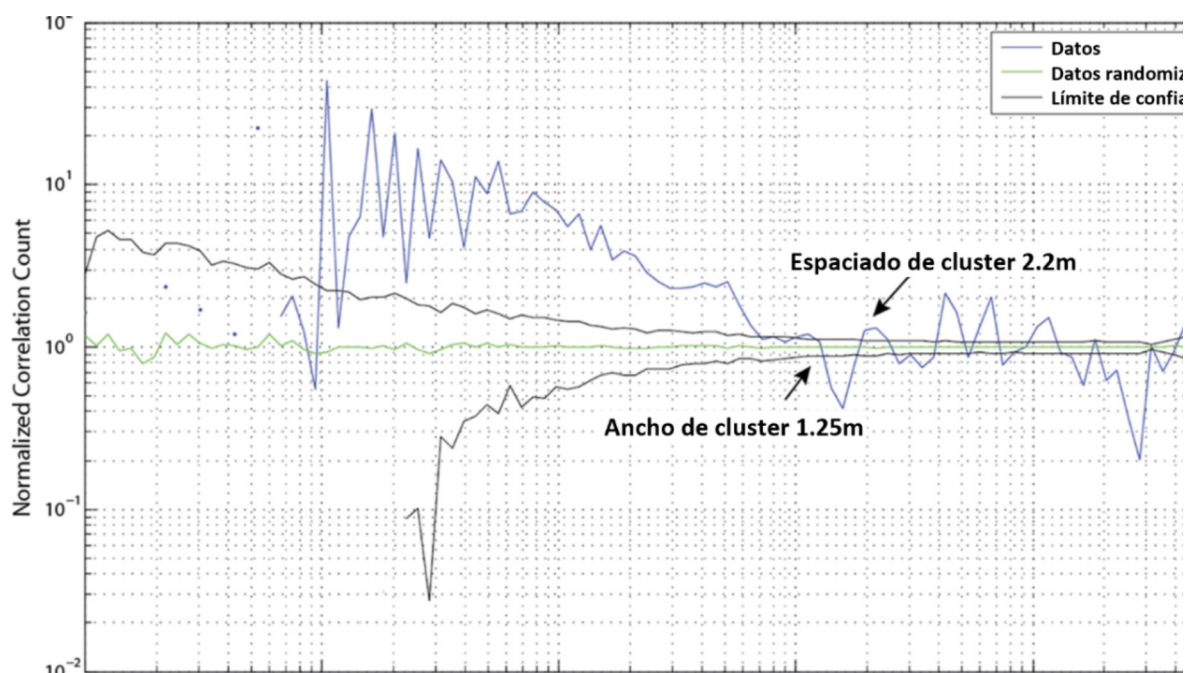


Figura 13. Análisis de NCC (Marrett *et al.*, 2018) en corona, confirmando la clusterización de BdD subhorizontales.



Figura 14. Clusters de BdD en coronas versus geomecánica (resistencia mecánica de la roca, *scratch*).

Con respecto al parámetro geomecánico, no es posible apreciar una correlación. En cambio, las litofacies sí parecen influenciar la distribución de la BdD, acotando su aparición a areniscas finas a medias granocrecientes, areniscas finas bioturbadas y areniscas conglomerádicas; lo que resulta acorde a la génesis esperada para estos rasgos (Figura 15).

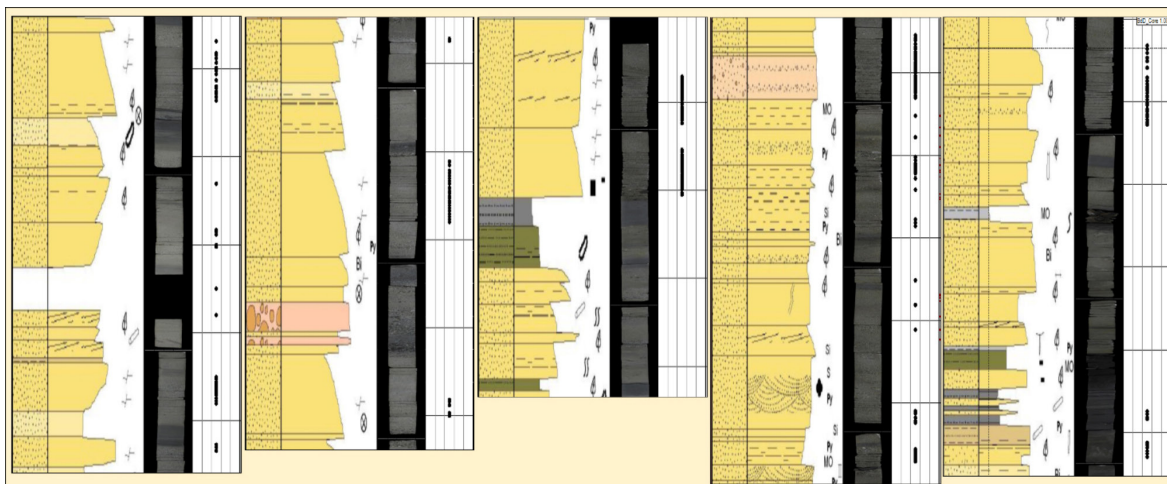


Figura 15. *Clusters* de BdD en coronas versus las litofacies descritas por Monti *et al.*, 2019.

FRACTURAS Y BANDAS DE DEFORMACIÓN EN IMÁGENES DE POZO

En resumen, en las coronas se han observado muy pocas FN en litofacies gruesas (psamitas y aún menos en psefitas), siendo casi en su totalidad fracturas con espejos de fricción en fangolitas, limolitas y arenas finas intercaladas con fangolitas. Las BdD son potestad absoluta de las psamitas, tal lo indicado en la literatura, aquí principalmente en areniscas gruesas a conglomerádicas. Extrapolando la información de las coronas a las imágenes de pozo, aplicando las litofacies generadas por Carrizo *et al.* (2021) para perfiles de pozo, se asume que los planos estructurales interpretados en facies finas serán FN con *slickenside*, y los interpretados en facies gruesas, serán mayoritariamente BdD.

Con el objetivo de corroborar si las FN y BdD observadas en coronas son detectadas por las imágenes de pozo, se compararon las interpretaciones de ambas fuentes de información. En la mayoría de los pozos, si bien varias BdD fueron interpretadas en las imágenes del pozo, la tasa de detección es baja respecto a la cantidad de estos rasgos visibles en coronas. Posiblemente esto se debe a los tipos de BdD y sus “rellenos”, y los contrastes de resistividad/conductividad que éstas generan en relación con la roca hospedante. Las BdD generalmente contienen arcillas y en ocasiones pirita (Valdéz *et al.*, 2018; Ukar 2022), que afectan la resistividad de manera negativa; en los casos con presencia de hidrocarburos en la roca hospedante (alta resistividad), el contraste podría potenciar la detección del plano de las BdD.

Debido a la importante influencia de las BdD sobre la permeabilidad (principalmente en forma de reducción), y la utilidad que conllevaría poder detectar este tipo de estructuras en imágenes de pozo, a continuación presentamos ejemplos de las BdD con carácter conductivo detectadas en imágenes de pozo para lodo OBM.

En la Figura 16 se aprecia que la barrera hidráulica que genera la BdD observada en la corona, es resaltada en la imagen por la diferencia de hidrocarburos a ambos lados de esta. En la interpretación original, dicha estructura había sido asumida como rechazo estructural a lo largo del plano, ya que luce como dos litologías diferentes, separadas por una superficie con desplazamiento en sentido inverso. En la Figura 17, los planos originalmente interpretados como fracturas conductivas son realmente BdD con presencia de arcillas y en ocasiones pirita (ambas con respuesta conductiva) confirmadas por corte delgado en la corona. En ocasiones, fue posible identificar una alta intensidad de BdD en base a los registros de imagen (Figura 18).

