

# **CARACTERIZACIÓN Y ANALISIS DE FRACTURAS NATURALES-ÁREA PUESTO TOUQUET**

Lic. Carla Diaz Torra

Director: Juan Franzese

Co-Director: René Manceda

## AGRADECIMIENTOS

*“No hay ninguna necesidad de saber hacia dónde estás yendo, no hay ninguna necesidad de saber por qué estás yendo. Todo lo que necesitas saber es si vas disfrutando, porque, cuando se va gozando, no se puede estar equivocado” (Osho).*

Esta frase refleja el trayecto recorrido a lo largo de la Especialización, hasta el punto culmine, la realización de la tesis. Este camino ha sido por momentos muy sinuoso, otros momentos más rectos, pero siempre lo recorrí con entusiasmo, permitiéndome dar cada paso con gran curiosidad y sin dejar de asombrarme por todo lo aprendido.

Todo esto se lo agradezco a:

Angela Melli directora de la Especialización, por darme la oportunidad de ser parte de la institución, al igual que la Dra. Patricia Pereyra secretaria de Posgrado de FCNyM.

A mi director Dr. Juan Franzese y a mi Co-director René Manceda, una persona de gran sabiduría, el cual pudo transmitir con gran paciencia sus conocimientos y su amor por la Geología.

A mi amada pareja por apoyarme incondicionalmente y por creer siempre en mí.

A mi familia y amigas/os por estar conmigo en todo momento, en una palabra, de apoyo, en un abrazo o simplemente en una mirada.

Y por último a mí misma por siempre seguir adelante y nunca rendirme

## INDICE GENERAL

### Páginas

|  |    |
|--|----|
| 1. Introducción                                      | 5  |
| 2. Ubicación y marco geológico de la zona de estudio | 5  |
| 3. Área de estudio                                   | 7  |
| 4. Geología del yacimiento                           | 10 |
| 5. Metodología                                       | 12 |
| 5.1 Modelo Estructural                               | 15 |
| 5.2 Descripción de Testigos Coronas                  | 20 |
| 5.2.1 Descripción de cortes delgados                 | 35 |
| 5.3 Descripción de perfiles de imágenes              | 36 |
| 5.4 Geofísica y Geomecánica                          | 38 |
| 6. Modelado  | 43 |
| 7. Consideraciones finales                           | 49 |
| 8. Bibliografía                                      | 50 |
| 9. Anexos  | 53 |



# **CARACTERIZACIÓN Y ANALISIS DE FRACTURAS NATURALES –ÁREA PUERTO TOUQUET**

## **1. Introducción**

En el presente trabajo se propone generar un modelo geomecánico de fracturas naturales en el bloque Puerto Touquet, localizado en la Cuenca Neuquina, Provincia del Neuquén, operado por la empresa Geopark, para optimizar los proyectos de desarrollo y exploración donde las fracturas juegan un papel importante en la optimización de los reservorios. Para ello se realizó un análisis tectónico-estructural apoyado en trabajos publicados e interpretación de la sísmica 3D, descripción de testigos coronas con el método FRAC de la Universidad de Texas en Austin, la definición de una estratigrafía mecánica basados en el análisis de perfiles sísmicos dipolares y el modelado integral en el módulo de fracturas de Petrel®, el cual permite crear redes de fracturas naturales a partir de la interpretación de los registros de pozos y/o datos sísmicos, basado en modelos geomecánicos.

Los resultados finales se reflejan en una visualización tridimensional de la densidad, distribución y propiedades de las fracturas de un modelo estático y que posteriormente podría ser usado para generar un modelo dinámico

## **2. Ubicación y marco geológico de la zona de estudio**

El Engolfamiento Neuquino comprende la región extra-andina del Neuquén y sur de Mendoza. Limita al O con la Cordillera Principal y Norpatagónica, hacia el NE con los Bloques de San Rafael y Las Matras, mientras que hacia el SE con el Macizo Norpatagónico (Figura 1).

El desarrollo de la cuenca Neuquina se inició en el Triásico superior vinculada a un sistema de rift dando origen a grábenes, hemigrábenes y zonas de transferencia definiendo depocentros aislados (Mombrú y Uliana 1978). El avance de los mismos se produjo sobre depósitos neo-paleozoicos y rocas permotriásicas volcaniclásticas del Grupo Choiyoi, en parte enrasado por depósitos volcánicos y clásticos del Precuyano; además altos de basamento prominentes y edificios volcánicos controlaron la distribución de los sedimentos marinos jurásicos. En el Jurásico inferior la cuenca evoluciona a una cuenca de retro arco producto del desarrollo de un arco volcánico. Esto se mantendrá hasta el Cretácico inferior. La influencia de la subsidencia térmica está documentada durante el Toarciano inferior; esto condujo a la unificación de los depocentros provocando que las unidades pasaran a tener un desarrollo más regional. Las variaciones eustáticas controlan la alternancia de secuencias marinas pacíficas y continentales (Legarreta y Uliana 1996) que caracterizan a este período. Para el Cretácico inferior alto la cuenca comienza a continentalizarse y a desarrollarse con características típicas de cuenca de antepaís, perdiendo definitivamente contacto con el Pacífico y sólo sufrirá una corta inundación marina atlántica en el Cretácico superior (Wichmann, 1927; Bertels, 1979; Uliana y Dellape, 1981). Durante el Cretácico superior y Cenozoico, el sector occidental de la cuenca es deformado en episodios discretos vinculados a sucesivas variaciones en el ángulo de subducción, que también controlan la posición del arco volcánico y por ende, la distribución de volcanitas. El sector oriental, en cambio, funciona como receptor de depósitos de antepaís y como zona de tránsito de sedimentos (Folguera et al.2002).



Figura 1: Ubicación de la cuenca Neuquina, extraído del libro Growth of the Southern Andes, (Naipauer, M. y Ramos, V.A. 2016).

La orientación regional del campo de esfuerzos es fuertemente controlada por la dinámica del margen convergente, que dio lugar a tres estadios de deformación principales. El primer evento (Toarciano-Valanginiano), con un  $\sigma_1$  de orientación NO, constituyó el principal evento de deformación, el cual fue disminuyendo hasta el Albiano, con una incipiente rotación hacia el oeste del vector  $\sigma_1$ , la que prevaleció hasta después del Cenomaniano. La deformación final tuvo lugar en el Mioceno tardío con una orientación este-oeste del esfuerzo principal y una extensión pliocena.

### 3. Área de estudio

La dorsal de Huincul está ubicada en el ámbito de la provincia del Neuquén (Figura 2). Se trata de un rasgo morfo-estructural regional desarrollado a los 39° de latitud Sur que se extiende por más de 250 km, constituida por un tren de estructuras anticlinales de orientación preferencial E-O fuertemente asimétricas con vergencia predominantemente sur; involucra desde un basamento Paleozoico hasta

sedimentos del Cretácico superior (Orchuela et al., 1981 y Ploszkiewicz et al., 1984). Se extiende desde la zona del Cordón de la Piedra Santa, donde se encuentra al oeste con el frente orogénico andino, hasta las inmediaciones de General Roca (Provincia de Río Negro) al este. Posee una historia de deformación mesozoica mayormente compresiva y casi continua, de 84 Ma de duración, abarcando desde el Jurásico Inferior hasta el Cretácico Superior (Mosquera et al. 2011), la cual controla la erosión y sedimentación en las cercanías de dicha dorsal (Cristallini et al. 2009, Mosquera et al. 2011).

La evolución tectónica de la dorsal se vio afectada principalmente a un basamento altamente anisótropo (Mosquera, op. cit.) y la interacción con el campo de esfuerzos regionales (Silvestro y Zubiri, 2008), los cuales provocaron que los eventos que afectaron a cada estructura sean diferentes.

En los trabajos de Silvestro y Zubiri, op. cit, identifican cuatro sectores según los distintos rasgos estructurales (Figura 2): **sector occidental**, con predominio de lineamientos en sentido NE de tipo compresivo; un **sector oriental**, caracterizado por lineamientos NO; un **sector central**, el cual puede considerarse como una transición entre los sectores antes mencionados, donde predominan estructuras anticlinales con orientación E; y un **sector norte**, ubicado ya en el ámbito del engolfamiento, donde las estructuras desarrolladas son enteramente transcurrentes y de orientación NO. En el presente trabajo solo se hará mención del sector occidental debido que nuestra área de interés se sitúa en dicho lugar.



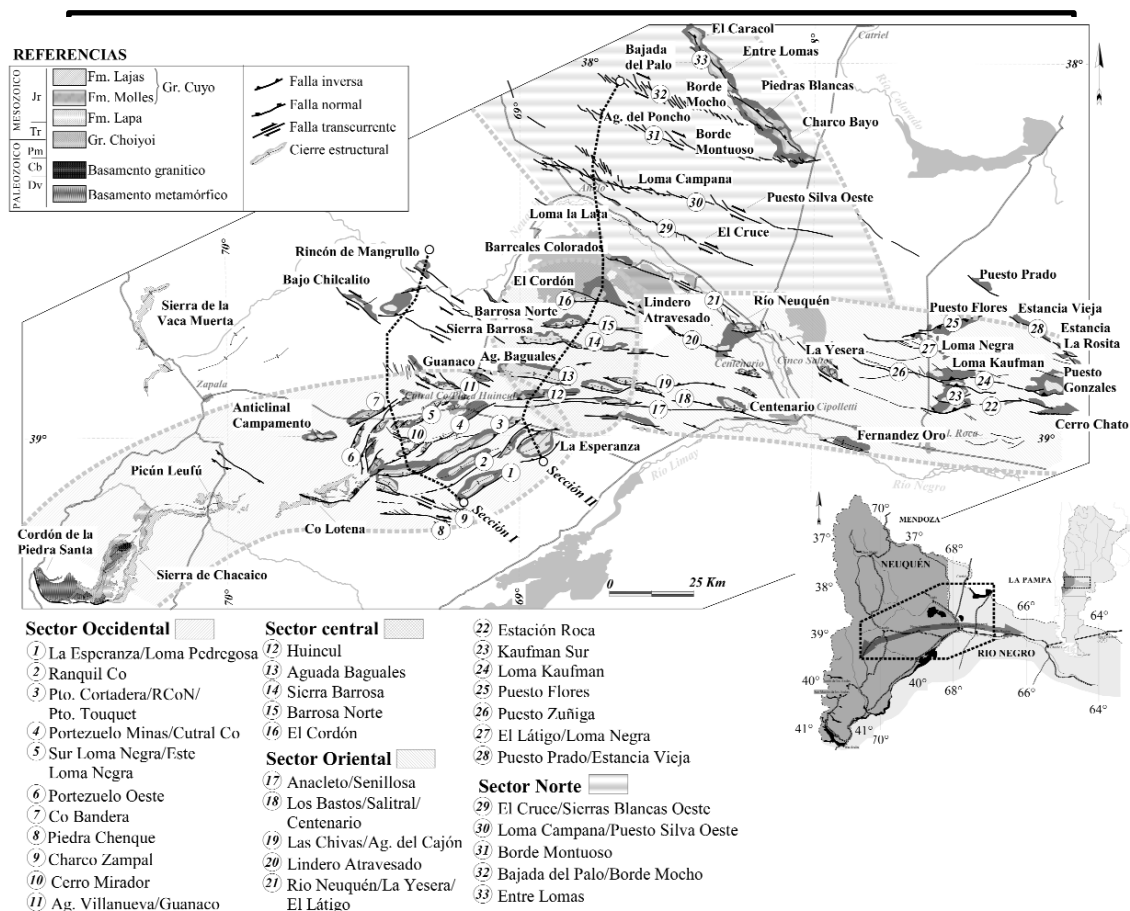


Figura 2: Lineamientos estructurales principales de subsuelo y afloramientos, relacionados a la dorsal neuquina. En base a la orientación de los lineamientos se puede diferenciar un sector occidental con predominio de estructuras compresivas de orientación NE y vergencia hacia el sureste; un sector oriental con estructuras mayormente transcurrentes de orientación NO; un sector norte correspondiente al engolfamiento en donde se desarrollan casi exclusivamente corredores transcurrentes de bajo relieve estructural y finalmente un sector central de transición en donde las estructuras tienen una orientación E-O y presentan características tanto transcurrentes como compresivas. Extraído del trabajo de Silvestro y Zubiri, 2008.

El área de estudio se ubica en el sector centro-oeste de la Dorsal de Huincul, a unos 7 km al sudeste de la ciudad de Cutral-Co y a 60 km al oeste de la ciudad de Neuquén. Abarca una superficie aproximada de 350 km<sup>2</sup>, comprendiendo las concesiones de explotación de Puesto Touquet y El Porvenir (Figura 3).



Figura 3: Ubicación del área de estudio, Puesto Touquet (A) y El Porvenir (B). Imagen extraída de Google Earth.

El bloque El Porvenir tiene una superficie total de 238 km<sup>2</sup> y cuenta con tres yacimientos de petróleo: Challacó, La Esperanza y El Porvenir. El área fue adquirida por Pluspetrol en 1990, con un total de 379 pozos perforados hasta el año 2014. Se registraron dos cubos sísmicos en el bloque, en los años 1998 y 2006, el primero de ellos abarcando el sector suroeste de Puesto Touquet. Challacó es el yacimiento más importante del bloque y se ubica sobre el alto de Challacó, la estructura más conspicua del área (Figura 4). Consiste en un pliegue anticlinal de rumbo NE-SO, en donde se halla la mayor parte de las reservas de petróleo, almacenado en las formaciones Tordillo y Challacó, ambas de origen fluvial, constituidas principalmente por areniscas gruesas a conglomerados y conglomerados respectivamente.

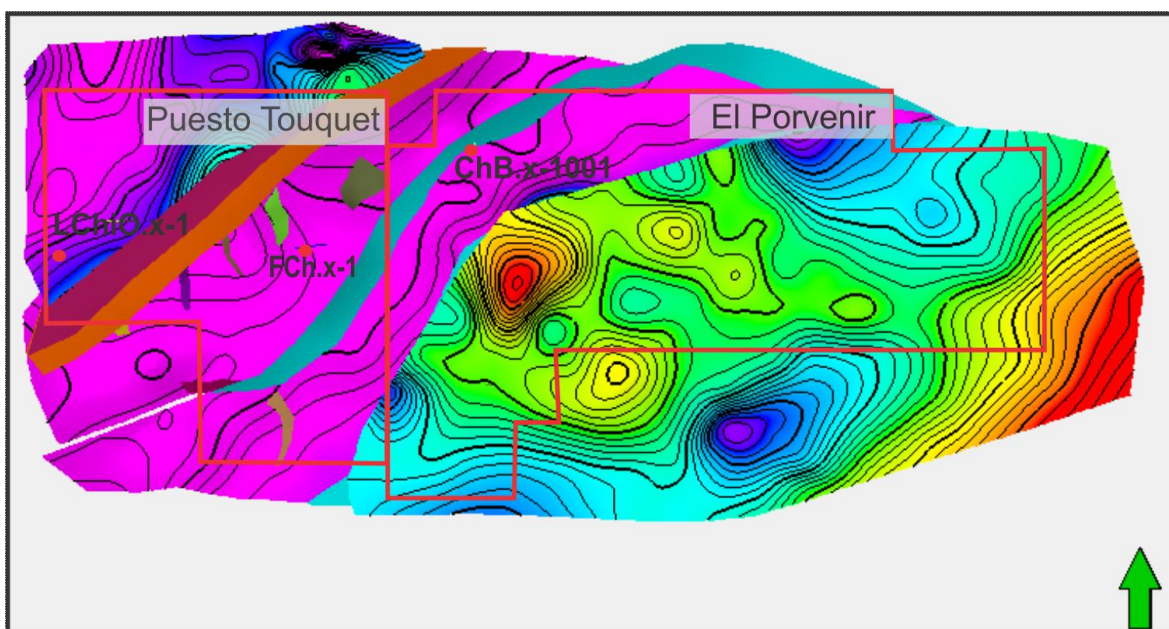


Figura 4: Mapa estructural en tiempo al techo del Mb. Cutral Có

El bloque Puesto Touquet tiene una extensión de 138 km<sup>2</sup> y cuenta con dos yacimientos de gas y condensado que producen de dos unidades distintas: el yacimiento Puesto Touquet (Mb Cutral-Co de la Fm Los Molles, constituido principalmente por areniscas) y el yacimiento La Chilca (Gr Precuyo, comprendido por depósitos piroclásticos, clásticos y volcánicos). Ambos yacimientos están localizados en el alto de Puesto Touquet, un anticlinal elongado en dirección SO-NE generado por la inversión de una falla antitética que despega de una falla de rift a raíz de los nuevos esfuerzos compresionales (Margueliche, 2017). Esta estructura es la responsable de generar el entrapamiento para las unidades más someras del Mb Cutral-Có.

El yacimiento Puesto Touquet fue descubierto por YPF en el año 1983 mediante la perforación del pozo PTu.x-1. Debido a la falta de gasoductos, y al resultado estéril del pozo PTu.x-2, el área no se desarrolló por carecer de valor económico explotable en esa época. El bloque fue adquirido por Pluspetrol en el año 1991. En el año 2001 se registró sísmica 3D que completo la cobertura parcial del cubo de 1998. Desde 1993 hasta 2010 se perforaron 17 pozos de delineación y desarrollo en el yacimiento Puesto Touquet con objetivo en la Fm Los Molles.

#### 4. Geología del Yacimiento

La formación a la cual nos referimos en este estudio es la Fm. Molles; la misma se encuentra apoyada sobre una estructura bien definida con depocentros aislados originados por el proceso de rifting. Hacia el Jurásico inferior medio la actividad extensional disminuyó dando paso a un régimen de subsidencia termal, que permitió el desarrollo de grandes depósitos sedimentarios ocasionados por las transgresiones desde el Pacífico que llegaban allí a través de aperturas en el arco (Spalletti et al., 2000) (Figura 4).

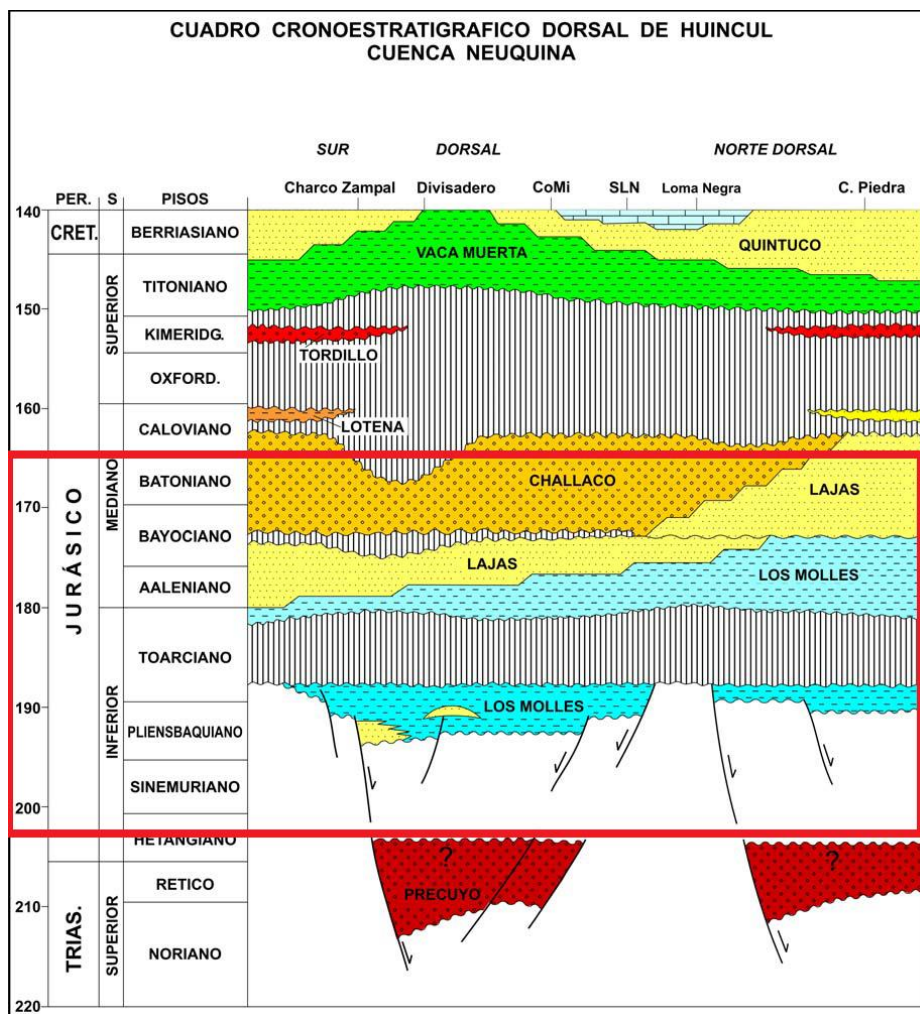


Figura 4: Cuadro cronoestratigráfico del Jurásico de la Dorsal de Huincul, Cuenca Neuquina. Dentro del recuadro está la formación correspondiente a nuestra área de estudio. Edades según escala de tiempo de tomado de Vergani, et al ,1995.

La Fm. Molles está Integrada mayormente por pelitas grises y gris oscuras con variable contenido orgánico, que alternan con areniscas finas hasta gruesas y conglomerados (Mb. Cutral-Co en el subsuelo de Plaza Huincul) (Arregui et al. 2011). Posee espesores variables, con máximos en la región central de la cuenca en donde superan los 2.000 m, especialmente documentados en el área de la Dorsal de Huincul (Barda Colorada Este) (Gómez Omil et al. 2002).

Se tuvieron en cuenta las secuencias depositacionales descriptas y analizadas en los trabajos de Gómez Omil et al. (2002), Gulisano et al. (2007) y Gulisano et al. (2011), los cuales describieron cinco mega-secuencias para el Grupo Cuyo. De las cinco, solo consideraremos las dos primeras que corresponden a la Fm. Molles. A la unidad en cuestión se la puede separar en tres miembros, Pelítico Inferior, Cutral-Có y Pelítico Superior. El primero corresponde a la secuencia I, Mb. Pelítico Inferior (Pliensbaquiano- Toarciano inferior), conformada principalmente por lutitas negras laminadas de origen marino profundo correspondiente a la primera inundación, que representaría un cortejo de mar alto, con una buena capacidad de generación de hidrocarburos.

La secuencia II se encuentra caracterizada por dos cortejos sedimentarios a nivel regional: de mar bajo (Mb Cutral Co) y de mar alto (Mb Pelítico Superior). El Mb Cutral-Có (cortejo sedimentario de mar bajo) representa un ambiente turbidítico integrado por areniscas líticas y cuarzo-feldespáticas bien seleccionadas, con tamaño variable de finas a medianas, y en algunos sectores, conglomerados y una fracción arcilla conformada principalmente por caolinita, con cemento caolinítico, calcítico y dolomítico.

