

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL COMAHUE
FACULTAD DE INGENIERÍA



Trabajo Final de Licenciatura en Ciencias Geológicas.

“Análisis sismoestratigráfico de la Fm. Vaca Muerta, en el área Loma Jarillosa Este, Cuenca Neuquina”.

ALUMNA: Garrone, Marina LEGAJO: 1668

DIRECTOR ACADÉMICO: Carlos Arregui

CO DIRECTORA ACADÉMICA: Sheyla Elian Iglesias

FECHA: Diciembre 2018

1. Resumen

Este trabajo está enfocado en la descripción, análisis y comprensión de los procesos geológicos que generaron la variabilidad de facies dentro de la Fm. Vaca Muerta, en el área Loma Jarillosa Este, utilizando como herramientas la Interpretación Sísmica y la aplicación de los principios de Estratigrafía Secuencial. Para realizar dicho estudio, se contó con un volumen sísmico de amplitud PSTM del área en cuestión y 7 pozos (incluyendo perfiles registrados), que se encuentran dentro del área. Se realizó una interpretación de los principales rasgos estructurales y estratigráficos, correlación entre los pozos, propagación de los horizontes seleccionados y generación de mapas isócronos, isocronopáquicos y de atributos sísmicos. Además se realizó un análisis detallado de la correlación de pozos haciendo hincapié en las variaciones de la curva de nivel de base (transgresión-regresión).

El análisis realizado permitió caracterizar a la Fm Vaca Muerta, dentro del contexto regional de la Cuenca Neuquina y a su vez realizar una caracterización sismo-estratigráfica mediante la integración de los datos sísmicos con los datos de pozo (Gamma Ray, Resistividad, Sónico, Densidad y SP).

Este trabajo fue realizado con el apoyo de la Subsecretaría de Minería e Hidrocarburos de la Provincia del Neuquén, quien cedió los datos de sísmica y pozos y de la empresa Halliburton, quien brindó el software Decision Space, por convenio con la Universidad Nacional del Comahue.

Palabras claves: Cuenca Neuquina, Fm. Vaca Muerta, análisis sismo-estratigráfico.

2. ABSTRACT

This study is focused on the description, analysis and understanding of the geological processes that generated the variability of facies within the Vaca Muerta Formation, in Loma Jarillosa Este area, in which Seismic Interpretation tools and application of the principles of Sequence Stratigraphy were used. To carry out this study, a PSTM amplitude volume of the area and seven wells (including well logs) were used, which were located within the area. In order to achieve this, the following procedures were carried out: a) an interpretation of the main structural and stratigraphic features b) correlation among the wells c) propagation of the selected horizons d) generation of isochronous maps e) generation of time-thickness maps and seismic attributes maps. In addition, a detailed analysis of the wells correlation was made, emphasizing the variations of the base level curve (transgression-regression).

The analysis allowed the characterization of the Vaca Muerta Fm., within the regional context of the Neuquén Basin and, at the same time, a seismic-stratigraphy characterization making correlation between seismic and well data was made. (Gamma Ray, Resistivity and Sonic).

This work was carried out with the support of the Subsecretaría de Minería e Hidrocarburos de la Provincia del Neuquén, who provided the seismic and well data and of the Halliburton company, who provided the Decision Space software, by agreement with the Universidad Nacional del Comahue.

Key words: Neuquén Basin, Vaca Muerta Fm., seismic-stratigraphic analysis.

3. Agradecimientos

- A la Universidad Nacional del Comahue en la que pude formarme como profesional gratuitamente.
- A todos los profesores que dictan clases para la carrera de Lic. en Ciencias Geológicas, los cuales trabajan día a día para que esta carrera se dicte de la mejor manera posible.
- A mi director de tesis Calor Arregui y a mi co- directora Sheyla Iglesias, quienes me guiaron este trabajo, brindando su tiempo, conocimientos y su excelente calidad humana.
- Al jurado evaluador de este trabajo, Santiago Benotti, Luis Mas y Nicolás Carrizo Paez, por brindar su tiempo para corregir y mejorar mi trabajo final.
- A la Subsecretaría de Minería e Hidrocarburos de la Provincia del Neuquén, la cual brindó los datos de sísmica y pozos.
- A la empresa Halliburton, quien brindó el software Decision Space.
- A la Fundación YPF, la cual me otorgó una beca de mérito durante mi carrera, y a mi tutor Diego Velo por su colaboración con este trabajo.
- A mis compañeros y amigos que hicieron muy ameno mi paso por la Universidad.
- A mi novio y mi familia por el apoyo incondicional en estos años.

Indice

1.	Resumen.....	II
2.	ABSTRACT.....	III
3.	Agradecimientos	IV
4.	INTRODUCCIÓN.....	6
4.1.	Objetivos.....	6
4.2.	Área de estudio.....	6
4.3.	Cuenca Neuquina.....	8
4.4.	Marco Estructural	10
4.5.	Marco Estratigráfico.....	11
5.	MARCO TEÓRICO.....	15
5.1.	Interpretación sísmica.....	15
5.2.	Perfilaje.....	24
5.3.	Estratigrafía secuencial.....	28
6.	Metodología.....	32
7.	Desarrollo y Resultados.....	33
7.1.	Análisis de los datos de pozo.....	33
7.2.	Atado de pozos y rotación del dato sísmico.....	34
7.3.	Resolución vertical	35
7.4.	Interpretación estructural.....	35
7.5.	Correlación entre registros de pozo	37
7.6.	Interpretación de horizontes	38
7.7.	Crossplot entre registros de pozo	40
7.8.	Descripción de secciones.....	43
7.9.	Mapas isocronopáquicos	45
7.10.	Mapas de atributos.....	48
7.11.	Análisis sismoestratigráfico.....	50
8.	Conclusiones.....	52
9.	Bibliografía	53

4. INTRODUCCIÓN.

La Cuenca Neuquina se ubica en el centro oeste Argentino, abarca casi toda la extensión de la provincia de Neuquén, el sector occidental de la provincia de Río Negro y La Pampa y la zona suroccidental de la provincia de Mendoza. Su relleno está constituido por 7000 m de sedimentos Jurásicos y Cretácicos, los cuales conforman una secuencia cíclica de depósitos marinos intercalados con etapas de continentalización. (Arregui et al 2011).

En esta cuenca productora de gas y petróleo, en los últimos años se comenzaron a desarrollar yacimientos No Convencionales, con el objetivo de explotar la Fm. Vaca Muerta, roca madre clásica de la cuenca. Esta unidad fue descrita por Weaver (1931) el cual la definió como margas bituminosas del Tithoniano (Jurásico tardío), está compuesta por lutitas bituminosas oscuras, margas y calizas, que fueron depositadas por una ingesión marina proveniente desde el océano paleopacífico entre el Tithoniano temprano hasta el Valanginiano temprano (Legarreta y Uliana, 1991). La formación está ampliamente distribuida ocupando un área de 120000 km² (Leanza et al., 1977; Uliana et al., 1977) y es considerada como la mejor roca madre ya que es la fuente que generó el 75% de los hidrocarburos en el país (Uliana et al., 1999).

Debido al gran interés en esta unidad se han desarrollado numerosos trabajos de investigación los cuales exponen la variabilidad litológica de la unidad puesta de manifiesto desde diferentes tipos de información y a distintas escalas.

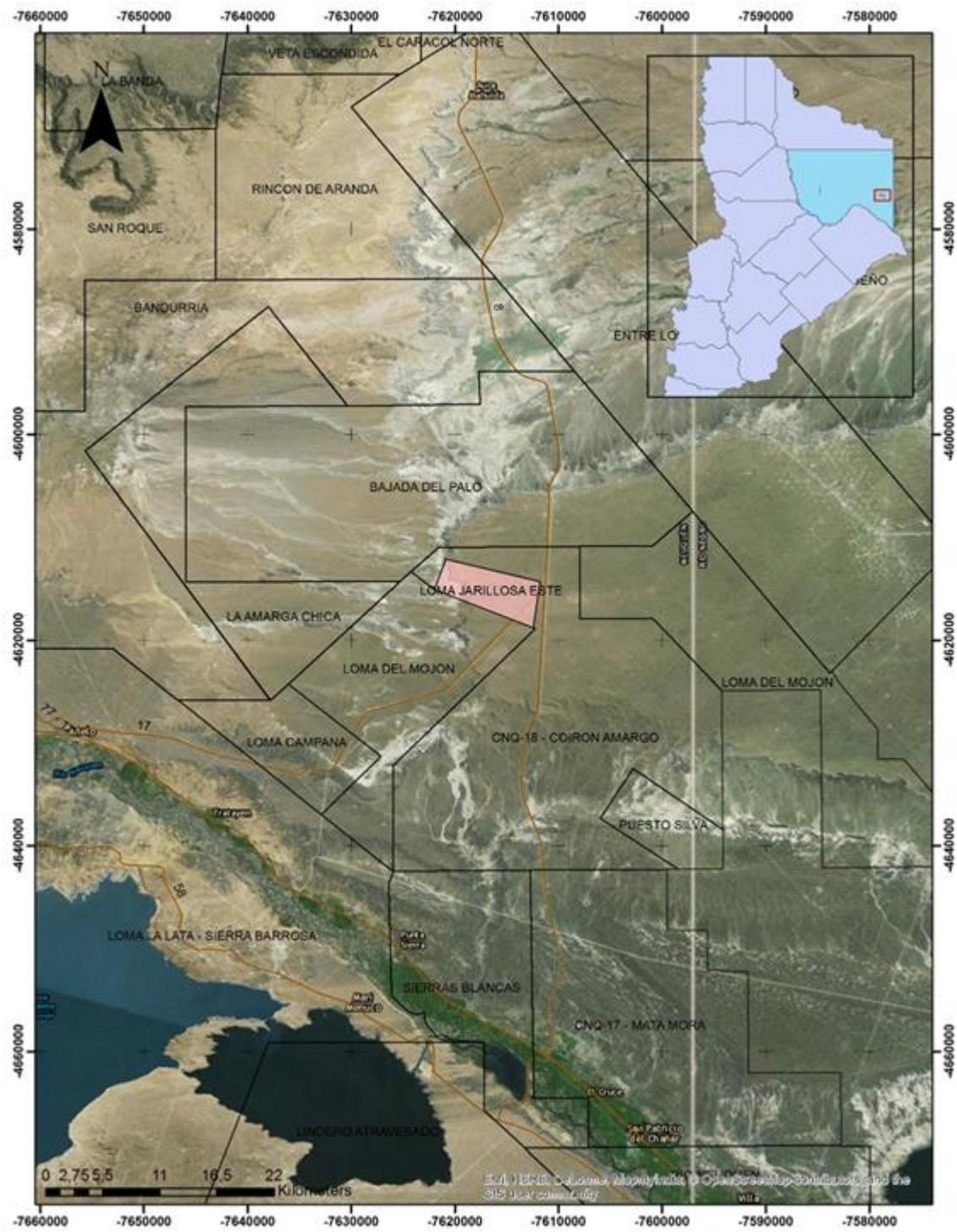
Este trabajo estuvo enfocado en las variaciones litológicas de la Fm. Vaca Muerta, en el área Loma Jarillosa Este, utilizando como herramientas la interpretación sísmica y la estratigrafía secuencial. La información utilizada en este trabajo, volumen sísmico de dicha área y siete pozos con sus respectivos perfiles, fue cedida por la Subsecretaría de Minería e Hidrocarburos de la provincia de Neuquén a través de un convenio con la Universidad Nacional del Comahue.

4.1. Objetivos.

El objetivo general de este trabajo final es la descripción y comprensión de los procesos geológicos que generaron la variabilidad de facies dentro de la Fm. Vaca Muerta. Lo que aportará un mayor conocimiento sobre la distribución de variaciones dentro de dicha formación, permitiendo generar predicciones más acertadas de la unidad en subsuelo.

4.2. Área de estudio.

El área de estudio, llamada Loma Jarillosa Este, se encuentra aproximadamente a 100 km de la ciudad de Neuquén y a 20 km de la localidad San Patricio del Chañar. Abarca un total de 66,1 Km² dentro de la Cuenca Neuquina en el sector oriental del bajo de Añelo y dentro del Flanco oriental del Engolfamiento. (Mapa 1)



Mapa 1. Área de estudio.