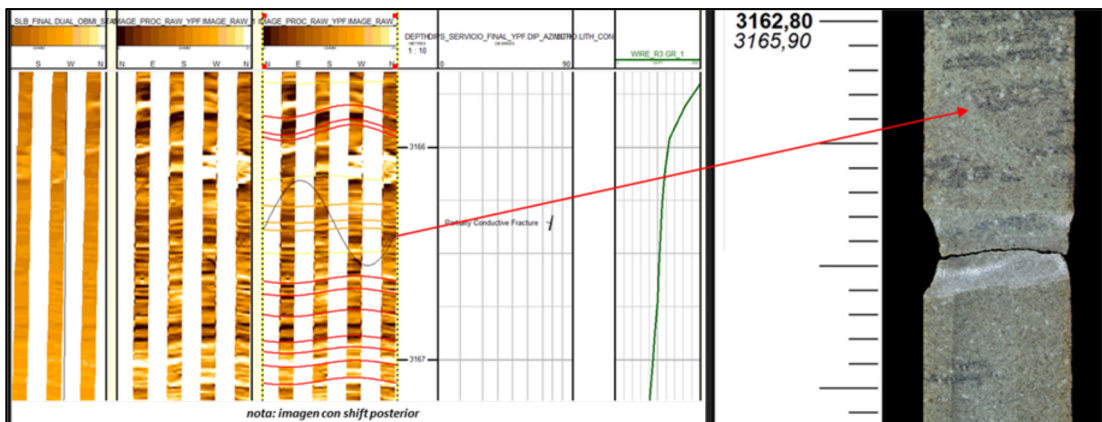


Figura 16. BdD observada en imagen de pozo OBM, respuesta conductiva. Debido a diferencia de hidrocarburo a ambos lados de la BdD (barrera), este plano había sido interpretado como fractura con rechazo (Nota: la profundidad no es coincidente por un *shift* aplicado en la imagen).

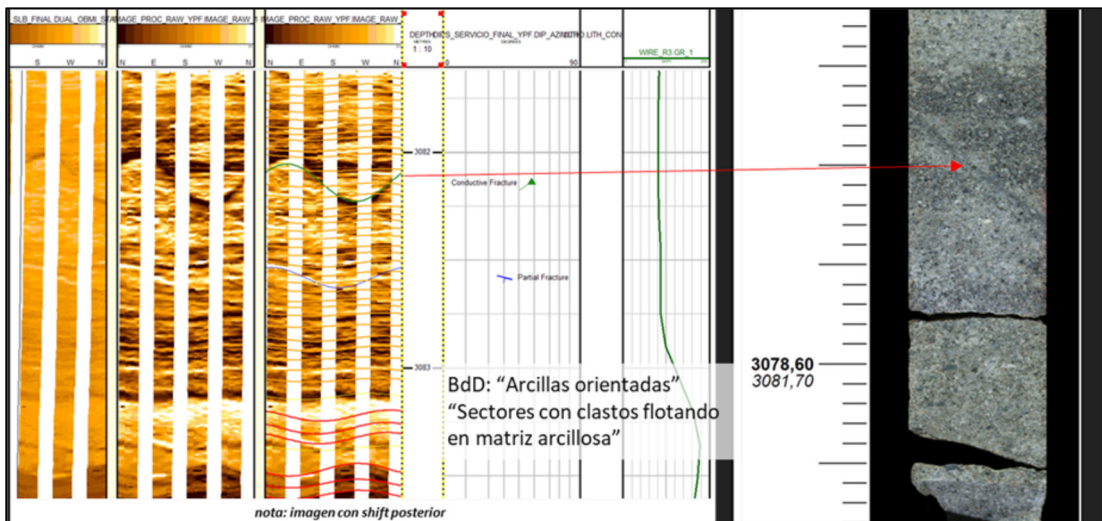


Figura 17. BdD observada en imagen de pozo, respuesta conductiva asociada a las arcillas descriptas en corte delgado en la corona.

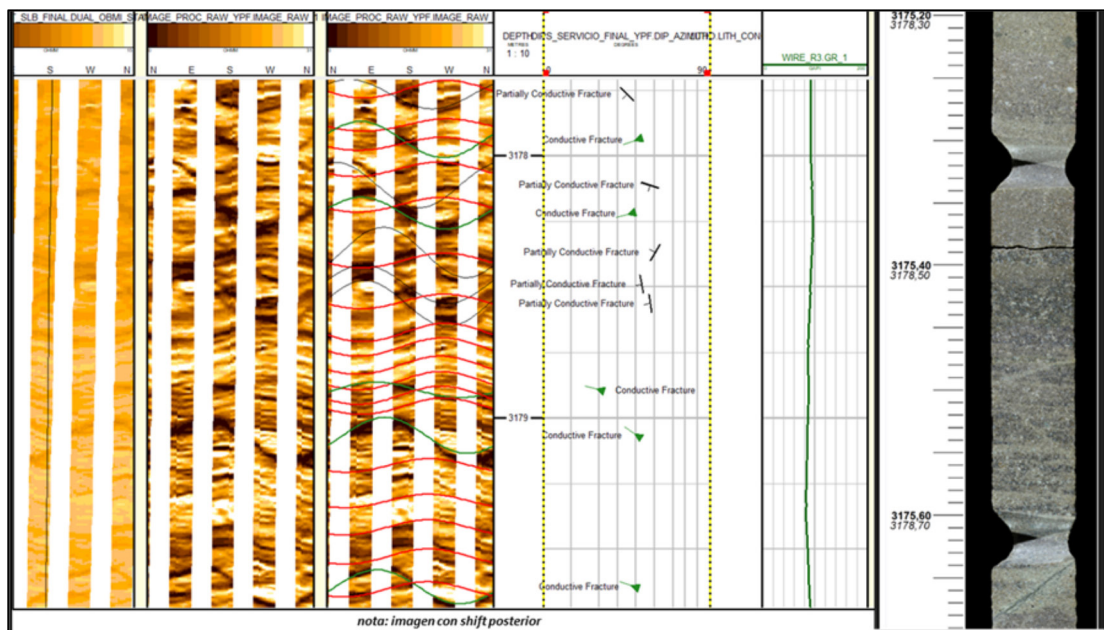


Figura 18. Múltiples BdD observadas en imagen de pozo OBM, respuesta conductiva resaltada por el contraste que genera el bitumen resistivo. (Nota: la profundidad no es coincidente por un shift)

Las FN con espejos de fricción (slickenside) observadas en facies pelíticas de las coronas, resultan en ocasiones complejas de observar en las imágenes de pozo, dado que es en estos tramos donde se suelen generar enganches y tironeos de los patines de las herramientas (*“stick&pull”*). No obstante, al contar con las observaciones de corona, los planos resistivos identificados en la imagen de pozo se asumen como fisuras de este tipo rellenas por lodo OBM (Figura 19). Por