El Mb. Pelítico superior, considerado como un cortejo de mar alto, está constituido por pelitas gris claro a medio que carecen de interés económico como roca generadora, fue depositado durante el Toarciano temprano al Toarciano tardío.



## 5. Metodología

En la figura 5 se esquematiza un flujo de trabajo simplificado del análisis de fracturas naturales (Manceda et al., 2005) donde se sintetizan los pasos realizados. Los datos utilizados para este estudio se obtuvieron a partir de testigos corona, imágenes de pozos, sísmica 3D y análisis de perfiles sónicos dipolares, y a partir de los mismos, se realizó la descripción de testigos corona, un modelo estructural, estudios geofísicos y geomecánicos, y finalmente el modelado, los cuales serán los puntos a tratar en detalle.

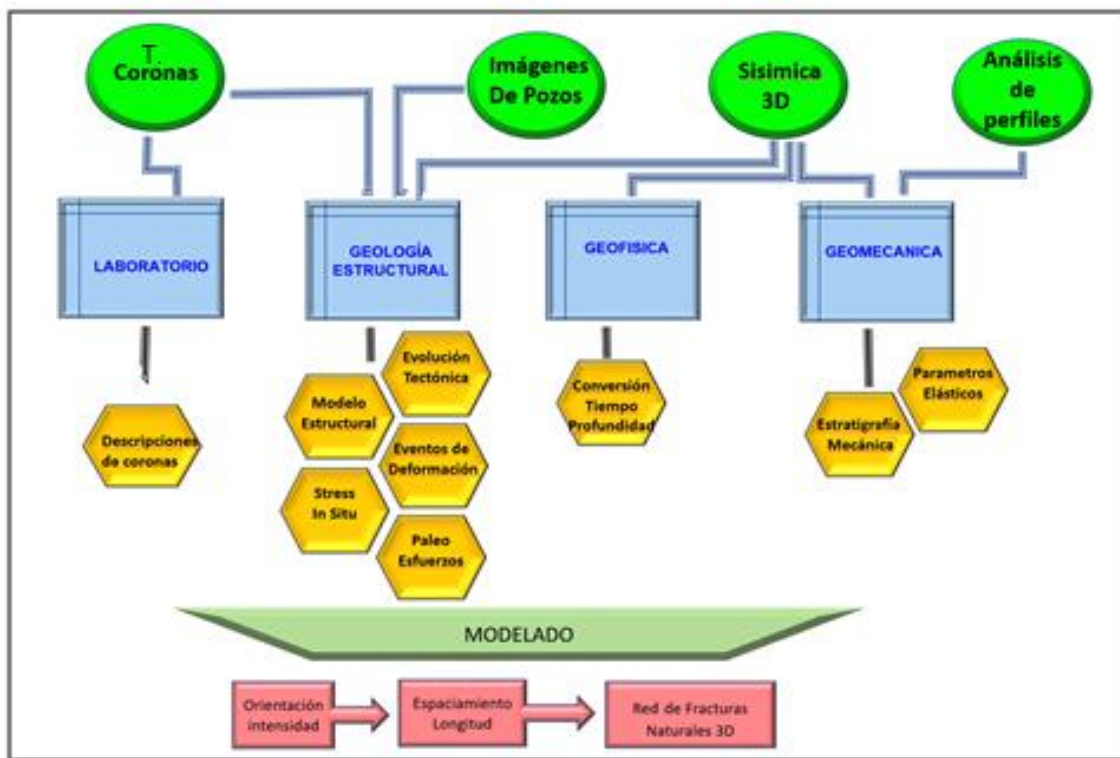


Figura 5: Esquema sintético del flujo de trabajo

El objetivo principal de este flujo de trabajo es construir una red de fracturas naturales tridimensional, el cual está fundamentado en un análisis estructural detallado de las fallas interpretadas en el cubo sísmico para obtener un patrón tridimensional de fallas en el área de estudio. Este patrón de fallas generado a través de la evolución del área de Puesto Touquet, permitirá determinar en cada fase tectónica la red de fracturas naturales creada entre la interacción del campo de esfuerzos remotos actuantes en ese tiempo, proveniente de la convergencia de placas, y el conjunto de fallas de la misma.

El resultado de ese proceso es la generación de campos locales, ya que el esfuerzo remoto se desviará en orientación e intensidad al interactuar con los planos de fallas existentes. De esta manera, se obtiene la distribución espacial, orientación e intensidad de las fracturas subsísmicas que se encuentran en el área y fundamentalmente, en zonas intermedias de pozos donde no hay datos duros.

Una vez definidas las relaciones espaciales de las fracturas naturales, se necesita conocer otras propiedades para generar una red, como las aperturas, cementos presentes en el espacio de la fractura y longitud, que se definen a partir de diferentes fuentes como se expresa en los párrafos anteriores (testigos corona, imágenes de pozo y afloramientos).

Finalmente, reunidos todos estos datos se modela una red tridimensional que puede ser calibrada en función de los mismos. A partir de los datos de sondeos que tienen registros de imágenes de pozos, se realiza una calibración en las zonas alejadas a estos.

Esta metodología incluye numerosas disciplinas y cuya integración es aparentemente un poco ardua, pero está basada en conceptos geomecánicos a diferencia de otras donde prevalecen las consideraciones geométricas que no tienen en cuenta la génesis de las fracturas naturales.

## 5.1 Modelo Estructural

El modelo estructural fue realizado por Esteban Margeliche (Tesis Especialización en Geociencias en Exploración y Desarrollo en Hidrocarburos 2017) basado en la sísmica 3D existente en el bloque y en la información de sondeos como FCh.x-1, PTu.x-1 y PBi.x-1. El estudio confirma los 3 sectores destacados en estudios previos, como se observa en la Figura 6 (Kim, et al., 2014).

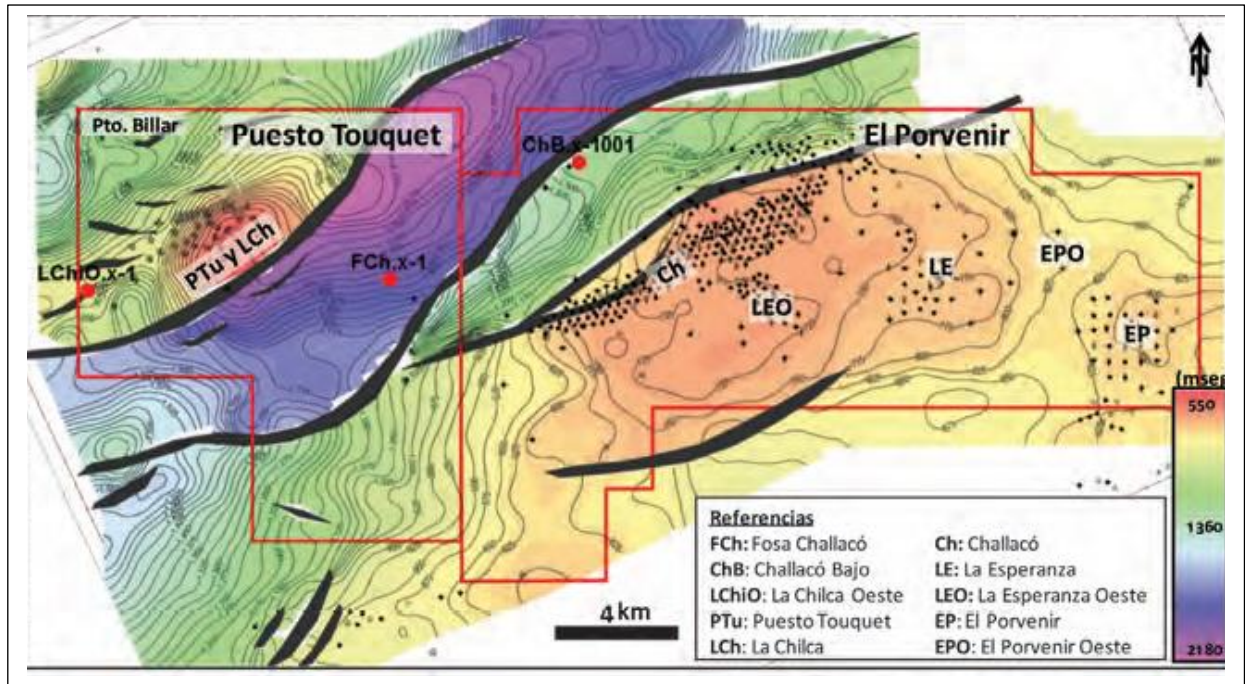


Figura 6: Mapa isócrono del Precuyo, donde los colores cálidos representan los valores positivos y los colores fríos los negativos (Kim, et al., 2014).

El sector NO se destaca por el Anticlinal California (zona denominada PTu y LCh en la figura 6), generado por la reactivación de una falla antitética y donde se desarrolla el yacimiento Puesto Touquet. La zona SE es también dominada por una estructura debido a reactivación de fallas extensionales, y se denomina Bajo Challacó (zona donde se localiza el pozo ChB.x-1001 en la figura previamente mencionada). La zona deprimida central flanqueada por las estructuras anteriores es conocida como la Fosa de Challacó, donde se ubica el pozo FCh.x-1. Estas zonas tienen un rumbo NNE-SSO controlado por la arquitectura extensional inicial.



Estas zonas que caracterizan el bloque se visualizan claramente en la Figura 7, donde se observa una línea sísmica compuesta a lo largo del bloque. Las fallas reactivadas están descriptas con detalle en el trabajo de Margueliche op. cit.

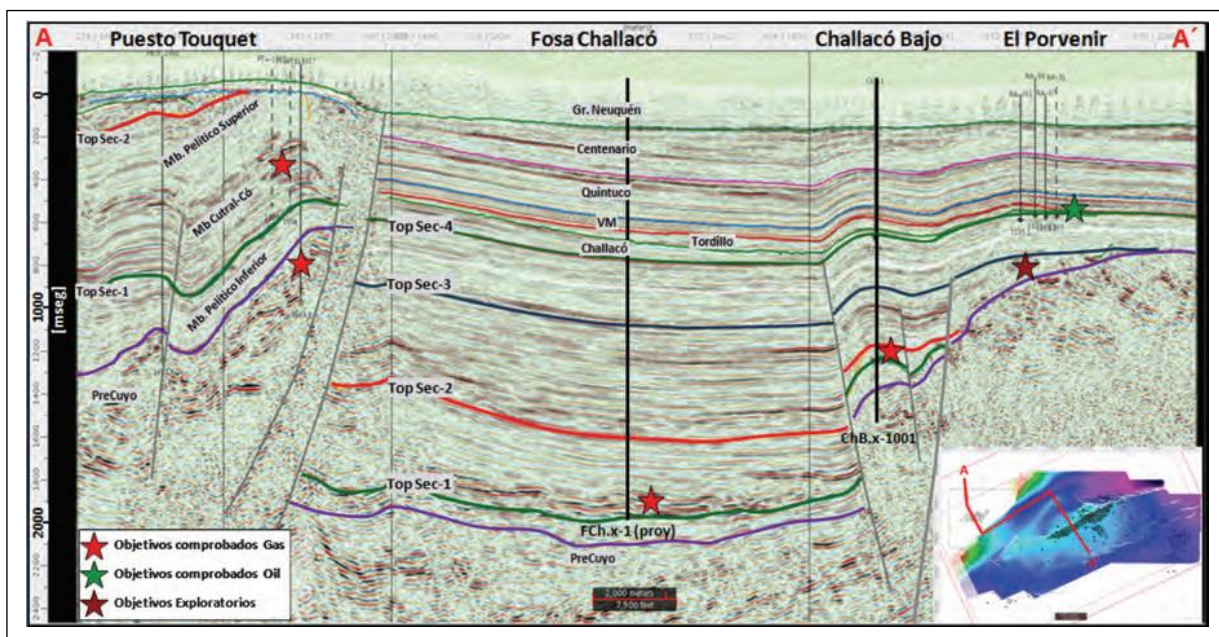


Figura 7: Sección compuesta del bloque mostrando los tres sectores estructurales (Kim, et al., 2018).

Las reactivaciones de estas estructuras se desarrollaron en cuatro eventos reconocidos a través de análisis de estratos de crecimiento y discordancias progresivas (Margueliche, op.cit.). En la tabla 1 se muestran las edades y orientaciones de los esfuerzos máximos horizontales; de acuerdo a estos datos y a la orientación de las estructuras, la primera reactivación se realiza en un régimen compresivo y los restantes en un ambiente tectónico de desplazamiento lateral.

|   |        |            |
|---|--------|------------|
| Pliensbachiano Superior                 | N 340° | Compresivo |
| Kimeridgiano?                           | N 320° | Compresivo |
| Berriasiana media-Valanginiana temprana | N 300° | Compresivo |
| Cenomaniano                             | N 280° | Compresivo |

Tabla 1: Edades y orientación de los esfuerzos máximos horizontales para cada evento de reactivación en bloque analizado.

La interpretación estructural realizada por Margueliche op. cit. en el cubo sísmico permitió generar un modelo estructural 3D y de esa manera poder analizar los eventos generadores de fracturas naturales geomecánicamente a través del programa Poly3D. Este programa fue generado por Andy Thomas (1993) en su tesis de doctorado en la Universidad de Stanford, California; calcula los desplazamientos, campos de esfuerzo y deformación en un espacio elástico lineal, usando elementos poligonales planares de discontinuidad y elementos de borde.

Los elementos poligonales, representan, geológicamente, una parte o el total de una superficie de falla (Figura 8). El desplazamiento de la discontinuidad, tanto en sentido perpendicular o paralelo al plano es constante en cada elemento pero como una superficie compuesta por numerosos elementos que interactúan mecánicamente por lo tanto, se pueden caracterizar distribución de aperturas o desplazamientos no uniformes.

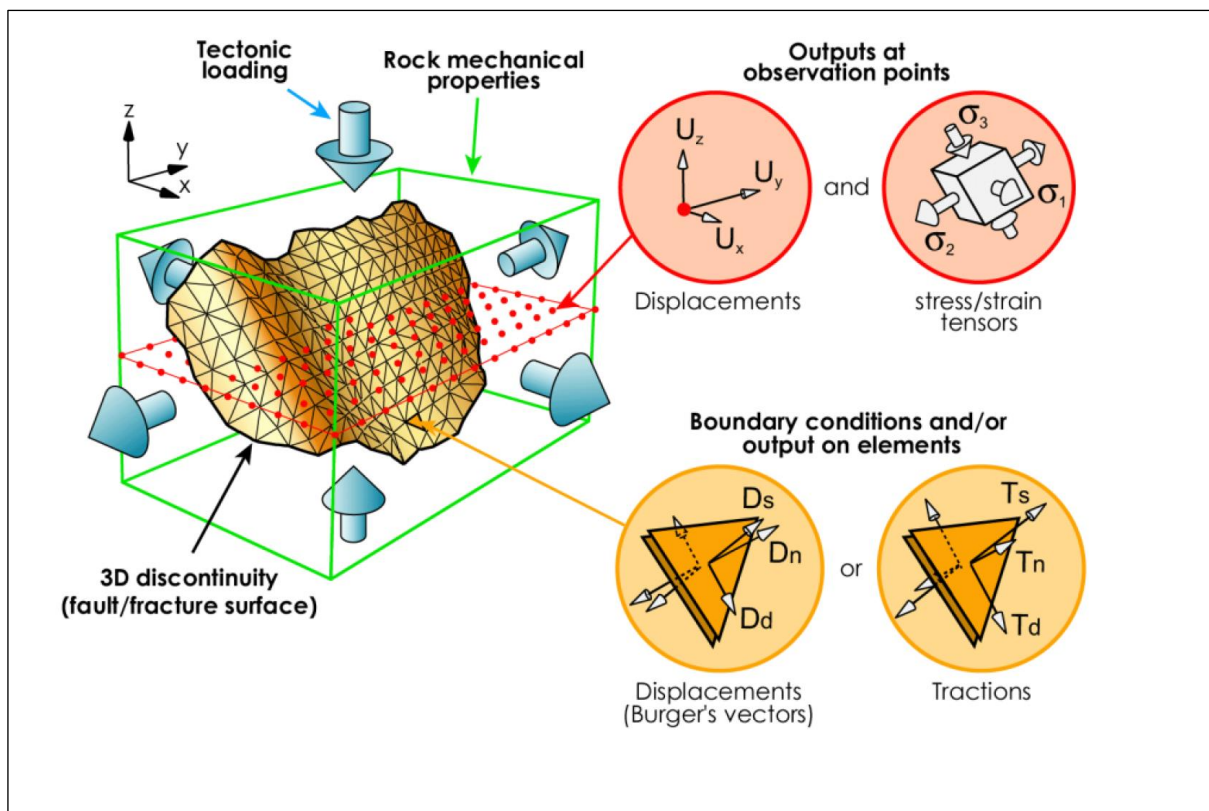


Figura 8: Interacción de los elementos poligonales y sus superficies de falla. Esquema extraído de tesis doctoral de la Universidad de Stanford, California. Thomas A. (1993).

La discretización de una superficie de falla en elementos triangulares permite la construcción de superficies tridimensionales donde se les asigna las condiciones de discontinuidad de desplazamiento y/o tracción y los valores del campo de esfuerzos o deformación en cada centro de los elementos triangulares. Los resultados incluyen el vector de desplazamiento, los tensores de esfuerzo y deformación o cualquier función como el esfuerzo de cizalla máximo de Coulomb, representados en una grilla de observación definida de acuerdo con cada modelo. En el modelo de la zona de Puesto Touquet se visualizan los planos de fallas y las superficies de interés para definir las zonas de mayor intensidad y orientación de fracturas naturales (Figura 9).

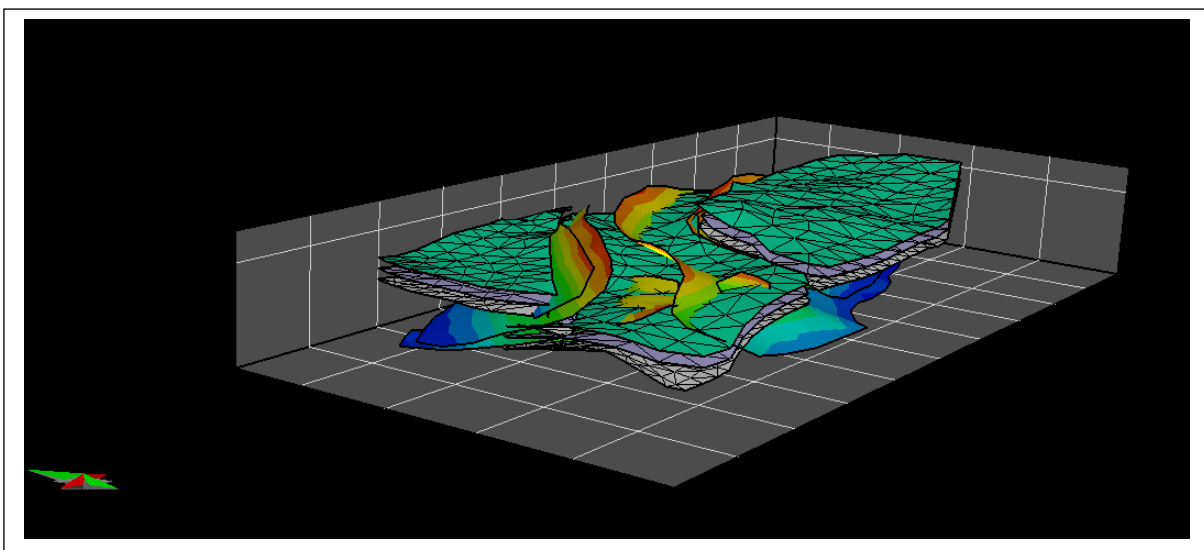


Figura 9: Modelo estructural 3D de la zona de Puesto Touquet. Las superficies de colores azul a rojo representan fallas y las superficies grilladas representan los topes del basamento, la Fm. Molles y el Mb Cutral-Co

La Figura 10 muestra la distribución de la Máxima Cizalla de Coulomb (MCSS) que es un proxy de la intensidad de fracturas naturales por cizalla generadas por la interacción de la orientación del máximo esfuerzo horizontal y las fallas interpretadas del cubo sísmico. En este ejemplo se observa la distribución MCSS correspondiente al evento Pliensbachiano superior, que tiene una orientación del esfuerzo de N340°. Los colores rojos determinan las zonas de mayor intensidad de fracturas, mientras que los azules definen zonas de menor intensidad.

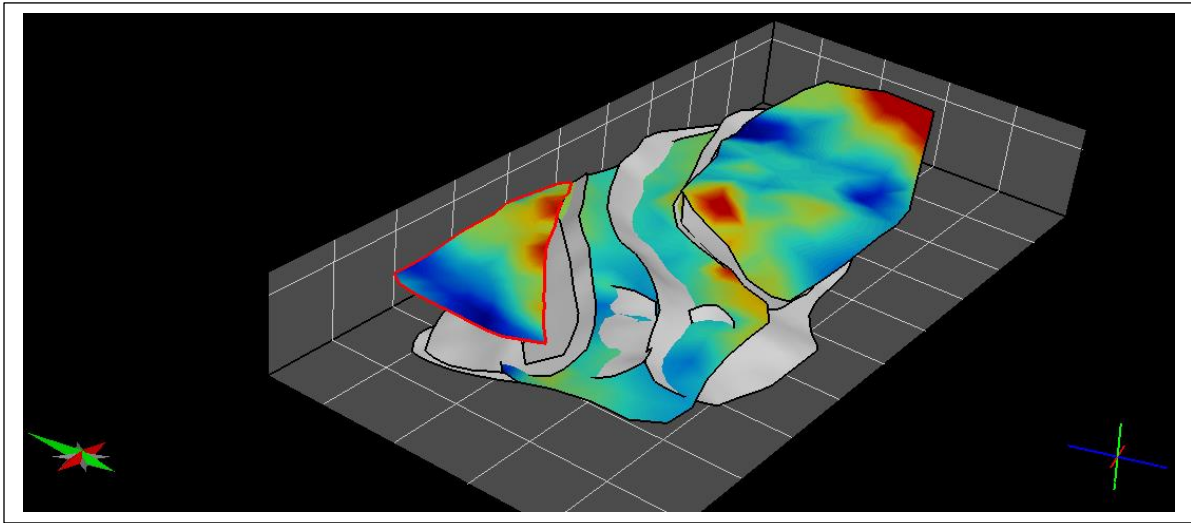


Figura 10: Las superficies de color gris representan los planos de fallas y las superficies con colores azul y rojo representan la superficie de observación.