4.3. Cuenca Neuquina.

El sustrato de la cuenca fue conformado por la colisión de tres terrenos que se amalgamaron a Gondwana, Cuyania en el Ordovícico Medio-Tardío (Astini 1996), Chilenia colisionó durante el Devónico Tardío (Ramos et al. 1986) y por último la Patagonia en el Carbonífero Tardío o Pérmico Temprano (Rapalini et al. 2010). El basamento de la Cuenca Neuquina está formado por rocas ígneas y metamórficas, las principales unidades son Fm. Colohuincul, Piedra Santa, Ectinita Guaraco Norte y Mamil Choique. Las edades de estas formaciones corresponden a un periodo de transición entre el Ciclo fini-Famatiniano y principio del Ciclo Gondwánico. Luego se encuentra el Grupo Andacollo, compuesto por sedimentitas marinas, rocas volcánicas y volcanoclásticas de edad paleozoico superior. Posteriormente encontramos las rocas volcánicas del Grupo Choiyoi, emplazado durante el Pérmico y parte del Triásico (Llambías y Sato 2011).

La formación de la cubeta que dio lugar a la Cuenca Neuquina está relacionada con la fragmentación de Gondwana durante el Triásico- Jurásico Inferior, donde se formaron depocentros aislados que fueron rellenos por sedimentos volcanoclásticos del Ciclo Precuyano. Luego durante el Jurásico- Albiano se formó un margen convergente al oeste de la cubeta, conformado por la placa oceánica del proto- Océano Pacífico y la placa continental del occidente de Gondwana, a partir de entonces se empezó a formar un arco volcánico y la cubeta entró en un estadio de sag lo que generó espacio que fue ocupado por ciclos que comenzaron con intrusiones marinas procedentes del Océano Pacífico y su posterior continentalización y desecación, éstos ciclos comprenden el Grupo Cuyo, Lotena y Mendoza. En esta etapa la Cuenca Neuquina se puede clasificar como una cuenca de trasarco. A los 100 Ma. la placa de subducción se horizontalizó generando compresión y formando un frente orogénico en el Cenomaniano, el cual desconectó al engolfamiento neuquino del Océano Pacífico, cuya evidencia reside en los depósitos del Grupo Bajada del Agrio, que constan de depósitos clásticos y evaporíticos. Este frente orogénico a fines del Cretácico conformó la Cordillera de los Andes y aportó sedimentos que luego formaron parte los depósitos fluviales del Grupo Neuquén. Durante el Campaniano – Paleoceno, se depositó el Grupo Malargüe, su depositación estuvo controlada por la tectónica del Cretácico Tardío, la cual generó el cambio de pendiente hacia el este lo que permitió una intrusión marina desde el Océano Atlántico. En esta etapa la Cuenca Neuquina pasó de una cuenca de retroarco a una cuenca de antepaís, recibiendo aporte sedimentario mayoritariamente desde el oeste. (Figura 1)

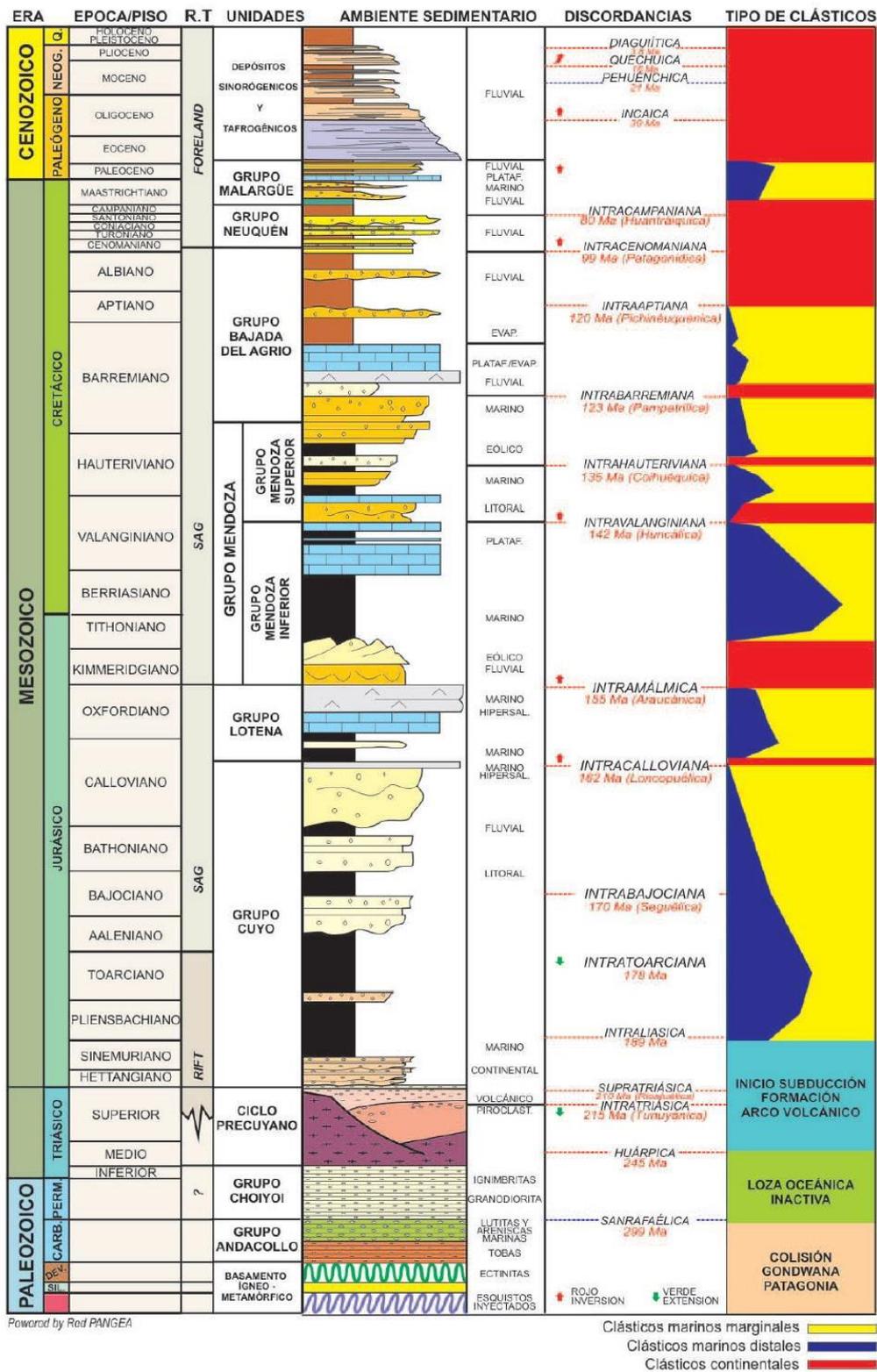


Figura 1. Columna estratigráfica de la Cuenca Neuquina (Extraído de Arregui et al. 2011).

4.4. Marco Estructural

El área Loma Jarillosa Este se encuentra dentro del flanco oriental de la Cuenca Neuquina, el cual ha sido caracterizado como un flanco de una cuenca de rift, que luego fue afectado por subsidencia térmica, teniendo como eje al Bajo de Añelo rasgo que controló la subsidencia entre el Jurásico Temprano y al menos el Paleógeno. Se reconocen en la etapa de subsidencia térmica dos etapas, una inicial que abarcó hasta el Jurásico superior (Kimmeridgiano) durante la cual la sedimentación se concentró al sur del río Colorado, y una posterior que se extiende aproximadamente hasta el Paleógeno, esta subsidencia térmica fue más generalizada y produjo el traslape de los sedimentos hasta el borde de cuenca. De esta forma los sedimentos pre-cretácicos presentan un fuerte acuñamiento en la zona del río Colorado en coincidencia con una zona de hinge que divide a la plataforma en dos sectores, uno sudoccidental que posee mayor inclinación de la discordancia rift – sag, y uno nororiental con un gradiente mucho menor. El sector más interno tiene una proporción mucho mayor de sedimentos de sag, mientras que al NE del hinge esta situación se invierte siendo mayor el espesor del relleno de rift en comparación con el de sag (Pangaro et al., 2011). Otros autores proponen al Bajo de Añelo y parte del Flanco Oriental como una cuenca de antepaís (Mosquera y Ramos 2006) que habría evolucionado desde el Cretácico en respuesta al apilamiento tectónico en la faja plegada.

El diseño estructural formado durante el Ciclo Precuyano condicionó y condiciona el modelo estructural actual. Cristallini (2009) definió para la parte oriental de la cuenca dos poblaciones bien marcadas de fallas pertenecientes al Precuyano; la primer población compuesta por fallas con direcciones azimutales superiores a 130° , en general acomodan grábenes y hemigrábenes profundos y de mayores dimensiones; La segunda población está compuesta por fallas con direcciones azimutales inferiores a los 110° , las cuales generan depocentros más pequeños y menos profundas. Estas dos direcciones son producto de la extensión en un sistema de rift oblicuo donde el borde del rift está dispuesto oblicuamente a la dirección de extensión. En este caso, los sistemas de fallas noroeste (Entre Lomas, Estancia Vieja) serían paralelos al borde del rift, mientras que los de orientación oeste-noroeste serían ortogonales a la dirección de extensión (Bechis 2009).

En la región del engolfamiento, las estructuras precuyanas presentan pequeñas reactivaciones jurásico-cretácicas que implican la propagación de una o varias fallas normales y la proliferación de fracturamiento tensional. Estas reactivaciones se pueden dividir en dos grupos, uno de ellos (reactivación tipo Entre Lomas o paralela) las fallas normales jurásico-cretácicas se desarrollan paralelas a las estructuras precuyanas (Figura 2). Este caso se da sobre fallas precuyanas de orientación noroeste. El otro grupo corresponde a las reactivaciones tipo Bandurria (o en echelón) en el que las fallas jurásico-cretácicas se disponen en echelón sobre las precuyanas que tienen dirección oeste-noroeste. En ambos casos, las fracturas jurásico-cretácicas tienen la misma dirección noroeste.

El mecanismo de subsidencia diferencial puede explicar muy bien la disposición en corte de las fallas normales jurásico-cretácicas concentradas sobre las precuyanas. Sin embargo, subsiste un problema en su disposición en planta, especialmente para explicar la geometría escalonada (en echelón) que presentan en algunos casos. Este hecho es explicado por la superposición de un campo de esfuerzos regional durante el Jurásico Superior y Cretácico Inferior, en que el esfuerzo principal máximo (σ_1) estuvo en la vertical, el intermedio (σ_2) en la dirección noroeste y el mínimo (σ_3) en la dirección noreste, y un campo local producido por la subsidencia diferencial. El primero controló las direcciones y el segundo los agrupamientos de fallas. (Cristallini et al., 2009)

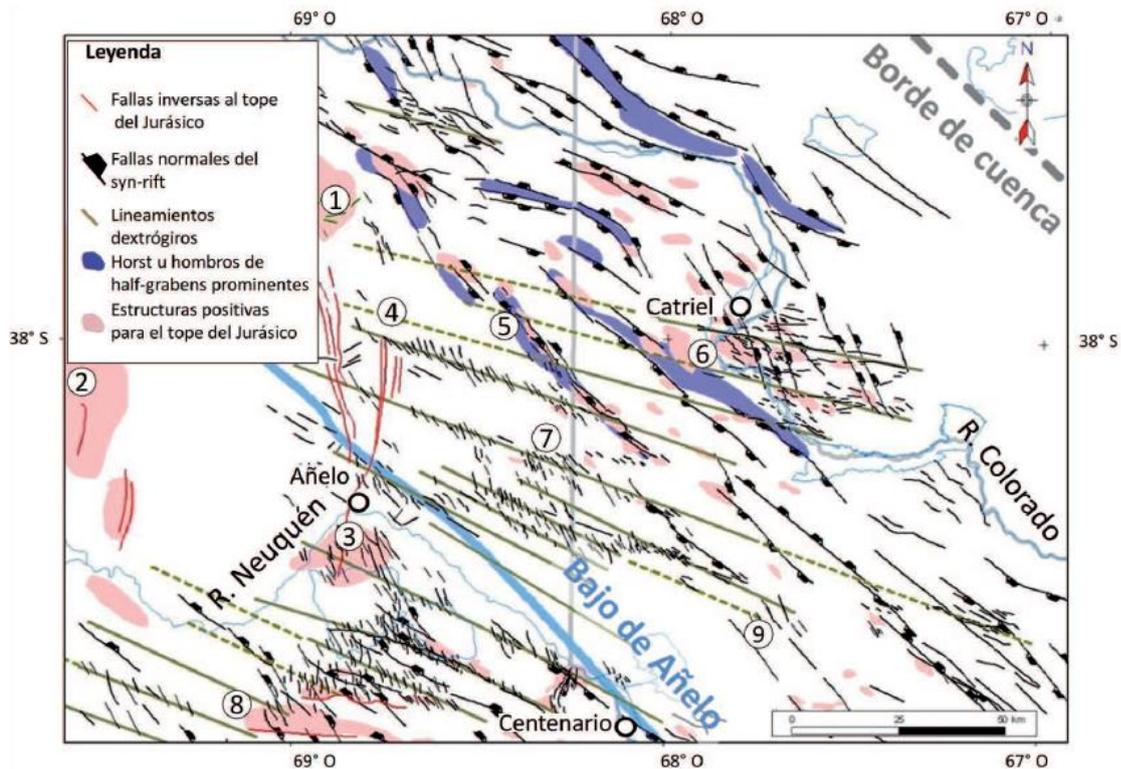


Figura 2. Superposición de las estructuras mapeadas al tope del Precuyano y basamento con los sistemas de fallas mapeados para el tope del Jurásico. Se destacan los sistemas de fallas en echelón para el tope del Jurásico. 1. Volcán Auca Mahuida. 2. Dorso de los Chihuidos. 3. Alto de Sauzal Bonito. 4. Aguada San Roque. 5. Alto Entre Lomas. 6. Medanito – 25 de Mayo. 7. Coirón Amargo. 8. Aguada Toledo. 9. Alto de Kauffman. (extriada de Pángaro et al., 2011)

4.5. Marco Estratigráfico.

La Fm. Vaca Muerta fue definida por Weaver (1931) como margas bituminosas del Tithoniano, su denominación actual, fue propuesta por Fosa Mancini et al. (1938). Está compuesta por lutitas bituminosas oscuras, margas y calizas, depositadas en respuesta a una transgresión marina rápida y generalizada, originaria del Océano Pacífico, como consecuencia de una fase tectónica de relajación compresional (Legarreta y Uliana, 1991).