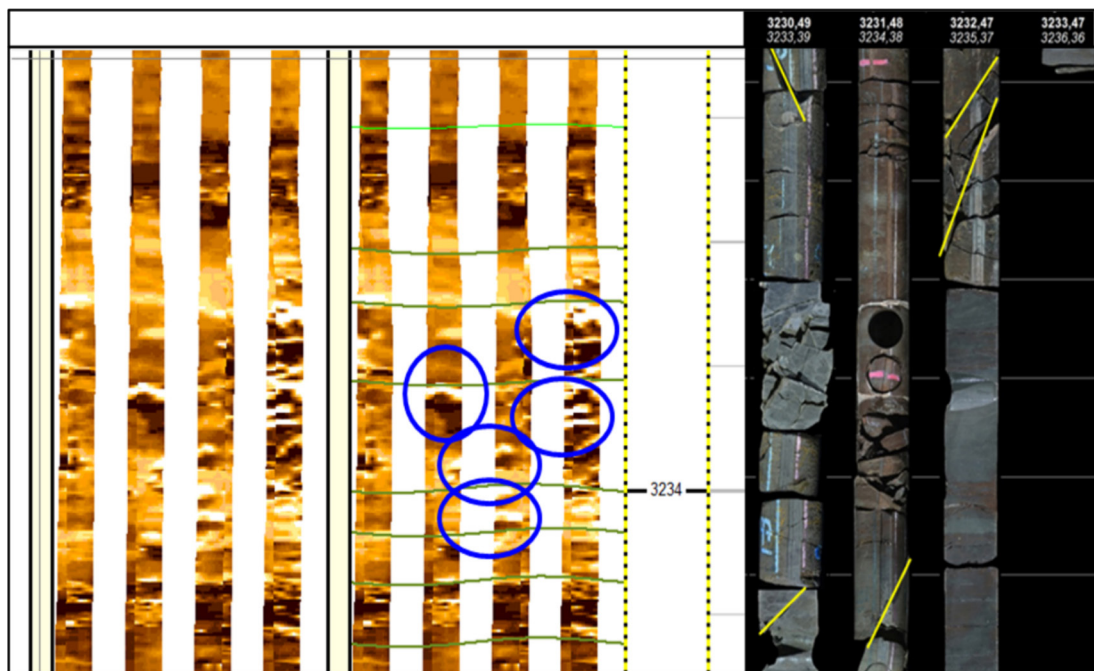


Figura 19. FN con espejos de fricción observadas en pelitas en coronas, complejas de detectar en imágenes de pozo por la calidad de las mismas producto de stick&pull. Planos resistivos resaltados en azul (OBM).

extensión, esta correlación se utiliza para interpretar imágenes en pozos sin corona (Figura 20). En los pozos perforados con lodo base agua se pudieron detectar algunos casos de FN en pelitas, con valores de resistividad bajos, las cuales también podrían interpretarse como fracturas abiertas (Figura 21).

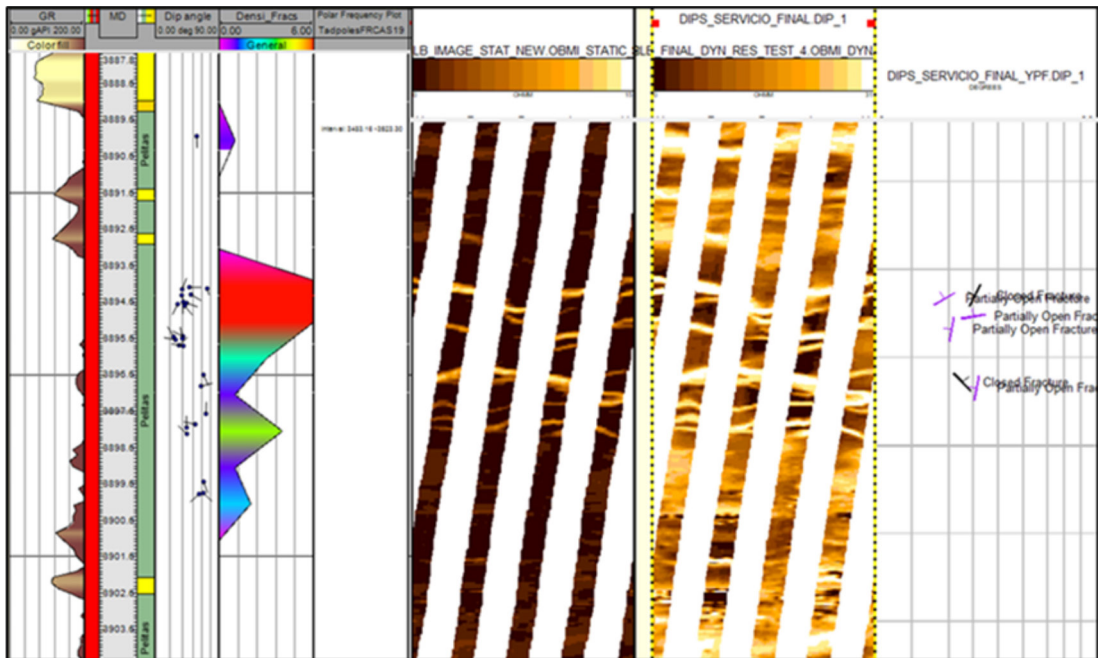


Figura 20. Planos resistivos en pelitas en imagen para lodo OBM, FN abiertas (?).

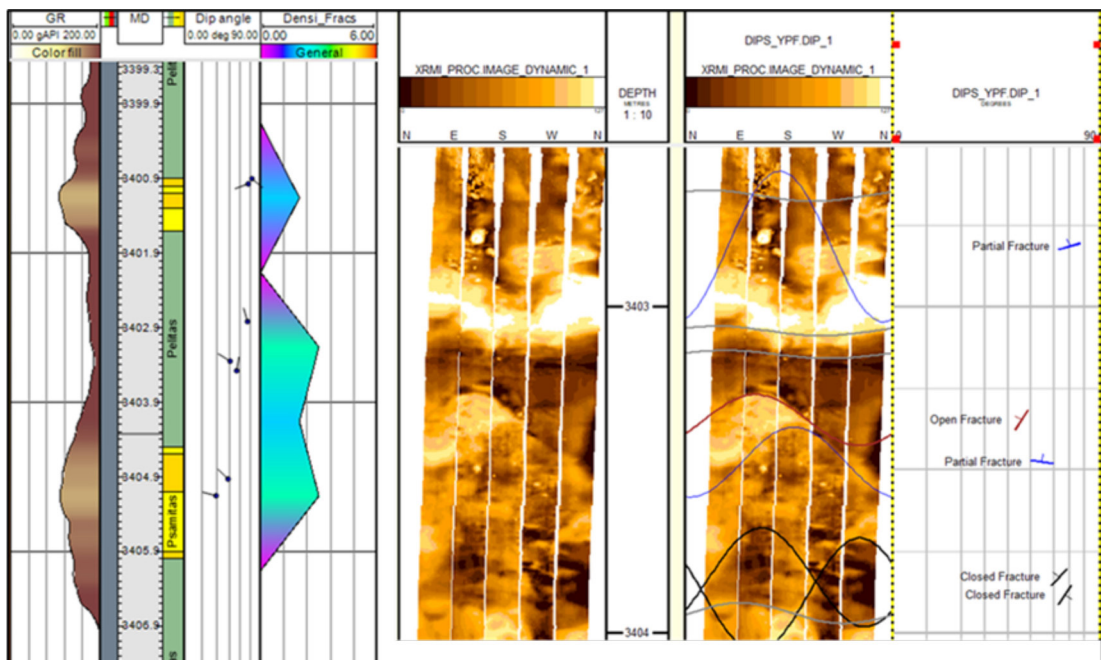
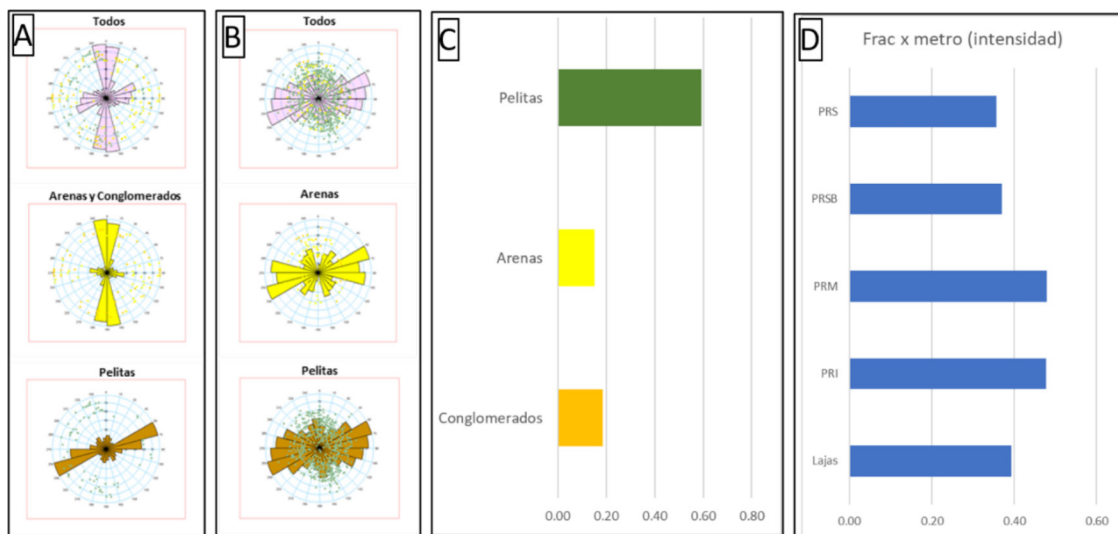