Además de definir zonas de distinta intensidad de fracturas como en la figura 10, se pueden precisar las orientaciones de las fracturas naturales (Figura 11), aplicando los esfuerzos remotos anteriormente mencionados (Tabla 1).

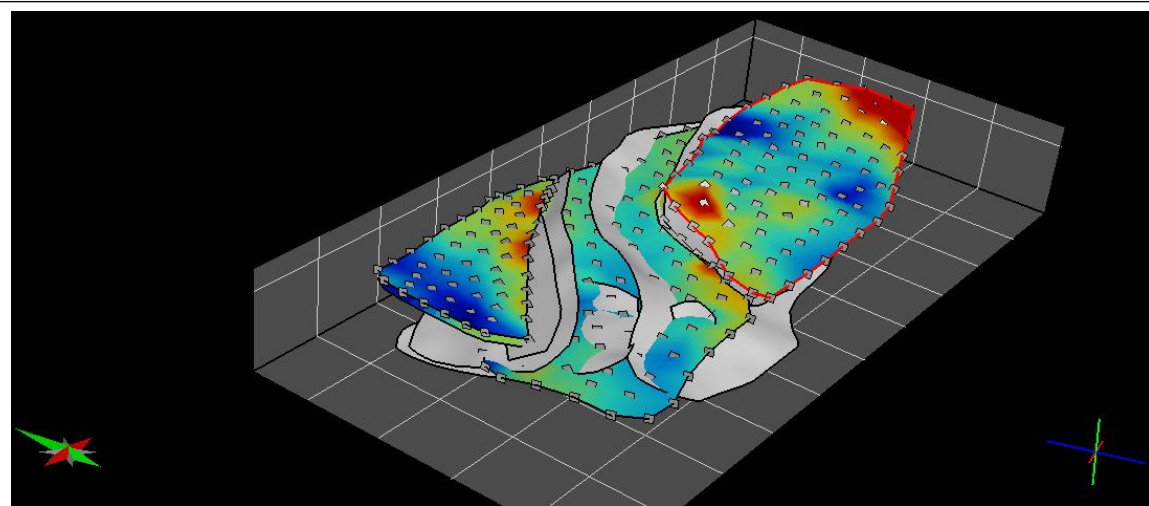


Figura 11: Distribución de la máxima cizalla de Coulomb y los planos de fracturas en el modelo.

Una aproximación de estas propiedades se puede visualizar en la siguiente figura , en relación de la trayectoria del esfuerzo principal, sigma 1(Figura 12).



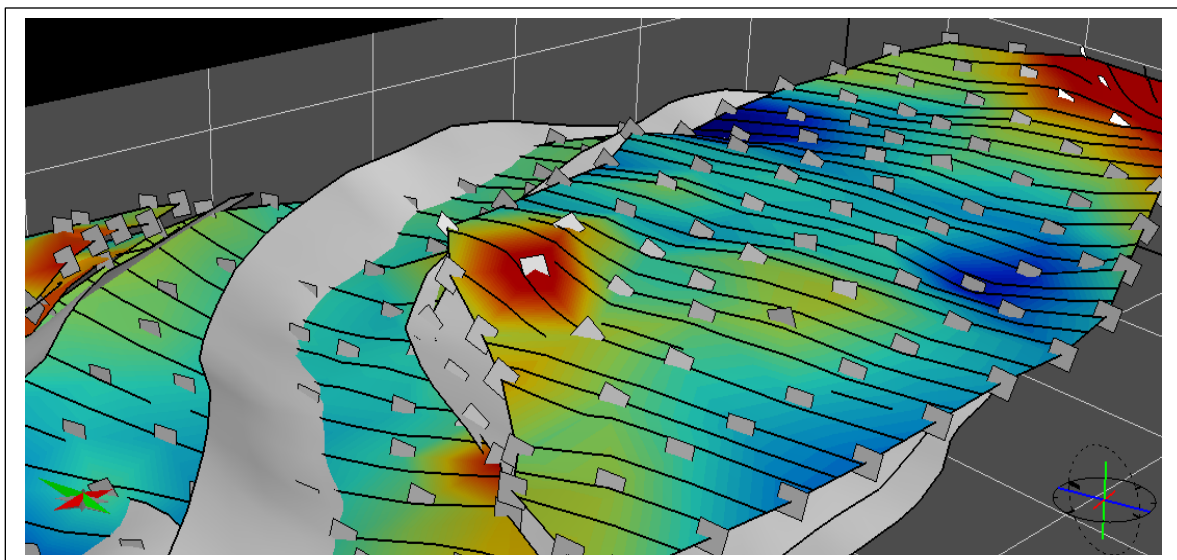


Figura 12: Distribución de las zonas de intensidad de fracturas naturales correspondientes al primer evento de reactivación de las estructuras en el Pliensbachiano.

Este análisis realizado para el evento del Pliensbachiano se repite para cada evento formador de fracturas naturales y luego se suman en un espacio 3D, para ello, los eventos tienen que estar calibrados y corresponder a valores de P32, para obtener la distribución espacial de las mismas.

### **Descripción de Testigos Corona**

En los testigos corona del Miembro Cutral-Co se observaron bandas de deformación, sin embargo, en las imágenes de pozos se determinaron fracturas. Esto se debe a la diferencia alcanzada por las herramientas previamente mencionadas, ya que un testigo corona normalmente tiene una longitud de 9-18m, mientras que, en las imágenes de pozo se pueden registrar cientos de metros con un sondeo. (El estudio completo de los testigos coronas, se encuentra en la tesis de Ignomiriello Facundo, 2017).

Las bandas de deformación se describieron en función de los trabajos de Fossen et al, 2016; Fossen et al, 2007 y Sylvie Schueller et al, 2013, quienes caracterizan estos rasgos en base a los mecanismos de deformación, es decir, por la reorganización de granos debido al deslizamiento, rotación y/o fracturas asociado a

la dilatación, cizallamiento y/o mecanismos de compactación, la profundidad de enterramiento (estrés) y litología.

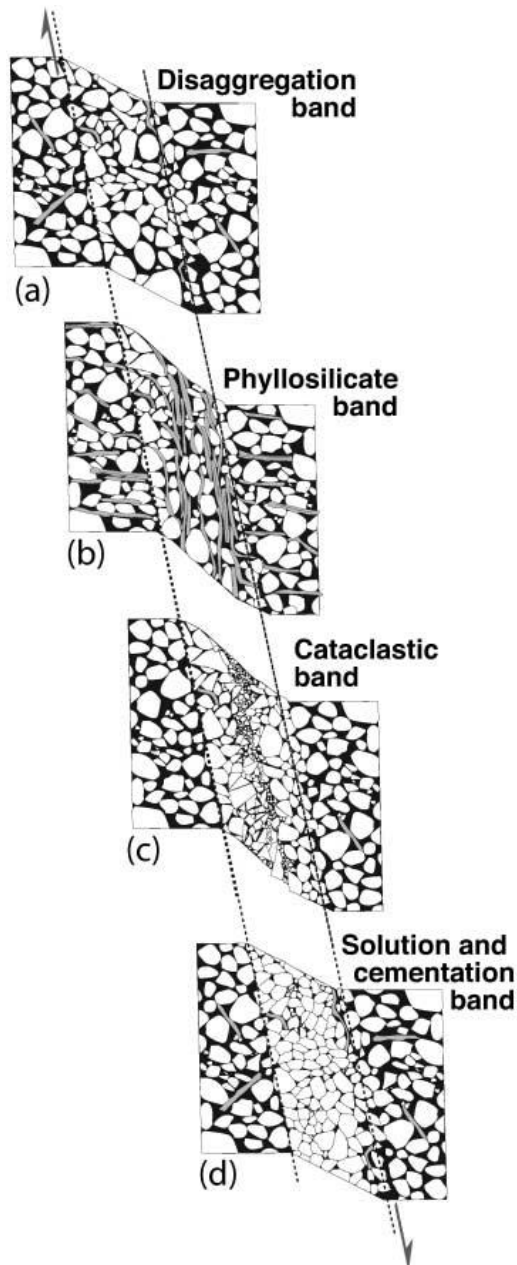
Los mecanismos de deformación dependen de las condiciones internas y externas tales como la mineralogía, tamaño de grano, forma, cementación, porosidad, propiedades de la roca huésped y estado de estrés.

Los factores susceptibles a cambiar en el tiempo son la porosidad, permeabilidad, los cementos y la orientación e intensidad de los esfuerzos, lo que evidencia una evolución temporal asociada con el aumento de la profundidad de enterramiento.

Algunas de estas propiedades intrínsecas de la roca huésped son aproximadamente constantes para una capa de roca sedimentaria dada. Sin embargo, pueden variar dramáticamente de una capa a otra, resultando en cambios rápidos en estilo de la banda de deformación a través de fronteras litológicas.

Los mecanismos de deformación predominantes, de acuerdo a los trabajos previamente citados, son: (1) flujo granular (deslizamiento límite de grano y rotación de grano), denominadas como bandas de desagregación; (2) bandas de filosilicatos; (3) cataclasis (fracturación grano y molienda o abrasión); (4) disolución y cementación. Estos mecanismos producen bandas con diferentes propiedades petrofísicas, siendo de gran utilidad al momento de detectar problemas de permeabilidad (Figura 13), (Fossen et al, 2016; Fossen et al, 2007 y Schueller et al, 2013).

A continuación, se describe las bandas de deformación de tipo cataclásticas, ya que, se encontraron durante el análisis y descripción de los testigos coronas.



### **Bandas cataclásticas**

Este tipo de bandas constan de un núcleo cataclástico, comúnmente rodeado por un volumen de roca compactada. El núcleo se caracteriza por una amplia distribución de tamaños de grano y alto contenido de matriz.

La porosidad de las bandas de deformación cataclásticas se reduce hasta en un orden de magnitud por grano de trituración, mientras que la permeabilidad puede disminuir de 2 a 3 órdenes, alcanzando hasta 6 órdenes de magnitud con respecto a la roca huésped. Las bandas cataclásticas se desarrollan principalmente en rocas que han sufrido un proceso de enterramiento de 1,5 a 2,5 km cuando la roca se ha litificado, aunque también se han encontrado en arenas poco consolidadas a profundidades de 1 km. Este proceso se ve favorecido en granos bien ordenados y redondeados con mayores puntos de contacto.

Figura 13: Principales tipos de bandas de deformación, basados en distintos mecanismos de deformación. Imagen tomada de Fossen et. al., 2007.

Los testigos corona analizados del Yacimiento Puesto Touquet fueron perforados en los siguientes sondeos: Pp.Nq.PTu.a-1001, Pp.Nq.PTu.a-1002 y Pp.Nq.PTu.a-1013, PTu.x-1., a partir de los cuales se pudo realizar la descripción de las propiedades de las fracturas y/o bandas de deformación, tales como la apertura, orientación, inclinación, características de los planos de fracturas, entre otros.

Para su análisis se utilizó cinta métrica, transportador, lupa, pincel, ácido clorhídrico, escala logarítmica para medir la apertura de las fracturas (Ortega O., Marrett R., and Laubach S. 2006) (Figura 14) y tabla auxiliar Excel para recopilar la información.

Los métodos tradicionales de medición de intensidad de fractura son inadecuados según Ortega et. al., 2006, porque ignoran la amplia gama de tamaños de fracturas que se encuentra en muchos sistemas, y por consiguiente, la dependencia de la escala de intensidad de fractura. Un enfoque alternativo hace uso de las distribuciones del tamaño de fracturas, que permite mayores comparaciones significativas entre diferentes puntos y las muestras de microfracturas en subsuelo para ser manejados en la medición de intensidad de fractura. Utilizando la escala logarítmica, junto con una lupa de mano, permite la documentación de fracturas con aperturas tan pequeñas como las de alrededor de 0,05 mm hasta aperturas de 5 mm.

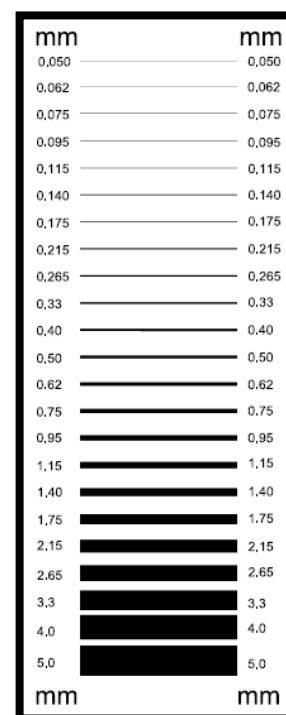


Figura 14: Escala logarítmica para medir fracturas.

Se realizó una revisión general con el fin de ubicarlas en el orden y posición correctos y así poder apreciar mejor su longitud y características. En cada una de ellas se midió altura (medida de la fractura paralela al eje del testigo corona), ángulos axiales, apertura o ancho de cada fractura, y las particularidades tales como la forma, rugosidad, y terminación de las fracturas (pudiéndoselas clasificar en terminación fuera del testigo, de forma gradual, abrupta sobre una falla, frente a una superficie de deslizamiento, o frente a pelitas), magnitud y sentido del desplazamiento, litología, tipo de mineralización, origen, certeza del origen, relación



de edad de fracturas con respecto a otras, etc. En el anexo queda expresado lo antes mencionado.

El pozo Pp.Nq.PTu.a-1001 con coordenadas Gauss Kruger X= 5.683.251,65 Y= 2.489.400,32 (Faja 2) y cota 586,03 m, está integrado por una carrera de 7,75 m, con diez cajones. El testigo corona está constituido principalmente por areniscas masivas finas a medias de color gris muy claro, de moderada selección, clasto sostenidas, intercalada con niveles pelíticos. En la tabla 2 está presente la longitud de la corona en cada uno de los cajones. A lo largo de toda la carrera se visualizan bandas de deformación como la ejemplificada en el cajón 4 (Figura 15).

|                   |                    |
|-------------------|--------------------|
| Cajón 1-10: 0,72m | Cajón 6-10: 0,78m  |
| Cajón 2-10: 0,86m | Cajón 7-10: 0,84m  |
| Cajón 3-10: 0,74m | Cajón 8-10: 0,82m  |
| Cajón 4-10: 0,78m | Cajón 9-10: 0,62m  |
| Cajón 5-10: 0,74m | Cajón 10-10: 0,85m |

Tabla 2: Longitud del testigo corona en los cajones correspondientes al pozo Pp.NqPTu.a.1001

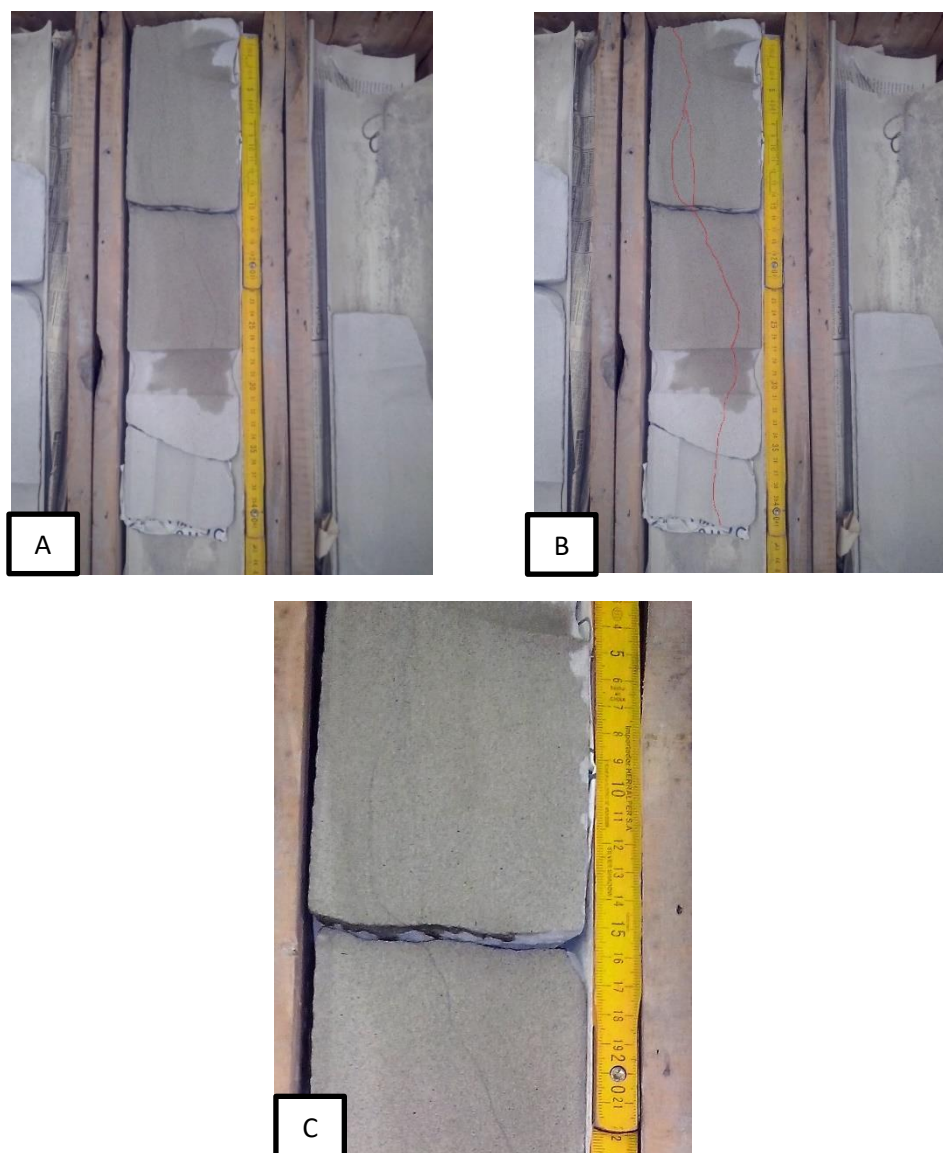


Figura 15: Segmento del testigo corona correspondiente al cajón 4 del pozo Pp.Nq.PTu.a-1001. La banda de deformación presenta un largo de 41 cm a una profundidad de 597.3 m, el ancho es de 1.4 mm y su superficie es planar curva; las paredes presentan rugosidad, de origen natural. **A**, imagen sin modificar; **B**, en rojo, posición de la banda de deformación y **C**, zoom de A, donde se aprecia con mayor detalle la banda de deformación.

El pozo Pp.Nq.PTu.a-1002 con coordenadas Gauss Kruger:  $X= 5.682.250,03$   $Y= 2.487.250,11$  (Faja 2) y cota de 591,29 m está constituido por una carrera de 8,58m, con diez cajones (Tabla 3). El testigo está integrado principalmente por areniscas de granulometría fina a media, bien seleccionadas, clasto sostenidas; en algunos sectores posee cemento calcítico, ya que se observó efervescencia producto de la

reacción con el ácido clorhídrico. A lo largo del testigo se distinguen niveles con clastos pelíticos aislados de variados tamaños, además de niveles pelíticos intercalando areniscas, apreciables en el cajón 8 (Figura 16). Con respecto a la presencia de fracturas y/o bandas de deformación solo se pudo observar a ojo desnudo una banda de deformación correspondiente al cajón 3.

|                   |                    |
|-------------------|--------------------|
| Cajón 1-10: 0,65m | Cajón 6-10: 1,00m  |
| Cajón 2-10: 0,78m | Cajón 7-10: 0,80m  |
| Cajón 3-10: 0,95m | Cajón 8-10: 0,75m  |
| Cajón 4-10: 0,75m | Cajón 9-10: 0,95m  |
| Cajón 5-10: 1,00m | Cajón 10-10: 0,95m |

Tabla 3: Longitud del testigo corona en los cajones correspondientes al pozo Pp.Nq.PTu.a-1002.



Figura 16: Cajón 8, areniscas finas intercaladas por pelitas laminadas y clastos pelíticos.

El pozo Pp.Nq.PTu.a-1013 presenta coordenadas Gauss Kruger: X= 5.683.051 Y= 2.488.844 (Faja 2) y cota 582 m. El testigo corona tiene una carrera de longitud total de 9,29 m en diez cajones (Tabla 4), y está constituido por areniscas medianas a gruesas, clasto sostenidas, con selección buena a mala; se observa además una intercalación de areniscas conglomerádicas estratificadas con clastos líticos. Los clastos pelíticos tienen formas redondeadas a sub-redondeadas, colores claros y en menor proporción oscuros, y tamaños muy variados desde 0,5 cm hasta mayores a 3 cm (Figura 17).

|                   |                    |
|-------------------|--------------------|
| Cajón 1-10: 0,60m | Cajón 6-10: 1,00m  |
| Cajón 2-10: 0,81m | Cajón 7-10: 1,00m  |
| Cajón 3-10: 0,95m | Cajón 8-10: 0,98m  |
| Cajón 4-10: 1,00m | Cajón 9-10: 0,98m  |
| Cajón 5-10: 1,00m | Cajón 10-10: 0,97m |

Tabla 4: Longitud total del testigo corona del pozo Pp.Nq.PTu.a-1013.

En este caso no se pudo observar bandas de deformación y/o fracturas a lo largo del testigo, aunque no se descarta la existencia de éstas imperceptibles a ojo desnudo.



Figura 17: A la izquierda, imagen del testigo corona correspondiente al cajón 4 (areniscas conglomeráticas); a la derecha, imagen obtenida del cajón 2, donde se observan clastos líticos y pelíticos de gran tamaño.

El Pozo YPF.Nq.PTu.x-1 se encuentra situado en la localidad de Cutral-Có, al igual que los otros 3 pozos anteriores, con coordenadas Gauss Kruger:  $X= 5.682.783$   $Y=2.488.416$  (Faja 2), y una cota de 584 m. Se corrieron seis carreras a lo largo del mismo abarcando tanto el Mb Cutral-Có como el Mb Pelítico inferior. Las cuatro primeras carreras corresponden al Mb Cutral-Có y las últimas dos al Mb Pelítico inferior (Figura 24).