Mitchum y Uliana (1982,1985) distinguieron 8 secuencias depositacionales dentro del Tithoniano – Valanginiano Temprano, en el sentido de Vail (1977). La secuencia basal representa la máxima transgresión, sobre la cual se desarrollan progradaciones, desde el sector austral hacia el norte. Gulisano (1984) también describió 8 secuencias depositacionales (A1-A8) para el mismo intervalo de tiempo, las cuales muestran una tendencia progradacional de sur a norte, con migración del margen de plataforma hacia el centro de la cuenca, reduciéndose el área de la sedimentación profunda.

En un trabajo reciente, llamado Transecta regional de la Fm. Vaca Muerta, se construyó un modelo estratigráfico integrado, construido a partir del análisis sismoestratigráfico de tres transectas. En este modelo se dividió al intervalo Tithoniano- Valanginiano en 6 unidades sísmicas, subdivididas por horizontes prospectivos, dando como resultados 12 intervalos sísmicos (Figura (Gonzales, G., et al., 2016). En este trabajo se destina un capítulo al área Coirón Amargo, vecina al área aquí analizada, en el cual menciona que la Fm. Vaca Muerta posee un espesor aproximado de 130 metros y de acuerdo a los mapas regionales de madurez térmica el área se encuentra dentro de la ventana de petróleo, (Figura 5) (Legarreta y Villar, 2012). La Fm. Vaca Muerta está representada por los intervalos T1-T2, T2-T3

y parte del intervalo T5, indicados en dicho trabajo. El intervalo T1-T2 está compuesto por fangolitas calcáreas bituminosas con laminación irregular y concreciones, el intervalo T2-T3 posee fangolitas calcáreas con laminación ondulosa y bajo a moderado grado de bioturbación, al igual que el intervalo T3-T5. El área analizada en este trabajo se encuentra en una posición proximal de ciclo Tithoniano-Valanginiano donde se desarrollan geometrías deposicionales llamadas *topset* correspondientes a zonas proximales y someras con superficies casi horizontales y *foreset* con mayor pendiente, definidas en (Gonzalez et al., 2016).(Figura 4)

En cuanto a la paleogeografía del área estudiada, según Legarreta y Uliana (1991), durante el Títoniano temprano- medio predominaron facies de cuenca profunda y luego, debido a la variación del nivel de mar comenzaron a depositarse facies más proximales.(Figura 6 y 7)

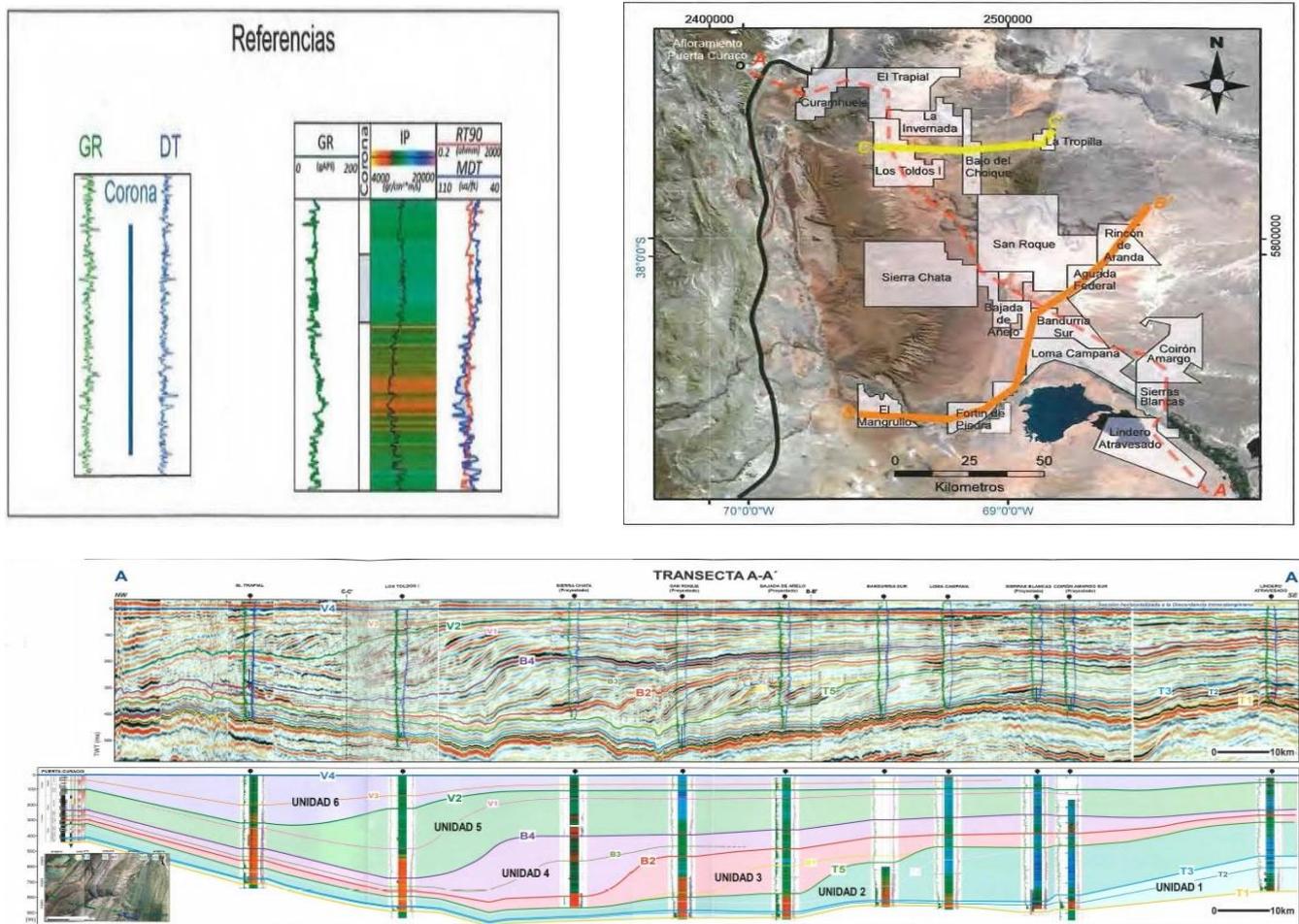


Figura 3. Integración sísmica, registro de pozos y afloramientos, de la Fm. Vaca Muerta en la Transecta A-A (Extraído de Gonzales, G., et al. 2016)



Figura 4 Segmentos de una clinoforma: Topset en la zona proximal con superficies casi horizontales, foreset en la zona central con mayor pendiente y bottomset en la zona distal con el desarrollo de superficies paralelas.

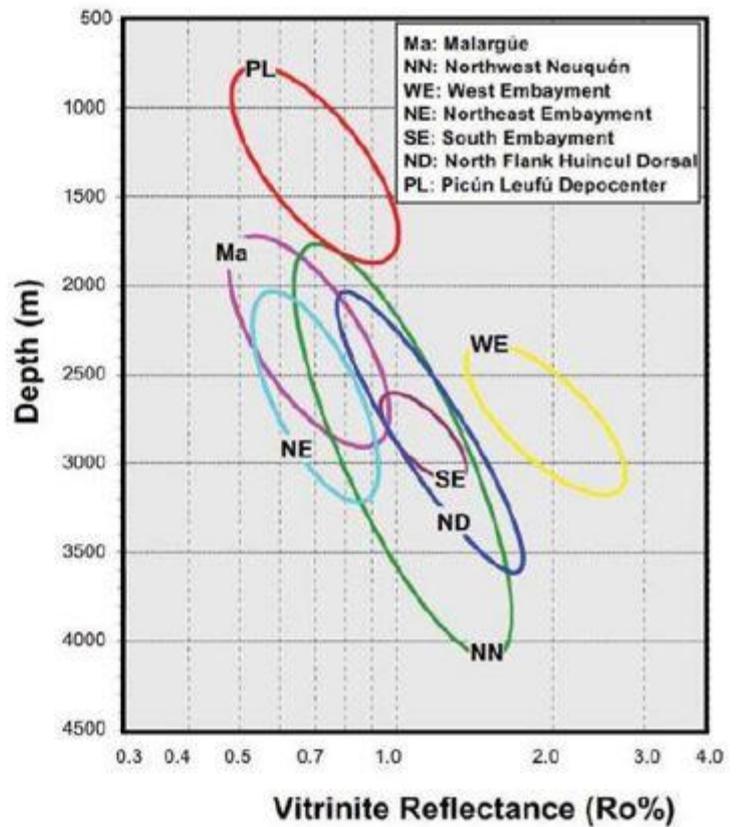
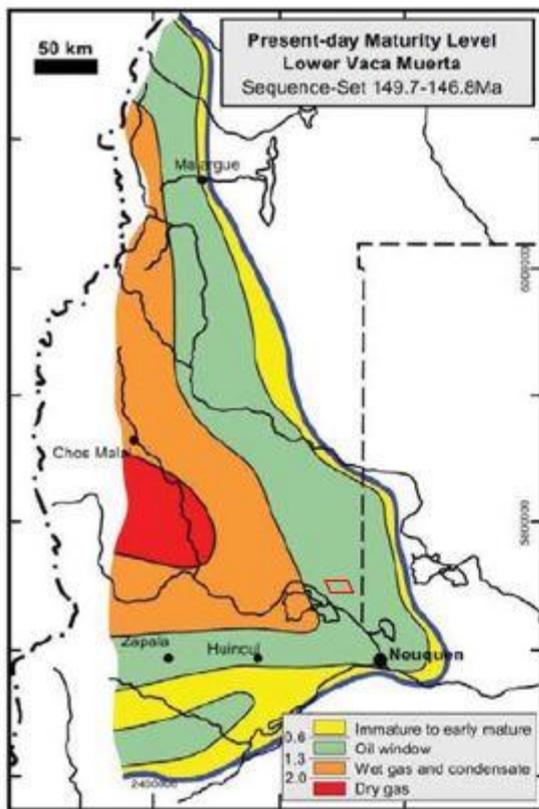


Figura 5. Izquierda: nivel de maduración actual, referido principalmente a la *sección inferior de Vaca Muerta*. Derecha: gráficos que muestran la profundidad (m) vs. Reflectancia de Vitrinita (Ro%) obtenida para diferentes áreas. (Extraído de Legarreta y Villar, 2012)

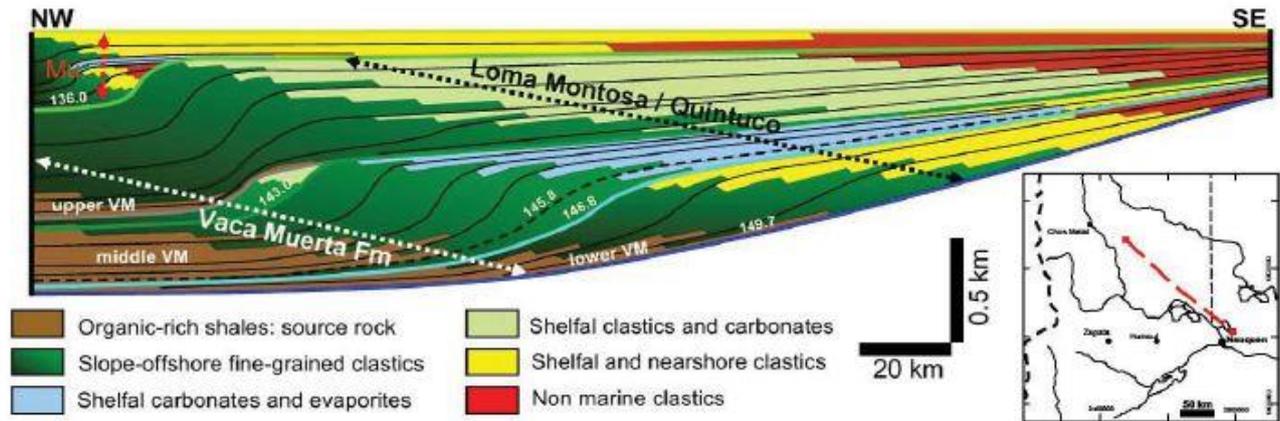


Figura 6. Sección transversal esquemática que ilustra la configuración interna, los límites del conjunto de secuencias principales, edades y facies. (Extraído de Legarreta y Villar 2012.)