Figura 21. Planos conductivos en pelitas, FN interpretadas como abiertas (lodo base agua).

Distribución Areal y Vertical

Para cada pozo se analizó la distribución de los planos estructurales identificados en registros de imagen, en la vertical y por litofacies; y la orientación de los mismos según la litología. En la Figura 22 se muestra el ejemplo de un pozo donde es evidente la diferencia de azimuth en FN y BdD según las litofacies (Figura 22A), y un ejemplo de un pozo donde el azimuth es coincidente (Figura 22B). Este comportamiento fue analizado también en relación con la cercanía de los planos de falla, no logrando encontrar una relación.



En un análisis áreal no es posible encontrar una relación entre la intensidad de planos estructurales (FN y BdD) y la existencia de planos de falla interpretados para el yacimiento (burbujas en Figura 23). En cambio, sí se aprecia cierta correlación para el sector central y norte del yacimiento, del azimuth de estos planos (diagramas de rosas con recuadro verde); en ocasiones BdD, en otras FN, en otras ambos, con el de las fallas. Esta correlación fue descripta por Cristalini y De La Cruz Olmos (2016) en tres pozos, y en este trabajo se suman 5 pozos con igual comportamiento. En función de la evidente influencia de las fallas en la dirección de los planos mencionados, no resulta sencillo relacionarlos con los paleo esfuerzos del Jurásico y Cretácico.

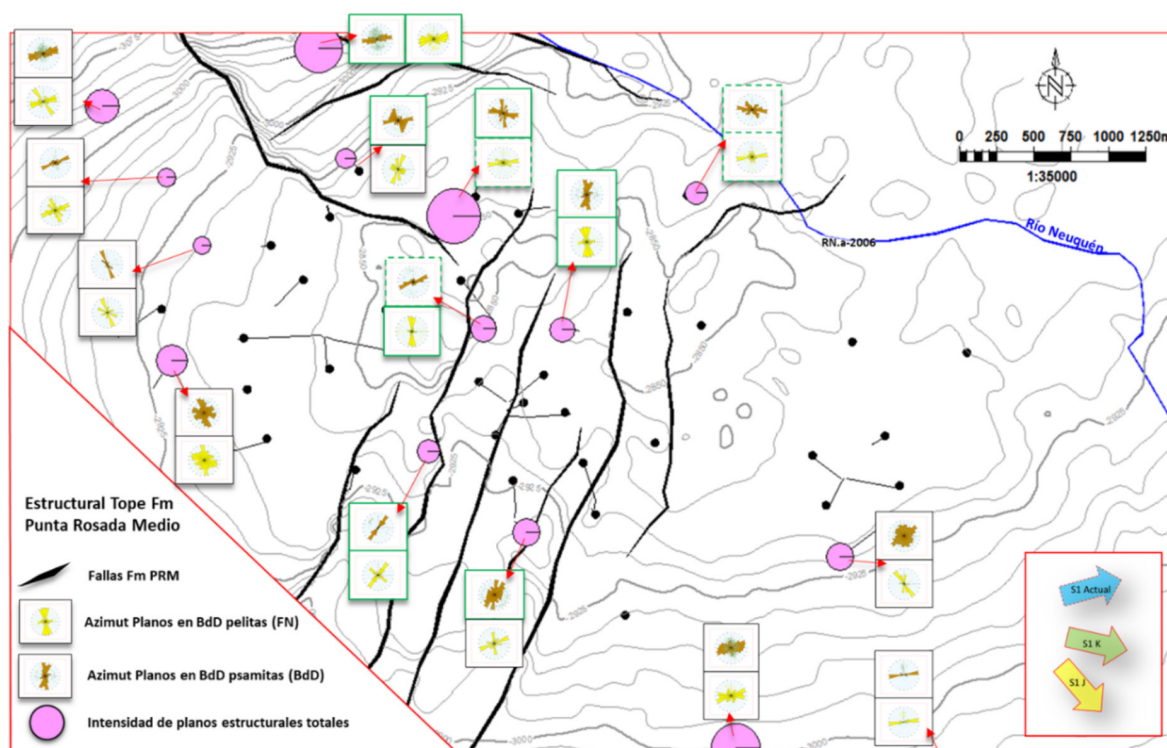


Figura 23. Intensidad y orientación de los planos estructurales naturales identificados en imagen de pozo, segregados por litología (BdD y FN), pudiéndose apreciar una relación o coincidencia entre el azimut de algunos y el de las fallas cercanas (verde).

PRODUCTIVIDAD Y ESTIMULACIÓN HIDRÁULICA VS FRACTURAS NATURALES

Intentar relacionar la productividad con cualquier otro parámetro o característica de los reservorios, ya sea geológica, sísmica, dinámica, operativa, etc., constituye siempre un anhelo y un gran desafío a la vez, ya que normalmente (y particularmente en este yacimiento) se considera que los caudales de fluidos serán posiblemente consecuencia de una conjunción de factores: carga directa desde la roca madre, sobrepresión, distancia a las fallas (*carriers*), posición paleoestructural, espesor de arenas, espesor útil contactado, terminación del pozo, entre otros.

Uno de los factores que definen el crecimiento de una fractura hidráulica y que pueden ayudar a encontrar una relación entre las FN y las BdD con la producción de los niveles estimulados es el *leakoff* o pérdida de fluido. Este fenómeno nos indica cómo el fluido bombeado se disipa en la formación durante y luego de finalizada la operación de estimulación hidráulica (Figura 24).