La litología está representada por areniscas masivas finas a muy finas, con buena selección, clastos redondeados, de color gris claro, clasto sostenidas. Se observan restos carbonosos en algunos niveles, e intercalaciones con areniscas medianas a gruesas. Además de clastos pelíticos aislados, a medida que nos acercamos al tope del Mb Cutral-Có aparecen intercalaciones con areniscas conglomeráticas, (Ignomiriello, 2017). El Mb Pelítico inferior está compuesto por arcilitas masivas de color gris oscuro a negro, con pequeñas intercalaciones de areniscas y clastos

pelíticos, con presencia de cementos carbonaticos. Se agruparon las carreras por su continuidad (en metros) en profundidad, juntando las carreras uno y dos, y cinco y seis. Tres y cuatro no presentan continuidad respecto a las anteriores (Tablas 5, 6, 7 y 8).

|                   |                    |           |       |
|-------------------|--------------------|-----------|-------|
| Cajón 1-7: 0,65m  | Cajón 5-7: 0,62m   | Carrera 1 | 544 m |
| Cajón 2-7: 0,65m  | Cajón 6-7: 0,635m  |           |       |
| Cajón 3-7: 0,61m  | Cajón 7-7: 0,58m   |           |       |
| Cajón 4-7: 0,62m  |                    |           |       |
| Cajón 1-12: 0,65m | Cajón 7-12: 0,61m  | Carrera 2 | 553 m |
| Cajón 2-12: 0,64m | Cajón 8-12: 0,565m |           |       |
| Cajón 3-12: 0,43m | Cajón 9-12: 0,65m  |           |       |
| Cajón 4-12: 0,63m | Cajón 10-12: 0,65m |           |       |
| Cajón 5-12: 0,64m | Cajón 11-12: 0,61m |           |       |
| Cajón 6-12: 0,50m | Cajón 12-12: 0,64m |           |       |
|                   |                    |           | 562 m |

Tabla 5: Carreras 1 y 2 agrupadas por su continuidad en profundidad, con una longitud total de 11,58 m correspondiente al Pozo YPF.Nq.PTu.x-1.

|                  |                  |           |       |
|------------------|------------------|-----------|-------|
| Cajón 1-8: 0,62m | Cajón 5-8: 0,57m | Carrera 3 | 828 m |
| Cajón 2-8: 0,65m | Cajón 6-8: 0,60m |           |       |
| Cajón 3-8: 0,61m | Cajón 7-8: 0,73m |           |       |
| Cajón 4-8: 0,62m | Cajón 8-8: 0,61m |           |       |
|                  |                  |           | 834 m |

Tabla 6: Carrera 3 con una longitud total de 5,01 m correspondiente al Pozo YPF.Nq.PTu.x-1.

|                   |                    |           |        |
|-------------------|--------------------|-----------|--------|
| Cajón 1-12: 0,63m | Cajón 7-12: 0.58 m | Carrera 4 | 1027 m |
| Cajón 2-12: 0,52m | Cajón 8-12: 0,49m  |           |        |
| Cajón 3-12: 0,57m | Cajón 9-12: 0,49m  |           |        |
| Cajón 4-12: 0,64m | Cajón 10-12: 0,61m |           |        |
| Cajón 5-12: 0,55m | Cajón 11-12: 0,58m |           |        |
| Cajón 6-12: 0,65m | Cajón 12-12: 0,53m |           | 1036 m |

Tabla 7: Carrera 4 con una longitud de 6,84 m correspondiente al Pozo YPF.Nq.PTu.x-1.

|                   |                   |           |          |
|-------------------|-------------------|-----------|----------|
| Cajón 1-4: 0.65 m | Cajón 3-4: 0.65 m | Carrera 5 | 1938m    |
| Cajón 2-4: 0.62 m | Cajón 4-4: 0.65 m |           |          |
| Cajón 1-8: 0.65 m | Cajón 5-8: 0.65 m | Carrera 6 | 1942.5 m |
| Cajón 2-8: 0.65 m | Cajón 6-8: 0.62 m |           |          |
| Cajón 3-8: 0.65 m | Cajón 7-8: 0.61 m |           |          |
| Cajón 4-8: 0.65 m | Cajón 8-8: 0.65 m |           | 1951,5 m |

Tabla 8: Carreras 5 y 6 agrupadas por su continuidad con una longitud total de 8,35 m correspondiente al Pozo YPF.Nq.PTu.x-1.

Aplicando la metodología mencionada se pudieron encontrar bandas de deformación/fracturas en dos de las coronas analizadas (Pp.Nq.PTu.a-1001 y YPF.Nq.PTu.x-1), en donde mediante un análisis estadístico utilizando el software Excel (Anexo) se generaron gráficos doble logarítmicos que permiten visualizar de manera más clara la cantidad de fracturas/bandas de deformación con la apertura y/o ancho de banda más favorable y el espaciado en el que se encuentren dichas apertura y/o ancho de bandas, y así poder delimitar zonas de interés.

Este trabajo se ha realizado a modo de demostración didáctica ya que no contamos con una longitud de las muestras tal que permita extrapolar las mediciones a tamaños de fracturas y/o bandas de deformación más grandes. Sin embargo, en la zona donde se pudo medir y aplicar el método se obtuvo un espaciamiento entre 4 y 9 m de una fractura y/o banda de deformación con una apertura de 2 mm, ya que la inversa de la frecuencia acumulada es el espaciamiento (Figuras 18 a 23). En consecuencia, este dato de espaciamiento es muy importante para adicionar al modelo de fracturas naturales discretas final (Discret fracture network, DFN). Vale aclarar que para las carreras 5 y 6 se utilizan los términos “fracture kinematic aperture (mm)” ya que, las mismas se localizan en el Mb. pelítico inferior.

| Ancho de banda (mm) | Número acumulativo | Frecuencia acumulativa (fracs/m) |                      |
|---------------------|--------------------|----------------------------------|----------------------|
| 3,3                 | 2                  | 0,22222222                       | Pozo YPF.Nq.Ptu-1001 |
| 2,65                | 3                  | 0,27777778                       |                      |
| 1,75                | 5                  | 0,46296296                       |                      |
| 1,4                 | 6                  | 0,55555556                       |                      |
| 1,15                | 7                  | 0,64814815                       |                      |
| 0,95                | 8                  | 0,74074074                       |                      |
| 0,75                | 9                  | 0,83333333                       |                      |
| 0,62                | 10                 | 0,92592593                       |                      |

Figura 18: Cuadro resumen que muestra el ordenamiento de los anchos de banda en mm y su frecuencia acumulada para el pozo Pp.Nq.PTu.a-1001.



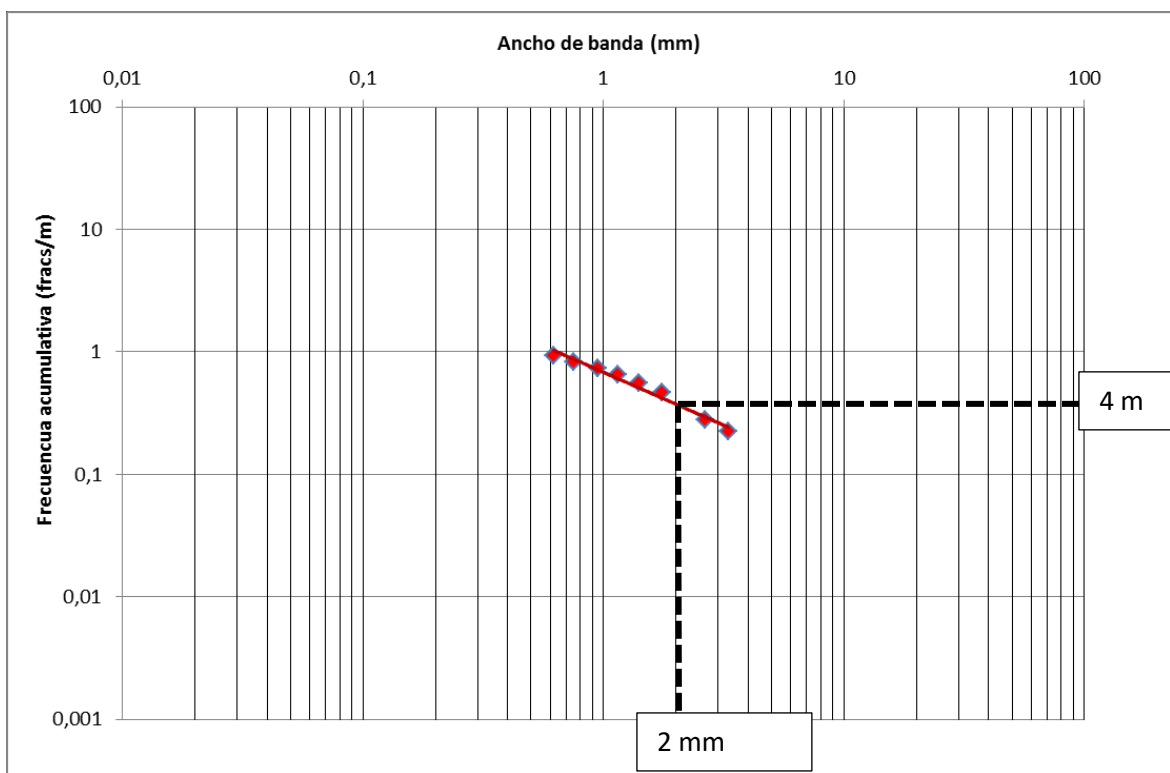


Figura 19: Cuadro doble logarítmico que representa la relación entre frecuencias acumuladas en fracturas/m y el ancho de bandas en mm. En este caso se observa que para el pozo Pp.Nq.PTu.a-1001 a medida que aumenta el ancho las bandas se hacen menos frecuentes, pudiéndose trazar una línea con pendiente negativa.

|             | Ancho de banda (mm) | Número acumulativo | Frecuencia acumulativa (fracs/m) |                     |
|-------------|---------------------|--------------------|----------------------------------|---------------------|
| Carrera 1-2 | 2,65                | 1                  | 0,05555556                       | Pozo YPF.Nq.PTu.x-1 |
|             | 2,15                | 3                  | 0,16666667                       |                     |
|             | 1,75                | 5                  | 0,27777778                       |                     |
|             | 1,4                 | 7                  | 0,38888889                       |                     |
|             | 1,15                | 9                  | 0,5                              |                     |
|             | 0,62                | 11                 | 0,61111111                       |                     |

Figura 20: Cuadro resumen que muestra el ordenamiento de los anchos de banda en mm y su frecuencia acumulada para las carreras 1 y 2 del pozo YPF.Nq.PTu.x-1.

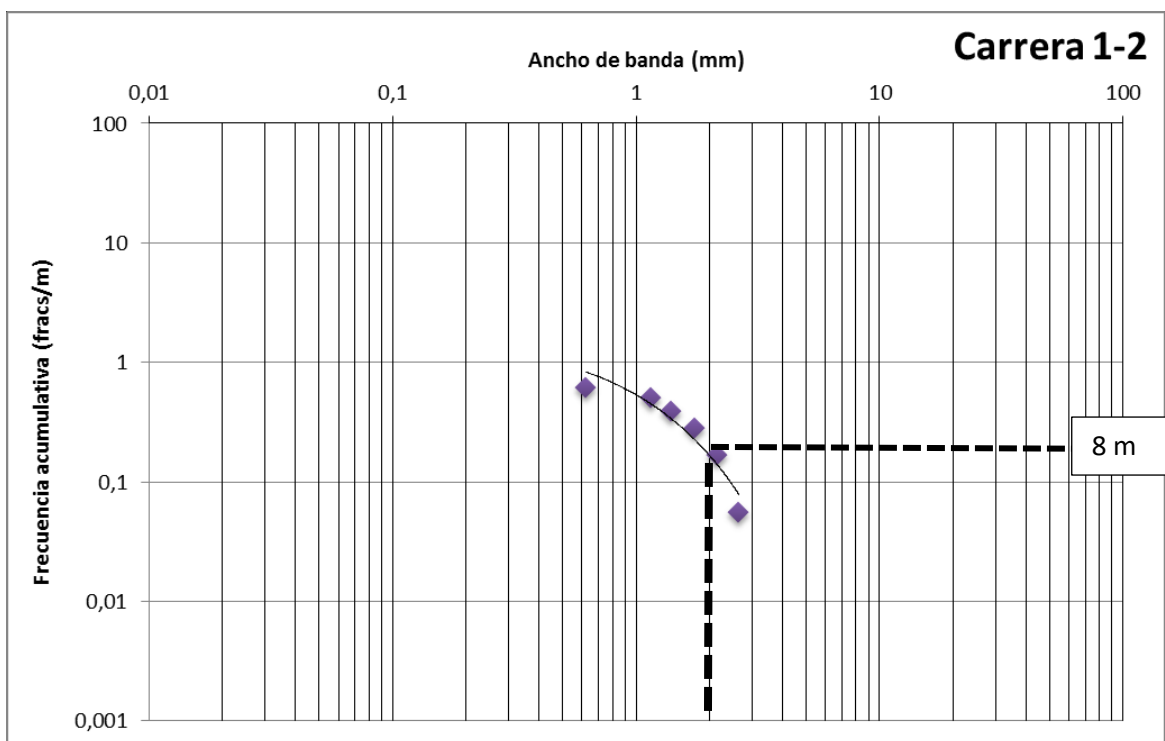


Figura 21: Cuadro doble logarítmico que representa la relación entre frecuencias acumulativas en fracturas/m y el ancho de bandas en mm para las carreras 1 y 2 del pozo YPF.Nq.PTu.x-1. En este caso también se observa que a medida que aumenta el ancho, las bandas se hacen menos frecuentes pudiéndose trazar una curva con pendiente negativa pero mucho más pronunciada que en el caso anterior, por lo tanto si hiciéramos una proyección hacia menores frecuencias acumulativas, los anchos de banda no llegarían a valores tan altos como si lo hiciésemos para el pozo Pp.Nq.PTu.a-1001.

|             | Fracture Kinematic aperture (mm) | Cumulative Number | Cumulative frequency (fracs/m) |                     |
|-------------|----------------------------------|-------------------|--------------------------------|---------------------|
| Carrera 5-6 | 3,3                              | 1                 | 0,07692308                     | Pozo YPF.Nq.PTu.x-1 |
|             | 1,75                             | 2                 | 0,15384615                     |                     |
|             | 1,15                             | 3                 | 0,23076923                     |                     |
|             | 0,5                              | 4                 | 0,30769231                     |                     |
|             | 0,4                              | 5                 | 0,38461538                     |                     |
|             | 0,075                            | 6                 | 0,46153846                     |                     |

Figura 22: Cuadro resumen que muestra el ordenamiento de las fracturas en mm y su frecuencia acumulada para las carreras 5 y 6 del pozo YPF.Nq.PTu.x-1.

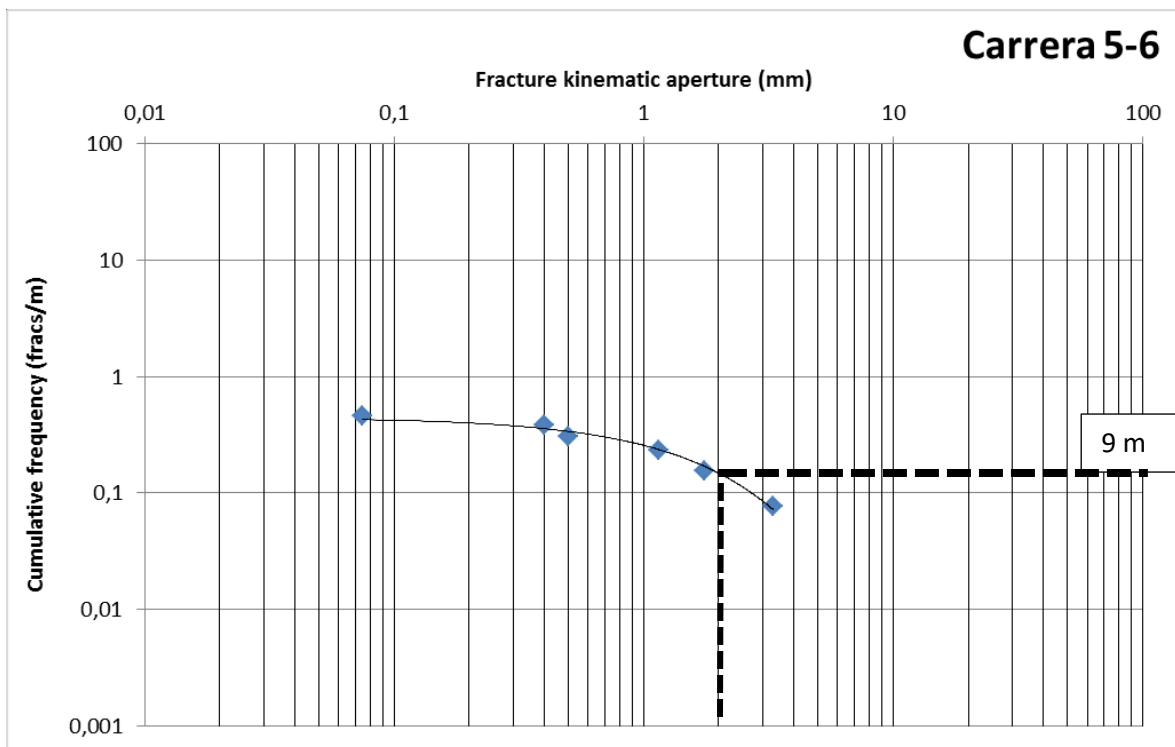


Figura 23: Cuadro doble logarítmico que representa la relación entre frecuencias acumuladas en fracturas/m y la apertura cinemática de fracturas en mm para las carreras 5 y 6 del pozo YPF.Nq.PTu.x-1 (Mb Pelítico inferior). Se observa un comportamiento mucho más tendido de la curva respecto de los casos anteriores.



Figura 24: Imagen del testigo corona correspondiente al cajón 6, (pozo YPF.Nq.Ptu x-1), en el cual se visualiza una fractura con relleno carbonático.

### 5.2.1 Descripción de cortes delgados

Los cortes delgados pertenecen al pozo Pp.Nq.PTu.a-1002 a profundidades de 744.9 m y 746.5 m. La observación fue realizada en un microscopio electrónico del Laboratorio Geológico Varelenso (LCV), con cámara adosada junto con el programa Image- Pro Plus; se trabajó con varios aumentos para obtener mayor detalle de las diferentes estructuras y se tomaron varias fotografías.

En ambas imágenes (figuras 25 y 26) se puede visualizar claramente la presencia de bandas de deformación, siendo posible distinguir dos zonas, la número 1 (verde) y la número 2 (naranja). La zona 1 muestra cristales compactados o matriz, mientras que en la zona 2 se distinguen dos tamaños diferentes de cristales, los de mayor tamaño presentan los bordes irregulares (A) y los de menor tamaño forman la pasta (B).

Según la observación y delimitación de las zonas se puede afirmar que se trata de bandas de tipo cataclásticas generadas por cizallamiento, en donde la zona 2 representaría el núcleo.

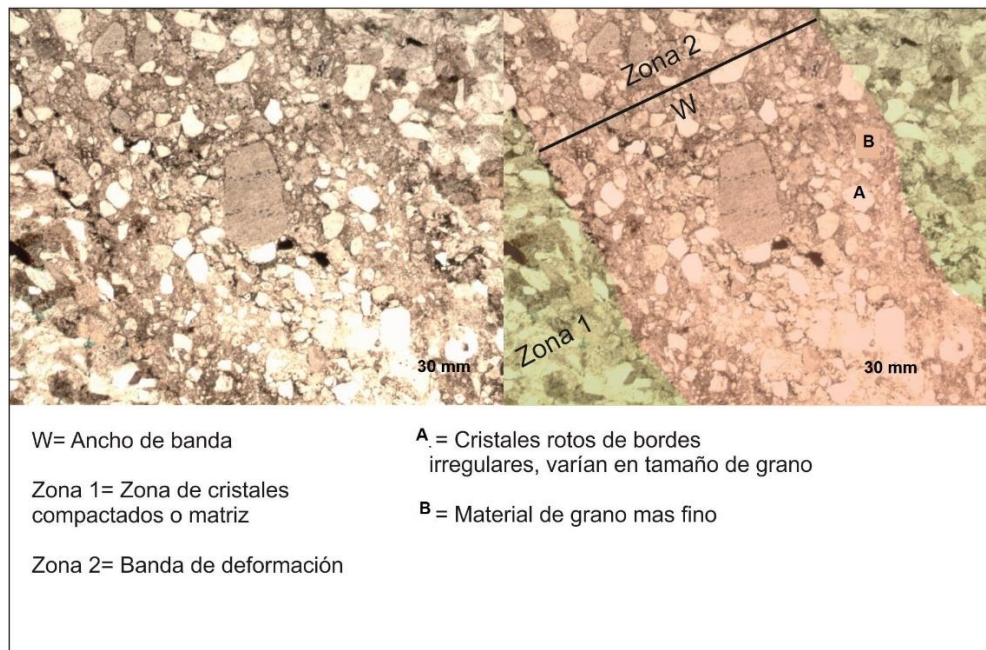


Figura 25: Corte delgado del testigo corona correspondiente al pozo Pp.Nq.PTu.a-1002 a 744.9 metros de profundidad.

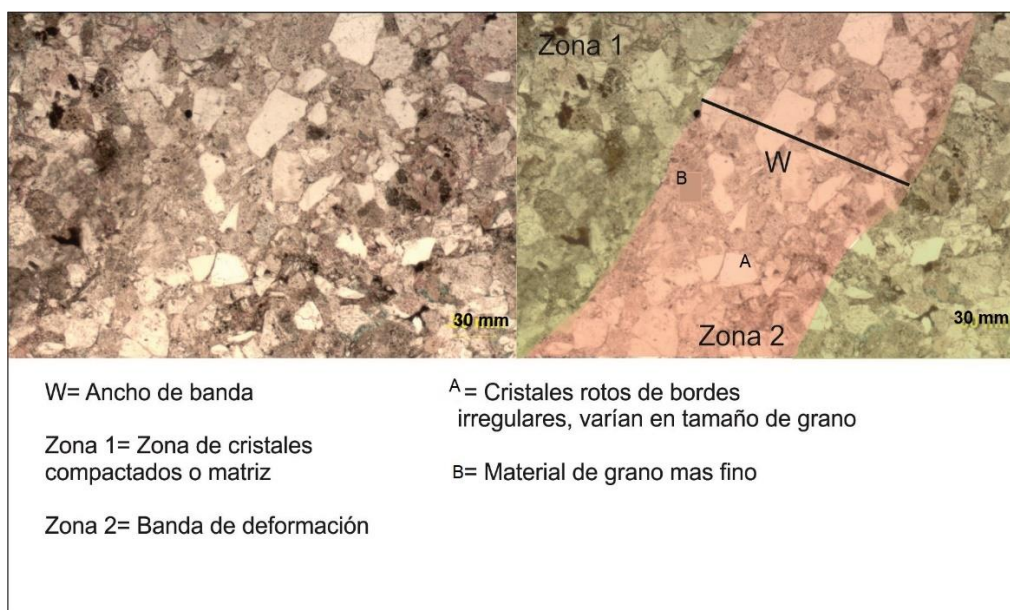


Figura 26: Corte delgado del testigo corona correspondiente al pozo Pp.Nq.PTu.a-1002 a 746.5 metros de profundidad.

### 5.3 Descripción de perfiles de imágenes

Los perfiles de imágenes utilizados en el trabajo corresponden a los pozos FCh.x-1 y PLUSPETROL\_ChB\_x\_1001, en una escala 1:40, de los cuales se interpretaron datos sobre fracturas y microfallas, con el fin de establecer los eventos tectónicos (Figura 27, 28 y 29).