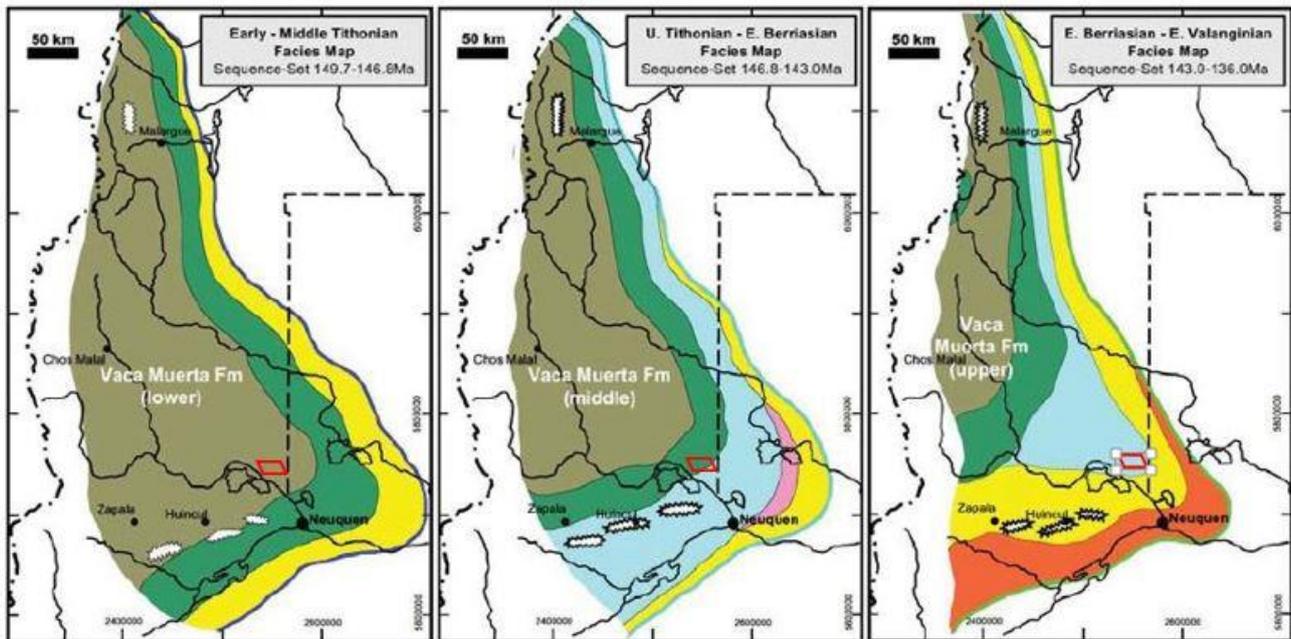


Figura 7. Mapas paleogeográficos que ilustran la distribución de facies para las secuencias analizadas en la Fig 6 (basado en Legarreta y Uliana, 1991). (Extraído de Legarreta y Villar 2012)

5. MARCO TEÓRICO.

5.1. Interpretación sísmica.

5.1.1. Sísmica de reflexión

Un volumen sísmico se obtiene aplicando el método de exploración llamado Sísmica de reflexión, el cual se basa en las Leyes de Snell, Principio de Fermat y Fresnel-Huygens. El método consiste en medir el tiempo de tránsito de un frente de onda, generado en la superficie a través de una fuente de energía apropiada (Vibratoria o explosiva), el cual se refleja en las interfaces del subsuelo y vuelve a la superficie donde es captado por sensores (geófonos) tendidos sobre el terreno con la disposición adecuada. Cada sensor recibe la respuesta de todas las interfases, generando así una traza sísmica en cada punto común profundo que se registró, lo que resulta en un registro sísmico de reflexión, que representa las interfases entre capas de distintas impedancias acústicas. Con el posterior procesamiento de los datos registrados se obtiene un volumen sísmico (en tiempo) que representa el diseño de la evolución geológica en el subsuelo.

5.1.1.1. Principio de Fermat:

“El trayecto seguido por la luz al propagarse de un punto a otro es tal que el tiempo empleado en recorrerlo es un mínimo”

El principio de Fermat permite derivar la ley de Snell, ya que, la luz va de un punto a otro, e incluso cuando cambia de medio, siempre va por el camino donde emplea menos tiempo, incidiendo y saliendo con los ángulos dados por la Ley de Snell.

5.1.1.2. Leyes de Snell

Cuando un frente de onda incide sobre un interfaz de contraste entre dos medios caracterizados por velocidades V_1 y V_2 , incidirá con un ángulo de incidencia θ_1 en el medio 1, en el caso de que se refleje lo hará con un ángulo igual θ_1 en el medio 1 y si se refracta se emitirá con un ángulo de refracción θ_2 en el medio 2, cuyo valor puede obtenerse mediante la ecuación siguiente llamada Ley de refracción y reflexión. (Figura 8)

$$\frac{\text{Sen } \theta_1}{V_1} = \frac{\text{Sen } \theta_2}{V_2}$$

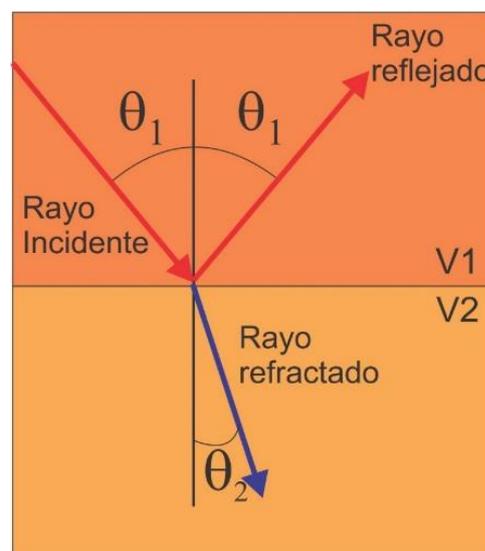


Figura 8. Ley de refracción y reflexión.

Caso Particular de la Ley de Snell

Cuando el ángulo de incidencia es mayor o igual al ángulo crítico, el rayo no puede refractarse y se refleja totalmente en la interfase, siendo θ_2 es igual a 90° . Esta situación será posible solo cuando V_2 sea mayor a V_1 . (Figura 9)

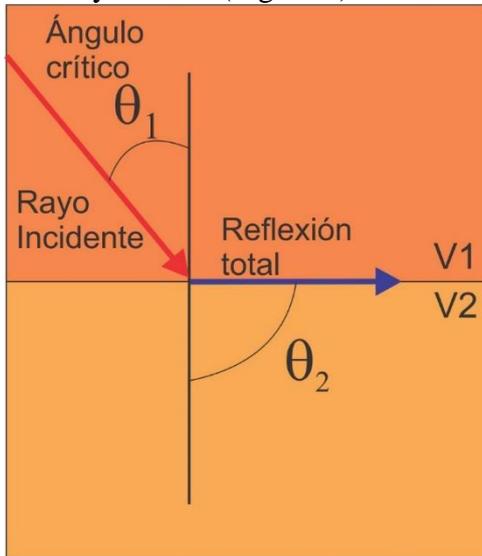


Figura 9. Caso particular de la ley de Snell.

5.1.1.3. Principio de Fresnel-Huygens:

Afirma que todo punto de un frente de onda inicial puede considerarse como una fuente de ondas esféricas secundarias que se extienden en todas las direcciones con la misma velocidad, frecuencia y longitud de onda que el frente de onda del que proceden.

5.1.1.4. Impedancia acústica:

El método es sensible a la variación de impedancia acústica en el subsuelo, definida como la resistencia que presenta un medio a ser atravesado la cual está dada por los cambios de la densidad y la velocidad en el mismo, ecuación 1, a su vez estos parámetros dependen de la porosidad, litología, tipo de fluido dentro de la roca, estado de compactación, temperatura, entre otros, lo que resulta de utilidad para predecir variaciones en secciones y mapas de dichos parámetros. La magnitud de los contrastes de impedancias entre las rocas se denomina Coeficientes de Reflexión R , es la fracción de energía sísmica que se refleja en la interfase y resulta del contraste de impedancias acústicas, ecuación 2.

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

Z : Impedancia acústica

V : velocidad [m/seg]

ρ : densidad [gr/cm³]

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

Z_1 = Impedancia del medio 1 Z_2 = Impedancia del medio 2

5.1.1.5. Diseño

El volumen sísmico 3D utilizado en este trabajo fue realizado por la compañía GEOTRA S.A para PLUSPETROL S.A, en el año 2004. Para llevar a cabo el método de sísmica de reflexión se debe diseñar el dispositivo de adquisición del proyecto, que consiste en la geometría apropiada de las líneas fuentes y líneas receptoras. Para un efectivo diseño que nos brinde información estructural y estratigráfica, se debe tener en cuenta la siguiente información: Grado de resolución requerida, orientación de anomalías estratigráficas, profundidad del objetivo, composición litológica del objetivo y de las litologías subyacentes y suprayacentes, orientación de los trenes estructurales del área de estudio, velocidades, geología y topografía de la zona. Para la registración del área Loma Jarillosa Este se utilizaron los parámetros descriptos en la Tabla 1.

Total líneas receptoras	30
Total estaciones receptoras	3670
Intervalo entre líneas receptoras	300m
Intervalo entre puntos receptores	60m
Total de líneas fuente	34
Total de puntos fuente	3062
Intervalo de líneas fuente	360
Intervalo entre puntos fuente	60
N° de puntos fuente por salvo	5
N° canales tendido completo	1440
Fold	60
Tamaño bin	30x30m
Max. offset	3985 m
Min. offset	30m
Número de canales por línea	

Tabla 1

5.1.1.6. Adquisición

Para llevar a cabo la registraci3n se necesita una fuente de energa, ge3fonos, los cuales tienen la funci3n de generar una tensi3n el3ctrica an3loga a la componente vertical del movimiento del suelo, y un sistema de transmisi3n para hacer llegar la energa el3ctrica al equipo de registraci3n o sism3grafo. A continuaci3n se detallan los par3metros correspondientes a la adquisici3n del proyecto Loma Jarillosa Este.

Par3metros de recepci3n

Tipo de arreglo	Lineal
Centro de arreglo	Estaca
Cantidad de ge3fonos por estaca	12

Par3metros de emisi3n

Tipo de arreglo	Lineal
Centro del arreglo	Estaca
N3 de vibros	4
Arreglo de emisi3n	4 vibros cada 11mts
N3 de barridos	2
Longitud del barrido	12 seg
Tiempo de escucha	6 seg
Frecuencia	10-100 Hz

5.1.1.7. Procesamiento

Consiste en la aplicaci3n de una serie de algoritmos matem3ticos para el ordenamiento, correcci3n y aplicaci3n de par3metros a los datos adquiridos en el campo, para obtener un dato s3smico de calidad, preservando las altas frecuencias y separando los eventos s3smicos no deseados (ruidos).

Secuencia b3sica de procesamiento



Geometría de adquisición: Consiste en asignar a cada estación su correspondiente coordenada (x.y.z)

Edición de trazas: Se eliminan aquellas trazas que presentan ruidos o malas conexiones.

Lectura de los primeros arribos: Los primeros arribos corresponden a ondas directas y refractadas, brindan información sobre la capa de weathering, conformada por un intervalo superficial de material poco consolidado y de baja velocidad de propagación de ondas, la cual provoca fuertes distorsiones y retardos en los tiempos medidos. El límite de esta capa es definido por la velocidad de propagación de ondas, siendo 1800 m/s el límite entre weathering y suweathering.

Enmudecimiento frontal: En este procedimientos se eliminan los primeros arribos de las ondas directas y refracciones, para que no se superpongan con a las reflexiones de horizontes someros.

Recuperación de amplitudes: Se corrige la pérdida de amplitudes debido a la absorción de los materiales y al decaimiento del frente de ondas con la distancia.