El análisis de este fenómeno, especialmente la declinatoria de la presión luego de finalizar el bombeo de fluido, más allá de dar certidumbre acerca del comportamiento que tendrá la fractura, nos puede brindar información valiosa del reservorio como la presión inicial, valor del estrés mínimo y transmisibilidad. Nolte (1979) desarrolló una técnica que, mediante la interpretación de una función adimensional del tiempo G, sus derivativas y la presión medida permite identificar,

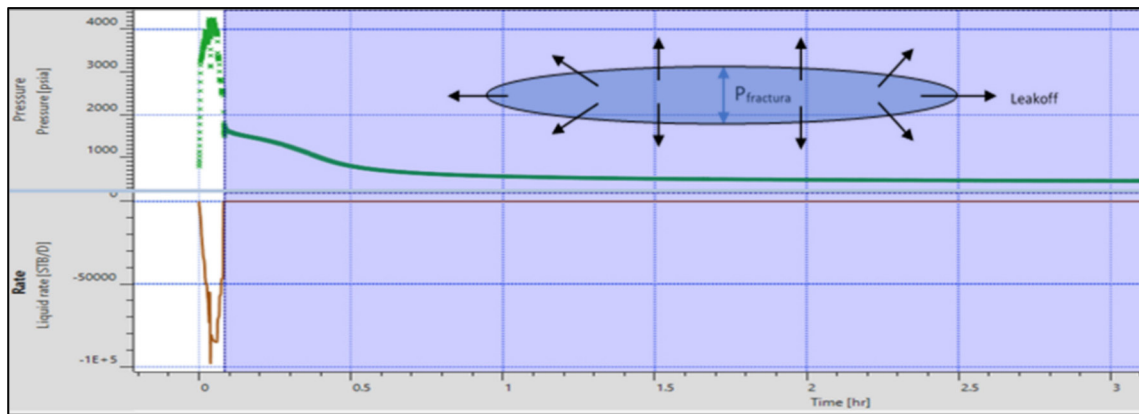


Figura 24. Declinatoria de presión de un DFIT (Diagnostic Fracture Injection Test) y esquema de *Leakoff* dentro del plano de una fractura hidráulica.

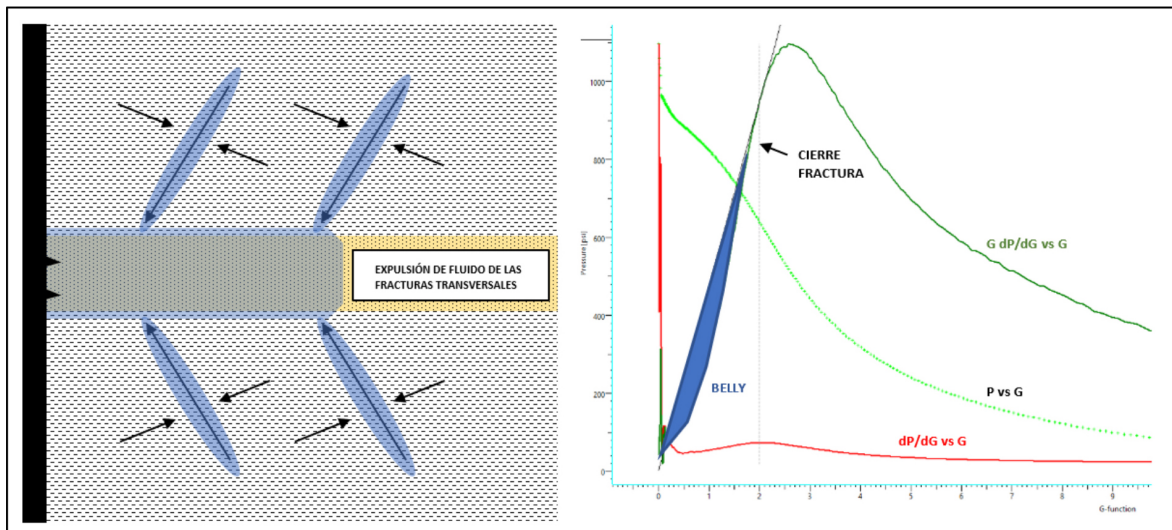


Figura 25. Mecanismos de HR asociado a presencia de fracturas transversales Función G Nolte (basado en Barree, 2009).

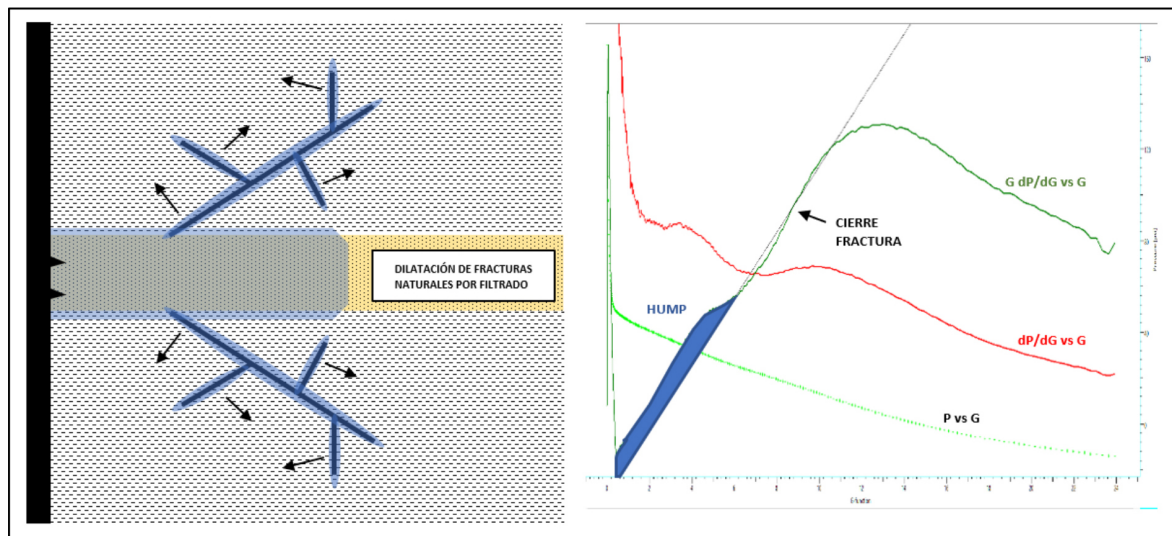


Figura 26. Mecanismos de PDL Función G Nolte (basado en Barree, 2009).

entre otros datos, diferentes tipos de mecanismos de *leakoff*. Dos de estos tipos de pérdida de fluido se pueden asociar a la presencia de fisuras o fracturas naturales, y que son objetivo de este trabajo:

Height Recession (HR): tal como lo describe Barree *et al.* (2009) en reiterados trabajos, este fenómeno puede darse cuando hay un crecimiento fuera de la zona de interés con otras propiedades petrofísicas o por almacenamiento de fluido en fracturas naturales transversales que se abren cuando supera la presión de apertura. Este tipo de mecanismo se identifica en la función G de Nolte por una “panza/belly” (azul) por debajo de la recta que nace en el origen y su derivativa (Figura 25)

Pressure Dependent Leakoff (PDL): Este fenómeno también ocurre cuando estamos en presencia de fracturas o fisuras naturales que se dilatan por efecto de la presión de filtrado y comienzan a admitir fluido. Se caracteriza por una “joroba/hump” (azul) encima de la derivativa (Figura 26). Una vez que las fisuras dejan de tener influencia y la matriz comienza a dominar el filtrado, la tendencia se vuelve normal sobre la recta.