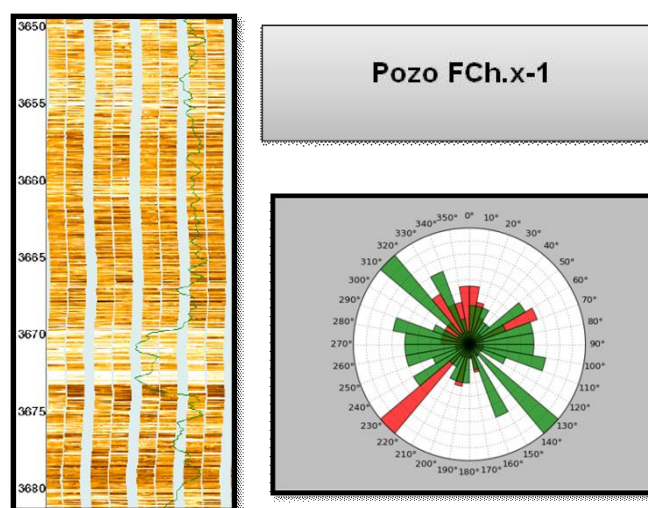


Figura 27: Imagen de pozo y un diagrama de rosa donde queda expresado el RBZ (rojo) y la inclinación (verde) de las fracturas del pozo FCh.x-1.



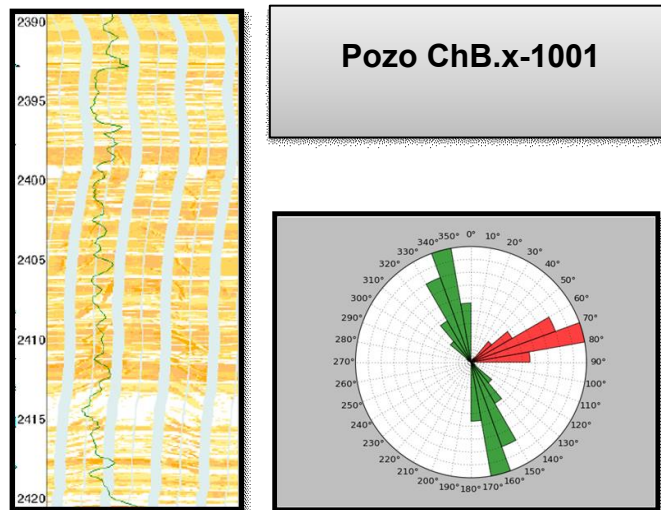


Figura 28: Imagen de pozo y diagrama de rosa donde queda expresado el RBZ (rojo) y la inclinación (verde) de las fracturas del pozo ChB.x-1001.

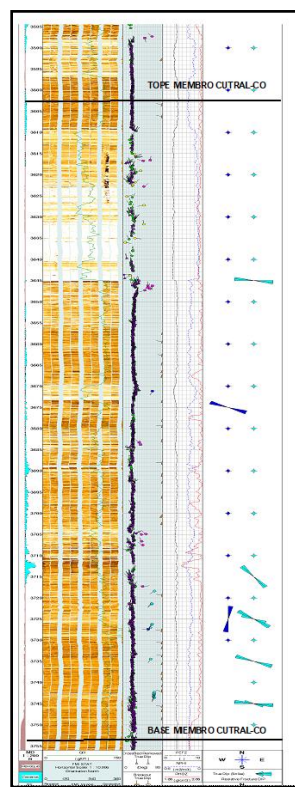


Figura 29: Perfil de Imagen de pozo del Miembro Cutral-Co correspondiente al sondeo FCh.x-1

En la figura 29 del sondeo FCh.x-1, donde se muestra el Perfil de Imagen de pozo del Mb Cutral-Co, se observa un aumento de las fracturas hacia su base, que se corrobora en el sondeo ChB. x-1001 (Figura 30).

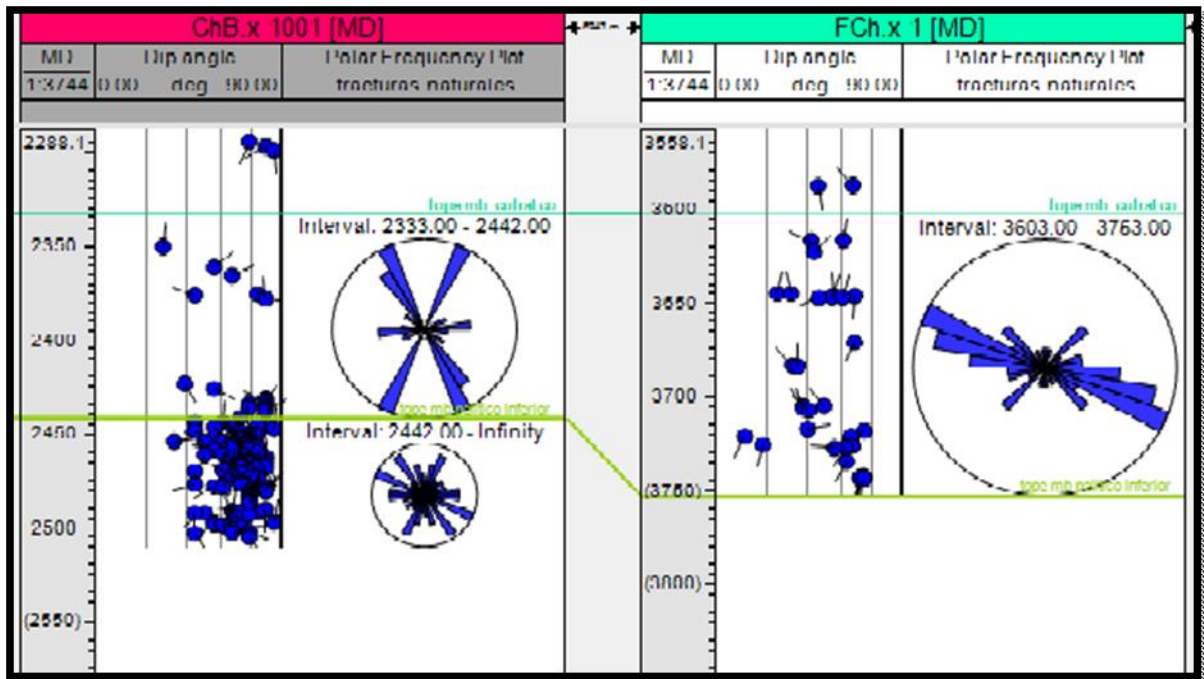


Figura 30: Diagramas de rosa y perfil de imagen de correlación entre los pozos ChB.x-1001 y FCh.x-1. RBZ e inclinación del Mb Cutral-Có.

## 5.4 Geofísica y Geomecánica

Los perfiles sísmicos se basan en una fuente emisora de sonido y receptores, que miden el tiempo de propagación de las ondas de sonido en una formación. El principio de medición sísmico consta de un arreglo múltiple de transmisores que emiten un pulso de frecuencia, que luego de atravesar la formación es detectado por los receptores (Figura 31). Al registrar la onda completa, se pueden obtener además del tiempo compresional, el tiempo de la onda de cizalla (shear) y la de Stoneley (Figura 32). Estos perfiles son importantes en la caracterización geomecánica de los reservorios.

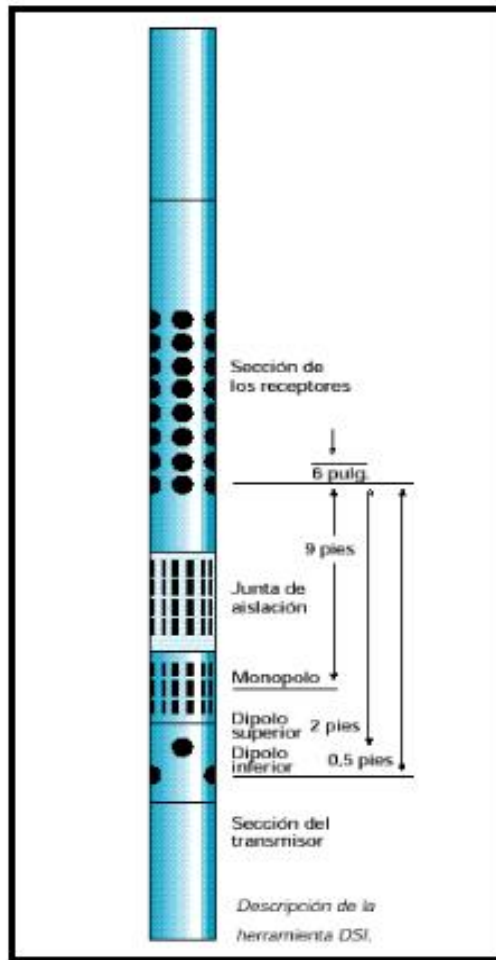


Figura 31: Esquema de la herramienta sónica con arreglo de múltiple de transmisores que emiten un pulso de frecuencia, detectado luego por los receptores. Fuente Schlumberger.



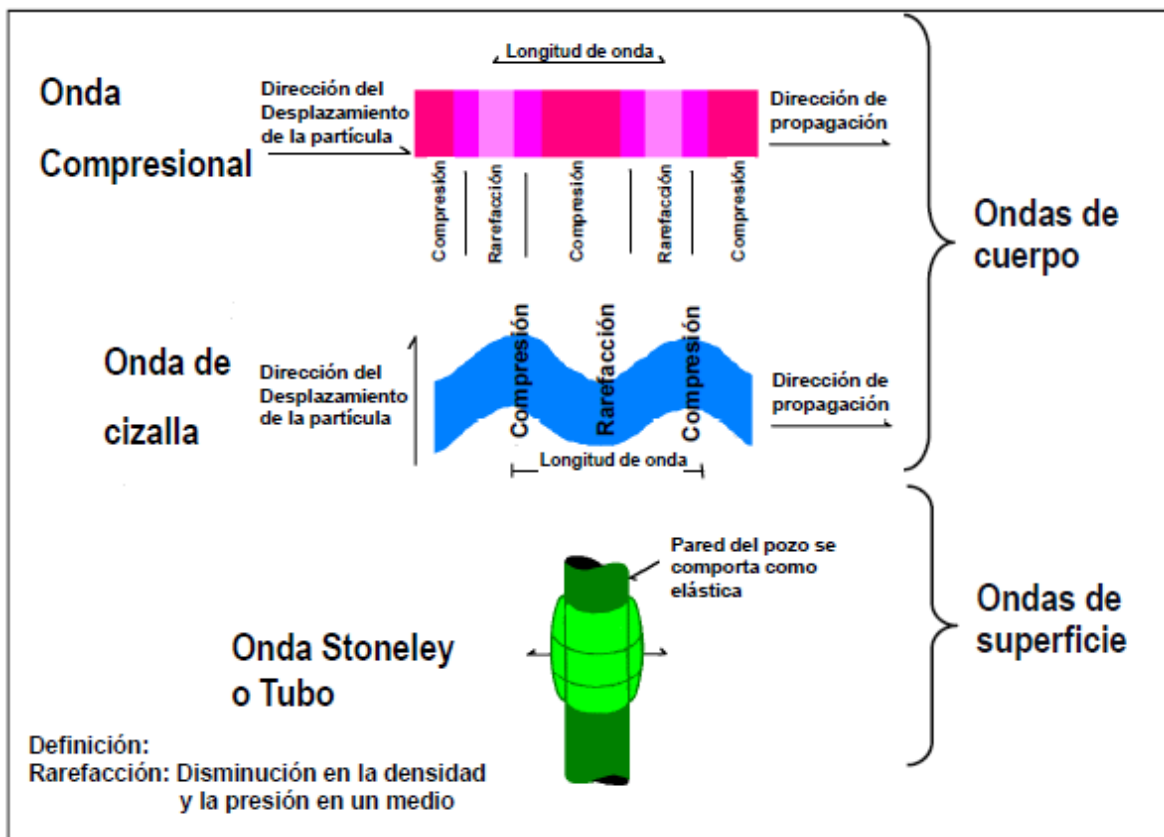


Figura 32: Los perfiles sónicos leen tres tipos de ondas, las ondas Stoneley, que son ondas de superficie; las ondas de cizalla; y las ondas compresionales, que son las de cuerpo. En la imagen se puede observar el comportamiento de cada una de ellas. Fuente Baker atlas; "acoustic theory principles".

Utilizando perfiles sónicos y de densidad de los pozos Pp.Nq.PBi.x-1001 y Pp.Nq.PTu.a-1001, y mediante el cálculo de impedancia acústica, se definieron los pases formacionales entre el Mb Pelítico superior/Cutral-Có y Mb Cutral-Có/Pelítico inferior, utilizando la siguiente fórmula:

$$Z = \rho * V \quad (1)$$

donde Z= impedancia acústica,  $\rho$ = densidad, V= velocidad sónica.

A partir de las impedancias acústicas de los pases formacionales ( $Z_1$  y  $Z_2$ ), se pudo determinar el coeficiente de reflexión (CR), en base a:

$$CR = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (2)$$

Obtenido el CR, se realiza su convolución utilizando una ondícula teórica (w), generando como resultado un sismograma sintético (Figura 32),

$$CR * w = \text{Traza Sísmica} \quad (3)$$

$$V = 2d/t \quad (4)$$

donde V= velocidad sónica, d= distancia y t=tiempo.

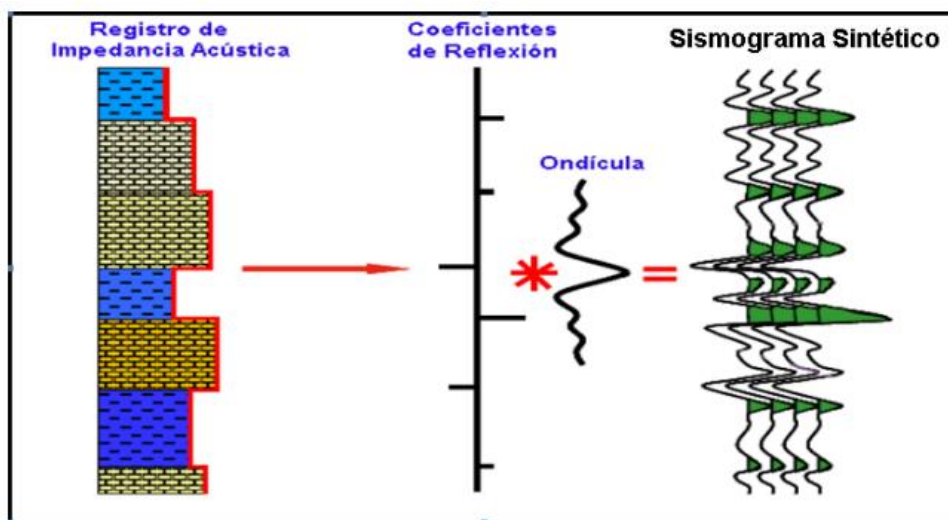


Figura 33: Operación de convolución, obteniendo como resultado un sismograma sintético. Imagen a modo ilustrativo, obtenida del material didáctico brindado por el posgrado.

Una vez obtenido el sismograma sintético se buscaron pares tiempo/ velocidad con la formula (4) y se construyó un mapa en profundidad, el cual fue corroborado por los perfiles SP y Gamma Ray de los pozos Pp.Nq.PBi.x-1001, Pp.Nq.PTu.a-1002, Pp.Nq.PTu.a-1001, Pp.Nq.PTu-1013, Pp.Nq.PTu.a-1008, YPF.Nq.PTu.x-1 y PLU.Nq.LChi.e-1003 a partir de la identificación de paquetes arena/ arcilla.

En consecuencia, con esta metodología es posible determinar los paquetes geomecánicos (zonas con similar respuesta frente a los esfuerzos), cuya importancia es fundamental en la estimación de la distribución de la densidad de fracturas o bandas de deformación, ya que están en relación con los parámetros

mecánicos. La estratigrafía mecánica es la subdivisión de la columna de roca en intervalos discretos, basada en las propiedades mecánicas de dichos intervalos; no hay que confundirlo con la estratigrafía de fracturas naturales, que es la subdivisión de la columna de roca en intervalos discretos basada en la intensidad, el tamaño o alguna propiedad de las mismas. Los parámetros geomecánicos usados comúnmente en el modelado de fracturas naturales son el Módulo de Young y el coeficiente de Poisson (Figuras 34 y 35).

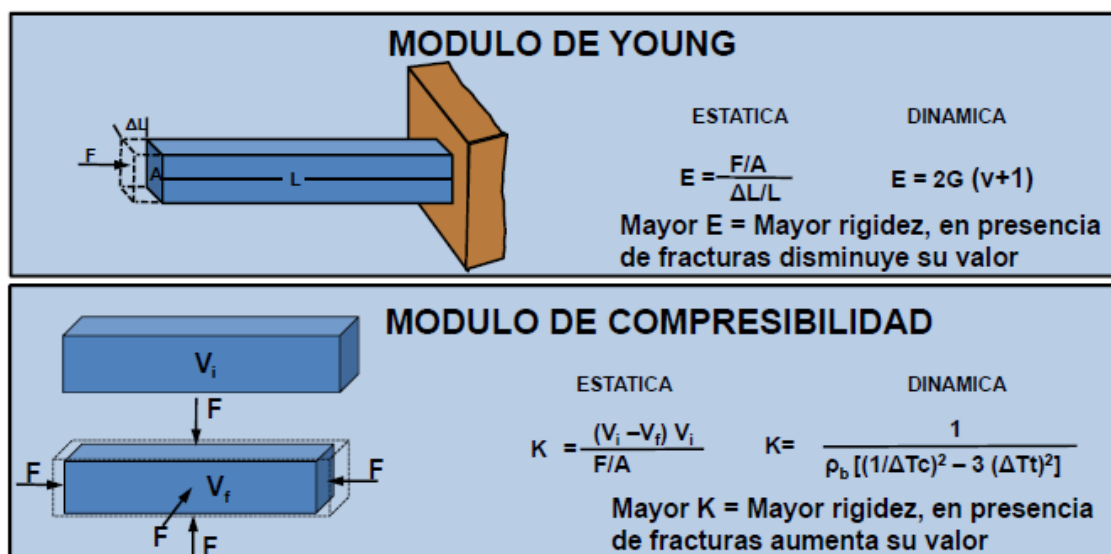


Figura 34: En la imagen superior, **Módulo de Young**; se trata de una constante elástica que debe su nombre al físico británico Thomas Young (1773-1829). Es la relación entre el esfuerzo longitudinal y la deformación longitudinal, y se indica con el símbolo  $E$ , donde  $G$  = Modulo de cizalla.

En la imagen inferior, **Módulo de compresibilidad**, expresado con el símbolo  $K$ , es la relación entre esfuerzo y deformación. El módulo de compresibilidad es una constante elástica equivalente al cambio en la presión aplicada dividido por la relación entre el cambio de volumen y el volumen original de un cuerpo, donde  $\Delta T_t$  = Tiempo de transito de corte,  $\Delta T_c$  = Tiempo de transito compresional,  $\rho_b$  = Densidad leída.

Imágenes tomadas del material didáctico brindado por el posgrado.

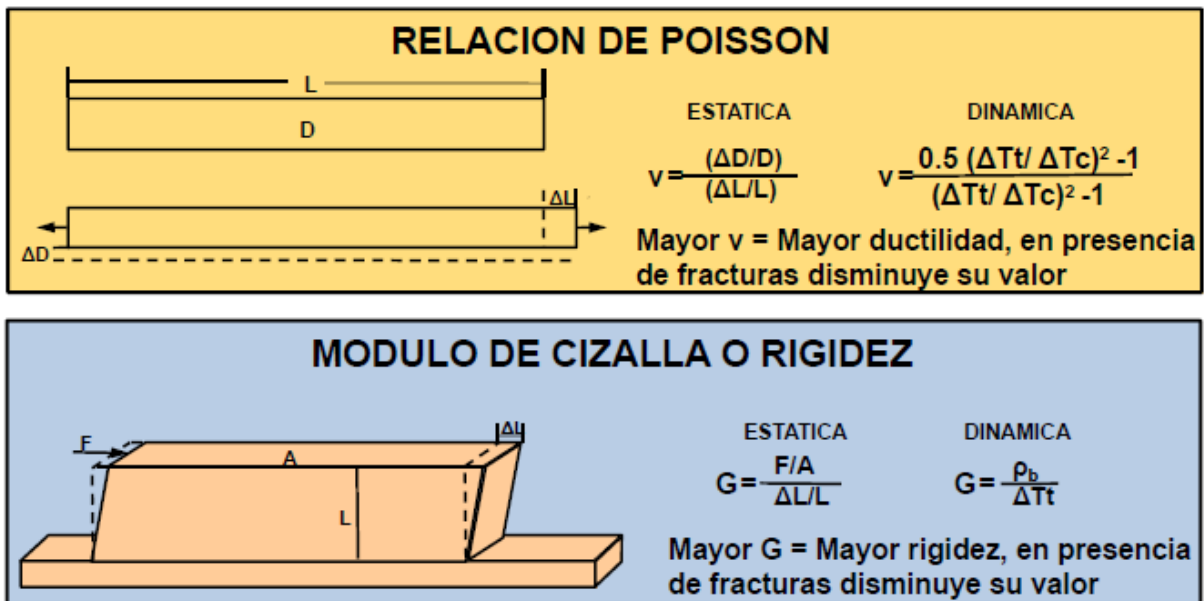


Figura 35: Imagen Superior, relación de Poisson ( $\nu$ ); una constante elástica es una medida de la compresibilidad de un material perpendicular al esfuerzo aplicado, o la relación entre la deformación latitudinal y la deformación longitudinal.

Imagen inferior, Módulo de cizalla o rigidez ( $G$ ); es una constante elástica para la relación entre el esfuerzo de corte o cizallamiento y la deformación de corte o cizallamiento.

Donde  $\Delta T_t$  = Tiempo de transito de corte  $\Delta T_c$  = Tiempo de transito compresional  $\rho_b$  = Densidad leída.

## 6. Modelado

En los apartados anteriores se describen las metodologías para obtener los diferentes parámetros que conforman una red discreta de fracturas naturales tridimensional. En la figura 36 se observa un flujo de trabajo simplificado donde quedan expresados los pasos realizados hasta llegar a la generación de un DFN.