Correcciones estáticas: Tienen como objetivo eliminar la influencia de la topografía y de la capa de weathering, y referir los tiempos a un plano de referencia. (Figura 10)

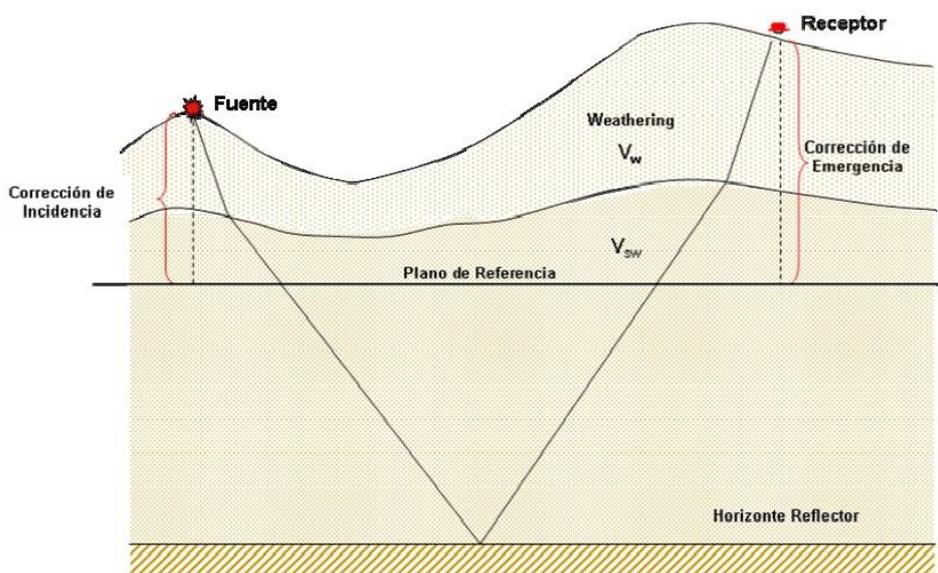


Figura 10. Esquema de correcciones estáticas. Extraído de los apuntes de la cátedra de Geofísica

Agrupamiento por familias de trazas (Gathers): Este ordenamiento consiste en agrupar las trazas que por geometría pertenecen al mismo punto común profundo. Se deduce que el espaciado en PCP es la mitad del espacio entre receptores y que las reflexiones en los gathers poseen trayectorias hiperbólicas.

Corrección Dinámica: Tiene por objetivo horizontalizar las hipérbolas de reflexión y colocar en fase las distintas reflexiones de cada familia de punto común profundo. Se llevan todos los eventos a tiempos de ida y vuelta vertical como si fuente y receptor estuviesen juntos, calculando las diferencias de tiempo entre cada trayectoria oblicua y la normal a la capa, lo que constituye la corrección por Retardo Normal (NMO o Normal Move Out).

Apilamiento o suma (Stack): Al haber conseguido dejar en fase las reflexiones y desfasados los ruidos superficiales y profundos (reflexiones múltiples), al sumar o apilar se atenúan los ruidos y se resalta la señal, por lo que se obtiene una traza suma que posee mejor relación Señal/Ruido. (Figura 11)

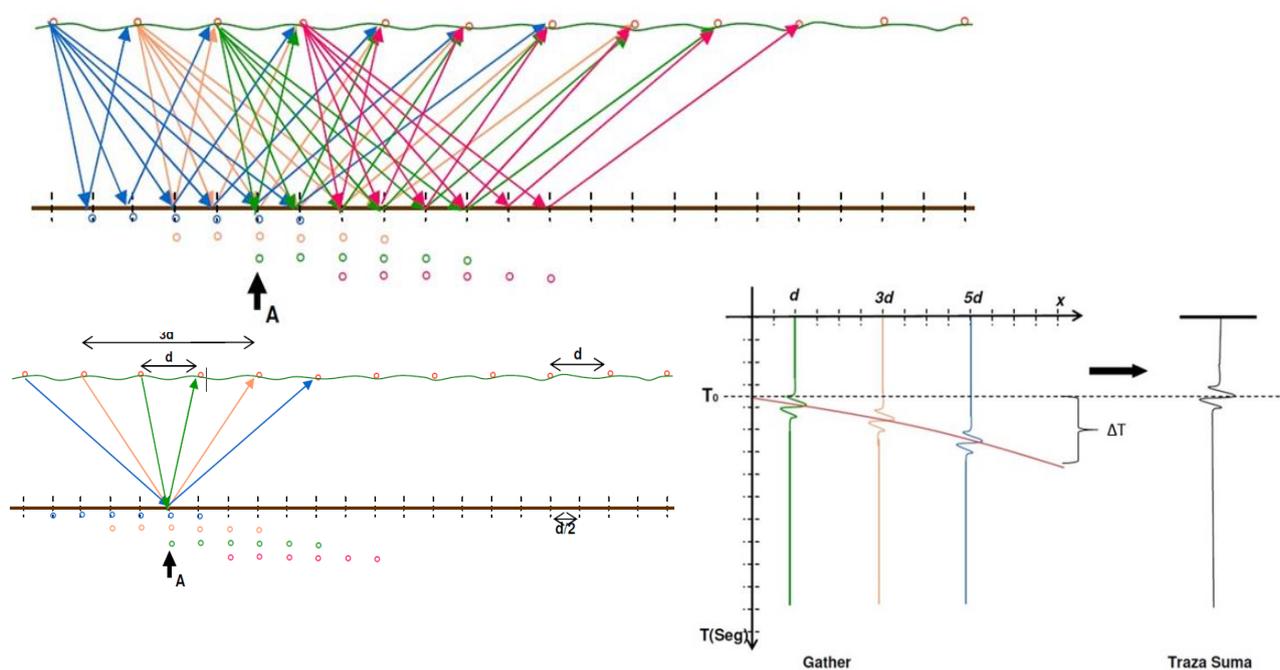


Figura 11. Esquema ejemplo del stack. Extraído de los apuntes de la Cátedra de Geofísica.

Filtros: Eliminan los ruidos y resaltan los eventos de reflexión, generalmente actúan sobre la frecuencia y amplitud de las trazas.

Deconvolución: El proceso de deconvolución tiende a mejorar los datos sísmicos afectados adversamente por el filtrado, o la convolución que se produce naturalmente a medida que la energía sísmica es filtrada por la Tierra. La deconvolución es el proceso inverso a la convolución, conocida la traza y la ondícula se puede obtener la distribución de los coeficientes de reflexión, Permite concentrar o colapsar la energía de cada evento reflejado, mejorando la resolución vertical, ya que se consigue agudizar la respuesta de los eventos reflejados.

Migración: Al registrar una línea sísmica se considera que la traza suma obtenida en cada Gather contiene datos como si fuente y receptor estuvieran juntos y el frente de onda ha viajado en forma vertical, esta suposición es errónea para el caso de que existan horizontes buzantes. La migración es un algoritmo que trata de corregir este error, llevando cada punto común profundo a su verdadera posición. Este algoritmo también colapsa las difracciones que se producen cuando el frente de onda alcanza un relieve brusco.

Sección o cubo sísmico final: Luego de aplicar todos los procedimientos anteriormente descriptos se obtiene la sección sísmica o el cubo sísmico, los cuales deben poseer buena calidad, con la menor cantidad de ruidos posible, alta frecuencia y buen enfoque.

El procesamiento del dato sísmico 3D, del área Loma Jarillosa Este, fue realizado por la empresa Veritas, la cual efectuó las secuencias de procesamiento que se pueden observar en las tablas 2 y 3.

Tabla 2. Secuencia de procesamiento- Post Stack time Migration. (Extraído de Informe de procesamiento)

Processing datum	450 metros
Remplacement velocity	2200 m/s.
Reformat SEG-D to Internal format	
Geometry, QC and Trace edition	
Spherical divergence correction	
Surface consistent spiking deconvolution	
Interactive velocity analysis (Preliminary Pass)	
Tomographic Statics	
Interactive velocity analysis (Firs pass)	
First pass surface consistent residual statics	
Interactive velocity analysis (Second pass)	
Second pass surface consisten residual statics	
Pre Stack spectral balance	
Surface consistent scaling	
FXY deconvolution in XSPREAD domain	
DMO velocity analysis	
DMO stack	
FX deconvolution	
Omega- X Migration	
Bandlimited single channel zero phase deconvolution (ZSIGNAL)	
Time variant Band Pass Frequency Filter	
Scaling for display	

Tabla 3. Secuencia de procesamiento- Pre Stack time Migration. (Extraído de Informe de procesamiento)

Migration geometry
Interactive migration velocity analysis
Pre Stack Time Migration (PSTM)
Stack
Bandlimited single channel zero phase deconvolution (ZSIGNAL)
FXY Deconvolution
Time variant band pass frequency filter
Scaling for display
Offset limited stacks

5.1.2. Atado de pozos.

Consiste en vincular los datos de pozo, en escala de profundidad, con los datos sísmicos, en escala de tiempo. De esta manera se puede identificar en el dato sísmico los niveles geológicos, estructuras o eventos sísmicos de interés.

El atado entre pozos y sísmica se puede realizar con diferentes métodos: por medio de registro de Perfil Sísmico Vertical (VSP), Ley de Velocidad (Check Shots), integración del perfil sónico y densidad.

Perfil Sónico: Mide el tiempo que tarda una onda sonora, emitida en el pozo, en recorrer una distancia conocida, al tiempo medido se lo llama “tiempo de tránsito” Δt , que es la inversa de la velocidad. Por lo tanto la velocidad de las rocas puede calcularse con la siguiente formula:

$$(3) V = \frac{dz}{\Delta t}$$

Teniendo las velocidades se puede obtener el Tiempo de Tránsito Integrado el cual permite relacionar la profundidad en el pozo con el tiempo de la sísmica.

Debido a que desde el perfil sónico se puede calcular las velocidades de las rocas, combinando el perfil sónico con el perfil de densidad se obtiene el perfil de impedancias acústicas y con él los coeficientes de reflexión. Estos últimos se convolucionan con una ondícula parecida a la sísmica y se genera el sismograma sintético, el cual es una traza sísmica sintética que debe ajustarse a la sísmica, en la posición del pozo si se logra un buen ajuste se pueden identificar los reflectores que se corresponden con los distintos niveles geológicos reconocidos en el pozo. (Figura 12)

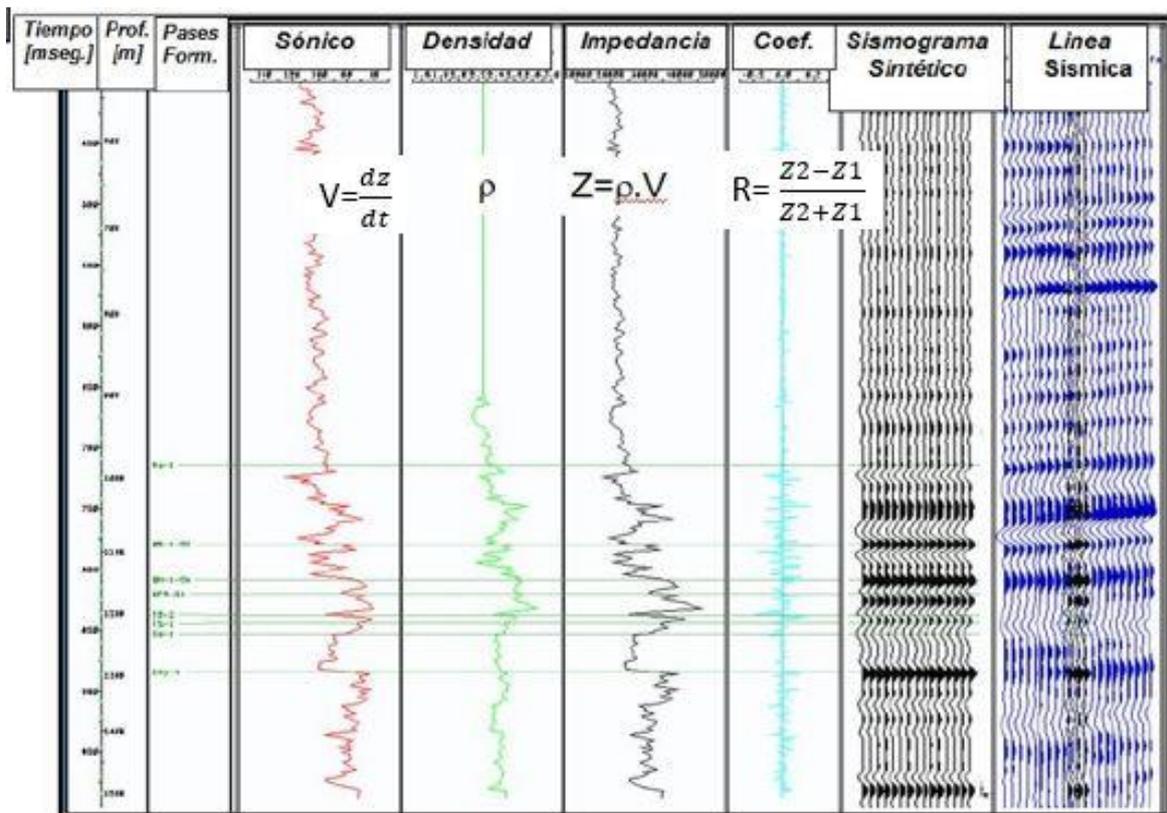


Figura 12. Construcción de Sismograma Sintético

Prueba de velocidad (*check shot*): Consiste en medir el tiempo que tarda un pulso sísmico generado en la superficie que se propaga por el subsuelo y donde es detectado por sensores colocados en el pozo en niveles de interés geológico. Como la trayectoria de los rayos es inclinada, por el apartamiento de la fuente, los tiempos deben corregirse para obtener T_0 , el cual representa el tiempo que tardaría el rayo si la fuente hubiese estado ubicada en la misma posición que el pozo. Este método nos permite obtener tres curvas: tiempo-profundidad, de velocidad promedio y velocidad intervállica. Con estos datos se puede calibrar el sismograma sintético aplicándole una corrección (*drift*) al perfil sónico que se obtiene a partir de las diferencias entre los tiempos medidos en la prueba de velocidad y los tiempos integrados del perfil sónico (TTI). De esta manera se obtiene un sismograma sintético corregido.