Analizando las terminaciones de los pozos que poseen perfiles de imagen, se detectaron dos comportamientos en la producción de los pozos que podrían tener una relación con las FN y BdD. Las fracturas abiertas observadas con importante intensidad en coronas y trasladadas a las imágenes de pozo, alojadas de manera prácticamente exclusiva en Facies no-reservorio (pelitas, fangolitas y arenas finas con intercalaciones), podrían officar como corredores de fracturas generando canales de alta permeabilidad al momento de la estimulación, que luego no necesariamente serán reflejados en la producción. Mientras que las BdD observadas en Facies gruesas en coronas, donde se comprobó con datos de corona el efecto negativo que pueden tener en las capacidades del reservorio, tal lo indicado en la literatura y sospechado en el yacimiento Aguada-Toledo/Sierra Barrosa para la misma Fm. (López *et al.*, 2017), las cuales luego se extrapolaron a los perfiles de imagen; podrían explicar caudales pobres o nulos en ciertas etapas.

A continuación, se presentan algunos ejemplos de pozos donde la presencia de fracturas naturales abiertas, identificadas en perfiles de imagen, podrían explicar los comportamientos de pérdida de fluidos mencionados.

En la Figura 27 la pérdida de fluido identificada como HR en las etapas 2 y 3 de estimulación hidráulica, se puede asociar a la presencia de fracturas naturales abiertas en facies pelíticas, las cuales se intercalan entre los niveles de reservorio. En la etapa 1 no se cuenta con registro de imagen, sospechando que las facies finas supra e infrayacentes a las arenas estimuladas, puedan contener fracturas naturales abiertas, tal lo identificado en otra etapa más somera en el mismo pozo en la Fm. Punta Rosada (Figura 28). Esto se asume en función de las simulaciones post-job de las estimulaciones sumado a las alturas identificadas en estudios de microsísmicas para este campo, donde las fracturas hidráulicas se suelen extender más allá del objetivo, principalmente en dirección superior.

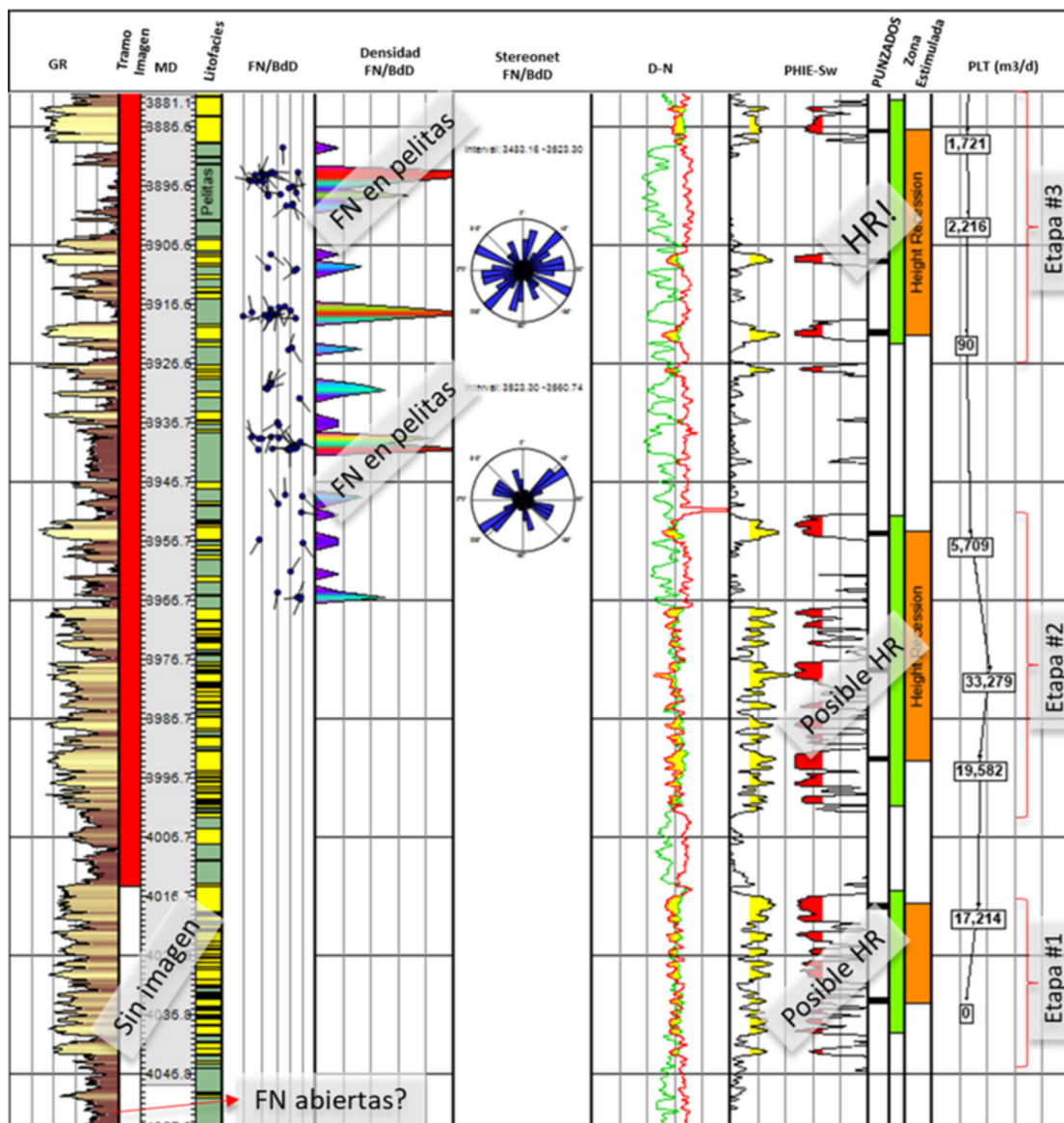


Figura 27. Pérdida de fluidos (HR) asociada a la presencia de fracturas naturales abiertas en facies pelíticas intercaladas en la zona estimulada, Fm. Lajas.

En los siguientes ejemplos (Figura 29 y Figura 30), se presentan pozos donde los caudales magros o muy inferiores a los esperados, medidos por perfiles de producción (PLT), podrían asociarse a la presencia de BdD con la consecuente obliteración en el reservorio que las mismas generan.

CONCLUSIONES

Se validaron 3.900 planos estructurales en imágenes de pozo con fracturas naturales (FN) con slikensides y las bandas de deformación (BdD) como estructuras más comunes.