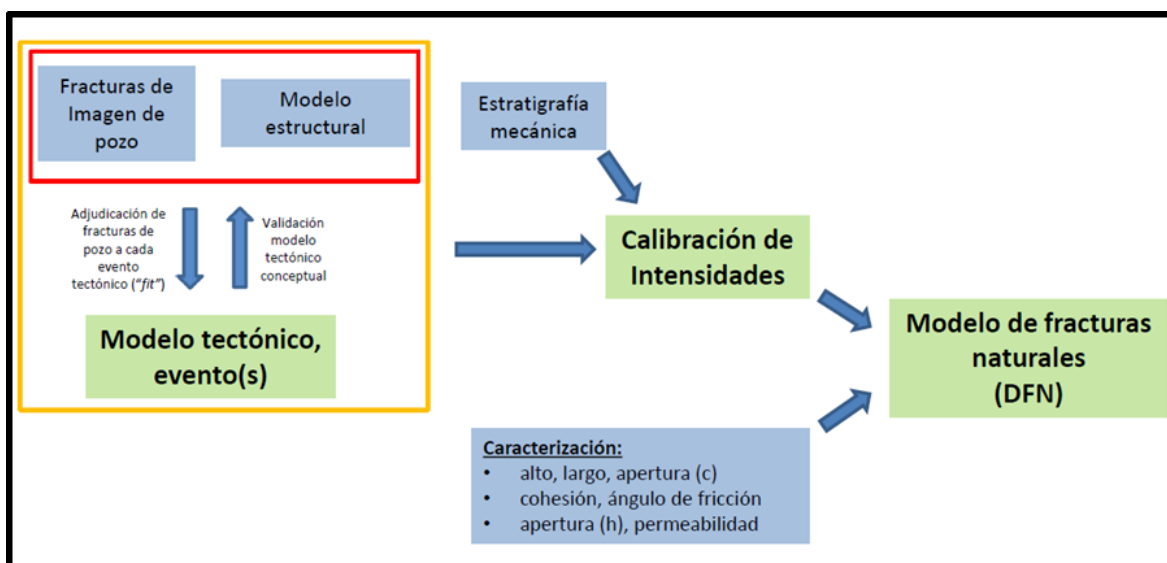


Figura 36: Flujo de trabajo para el modelado geomecánico de fracturas naturales (Manceda et al., 2016)

Utilizando el modelo estructural para conocer el arreglo de fallas tridimensional, se las analizó en un programa para conocer la distribución de esfuerzos, y por lo tanto, la distribución de fracturas naturales en cuanto a su densidad y orientación para cada evento de deformación. Se analizaron las relaciones espaciales como el espaciamiento de un tamaño de apertura determinado, se identificaron los conjuntos de fracturas tomados de las imágenes de pozo para poder luego calibrar el modelo y se analizaron los aspectos geomecánicos como la estratigrafía mecánica y los módulos elásticos intervinientes.

En el área de estudio Solo se pudo hacer una calibración en el área de la Fosa de Challacó donde se cuentan datos para cumplir con la metodología mientras que en el bloque de Puesto Touquet y El Porvenir se muestran solo modelos conceptuales sin la calibración correspondiente debido a la falta de datos de imágenes de pozos en estas zonas.

Una visualización de los mapas de intensidad se observa en la Figura 37 para cada evento de deformación interpretado en el análisis estructural. Estos mapas de intensidad fueron contruidos en base a la Máxima Cizalla de Coulomb (MCSS), en base a:

$$MCSS = (\sigma_1 - \sigma_3) / 2 \sqrt{(1 + 0,6^2)} - 0,6 * (\sigma_1 + \sigma_2) / 2$$

siendo 0.6 el coeficiente de fricción, el cual es aplicable a las fracturas afectadas por cizalla que son de modo II y III. Mientras que para las fracturas tensionales se determina a través del valor de sigma 3.

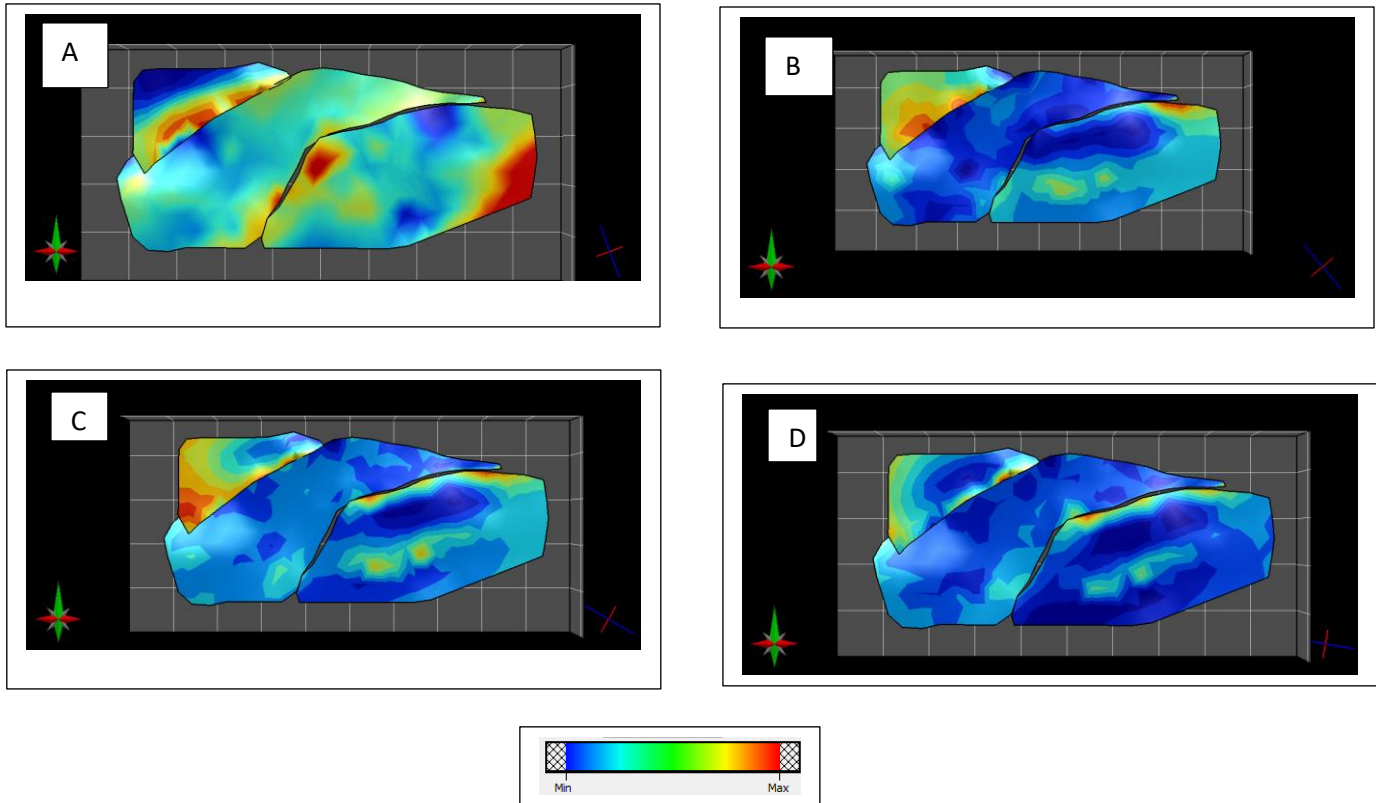


Figura 37: Mapas de intensidad de fracturas para el tope del Miembro Cutral-Co A) Evento Pliensbachiano. B) Evento Kimmeridgiano? C) Evento Berriasiano Medio-Valanginiano Temprano. D) Evento Cenomaniano .

Los mapas de intensidad para los diferentes eventos muestran, desde el evento Pliensbachiano hasta el Evento Cenomaniano, una disminución en las áreas de mayor intensidad de fracturas definidas a través de los colores naranja a rojo. Tal distribución se debe a la rotación del esfuerzo respecto de la orientación de los planos de fallas. El bloque más afectado es el del Anticlinal California – Yacimiento Puesto Touquet, donde los Eventos A, B y C muestran diferentes zonas de intensidad. Las mismas no podrán ser calibradas en este sector por no contar con datos de imagen de pozos.

En la Figura 38 se observa la distribución de los planos de fracturas para cada evento; estos planos fueron determinados computando el tensor de esfuerzos al tope del Mb Cutral-Co, combinado con el criterio de fallamiento de Coulomb:

$$\tan 2\theta = \pm \frac{1}{\mu}$$

donde  $\theta$  es el ángulo entre los planos de falla y el esfuerzo compresivo máximo  $\sigma_1$  y  $\mu$  es el coeficiente de fricción interna. Los planos se intersectan a lo largo de  $\sigma_2$  y su orientación solo es influenciado por  $\mu$  y la orientación de los esfuerzos principales.

La distribución de los planos de fracturas deberá analizarse en función de los mapas de intensidad.

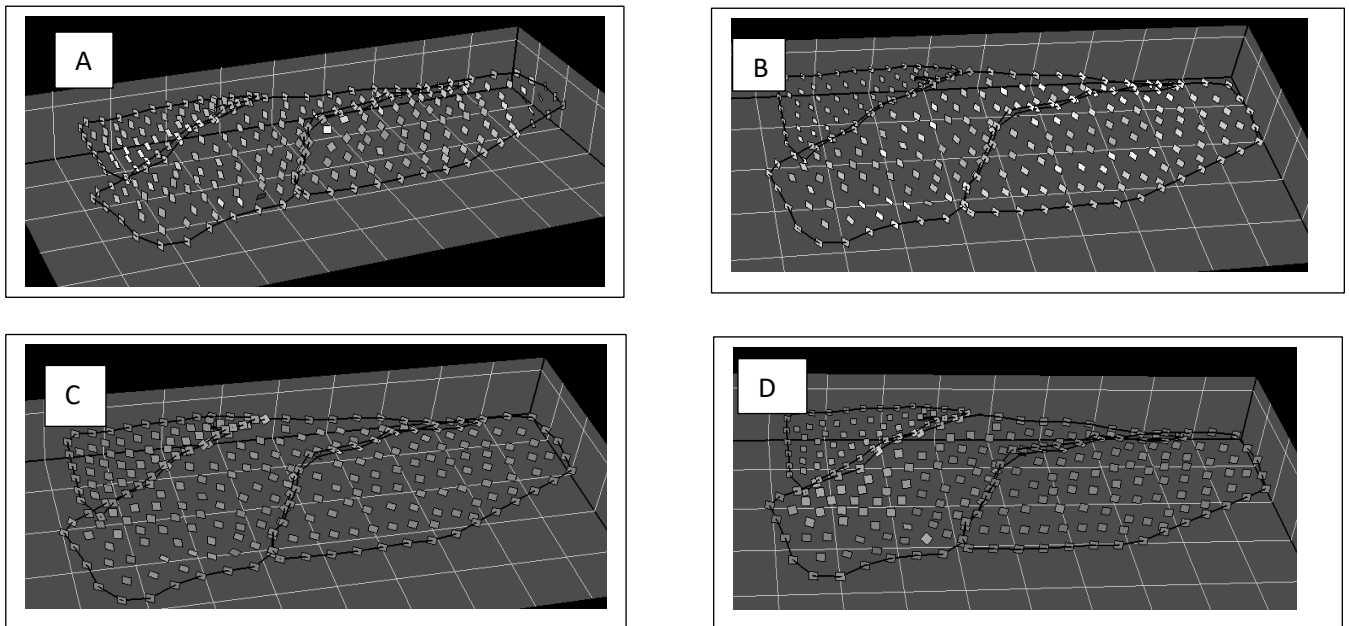


Figura 38: Distribución de las orientaciones de fracturas para el tope del Mb Cutral-Co. A) Evento Pliensbachiano. B) Evento Kimmeridgiano? C) Evento Berriasiano Medio-Valanginiano Temprano. D) Evento Cenomaniano.

La integración de todos los datos descritos en los apartados anteriores se materializa en la sumatoria de todos los eventos y propiedades de las fracturas

naturales. Este modelo estático luego es analizado dinámicamente, aunque este paso esta fuera del alcance de este estudio.

En este caso debido a la falta de datos con los que se cuenta, solo se pudo modelar la escama de la Fosa de Challacó, donde se observa un mapa de densidad P32 de las fracturas de todos los eventos. Se tomó el Mb Cutral-Co como un solo paquete mecánico debido al largo proceso de análisis para cada paquete en el programa Petrel, y se prosiguió a la generación de grillas de orientación y tendencia de intensidad de fracturas; luego, a una calibración donde se ejecutan miles de simulaciones geomecánicas que cubren todos los posibles esfuerzos tectónicos de Anderson en términos de orientación y magnitud para cada nodo de la grilla en relación con los datos reales de los pozos.

El mapa resultante muestra una distribución de intensidad moderadas de fracturas hacia el NE de la lámina y algunos picos de intensidad cercanos a las fallas, pero de muy poca extensión areal (Figura 39).

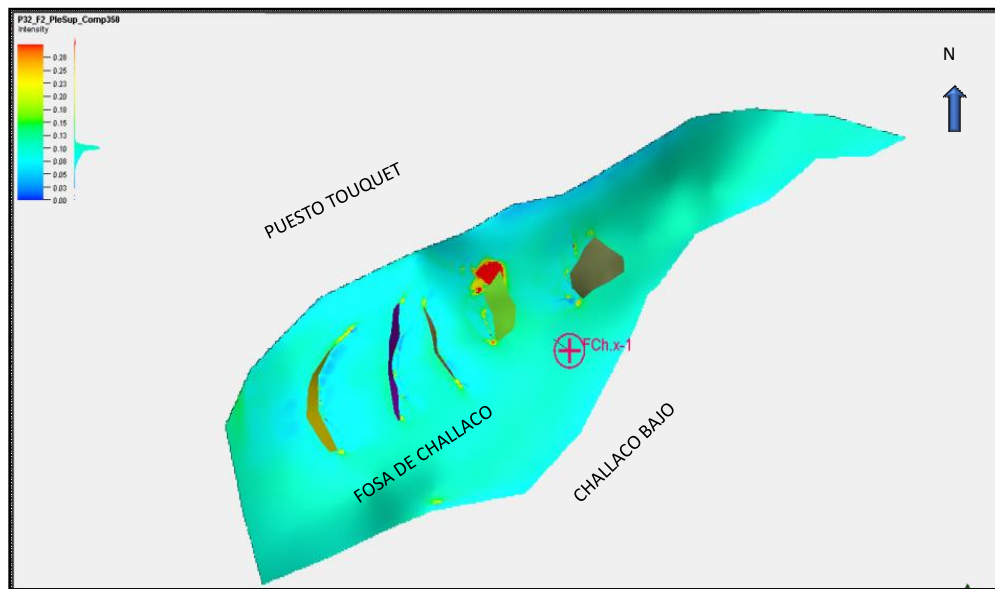


Figura 39: Mapa de intensidad de fracturas de la lámina de la Fosa de Challacó para el tope del Mb Cutral-Co.

La calibración de este modelo se pudo realizar con el sondeo FCh.x-1 que se ajusta para el evento Pliensbachiano.



## 7. CONSIDERACIONES FINALES

- 1) Los resultados finales del presente trabajo reflejan una visualización tridimensional de la densidad, distribución y propiedades de las fracturas de un modelo estático.
- 2) A pesar de la poca información extraída durante el proceso se pudo obtener un mapa de intensidades de fracturas para la lámina de la Fosa de Challaco para el Pliensbachiano Superior, con una dirección del esfuerzo de 350°.
- 3) Esta densidad de las bandas de deformación, que se evidencian en las imágenes de pozos coincide con el rango de espaciamientos tomados de los testigos corona 1frac/4-9m.
- 4) En Los testigos corona del Mb Cutral Co, no observan fracturas, aunque si bandas de deformación. Esto se debe a que la mayoría de las fracturas son verticales y los sondeos también. Consecuentemente con un espaciamiento como el detectado es muy difícil de ver las fracturas en los testigos corona.
- 5) En las imágenes de pozo por el contrario se observa un numero moderado de fracturas hacia la base del Miembro Cutral-Co.
- 6) En las escamas de Puesto Touquet y El Porvenir solo se muestran los modelos conceptuales debido a la falta de imágenes de pozo para calibrar dichas áreas.
- 7) Un análisis dinámico podría corroborar si los niveles de producción serían mayores hacia el NNE en la escama de la Fosa de Challaco, en el futuro, si esa zona se explorara.
- 8) Si bien esta metodología es muy útil en campos reconocidamente fracturados, también es aplicable a reservorios que producen por porosidad primaria pero que se encuentran en zona estructuralmente complejas como es la zona de estudio, para determinar si las fracturas naturales pueden mejorar la permeabilidad de estos reservorios.

## 8. BIBLIOGRAFÍA:

Arregui C., Carbone O., Martínez R. El grupo Cuyo (Jurásico temprano-medio) en la cuenca Neuquina. Relatorio del XVIII congreso Geológico Argentino, 2011.

Bertels, A. 1979. Paleobiogeografía de los foraminíferos del Cretácico Superior y Cenozoico de América del Sur. *Ameghiniana* 7(1): 1-56.

Ciancio, L., C. González and R. Manceda. 2014. Estudios de reservorios con fracturas naturales. Ejemplos en formaciones Vaca Muerta y Chachao. Cuenca Neuquina. Argentina IX Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Argentina. Nov. 2014

Cristallini E., Tomezzoli R., Pando G., Gazzera C., Martínez J., Quiroga J., Buhler M., Bechis F., Barredo S. y Zambrano O. Controles precuyanos en la estructura de la Cuenca Neuquina. *Rev. Asoc. Geol. Argent.* v.65 n.2 Buenos Aires oct. 2009

Gómez Omil, R., Schmithalter, J., Cangini, A., Albariño, L. & Corsi, A. 2002. El Grupo Cuyo en la Dorsal de Huincul, consideraciones estratigráficas, tectónicas y petroleras. Cuenca Neuquina. 5° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Actas en CD. Mar del Plata.

Gulisano C., Gutiérrez Pleimling A., Orchuela I., Ambrosio A. y p Malone P. Modelo estratigráfico secuencial del grupo Cuyo en la Dorsal de Huincul, -cuenca Neuquina, Argentina. *XVIII Congreso Geológico Argentino, Mayo 2011, Neuquén.*

Fossen H., Schultz R., Shipton Z and Mair K. Deformation bands in sandstone: a review. *Journal of the Geological Society, London*, Vol. 164, 2007, pp. 755–769.

Fossen H. and Bale A. Deformation bands and their influence on fluid flow *AAPG Bulletin*, v. 91, no. 12 (December 2007), pp. 1685 – 1700.

Fossen H. Schultz R. Shipton Z.K. and Mair K. Deformation bands in sandstone: a review *Journal of the Geological Society, London*, Vol. 164, 2007, pp. 755–769. Printed in Great Britain. 755, 2016

Ignomiriello F. Caracterización del reservorio desde los puntos de vista geológicos y petrofísicos, Especialización en Geociencias de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, UNLP, tesis inédita, 2017.

Kim Hyung J., Mallea Martín, Gutiérrez Raúl, Malone Patricio Exploración del Gr. Cuyo (Jurásico) en bloques maduros de la dorsal de Huincul-Puesto Touquet y el Porvenir, Cuenca Neuquina. IX Congreso de exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Argentina, 2014.

Knipe, R.J. Faulting processes and fault seal. In: Larsen, R.M., Brekke, B.T., Larsen, B.T. & Talleraas, E. (eds) Structural and Tectonic Modelling and its Application to Petroleum Geology. Norwegian Petroleum Society, 1992.

Special Publication, 1, 325–342.

Lazzari, V., Hryb, D., Manceda, R y M. Foster, Predicción de Fracturas Naturales en la Formación Vaca Muerta. IX Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Argentina. Nov. 2014.  
<http://www.iapg.org.ar/congresos/2014/conexplo/TRABAJOSPREMIADOS.pdf>

Legarreta, L. y M. Uliana, 1996. La sucesión jurásica en el centro-oeste de Argentina. Arreglo estratigráfico, secuencias y evolución paleogeográfica. Boletín de Informaciones Petroleras, 3ra. Época, Año XII (45): 66-78. Buenos Aires

Manceda, R. J Prieto Fanjul, L. Maerten, N. Jacquelot, G. Jalfin, J. Gale, R. Villaroel, D. Risi, S. Leoni. 2005 Characterization and Modeling of Fractured Reservoirs: Using conventional and unconventional approaches: An application to the Tropical Field, Serranía del Interior, Venezuela. EAGE Madrid.

Manceda, R., Lopez, R. and D. Hryb. Characterization and Geomechanics-based Modelling of Natural Fractures: Impact in Unconventional Plays. Moving toward the Prediction of Unconventional Plays: Lessons Learned from Tight and Shale Reservoirs in the Neuquén Basin. AAPG, Geoscience Technology Workshop Buenos Aires I 16-18 November 2016.

Margueliche E. Caracterización Tectónica- Área Puesto Touquet/ El Porvenir, Especialización en Geociencias de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, UNLP, tesis inédita, 2017.

Mombrú, C.A. & Uliana, M.A. 1978. Esquema tectosedimentario de la cuenca mesozoica de Mendoza y Neuquén. 7º Congreso Geológico Argentino, Actas 2: 239-256. Neuquén.

Mosquera A., Silvestro J., Ramos V., Alarcón M. y Zubiri M. La estructura de la Dorsal de Huincul. Relatorio del XVIII Congreso Geológico Argentino. Neuquén, 2011.

Naipauer, M. y Ramos, V.A. 2016. Changes in source areas at Neuquén Basin: Mesozoic evolution and tectonic setting based on U-Pb ages on zircons. En Folguera, A., Naipauer, M., Sagripanti, L., Ghiglione, M., Orts, D. y Giambiagi L. (eds.) Growth of the Southern Andes, Springer Earth System Sciences, 33-61, Amsterdam.

Maerten L., Gillespie P., and Daniel J-M., 2006. Three-dimensional geomechanical modeling for constraint of subseismic fault simulation. AAPG Bulletin, v. 90, no. 9 (September 2006), pp. 1337–1358.

Schueller S., Braathen A., Fossen H., Tveranger J. Spatial Distribution of deformation bands in damage zones of extensional faults in porous sandstones: Statistical analysis of field data. Journal of Structural Geology 52 (2013) 148 e162.

Silvestro J. y Zubiri M. Convergencia oblicua modelo estructural alternativo para la Dorsal Neuquina (39°S) – Neuquén. Revista de la Asociación Geológica Argentina 63 (1): 49 - 64 (2008)

Spalletti, L., Franzese, J., Matheos, S. y Schwarz, E. 2000. Sequence stratigraphy of a tidally dominated carbonate-siliciclastic ramp; the Tithonian of the southern Neuquén Basin, Argentina. Journal of the Geological Society 157: 433-446, London.

Vergani, G.D., Tankard, A.J., Belotti, H.J. y Welsink, H.J. 1995. Tectonic evolution and paleogeography of the Neuquén Basin, Argentina. Petroleum Basins of South America. American Association of Petroleum Geologists Memoir 62: 383-402

Vergani, G.D. 2005. Control estructural de la sedimentación Jurásica (Grupo Cuyo) en la Dorsal de Huincul, Cuenca Neuquina, Argentina. Modelo de falla lístrica rampa – plano, invertida. Boletín de Informaciones Petroleras, 1: 32-44.