Perfil sísmico vertical (*VSP*): Este perfil se registra igual que la prueba de velocidad, con la diferencia de que los sensores dentro del pozo se ubican de manera equidistante en la zona de interés y a intervalos irregulares en el resto del sondeo. Este método registra (a diferencia de la prueba de velocidad) tanto la onda directa como la reflejada, esta última brinda información por debajo del fondo del pozo, el T_0 se obtiene de sumar los tiempos de la onda directa y reflejada. Luego del procesamiento de estos tiempos se obtiene una traza suma que representa la respuesta sísmica de la columna sedimentaria en la posición del pozo, la cual puede correlacionarse con la sísmica de superficie.

5.1.3. Resolución sísmica.

Se refiere al menor detalle que podrá ser visto por la sísmica. La resolución del dato sísmico se mide en términos de la longitud de onda, la cual está en relación con la velocidad y frecuencia predominante del dato sísmico. El valor de la resolución sísmica es proporcional a la profundidad y la velocidad de las ondas sísmicas y es inversamente proporcional a la frecuencia. A menor longitud de onda, mejor será la resolución. La velocidad sísmica aumenta con la profundidad, porque las rocas están más compactadas. La frecuencia predominante decrece con la profundidad porque las altas frecuencias de la señal sísmica son absorbidas o atenuadas a medida que avanzan por la corteza terrestre. El resultado es que la longitud de onda aumenta significativamente con la profundidad, empeorando la resolución vertical y lateral.

5.1.3.1. Resolución vertical.

Es el espesor mínimo de una capa, en la cual las reflexiones provenientes de su tope y de su base pueden ser distinguidas y que refleja el espesor real de las capas. El criterio de Rayleigh establece que el límite de resolución es de un $\frac{1}{4}$ de la longitud de onda (λ) dominante (Sheriff, 1997). (Ecuación 4)

$$(4) \quad RV = \lambda/4 = v/4F$$

5.1.3.2. Resolución horizontal.

Está directamente relacionada con el radio de Fresnel y corresponde a la mínima separación lateral de objetos que podrán ser discriminados. En general la resolución sísmica vertical luego de la aplicación del proceso de migración al proceso sísmico puede expresarse de la siguiente manera:

$$(5) \quad RH = \frac{\lambda}{2}$$

5.1.4. Interpretación de horizontes.

Una vez identificados los reflectores de interés, es recomendable interpretarlos siguiendo una sección arbitraria que pase por los pozos. Luego se puede seguir con una interpretación en forma de grilla, por ejemplo realizando una interpretación cada 50 o 20 líneas/trazas. El espaciamiento entre líneas/trazas interpretadas está en relación con el objetivo del estudio.

Una vez que se tiene interpretada el área con una grilla, se puede recurrir a diferentes formas de completar la interpretación (poblado de datos):

Interpolación: los datos se completan por interpolación de los datos existentes, sin tener en cuenta el dato sísmico entre las líneas/trazas interpretadas.

Picado automático: en este caso el programa realiza una especie de interpolado, teniendo en cuenta el dato sísmico que existe entre los datos interpretados. Este tipo de poblado de datos se puede utilizar cuando el dato sísmico es de muy buena calidad y la superficie sísmica que se está interpretando tiene continuidad lateral.

Picado manual: cuando el dato sísmico es de calidad reducida o el reflector que se quiere interpretar no es muy continuo, se debe recurrir a la interpretación manual, o sea es el intérprete es el que realiza el poblado de los espacios entre grilla, interpretando cada una de las líneas o trazas.

5.1.5. Interpretación de fallas y discontinuidades.

Consiste en el reconocimiento de la desconexión de una superficie. Puede ser que la falla tenga mucho, poco, o nada de rechazo, siendo en el último caso una discontinuidad. Para la interpretación de fallas en vez de seguir una malla regular, es aconsejable realizar la interpretación en una dirección perpendicular a la de la falla, para observar el mayor rechazo. También es útil valerse de atributos sísmicos para reconocer e interpretar fallas o discontinuidades.

5.2. Perfilaje.

Existen tres tipos de registros de pozos para estudiar una formación: Registros de litología, de porosidad y resistividad (Halliburton 2010). En este trabajo para delimitar intervalos dentro de la Fm. Vaca Muerta se utilizaron perfiles de rayos gamma y SP para la identificación de litologías, resistividad para analizar la saturación de la unidad, sónico y densidad los cuales brinda información sobre la porosidad y cruce de Passey el cual permite identificar unidades ricas en materia orgánica.

A continuación se explicarán brevemente los perfiles utilizados en el presente estudio.

5.2.1. Rayos Gamma

La curva de rayos gamma es una medición de la radiación natural de la formación. Debido a que los elementos radioactivos tienden a concentrarse en arcillas y lutitas, este registro nos permite distinguir litologías, donde los valores altos representan litologías como lutitas o arenas lutíticas y los valores bajos a arenas limpias o carbonatos. (Figura 13)

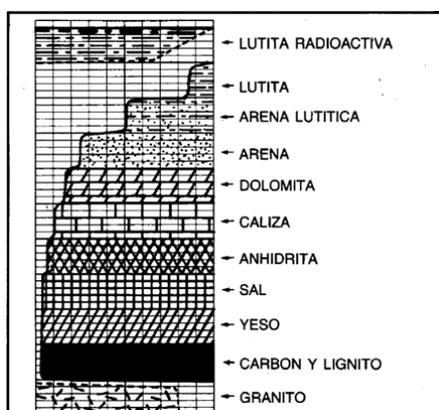


Figura 13. Respuesta típica de la curva de rayos gamma para diversas litologías, los valores aumentan hacia la derecha (extraído de Introducción al análisis de registros de pozos, Halliburton)

5.2.2. Rayos Gamma Espectral

El perfil de rayos gamma puede ser separado en sus respectivos componentes Potasio, Torio y Uranio mediante un espectrómetro. Estos elementos tienen ciertas características de ocurrencia, transporte y propiedades químicas que proveen información que ayudan a inferir ambientes depositacionales. El Potasio es muy sensible a la erosión, alteración y efectos diagenéticos, por lo que está presente en sedimentos inmaduros. También está presente en arcillas, evaporitas y en calizas originadas a partir de algas. El Torio tiene muy baja solubilidad y movilidad, condición que limita su ambiente depositacional, se encuentra solo en sedimentos detríticos, en minerales arcillosos, minerales pesados y cenizas volcánicas. El Uranio posee alta solubilidad y movilidad, está presente en minerales arcillosos, minerales pesados, cenizas volcánicas, sedimentos químicos y está fuertemente asociado a la materia orgánica, por lo que es un indicador de roca madre. (Catedra de Geofísica, Universidad Nacional del Comahue)

5.2.3. SP.

La curva SP es una medida de las corrientes eléctricas que se producen dentro del pozo debido al contacto entre diversos fluidos con salinidades diferentes, por lo que se usa generalmente en pozos perforados con fluidos cuya base es el agua dulce. Estas corrientes son producidas por fuerzas electromotrices en las formaciones, que son de origen electroquímico o electrocinético. Los filtrados de lodo de perforación invaden aquellas zonas que exhiben permeabilidad y en consecuencia se generan corrientes. El valor de la curva SP se obtiene de la relación entre la resistividad del filtrado de lodo y la resistividad del agua presente en la formación. En presencia de lutitas las lecturas de la curva SP son más o menos constantes y tienden a seguir una línea recta, llamada línea base de lutitas, en cambio, en las formaciones permeables la curva de SP se aparta de la línea base de lutitas, pudiéndose desviar tanto a la derecha como hacia la izquierda dependiendo de las salinidades relativas del agua de formación y de filtrado de lodo. (Figura 14)

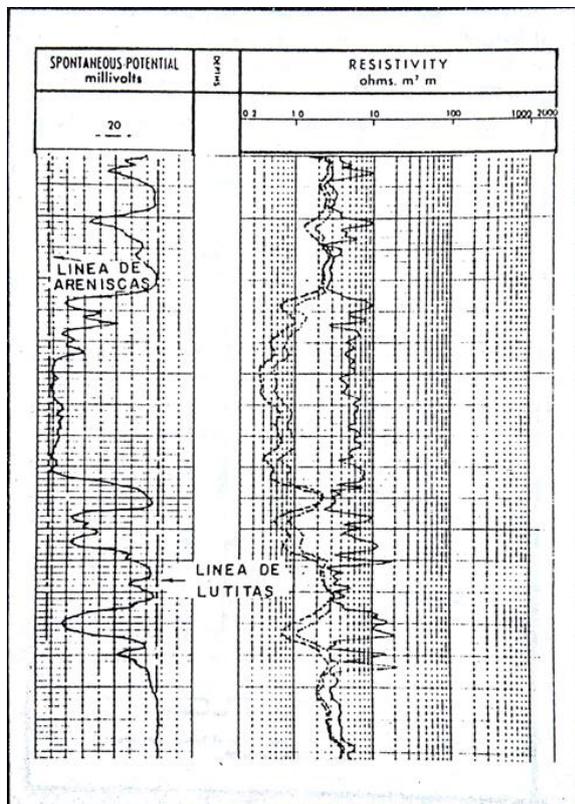


Figura 14. Ejemplo de la curva de SP en una serie arena-arcillas. (Extraído de Interpretación de perfiles, Schlumberger)

5.2.4. Sónico.

El perfil sónico o tiempo de tránsito, representa el tiempo requerido por una onda compresional de sonido para recorrer un pie de formación. Este registro mide el tiempo de recorrido del sonido en una formación, a través de un instrumento acústico que consta de un transmisor y dos receptores, cuando se activa el transmisor, la onda acústica se trasmite por la columna de lodo, entra en la formación, regresa a la columna de lodo y se registra en los receptores. El tiempo de tránsito de formación depende de la litología y de la porosidad, en general, a mayor densidad o consolidación, el tiempo de recorrido será menor y a mayor porosidad el tiempo de recorrido será mayor. (Figura 15)

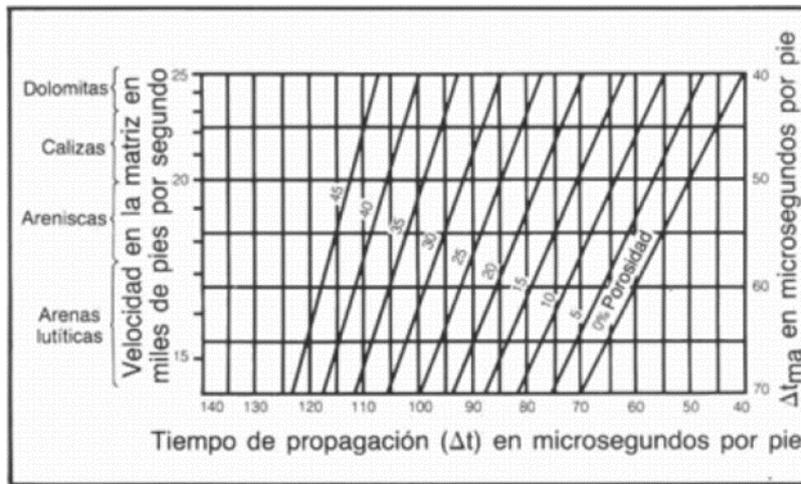


Figura 15. Relación del tiempo de propagación la porosidad para diferentes litologías. (Extraído de Introducción al análisis de registros de pozos, Halliburton)

5.2.5. Densidad

El registro de densidad mide la densidad de los electrones en la formación mediante una fuente química de rayos gamma y dos receptores sellados de dichos rayos, todo el instrumento está montado en una almohadilla. El número de electrones que puede transmitirse de la fuente a los receptores es proporcional a la densidad de la formación. En las formaciones con densidad baja, y por lo tanto alta porosidad, la mayor parte de los rayos gamma producidos por la fuente llegan hasta el receptor y pueden ser medidos, en cambio, cuando aumenta la densidad, y en consecuencia disminuye la porosidad, menos rayos llegan al receptor. Puesto que se conocen la mayoría de las densidades de los minerales de las rocas sedimentarias, así como las de los fluidos de los poros, la relación entre la densidad de la formación y la porosidad puede expresarse mediante la siguiente ecuación.

$$(6) \text{ Porosidad} = \frac{\text{Densidad de la matriz} - \text{densidad total}}{\text{Densidad de la matriz} - \text{densidad del fluido}}$$

5.2.6. Resistividad.

La resistividad puede definirse como la capacidad de una sustancia de resistir o impedir el flujo de la corriente, lo contrario al concepto de conductividad, por lo tanto una resistividad alta corresponde a una conductividad baja y vice-versa. La unidad de resistividad se expresa en ohmio/metro.