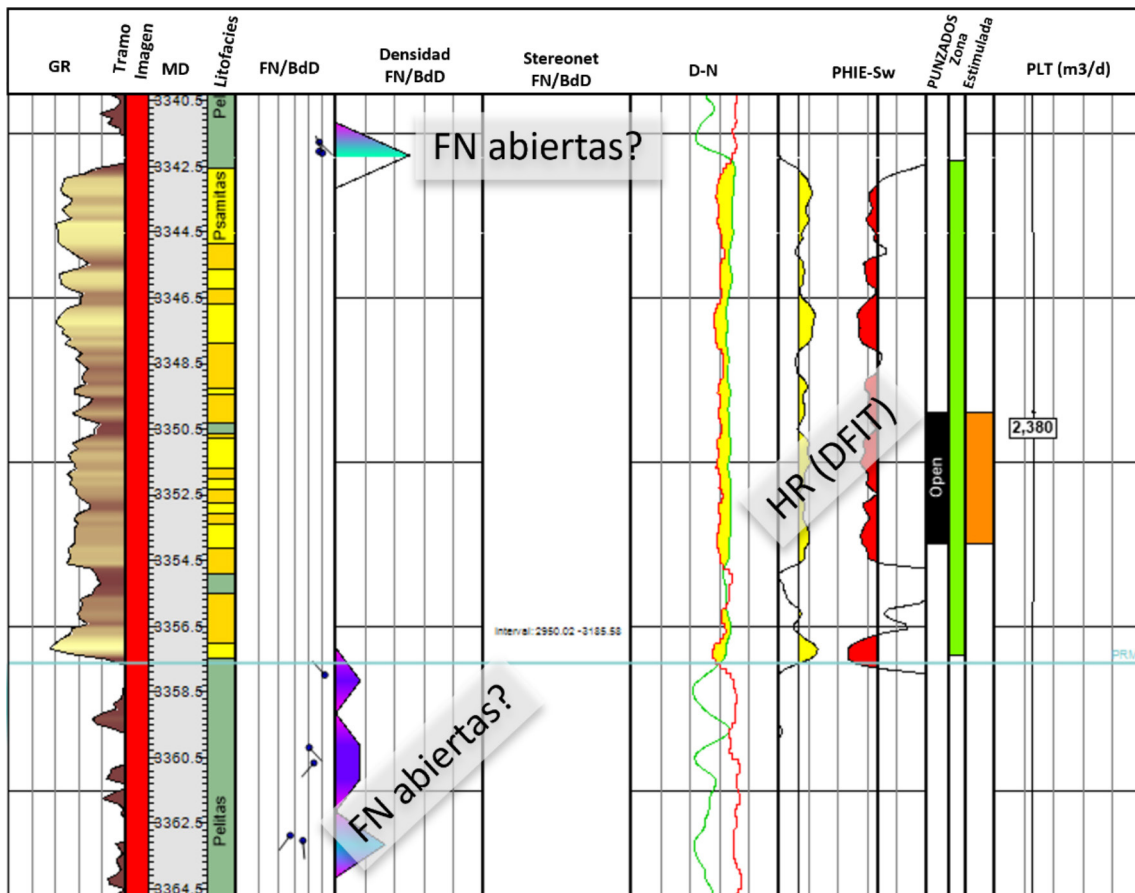


Figura 28. Pérdida de fluidos (HR) asociada a la presencia de fracturas naturales abiertas en facies pelíticas supra e infrayacentes a las arenas estimuladas, Fm. Punta Rosada.

Las FN se observan en coronas de manera casi exclusiva en facies de pelitas, fangolitas y arenas finas intercaladas con fangolitas, pudiendo identificar algunas con espejos de fricción (sliceinside) y dirección de movimiento subvertical. Mientras que las BdD observadas tanto en coronas, afloramiento e imágenes de pozo, siempre están asociadas a Facies clásticas gruesas. En la mayoría de los pozos, las BdD son subverticales, pero algunas coronas muestran un gran número de BdD subhorizontales dispuestas en *clusters* de aprox. 1 m de espesor y distanciadas cada 2 metros. Aunque no se ha observado un control geomecánico, si existe una correlación con la litología, hallándose concentradas las BdD principalmente en areniscas finas a medias y conglomerádicas.

Las BdD afectan la calidad de los reservorios oficiando en ocasiones como barreras hidráulicas. La mayoría son de origen cataclástico y ricas en minerales de arcilla. Algunas contienen bitumen y/o óxidos y se observa baja porosidad remanente luego de la cementación y/o la infiltración de hidrocarburo.

En algunos casos, las BdD cataclásticas se reactivan en fracturas de Modo I (*Opening Mode*) rellenas por ankerita seguida en ocasiones por baritina con evidencia de contracción y cizalla como principales mecanismos de deformación.

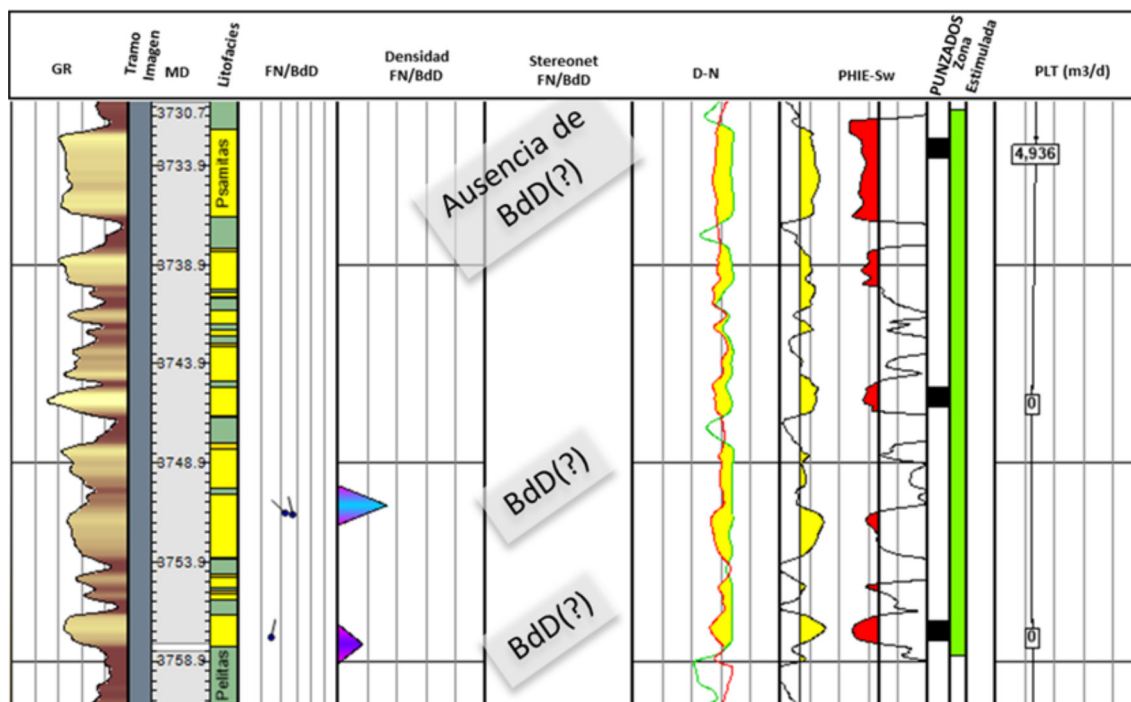


Figura 29. Caudales bajos medidos por PLT, probablemente asociados a la presencia de BdD en facies psamíticas. Fm. Punta Rosada.