Ploszkiewicz, J. V., I. A. Orchuela, J. C. Vaillard y R. F. Viñes, 1984. Compresión y desplazamiento lateral en la zona de falla Huincul, estructuras asociadas, Provincia del Neuquén. IX Cong. Geol. Arg., Actas II:163-169

Orchuela, I.A., Ploszkiewicz, J.V. & Viñes, R.F. 1981. Reinterpretación estructural de la denominada dorsal neuquina. 8° Congreso Geológico Argentino, Actas 3: 281-293. San Luis.

Ortega O., Marrett R., and Laubach S. Ascale-independent approach to fracture intensity and average spacing measurement. AAPG Bulletin, v. 90, no. 2 (February 2006), pp. 193 – 208.

Thomas A. 1993 Tesis de Doctorado en la Universidad de Stanford, California.

Uliana, M.A. y Dellapé, D.A. 1981. Estratigrafía y evolución paleoambiental de la sucesión maestrichtiano-eoterciaria del engolfamiento neuquino (Patagonia Septentrional). VII° Congreso Geológico Argentino. Actas 3: 673-711.

Wichmann, R. 1927. Sobre las facies lacustres Senoniana de los estratos con dinosaurios y su fauna. Boletín de la Academia Nacional de Ciencias 30(1-4): 383-406.

## 9. ANEXO

El pozo Pp.Nq.PTu.a-1001 cuenta con una carrera con testigo corona dispuesta en 10 cajones, con tope 591,2 m y base 600,2 m. El testigo está constituido principalmente por areniscas masivas finas a medias de color gris muy claro, de moderada selección, clasto sostenidas, intercalada con niveles pelíticos. En la tabla 9 está presente la longitud de la corona en cada uno de los cajones.

|                    |                     |
|--------------------|---------------------|
| Cajón 1-10: 0,72 m | Cajón 6-10: 0,78 m  |
| Cajón 2-10: 0,86 m | Cajón 7-10: 0,84 m  |
| Cajón 3-10: 0,74 m | Cajón 8-10: 0,82 m  |
| Cajón 4-10: 0,78 m | Cajón 9-10: 0,62 m  |
| Cajón 5-10: 0,74 m | Cajón 10-10: 0,85 m |

Tabla 9: Longitud del testigo corona en los cajones correspondientes al pozo Pp.NqPTu.a.1001.

Cajón 1: tramo 26, la banda de deformación se encuentra a una profundidad de 599,49 m. La altura aparente es de 8 cm., el ángulo de fractura respecto al eje de la corona es de 2° H (horario). El ancho de la banda es de 0.62 mm; hacia la parte superior la terminación no está bien definida, pero la parte inferior es hacia el borde del testigo. El plano de fractura es planar curvo, con superficie rugosa y carece de deslizamiento. Observando con lupa se detecta que esta está compuesta del mismo material que la roca huésped (arena de menor granulometría), lo que podría estar indicando una zona de cizalla.

Cajón 2: La banda de deformación se encuentra en los tramos 25/24 a 599 m de profundidad, con un largo de 26,1 cm, dispuesta verticalmente y con un ancho de 1.75 mm. Hacia la parte superior termina de manera gradual mientras que en la

parte inferior termina hacia el borde del testigo corona; el plano de la banda es irregular planar con superficie rugosa y no se observa desplazamiento. Con el uso de la lupa se observó que en el interior de la fractura el material presente es de la misma composición que el resto del testigo corona.

Cajón 2: tramos 25/24 se encuentra a una profundidad de 598,84 m con 17 cm de largo; el ancho es de 0.75 mm, con terminación gradual tanto en el extremo superior como en el extremo inferior. La banda de deformación es irregular planar escalonada, sin mineralización en el interior. En su interior podemos observar por medio de la utilización de la lupa que el material presente es de la misma composición que el resto de la roca.

Cajón 2: tramo de 25/24 a una profundidad de 598 m y un largo de 28 cm. Con una disposición vertical, 0.95 mm de ancho. La banda de deformación es irregular planar escalonada con superficie rugosa; no se observa desplazamiento y al igual que en las anteriores, el relleno que se distingue es de la misma composición que en el resto del testigo. La banda es vertical en la parte superior, pero en los últimos 6 cm la fractura presenta una inclinación de 50° AH (antihorario).

Cajón 3: tramos 23b/23a con profundidad de 598 m y 12 cm de largo, ancho de 2,65 mm. El plano de la banda de deformación es irregular planar escalonado, con una superficie rugosa rellena de la misma composición que el resto de la roca, pero de menor granulometría.

Cajón 4: La banda de deformación se aprecia en los tramos 20/20b/19 (figura 40) con un largo de 41 cm a una profundidad de 597,3 m; el ancho es de 1,4 mm, su superficie es planar curvo y las paredes presentan rugosidad. El relleno presente es de la misma composición que la roca circundante. A 597,15 m de profundidad, la banda de deformación sufre lo que puede ser una reactivación generando un ojal de 2 cm de ancho por 8 cm de largo, cambiando su inclinación a 24° AH, con azimut de 43°.



Figura 40: Imagen del segmento del testigo corona correspondiente al cajón 4 del pozo Pp.Nq.PTu.a-1001. La banda de deformación presenta un largo de 41 cm a una profundidad de 597.3 m, el ancho es de 1.4 mm y su superficie es planar curvo; las paredes presentan rugosidad. A la izquierda, imagen sin modificar; a la derecha, en rojo, posición de la banda de deformación.

Cajón 5: En los tramos 16/17 a una profundidad de 596,5 m se puede ver una banda de deformación con un largo de 34,5 cm, planar escalonada con superficie rugosa; el ángulo respecto al eje axial es de 5° H. El relleno está constituido por el mismo material del testigo.

Cajón 6: En el tramo 15b se distingue una banda de deformación de 14 cm de largo, a una profundidad de 596,10 m, con un ángulo de 12° H y un ancho y/o apertura de 1,75 mm; es planar escalonada con una superficie rugosa. A ojo desnudo no se observa desplazamiento. El relleno, al igual que lo observado en los otros cajones, está representado por material de la misma composición, pero de menor granulometría (areniscas masivas finas a medias).

Cajón 7: A una profundidad de 563,5 m, en el tramo 12b, encontramos una fractura de 31,8 cm de largo, un ancho/apertura de 1,15 mm y un ángulo de 15° H (figura 40); la terminación en la parte superior es hacia afuera del testigo y en la parte inferior es difícil de distinguir. La banda de deformación es planar escalonada, en

donde se aprecian pequeños ojales. El relleno está integrado por areniscas de menor granulometría que en el resto del testigo. Azimut de 30°.



Figura 41: Imagen correspondiente al cajón 7 del pozo Pp.Nq.PTu.a-1001.

En los otros tres cajones no se pudieron distinguir fracturas y/o bandas de deformación, pero no se descarta su presencia a una escala menor.

| Ancho de banda (mm) | Número acumulativo | Frecuencia acumulativa (fracs/m) |                      |
|---------------------|--------------------|----------------------------------|----------------------|
| 3,3                 | 2                  | 0,22222222                       | Pozo YPF.Nq.Ptu-1001 |
| 2,65                | 3                  | 0,27777778                       |                      |
| 1,75                | 5                  | 0,46296296                       |                      |
| 1,4                 | 6                  | 0,55555556                       |                      |
| 1,15                | 7                  | 0,64814815                       |                      |
| 0,95                | 8                  | 0,74074074                       |                      |
| 0,75                | 9                  | 0,83333333                       |                      |
| 0,62                | 10                 | 0,92592593                       |                      |

Figura 42: Cuadro resumen que muestra el ordenamiento de los anchos de banda en mm y su frecuencia acumulativa para el pozo Pp.Nq.PTu.a-1001.



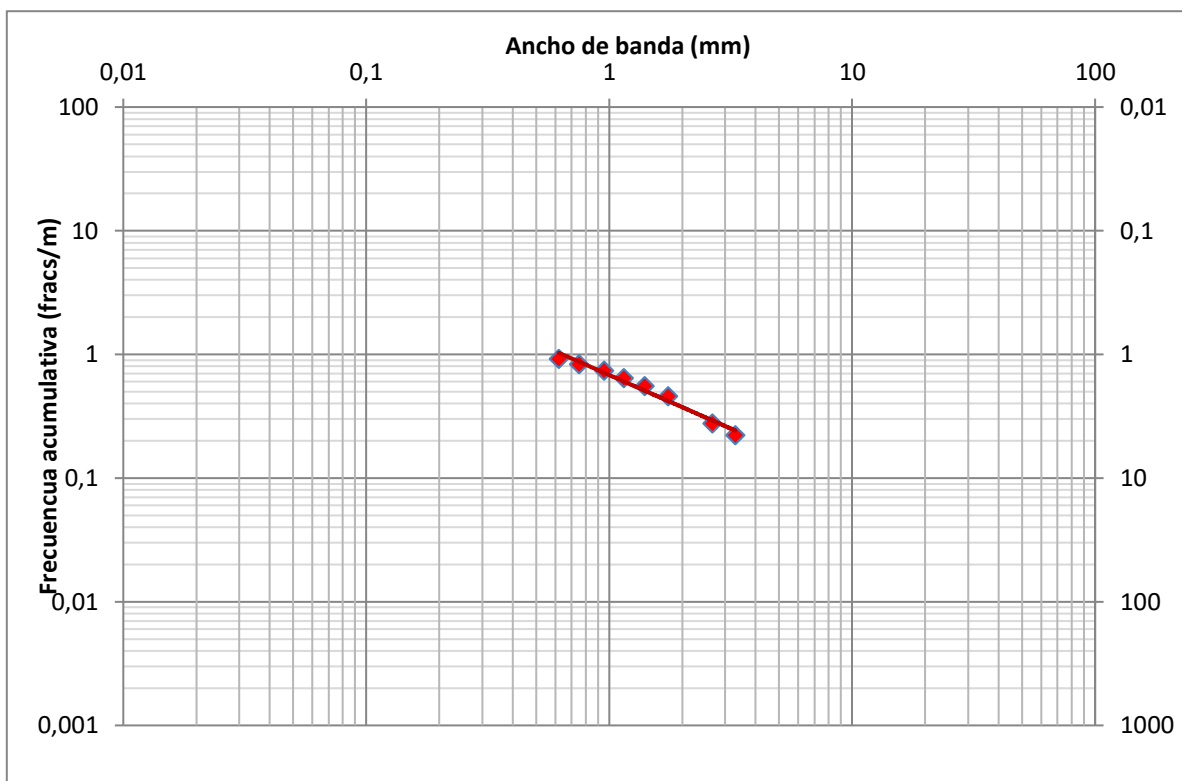


Figura 43: Cuadro doble logarítmico que representa la relación entre frecuencias acumuladas en fracturas/m y el ancho de bandas en mm. En este caso se observa que para el pozo Pp.Nq.PTu.a-1001 a medida que aumenta el ancho, las bandas se hacen menos frecuentes, pudiéndose trazar una línea con pendiente negativa.

El pozo Pp.Nq.PTu.a-1002, con cota de 591,29 m, está constituido por una carrera de 8,58m con diez cajones (Tabla 10). El testigo está integrado principalmente por areniscas de granulometría fina a media, bien seleccionadas, clasto sostenidas; en algunos sectores posee cemento calcítico, ya que se observó efervescencia producto de la reacción con el ácido clorhídrico. A lo largo del testigo se distinguen niveles con clastos pelíticos aislados de variados tamaños, además de niveles pelíticos intercalando areniscas, apreciables en el cajón 8 (Figura 44). Con respecto a la presencia de fracturas y/o bandas de deformación solo se pudo observar a ojo desnudo y/o lupa binocular una banda de deformación correspondiente al cajón 3.



Figura 44: Cajón 8, areniscas finas intercaladas por pelitas laminadas y clastos pelíticos.

|                    |                     |
|--------------------|---------------------|
| Cajón 1-10: 0,65 m | Cajón 6-10: 1,00 m  |
| Cajón 2-10: 0,78 m | Cajón 7-10: 0,80 m  |
| Cajón 3-10: 0,95 m | Cajón 8-10: 0,75 m  |
| Cajón 4-10: 0,75 m | Cajón 9-10: 0,95 m  |
| Cajón 5-10: 1,00 m | Cajón 10-10: 0,95 m |

Tabla 10: Longitud del testigo corona en los cajones correspondientes al pozo Pp.Nq.PTu.a-1002.

Cajón 3: La banda de deformación observada se encuentra a una profundidad de 744,28 m; la misma presenta una apertura y/o ancho de banda de 2,65 mm, con una inclinación de 25° H y un largo aparente de 56 cm. La terminación en la parte

superior es hacia afuera de la corona, mientras que en la parte inferior es difícil de determinar. El plano de la banda es planar escalonado con las paredes rugosas; no se observa desplazamiento. En el interior de la banda no se observan mineralizaciones ni cementos, pero la misma presenta una composición semejante a la arenisca circundante aunque de menor granulometría, evidenciando una zona de cizalla. En los primeros 34 cm la fractura es vertical, con un azimuth de 3°.

El pozo Pp.Nq.PTu.a-1013 con cota 582 m, consta de una sola carrera separada en 10 cajones (Tabla 11). El testigo corona está constituido por areniscas medianas a gruesas, clasto sostenidas, con selección buena a mala; se observa además una intercalación de areniscas conglomerádicas estratificadas con clastos líticos. Los clastos pelíticos tienen formas redondeadas a sub-redondeadas, colores claros y en menor proporción oscuros, y tamaños muy variados desde 0,5 cm hasta mayores a 3 cm (figura 45).

|                    |                     |
|--------------------|---------------------|
| Cajón 1-10: 0,60 m | Cajón 6-10: 1,00 m  |
| Cajón 2-10: 0,81 m | Cajón 7-10: 1,00 m  |
| Cajón 3-10: 0,95 m | Cajón 8-10: 0,98 m  |
| Cajón 4-10: 1,00 m | Cajón 9-10: 0,98 m  |
| Cajón 5-10: 1,00 m | Cajón 10-10: 0,97 m |

Tabla 11: Longitud total del testigo corona del pozo Pp.Nq.PTu.a-1013, separada en cajones.

En este caso no se pudieron observar bandas de deformación y/o fracturas a lo largo del testigo corona, aunque no se descarta la existencia de estas.



Figura 45: A la izquierda, imagen del testigo corona correspondiente al cajón 4 (areniscas conglomeráticas); a la derecha, imagen obtenida del cajón 2, donde se observan clastos líticos y pelíticos de gran tamaño.

El Pozo YPF.Nq.PTu.x-1 se encuentra situado en la localidad de Cutral-Có, al igual que los otros 3 pozos anteriores. Se corrieron seis carreras a lo largo del mismo abarcando tanto el Mb Cutral-Có como el Mb Pelítico inferior; las cuatro primeras carreras corresponden al Mb Cutral-Có y las últimas dos al Mb Pelítico inferior.

La litología está representada por areniscas masivas finas a muy finas, con buena selección, clastos redondeados, de color gris claro, clasto sostenidas. Se observan restos carbonosos en algunos niveles, e intercalaciones con areniscas medianas a gruesas. Además de clastos pelíticos aislados, a medida que nos acercamos al tope del Mb Cutral-Có aparecen intercalaciones con areniscas conglomeráticas, (Ignomiriello, 2017). El Mb Pelítico inferior está compuesto por arcilitas masivas de color gris oscuro a negro, con pequeñas intercalaciones de areniscas y clastos pelíticos, con presencia de cementos carbonaticos.

Se agruparon las carreras por su continuidad (en metros) en profundidad, juntando las carreras uno y dos, y cinco y seis. Tres y cuatro no presentan continuidad respecto a las anteriores (Tablas 12, 13, 14 y 15).

|                    |                     |           |       |
|--------------------|---------------------|-----------|-------|
| Cajón 1-7: 0,65 m  | Cajón 5-7: 0,62 m   | Carrera 1 | 544 m |
| Cajón 2-7: 0,65 m  | Cajón 6-7: 0,635 m  |           |       |
| Cajón 3-7: 0,61 m  | Cajón 7-7: 0,58 m   |           |       |
| Cajón 4-7: 0,62 m  |                     |           |       |
| Cajón 1-12: 0,65 m | Cajón 7-12: 0,61 m  | Carrera 2 | 553 m |
| Cajón 2-12: 0,64 m | Cajón 8-12: 0,565 m |           |       |
| Cajón 3-12: 0,43 m | Cajón 9-12: 0,65 m  |           |       |
| Cajón 4-12: 0,63 m | Cajón 10-12: 0,65 m |           |       |
| Cajón 5-12: 0,64 m | Cajón 11-12: 0,61 m |           |       |
| Cajón 6-12: 0,50 m | Cajón 12-12: 0,64 m |           | 562 m |

Tabla 12: Carreras 1 y 2 agrupadas por su continuidad en profundidad, con una longitud total de 11,58 m correspondiente al Pozo YPF.Nq.PTu.x-1.

### Carrera 1

Cajón 5: para el tramo 19, a una profundidad de 549,86 m, la banda de deformación presenta una altura aparente de 7 cm, vertical, con un ancho de 0,62 mm; la terminación hacia el tope no se pudo definir mientras que para la parte inferior la banda de deformación desaparece gradualmente. No se observa mineralización ni cementos rellenando el interior de la banda, pero si se observó material de la misma composición que en el resto del testigo. Presenta una forma irregular planar escalonada con paredes rugosas. Azimut N310°.

Cajón 6: La banda de deformación fue encontrada en el tramo 21 a una profundidad de 529,86 m, con una altura aparente de 1 cm, con una disposición horizontal y un ancho de 1,15 mm. La terminación en ambos lados es hacia afuera

de la corona; presenta una forma irregular planar escalonada de paredes rugosas. No se pudo determinar la magnitud del desplazamiento, ni el azimut.

## Carrera 2

Cajón 1: en el tramo 2, a una profundidad de 561,72 m con una altura de 6 cm, aparece una banda de deformación con un ángulo de 15° en sentido horario, con ancho de banda de 1,75 mm. La terminación es gradual hacia la parte superior y hacia la parte inferior no se pudo determinar. De forma irregular planar escalonada con paredes rugosas. No presenta cementos ni mineralizaciones en el interior de la banda, pero si se distingue material de la misma composición que la roca en general, pero de menor granulometría. Azimut N 340°.

Cajón 3: en el tramo 11, a una profundidad de 560,59 m se encuentra una banda de deformación con una altura aparente de 10 cm y ancho de 0,62 mm; la terminación de la misma hacia la parte superior es hacia afuera del testigo corona, mientras que en la parte inferior la terminación es difícil de determinar. De forma irregular planar escalonada con paredes rugosas. No se pudo determinar el azimut.

Cajón 6: en el tramo 20, a una profundidad de 559,28 m encontramos una banda de deformación con una altura aparente de 7,2 m, vertical, con un ancho de 0,62 mm, de forma irregular planar curvo. No se pudo medir el azimut.

Cajón 6: en el tramo 20 aparece una banda de deformación a una profundidad de 559,23 m con una altura aparente de 1 cm, lo que indica que la misma está en una posición horizontal; el ancho de la banda es de 1,4 mm. La terminación es hacia afuera de la corona. No se pudo determinar el azimut.

Cajón 6: a una profundidad de 559,13 m, en el tramo 21, se aprecia una banda de deformación con una altura aparente de 9,8 cm, vertical, con un ancho de 2,65 mm; la terminación en ambos extremos es hacia afuera de la corona. Presenta una forma irregular planar escalonada de paredes rugosas, no se observan cementos en el interior. No se pudo determinar el azimut.

Cajón 8: en el tramo 29, a una profundidad de 557,90 m, se encuentra una banda de deformación con un ancho de 1,4 mm y una altura de 1 cm, lo que indica que la misma es horizontal; la terminación, al igual que la anterior, es hacia afuera de la corona. Presenta una forma irregular planar escalonada. No se pudo determinar el azimut.

Cajón 8: en el tramo 30, a una profundidad de 557,74 m se distingue una banda de deformación con una altura aparente de 4 cm y un ángulo de 40° en sentido horario, de forma irregular planar curvo con paredes rugosas. No se pudo medir el azimut.

Cajón 8: tramo 30, 24 cm por encima de la anterior se encuentra una banda de deformación con una altura aparente de 1 cm, y un ancho de 2,15 mm. Al igual que en el caso anterior, posee una forma irregular planar curvo con paredes rugosas y no se observan cementos en el interior.

Cajón 11: en el tramo 37 y a una profundidad de 555,94 m se encuentra una bandad de deformación con un ancho de 2,15 mm, una altura aparente 1 cm y un ángulo de 85°. La terminación es hacia afuera de la corona, con forma irregular planar escalonada de paredes rugosas. No se pudo determinar el azimut.

|             | Ancho de banda (mm) | Número acumulativo | Frecuencia acumulativa (fracs/m) |                     |
|-------------|---------------------|--------------------|----------------------------------|---------------------|
| Carrera 1-2 | 2,65                | 1                  | 0,05555556                       | Pozo YPF.Nq.PTu.x-1 |
|             | 2,15                | 3                  | 0,16666667                       |                     |
|             | 1,75                | 5                  | 0,27777778                       |                     |
|             | 1,4                 | 7                  | 0,38888889                       |                     |
|             | 1,15                | 9                  | 0,5                              |                     |
|             | 0,62                | 11                 | 0,61111111                       |                     |

Figura 46: cuadro resumen 1a: muestra el ordenamiento de los anchos de banda en mm y su frecuencia acumulativa para las carreras 1 y 2 del pozo YPF.Nq.PTu.x-1.