En las rocas los minerales sedimentarios que componen la matriz no transportan corrientes eléctricas, por lo tanto el flujo de corriente en las rocas sedimentarias se debe al líquido contenido en los poros. Si el líquido contiene iones, que son los transportadores de corriente, cloruro de sodio (NaCl), como suele ocurrir en el agua de formación, se registrará una disminución de la resistividad.

Un aumento de la temperatura de la formación produce una mayor velocidad en el movimiento de los iones, lo cual resulta en una disminución de la resistividad. Si el volumen de agua contenido en la formación aumenta, también aumenta la cantidad de iones que contiene, por lo que disminuirá la resistividad. La litología también afecta a la resistividad, en general, los carbonatos poseen mayor resistividad que las rocas clásticas debido a la geometría de los poros, las vías que debe utilizar el agua para fluir son más tortuosas.

5.2.7. $\Delta \log R$ (Passey et al., 1990)

El método implica la superposición de la curva de porosidad (generalmente la curva del sónico) y de resistividad (preferiblemente de una herramienta de lectura profunda), en una escala correspondiente. En rocas pobres en contenido orgánico y saturadas en agua, las curvas se hacen paralelas y se unen, debido a las variaciones de la porosidad. En cambio en rocas reservorios de hidrocarburos y rocas no reservorios pero ricas en materia orgánica las curvas se separan. La separación en intervalos ricos en contenido orgánico resulta de dos efectos: la curva de porosidad responde a la presencia de kerógeno de baja densidad y baja velocidad, y la curva de resistividad responde al fluido de formación. En una roca rica en materia orgánica inmadura, donde no se han generado hidrocarburos, la separación de la curva observada se debe únicamente a la respuesta de la curva de porosidad. En las rocas madres maduras, además de la respuesta de la curva de porosidad, la resistividad aumenta debido a la presencia de hidrocarburos generados. La magnitud de la separación de la curva en las rocas no reservorios se calibra con el carbono orgánico total y madurez, y permite estimar en profundidad la riqueza orgánica en ausencia de datos de muestra. Este método permite evaluar con precisión la riqueza orgánica en una amplia variedad de litologías y madurez, utilizando registros de pozos comunes. (Figura 16)

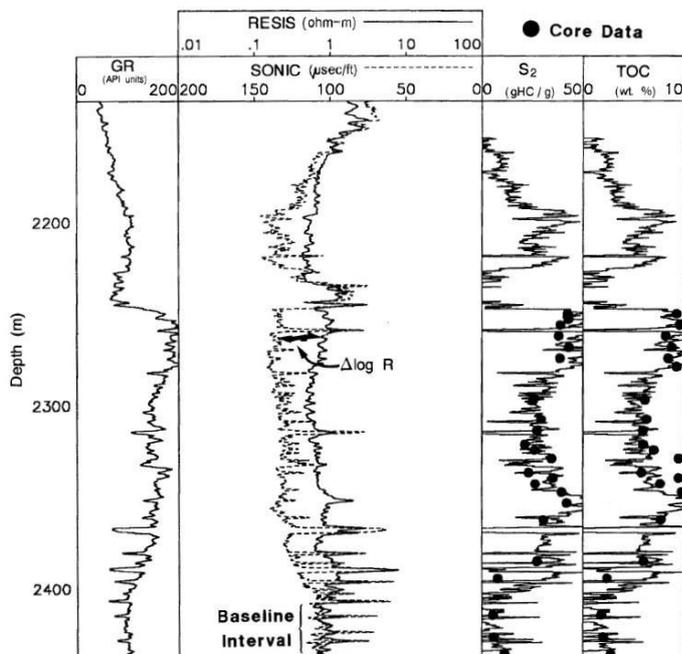


Figura 16. Superposición de los perfiles sónico y resistividad mostrando la separación $\Delta \log R$ en un intervalo rico en materia orgánica. La escala relativa de las curvas de sónico y resistividad es de $50 \mu\text{sec/ft}$ ($164 \mu\text{sec/m}$) correspondiente a un factor de 10 en resistividad. Los valores en el centro del track 2 corresponden a los valores de R_{baseline} y $\Delta t_{\text{baseline}}$ (en este ejemplo $R_{\text{baseline}} = 1 \text{ ohm-m}$, y $\Delta t_{\text{baseline}} = 100 \mu\text{sec/ft}$) (extraído de Passey et al., 1990).

5.3. Estratigrafía secuencial.

La estratigrafía de secuencia se desarrolló como un método interdisciplinario que combinó procesos autigénicos (producidos por la propia dinámica de los ambientes sedimentarios) y alogénicos (generados fuera del ambiente sedimentario) en un modelo unificado para explicar la evolución y la arquitectura estratigráfica de las cuencas sedimentarias (Miall, 1995).

El término "secuencia" fue introducido por Sloss et al. (1949) para designar una unidad estratigráfica delimitada por discordancias, Sloss se refirió a "masas limitadas por discordancia de estratos de rango mayor que grupo o supergrupo" (Krumbein y Sloss, 1951), por lo que restringió la aplicabilidad del concepto de "secuencia" solo a los estudios estratigráficos a escala regional. El significado de "secuencia" estratigráfica se ha ampliado posteriormente para incluir cualquier "sucesión de estratos genéticamente relacionados" (Mitchum, 1977), los sedimentólogos en los años 60 y 70 han redefinido el significado del término "secuencia" para incluir una sucesión de facies que están "organizadas de una manera coherente y predecible" (Pettijohn, 1975), lo que refleja la evolución natural de un modelo deposicional.

En la década de 1970 surgió la estratigrafía sísmica con el trabajo de Vail (1975) y Vail et al. (1977). Los conceptos de estratigrafía sísmica se publicaron junto con un diagrama de variaciones globales del nivel del mar (Vail et al., 1977), basado en la suposición de que la eustasia es el principal motor detrás de la formación de secuencias. La estratigrafía sísmica y la tabla de ciclos globales fueron presentadas a la comunidad geológica como un paquete inseparable.

Estas ideas luego pasaron a la estratigrafía secuencial en sus primeros años, a medida que la estratigrafía sísmica evolucionó a estratigrafía de secuencia con la incorporación de afloramientos y datos de pozos (Posamentier et al., 1988; Posamentier y Vail, 1988; Van Wagoner et al., 1990) Publicaciones posteriores (por ejemplo, Hunt y Tucker, 1992, Posamentier y James, 1993, Posamentier y Allen, 1999) desvían la atención de la eustasia hacia una mezcla de eustasia y tectónica, denominada "nivel relativo del mar". El cambio de énfasis de los cambios en el nivel del mar a los cambios relativos en el nivel del mar a principios de la década de 1990 (por ejemplo, Hunt y Tucker, 1992; Christie-Blick y Driscoll, 1995) marcó un cambio importante y positivo. Al hacerlo, no se forzó ninguna interpretación de fluctuaciones eustáticas o tectónicas específicas sobre secuencias, cortejos de sistemas o superficies estratigráficas. En cambio, se deduce que las superficies claves, e implícitamente las unidades entre ellas, se formaron en relación con una curva más "neutral" de cambios relativos del nivel del mar (nivel base) que pueden acomodar cualquier relación entre los controles alogénicos en la acomodación.

Esta disciplina utiliza la curva de variación de nivel de base para definir diferentes cortejos sedimentarios limitados por superficies estratigráficas. Un cortejo sedimentario es una sucesión progresiva de depósitos sedimentarios genéticamente ligados, contemporáneos y limitados por superficies estratigráficas (Brown y Fischer, 1977). Existen 4 cortejos sedimentarios: Cortejo de bajo nivel o *lowstand system tract (LST)*, cortejos transgresivo o *transgressive system tract (TST)*, cortejo de alto nivel o *highstand system tract*, cortejo de caída del nivel de base o *falling stage system tract (FSST)* (Catuneanu, 2006) (Figura 17)

LST: este cortejo está limitado en su base por la superficie de discontinuidad aérea o conformidad correlativa marina y en su tope por la superficie de máxima regresión. Se constituye en la primer etapa de la subida del nivel de base, donde es compensada por la sedimentación, formando una regresión normal. El patrón de acumulación es progradante y, en el tope, agradante cuando la tasa de sedimentación equilibra la subida del nivel de base.

TST: El cortejo transgresivo tiene lugar cuando la velocidad de subida del nivel de base supera la tasa de sedimentación. Está limitado en su base por la superficie de máxima regresión y en el tope por la superficie de máxima inundación. Se identifica por su patrón de acumulación retrogradante.

HST: Este cortejo es limitado en su base por la superficie de máxima inundación y en su tope es limitado por una superficie compuesta por la discontinuidad subaérea, superficie regresiva de erosión marina y la superficie basal de regresión forzada. Este cortejo representa la etapa tardía de la suida del nivel de base, donde es superada por la sedimentación, generando una regresión normal.

FSST: Está compuesto por los sedimentos que se acumulan durante una caída abrupta del nivel de base. Está limitado en la parte superior por una superficie compuesta que incluye la discordancia subaérea, su conformidad correlativa y la porción más joven de la superficie regresiva de la erosión marina y en la base está limitado por la superficie basal de regresión y por la parte más antigua de la superficie regresiva de la erosión marina. Los depósitos muestran un patrón progradante y un offlapping característico de este cortejo.

Con el tiempo han surgido diferentes modelos de secuencias. Dentro de la estratigrafía secuencial se pueden encontrar diferentes enfoques en cuanto a: las suposiciones subyacentes con respecto a los controles primarios sobre la ciclicidad estratigráfica; el tipo de cuenca de la cual se derivaron los modelos y los avances conceptuales graduales que permitieron el desarrollo de modelos alternativos. Las variaciones en la secuencia deposicional original dieron como resultado la publicación de varias versiones ligeramente modificadas del modelo de secuencia. (Figura 18)

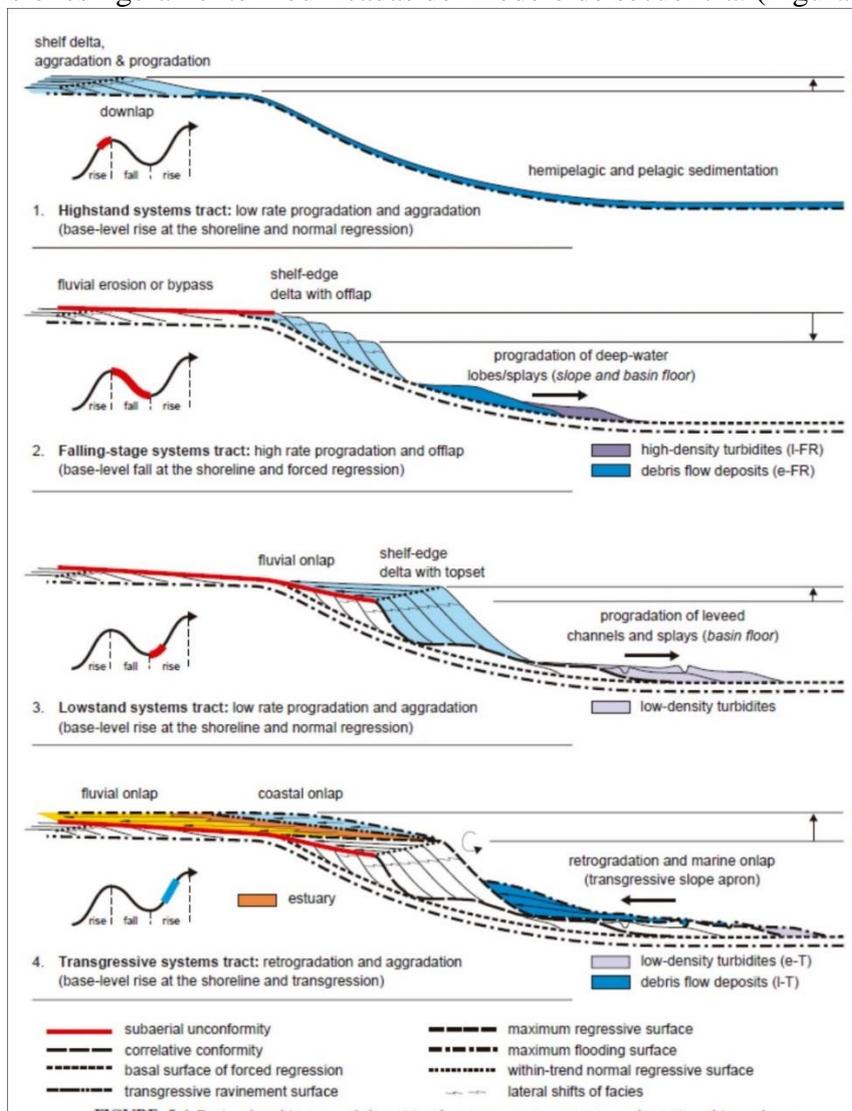


Figura 17. Arquitectura detallada de los cortejos sedimentarios, sistemas depositacionales y las superficies estratigráficas en la zona de transición entre ambientes fluviales y marinos poco profundos (extraído de Catuneanu, 2006).