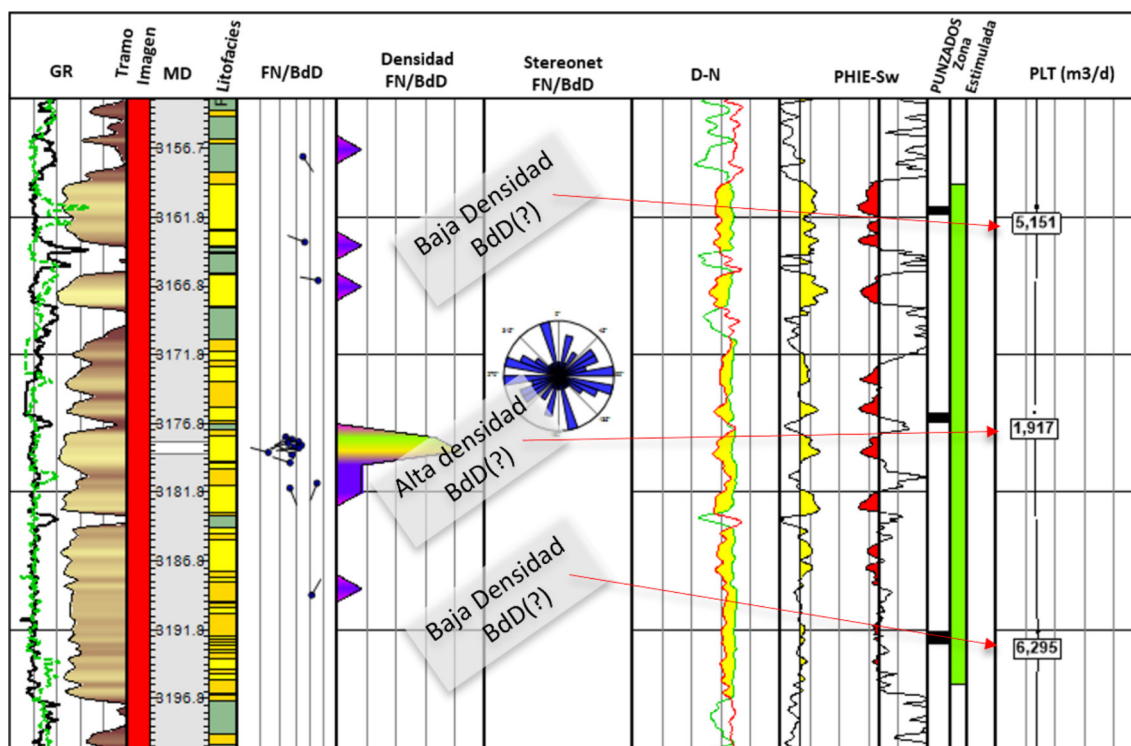


Figura 30. Caudales bajos medidos por PLT, que podrían asociarse a la BdD en facies psamíticas. Fm. Punta Rosada.

En algunos pozos se observa una diferencia en el azimut de las FN y BdD, y en otros un correlato entre la orientación de estos planos y los planos de falla, fundamentalmente en los pozos cercanos a las mismas.

Si bien se han detectado tanto BdD como FN en las imágenes de pozo, no resulta sencillo detectarlas ni diferenciarlas. Algunas FN presentan respuesta resistiva para OBM, y conductiva para lodo base agua, indicando que se encontrarían abiertas.

Las BdD en imágenes generalmente se detectan como planos conductivos debido al relleno de arcillas, óxidos y/o piritita; donde la presencia de hidrocarburo en la roca hospedante podría potenciar su detección.

Desde el punto de vista del impacto en la productividad, se podrían asociar las FN en pelitas con los comportamientos de pérdidas de fluidos en las fracturas hidráulicas, como vías de alta permeabilidad al momento de la estimulación. Mientras que las BdD podrían explicar caudales pobres o disminuidos en ciertos pozos, por su efecto confirmado en la disminución de porosidad y permeabilidad.

Es un objetivo a futuro realizar un modelo de intensidad de planos en función de la litología (FN y BdD), para intentar predecir los comportamientos mencionados.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a las autoridades de YPF y empresas asociadas en este campo por la posibilidad de publicar este trabajo, el aporte de nuestros colegas y compañeros sin el cual no hubiera sido posible realizarlo, así como el valioso apoyo técnico brindado por el Fracture Research and Application Consortium (FRAC), *Bureau of Economic Geology*, The University of Texas at Austin.

REFERENCIAS CITADAS

- Baree, R.; Harris, H.; Towler, B.; Ramurthy, m. 2013. Effects of High Pressure-Dependent *Leakoff* (PDL) and High Process-Zone Stress (PZS) on Stimulation Treatments and Production,” SPE 167038.
- Berdini, O.; Arregui, C. y Pimentel Mendes, M., 2002. Evolución tecto-sedimentaria de la estructura Río Neuquén, Cuenca Neuquina, República Argentina. XV Congreso Geológico Argentino, Actas 3: 187-192, Calafate.
- Berdini, O.; Rodríguez, J.; Matheos, S.; Spalletti, L.; Villa, H. 2011. Evaluación de los procesos diagénéticos y modelado bidimensional del sistema petrolero Los Molles-Lajas/Punta Rosada en el yacimiento Río Neuquén, Cuenca Neuquina, Argentina. VIII Congreso de Exploración y desarrollo de hidrocarburos, Mendoza.
- Carrizo, N; Santiago, E.; Saldungaray, P. 2021. An integrated physical characterization of a siliciclastic tight gas reservoir in Neuquén basin, western

- Argentina. SPWLA 62nd Annual Logging Symposium, May 17-20, 2021.
- Cristalini, E.; De la Cruz Olmos, M. 2016. Caracterización estructural y evolución tectónica del bloque Río Neuquén. Porvicias del Neuquén y Río Negro. Informe interno Pampa Energía.
- De La Cruz Olmos, M.; Ibañez Zurita, P.; Krittian, A.; Naidés, C. 2018. Arenas Compactas del Grupo Cuyo, Yacimiento Río Neuquén. Rocas Reservorio de las cuencas productivas argentinas, X Congreso de Exploración y desarrollo de hidrocarburos, Mendoza.
- Dellapé, D.A., Pando, G.A., Uliana, M.A. & Musacchio, E.A. 1978. Foraminíferos y ostrácodos del Jurásico en las inmediaciones del arroyo Picún Leufú y la ruta 40 (Provincia del Neuquén, Argentina) con algunas consideraciones sobre la estratigrafía de la Formación Lotena. 7°. Congreso Geológico Argentino, Actas 2: 489-507. Buenos Aires.
- Digregorio, José H. 1972. Neuquén. En: Leanza, A.F. (Ed.): Geología Regional Argentina. Academia Nacional de Ciencias. República Argentina. pp. 439-506. Córdoba.
- Fossen, H. 2010. Structural Geology. Cambridge University Press, 463.
- Fossen, H., Schultz, R.; Shipton, Z.; Mair, K. 2007. Deformation Bands in Sandstones: a review. Journal of the Geological Society, London.
- Fossen, H.; Bale, A. 2007. Deformation bands and their influence on fluid flow. AAPG Bulletin V91, No 12.
- Hammar, V., Rojo, S., Sigismondi, M., Chirinos, N. 2018. Interpretación Estratigráfica Secuencial aplicada al desarrollo de la Fm. Lajas en el yacimiento Río Neuquén. X Congreso de Exploración y desarrollo de hidrocarburos, Mendoza.
- Laubach, S.; Olson, J.; Gale, J. 2004. Are open fractures necessarily aligned with maximum
- Monti, M.; Rodriguez, E.; Yankowsky, J.; Ottone, E. 2019. Estudio integrado de corona YPF. Nq.RN.a-XXXX (Río Neuquén) Cuenca Neuquina. YTEC.
- Valdéz, A.; Soae, L.; Rodrigez Shelotto, L. Estudio Sedimentológico, petrográfico, diagenético, mineralógico, de MEB, fracturas y palinológico, Sondeo YPF.Nq.RN.a-XXXX, LCV.
- Ukar, E.; López, R.; Gale, J. F. W.; Ciancio, L.; Elliott, S., 2022. Deformation bands as fluid pathways in outcrops of Lajas Formation tight-gas sandstone, Neuquén Basin, Argentina. IMAGE '22 conference, August 28th-September 2nd, Houston, Texas, USA.
- Weaver, Ch. 1931 Paleontology of the Jurassic and Cretaceous of West. Central Argentina. University of Washington. Memoir 1: 1-469. Seattle.