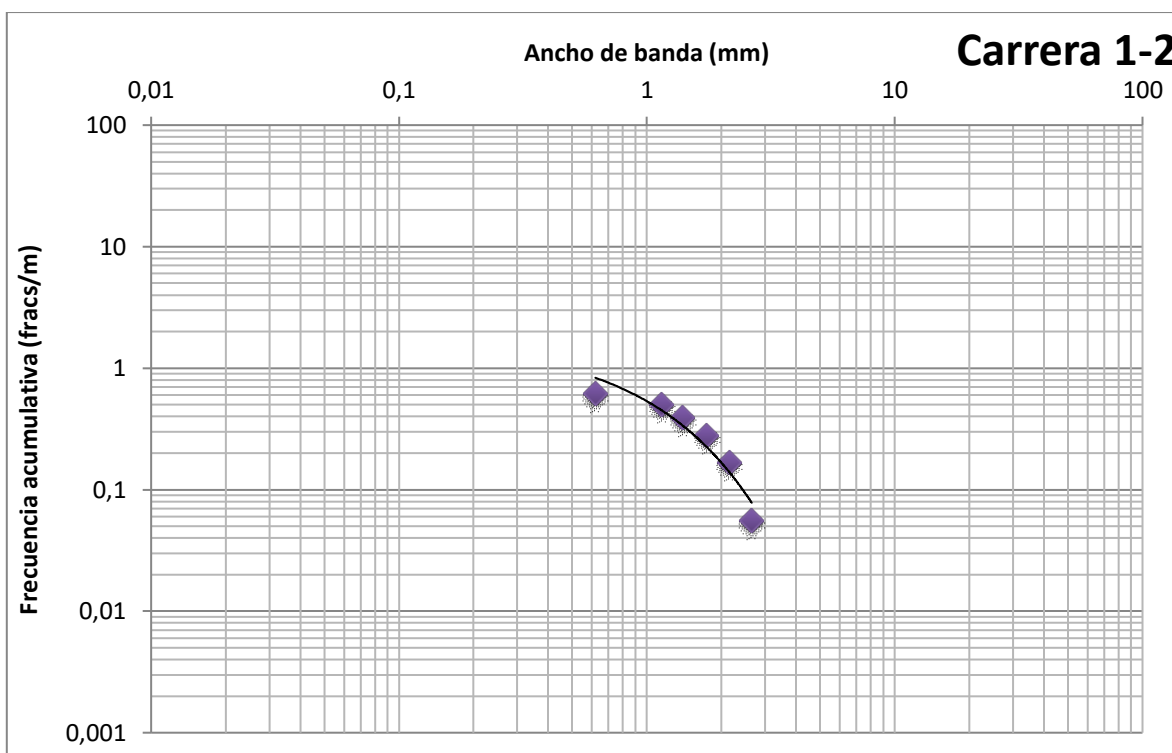


Figura 47: cuadro resumen 1b: cuadro doble logarítmico que representa la relación entre frecuencias acumulativas en fracturas/m y el ancho de bandas en mm para las carreras 1 y 2 del pozo YPF.Nq.PTu.x-1. En este caso también se observa que a medida que aumenta el ancho, las bandas se hacen menos frecuentes, pudiéndose trazar una curva con pendiente negativa pero mucho más pronunciada que en el caso anterior; por lo tanto si hiciéramos una proyección hacia menores frecuencias acumulativas, los anchos de banda no llegarían a valores tan altos como si lo hiciésemos para el pozo Pp.Nq.PTu.a-1001.

|                   |                   |              |       |
|-------------------|-------------------|--------------|-------|
| Cajón 1-8: 0,62 m | Cajón 5-8: 0,57 m | Carrera<br>3 | 828 m |
| Cajón 2-8: 0,65 m | Cajón 6-8: 0,60 m |              |       |
| Cajón 3-8: 0,61 m | Cajón 7-8: 0,73 m |              |       |
| Cajón 4-8: 0,62 m | Cajón 8-8: 0,61 m |              | 834 m |

Tabla 13: Carrera 3 con una longitud total de 5,01 m correspondiente al Pozo YPF.Nq.PTu.x-1.



Cajón 2: en el tramo 9, la banda de deformación se encuentra a 832,76 m de profundidad, altura aparente de 3 cm con un ángulo de 70° y un ancho de 0,15 mm; la terminación en la parte superior es paulatina, mientras que en la parte inferior la banda sale de la corona. De forma irregular con paredes rugosas. Se puede observar una fractura incipiente.

Cajón 6: la banda de deformación se encuentra a una profundidad de 830,40 m, es vertical con una altura aparente de 6 cm y un ancho de 0,62 mm. La terminación en la parte superior es progresiva, mientras que en la parte inferior la banda sale del testigo, de forma planar curvo. No se pudo determinar el azimut.

|                    |                     |           |        |
|--------------------|---------------------|-----------|--------|
| Cajón 1-12: 0,63 m | Cajón 7-12: 0,58 m  | Carrera 4 | 1027 m |
| Cajón 2-12: 0,52 m | Cajón 8-12: 0,49 m  |           |        |
| Cajón 3-12: 0,57 m | Cajón 9-12: 0,49 m  |           |        |
| Cajón 4-12: 0,64 m | Cajón 10-12: 0,61 m |           |        |
| Cajón 5-12: 0,55 m | Cajón 11-12: 0,58 m |           |        |
| Cajón 6-12: 0,65 m | Cajón 12-12: 0,53 m |           | 1036 m |

Tabla 14: Carrera 4 con una longitud de 6,84 m correspondiente al Pozo YPF.Nq.PTu.x-1.

Cajón 5: en el tramo 16 a 1033,35 m de profundidad se pudo distinguir una fractura con altura aparente de 1 cm, ángulo de 80° en sentido horario y una apertura de 1,4 mm. Presenta una forma irregular con paredes rugosas, con cemento pelítico y calcítico ocupando un 20%; la fractura reaccionó fuertemente frente al HCl. No se pudo medir el azimut.

Cajón 9: la banda de deformación se encuentra a 1030,39 m de profundidad, con una altura aparente de 1,5 cm y un ancho de 0,62 mm; ángulo de 85° sentido horario. La terminación en ambos extremos es hacia afuera del testigo corona. No se pudo determinar el azimut.

Cajón 10: en el tramo 31 se distingue una banda de deformación con una altura de 1 cm y un ancho de 0,75 mm, a 1030 m de profundidad. Presenta una forma planar curvo con paredes rugosas. No se aprecia ningún tipo de cemento.

|                   |                   |           |          |
|-------------------|-------------------|-----------|----------|
| Cajón 1-4: 0.65 m | Cajón 3-4: 0.65 m | Carrera 5 | 1938m    |
| Cajón 2-4: 0.62 m | Cajón 4-4: 0.65 m |           |          |
| Cajón 1-8: 0.65 m | Cajón 5-8: 0.65 m | Carrera 6 | 1942.5 m |
| Cajón 2-8: 0.65 m | Cajón 6-8: 0.62 m |           |          |
| Cajón 3-8: 0.65 m | Cajón 7-8: 0.61 m |           |          |
| Cajón 4-8: 0.65 m | Cajón 8-8: 0.65 m |           | 1951.5 m |

Tabla 15: Carreras 5 y 6 agrupadas por su continuidad con una longitud total de 8,35 m correspondiente al Pozo YPF.Nq.PTu.x-1.

## Carrera 5

Cajón 1: se distingue una fractura a una profundidad de 1041,68 m con altura aparente de 1 cm y una apertura de 3,3 mm. La terminación de ambos extremos es hacia afuera del testigo; presenta una forma irregular con paredes suaves. Se distingue cemento carbonatico obturando el 100% de la fractura, reacciona fuertemente al HCl. Azimut N315°.

Cajón 1: en el tramo 4 se encuentra una fractura horizontal con una apertura de 1,75mm. Al igual que en la anterior, la terminación es hacia afuera del testigo

corona, de forma irregular con paredes suaves. Se encuentra totalmente rellena por cemento calcítico. Azimut N315°.

Cajón 2: la fractura se encontró a 1040,84 m de profundidad, con altura de 30 cm y una apertura de 0,4 mm; de forma irregular con paredes suaves. El interior de la misma se encuentra 100% relleno por cemento calcítico. Azimut N 345°.

## Carrera 6

Cajón 2: la fractura se encuentra a una profundidad de 1950,85 m con una altura aparente de 10 cm y una apertura de 0,5 mm, con un ángulo de 45° con paredes suaves y forma planar curvo. Se encuentra totalmente rellena por cemento calcítico y otro no identificado de coloración oscura. Azimut N 345°.

Cajón 5: esta última fractura fue hallada a una profundidad de 1947,62 m, con una altura aparente de 31 cm y una apertura de 1,15 mm. De forma irregular planar escalonada, con paredes suaves. Se observa cemento calcítico ocupando el 100% de la apertura. Azimut N 345°.

|             | Fracture<br>Kinematic<br>aperture (mm) | Cumulative<br>Number | Cumulative<br>frequency<br>(fracs/m) |                     |
|-------------|--|----------------------|--------------------------------------|---------------------|
| Carrera 5-6 | 3,3                                    | 1                    | 0,07692308                           | Pozo YPF.Nq.PTu.x-1 |
|             | 1,75                                   | 2                    | 0,15384615                           |                     |
|             | 1,15                                   | 3                    | 0,23076923                           |                     |
|             | 0,5                                    | 4                    | 0,30769231                           |                     |
|             | 0,4                                    | 5                    | 0,38461538                           |                     |
|             | 0,075                                  | 6                    | 0,46153846                           |                     |

Figura 47: cuadro resumen 2a: muestra el ordenamiento de los anchos de banda en mm y su frecuencia acumulativa para las carreras 5 y 6 del pozo YPF.Nq.PTu.x-1.

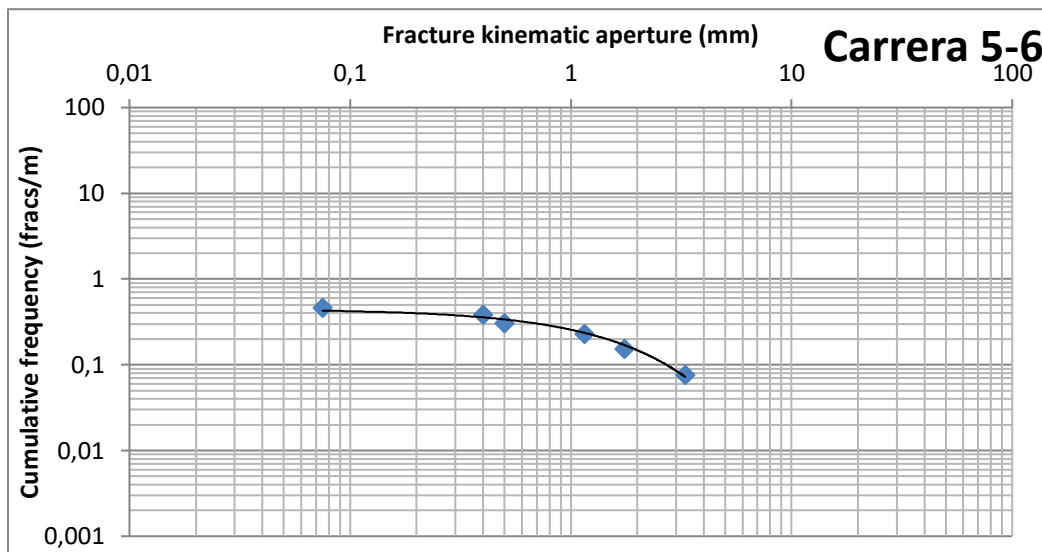


Figura 48: cuadro resumen 2b: cuadro doble logarítmico que representa la relación entre frecuencias acumulativas en fracturas/m y la apertura cinemática de fracturas en mm para las carreras 5 y 6 del pozo YPF.Nq.PTu.x-1 (Mb. Pelítico Inferior). Se observa un comportamiento mucho más tendido de la curva respecto de los casos anteriores.

Los cortes delgados pertenecen al pozo Pp.Nq.PTu.a-1002 a profundidades de 744,9 m, 746,5 m y 597,43 m. La observación fue realizada en un microscopio electrónico con cámara adosada junto con el programa Image- Pro Plus; se trabajó con varios aumentos para obtener mayor detalle de las diferentes estructuras y se tomaron varias fotografías (figuras 49 y 50).

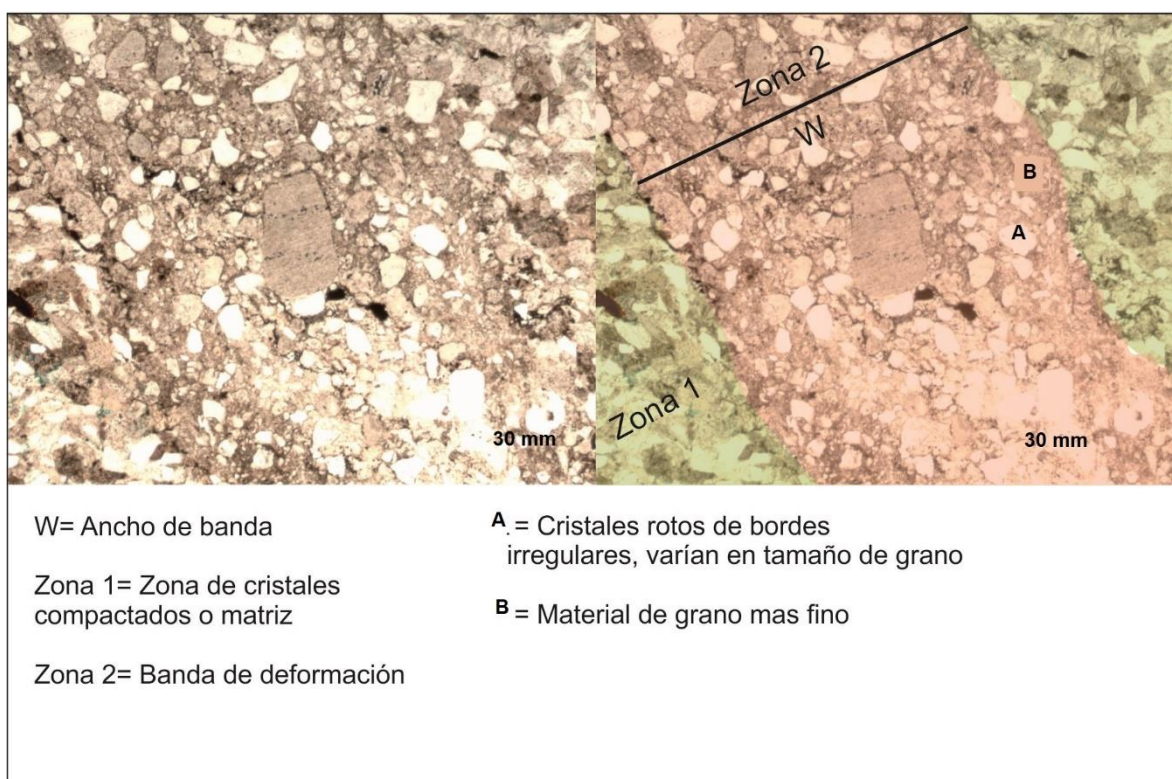


Figura 49: Corte delgado del testigo corona correspondiente al pozo Pp.Nq.PTu.a-1002 a 744.9 metros de profundidad.

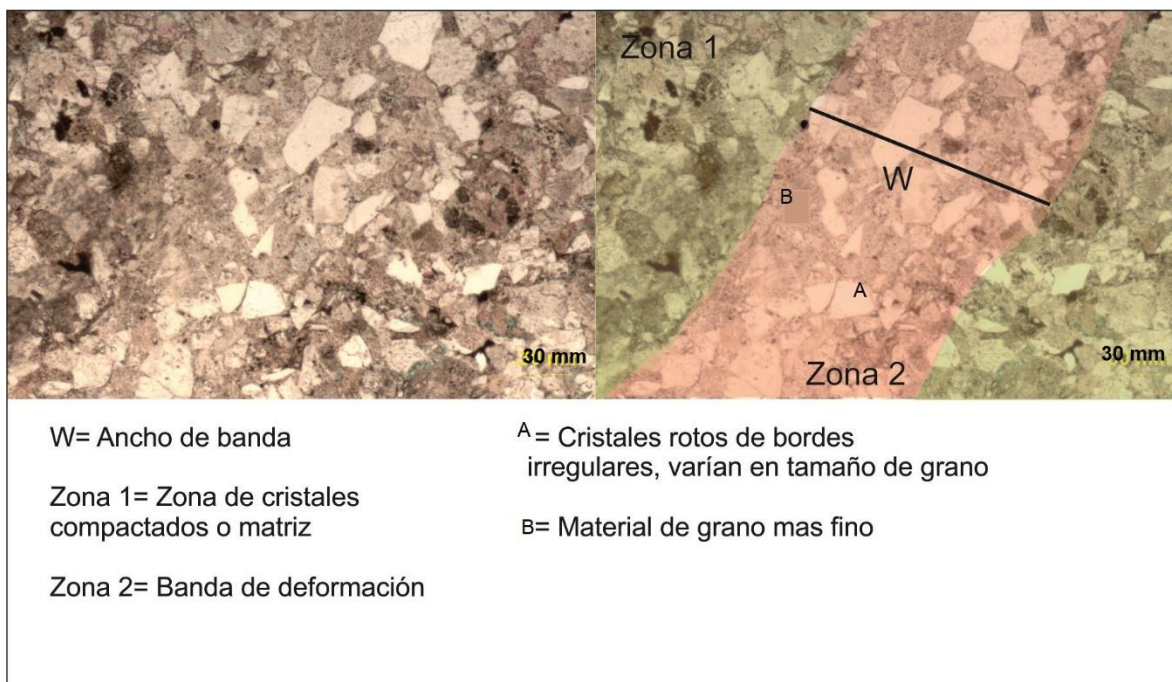


Figura 50: Corte delgado del testigo corona correspondiente al pozo Pp.Nq.PTu.a-1002 a 746,5 metros de profundidad.

Se realizó un paneo general de los perfiles de imágenes correspondientes a los pozos PLU.Nq.ChB.x-1001 y PLU.Nq.FCh.x-1. con una longitud total de 220 y 765 m respectivamente. Ambos cuentan con dos tipos de fracturas, conductivas y resistivas, además de microfallas. Las mediciones del RBZ fueron efectuadas con un transportador; los datos obtenidos se volcaron en una tabla Excel para ser graficados en un cuadro doble entrada **espaciamiento** (diferencia de las fracturas ordenadas de mayor a menor) vs. **frecuencia acumulada** (número de fracturas/ longitud de la imagen de pozo) (figuras 51 y 52).

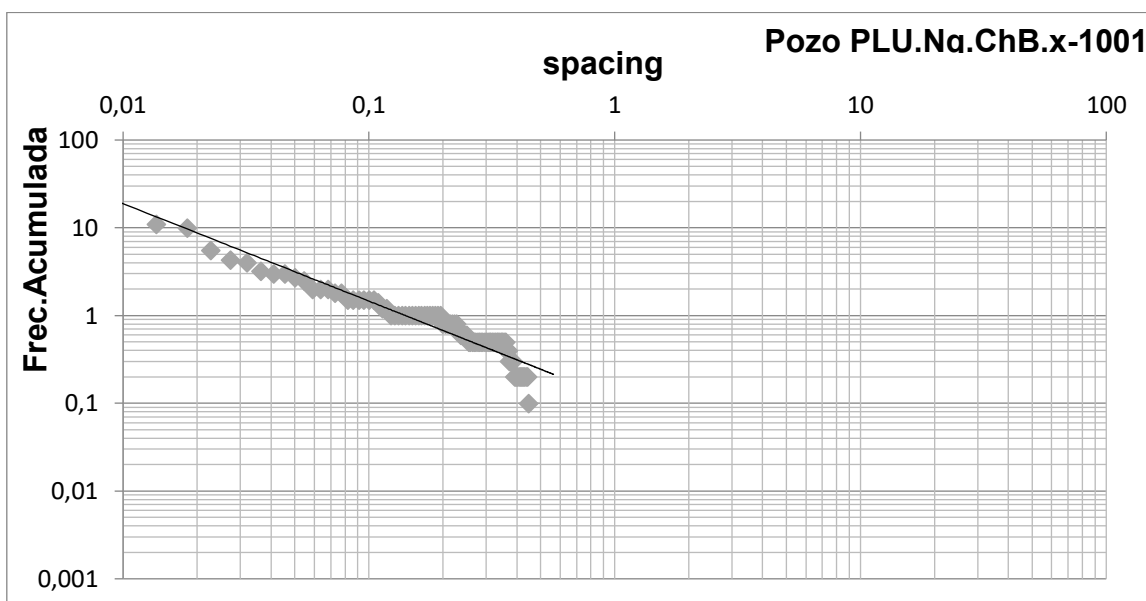


Figura 51: Cuadro doble logarítmico que representa la relación entre frecuencias acumulativas en fracturas/m y el espaciamiento entre fracturas del pozo PLU.Nq.ChB.x-1001.

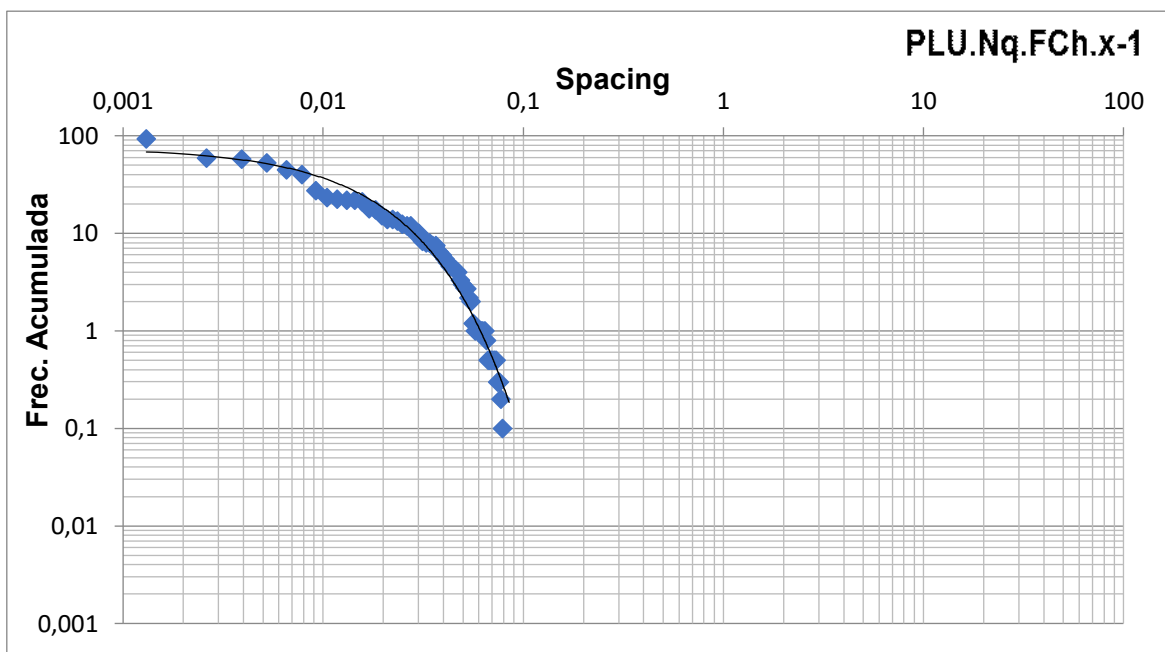


Figura 52: Cuadro doble logarítmico que representa la relación entre frecuencias acumulativas en fracturas/m y el espaciamiento entre fracturas del pozo PLU.Nq.FCh.x-1.