Sequence model Events	Depositional Sequence II	Depositional Sequence III	Depositional Sequence IV	Genetic Sequence	T-R Sequence
end of transgression	HST	early HST	HST	HST	RST
end of regression	TST	TST	TST	TST	TST
end of base-level fall	late LST (wedge)	LST	LST	late LST (wedge)	RST
onset of base-level fall	early LST (fan)	late HST (fan)	FSST	early LST (fan)	
	HST	early HST (wedge)	HST	HST	

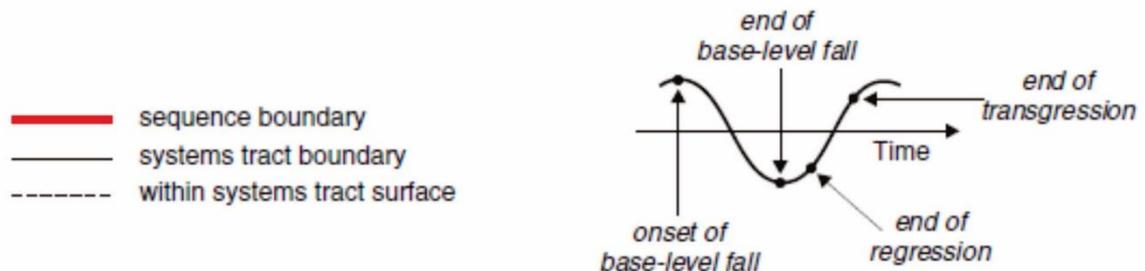


Figura 18. Temporización de los cortejos sedimentarios y límites de secuencia para los modelos de secuencia actualmente en uso (extraído de Catuneanu, 2006).

5.3.1. Terminaciones estratales.

Las terminaciones estratales se definen por las relaciones geométricas entre los estratos y las superficies estratigráficas contra las cuales se terminan. Los principales tipos de terminaciones estratales son los truncamientos, toplaps, onlaps, downlaps y offlaps. Estos conceptos (excepto el de truncamiento) fueron introducidos por la estratigrafía sísmica para definir la arquitectura de los reflectores sísmicos (Mitchum y Vail, 1977; Mitchum et al.1977). Las terminaciones estratales conjuntamente con el diseño de patrón de apilamiento, permiten deducir el movimiento de la línea de costa, es decir las fluctuaciones del nivel de base. Por ejemplo, un onlap costero asociado con retrogradación indica una transgresión; un offlap es frecuente en las regresiones forzadas. (Figura 19)

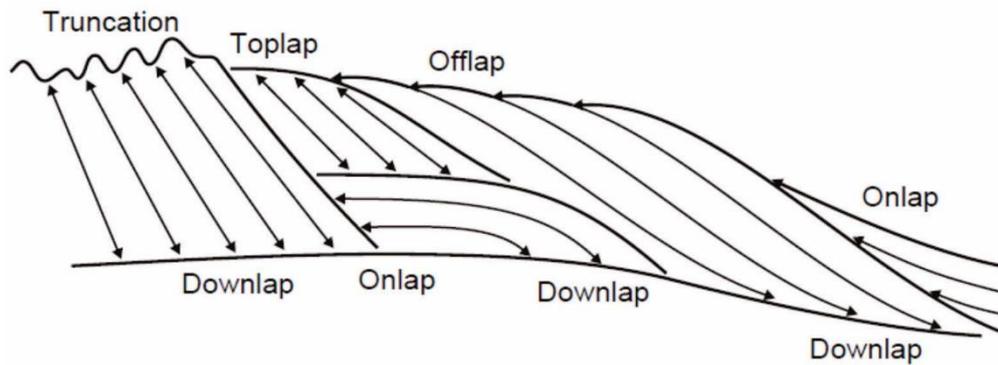


Figura 19. Terminaciones estratales. Extraído de Catuneanu, 2006.

Terminaciones de techo

Truncamiento: Terminación estratal contra una superficie de erosión suprayacente.

Toplap: Terminación de capas inclinadas (clinoformas) contra una superficie supra yacente de bajo ángulo. Dicha superficie es el resultado de un no-depósito (bypass sedimentario) con más o menos de erosión. La superficie del toplap representa el límite proximal de la unidad sedimentaria. En estratigrafía sísmica, el topset de un sistema deltáico (depósitos de llanura deltáica) puede ser demasiado delgado como para ser detectado como unidad individual (por debajo de la resolución sísmica).

Offlap: Cada clinoforma deja al descubierto, durante su sedimentación, parte de la clinoforma anterior. Esto se produce durante la caída del nivel de base en las regresiones forzadas.

Terminaciones de base

Onlap: Terminación de estratos de bajo ángulo contra una superficie de mayor pendiente.

Downlap: Terminación de estratos inclinados contra una superficie de menor pendiente. Los downlaps son comunes en las bases de las clinoformas de progradación.

6. Metodología.

Se realizó una recopilación y revisión bibliográfica de los antecedentes de estudio de la Fm. Vaca Muerta, entre los cuales cabe destacar: Transecta regional de la Fm. Vaca Muerta (Gonzalez et al. 2016), La Fm. Vaca muerta y equivalentes (Jurásico Tardío –Cretácico Temprano) en la Cuenca Neuquina (Leanza et al., 2011), Análisis estratigráfico del intervalo Tithoniano-Valanginiano (Fm. Vaca Muerta, Quintuco y Mulichinco) en el suroeste de la provincia del Neuquén (Gulisano et al. 1984), *Paleontology of the Jurassic and Cretaceous from west central Argentina* (Weaver, C. 1931), Estratigrafía sísmica de las Formaciones Loma Montosa, Quintuco y Vaca Muerta, Jurásico Superior y Cretácico Inferior de la Cuenca Neuquina, Argentina (Mitchum y Uliana, 1982). También se llevó a cabo una revisión y análisis de la información brindada por la subsecretaría, poniendo mayor énfasis en los informes de registración y procesamientos del volumen sísmico, extensión de los perfiles e informes de cada pozo.

Utilizando un software se combinó el dato sísmico 3D del área Loma Jarillosa Este con los perfiles de pozos que se encuentran dentro del área. Para correlacionar la sísmica con los pozos se debió rotar la fase del volumen sísmico -70° , de esta manera los pozos quedaron con una diferencia aproximada de $\pm 20^\circ$ con respecto a la sísmica. También se calculó la resolución vertical del dato sísmico en el intervalo de estudio. Una vez que los pozos se correlacionaron a la sísmica con sus correspondientes perfiles, se interpretaron reflectores sísmicos de importancia, lo cuales fueron: Tope del Mb. Catriel, Tope de transición entre la Fm. Vaca Muerta y Quintuco y Tope de la Fm. Quintuco. Luego se interpretaron diferentes intervalos dentro de la Fm. Vaca Muerta, realizando correlaciones entre pozos con los registros de Rayos gamma, SP, Sónico, Densidad y el cruce de Passey (Sónico e ILD). Los reflectores sísmicos interpretados fueron propagados en el volumen sísmico, de forma automática teniendo en cuenta el dato sísmico y tomando como referencia el dato sísmico interpretado, en algunos casos fue necesario la interpolación. Posteriormente se interpretaron las fallas visibles en el dato sísmico, utilizando el atributo de discontinuidad. Se construyeron crossplot entre los datos de cada pozo, con el objetivo de hallar alguna correlación entre ellos. De acuerdo a los resultados obtenidos en éstos se realizaron mapas isócronos, isocronopáquicos y de amplitud (RMS y Mean) de los horizontes, las secciones importantes y amplitud instantánea de cada intervalo. Se realizaron crossplot entre los mapas de amplitud (RMS y Mean) y los datos de pozos, con la finalidad de poder extrapolar los datos de pozos a todo el volumen sísmico. Se llevó a cabo un análisis detallado de la correlación de pozos haciendo hincapié en la curva de nivel de base, relacionando con los mapas de atributos sísmicos.

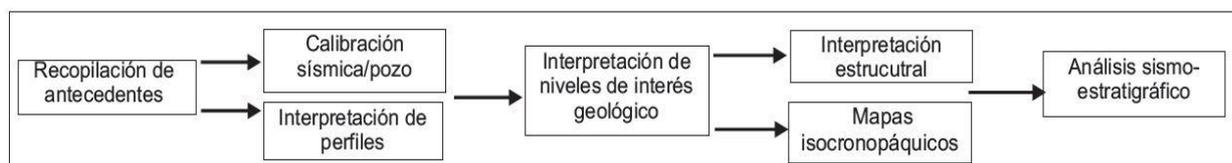


Ilustración 1. Esquema de flujo de trabajo.

7. Desarrollo y Resultados.

7.1. Análisis de los datos de pozo.

Se realizó un análisis de los datos de los pozos perforados en el área, para lograr discriminar entre ellos cuales contaban con la mejor y mayor información, (Tabla 4, Tabla 5). En la Tabla 4 se puede observar aquellos pozos con mayor información en colores verde, en naranja aquellos pozos que contienen información en menor extensión vertical, y en rojo aquellos pozos que tienen poca información, estos pozos son horizontales los cuales no fueron utilizados en el trabajo.

Tabla 4 Información de los datos de pozo.

Pozo	COORDENADAS (Chos malal)			PERFIL SONICO mts		PERFIL DE DENSIDAD mts		Coordenadas (posgar 94)		ILD/AT 90 mts		GR mts	
	X	Y	Z	Desde	Hasta	Desde	Hasta	x	y	Desde	Hasta	Desde	Hasta
LJEX-1010	5765961,75	2553370,04	689,57	2495	3202,2	2525	3200	5765805	2553443,88	2496	3202,2		
LJEX-1014	5765272,21	2551043,41	701,44	2557,1	3248,07	2557,1	3238,34	5765116	2551117,25	2557,1	3243,1	2557,1	3243,1
LJEX-1003	5765770,66	2553740,62	688,78	2502,6	3282,9	2739,2	3300,9	5765614	2553814,46			2479,8	3396
LJEX-1001	5765935,72	2552319,39	694	104,4	3381,5	2409,2	3381,5	5765779	2552393,23	104,5	3381,5	104,5	3381,5
LJEX-1002	5766305,52	2551295,01	697,52	105	3666	2400	3666	5766149	2551368,85	105	3666	105	3666
LJE-1006-H	5766426,57	2552587,73	691,48	2496	3388	2496	2979	5766270	2552661,57			2496	3382
LJE-1008-H	5765357,29	2553921,37	690,22	2450	3175	3000	3181	5765201	2553995,21			3000	3181

Tabla 5. Profundidad a la que se encuentra los topes formacionales (MD), en cada pozo.

NOMBRE DEL POZO	LJE.X-1010	LJE.X-1014	LME.X-1003	LJE.X-1001	LJE.X-1002	LJE_1006-H	LJE_1008-H
PASES FORMACIONALES							
Grupoo Neuquén				400	896		
Fm. Rayoso					1039	1052	1051
Fm. Centenario				1327	1330	1325	1338
Fm. Mulichinco							
Fm. Quintuco Superior	2402				2409	2414	2397
Fm. Quintuco Medio	2660	2685					
Fm. Quintuco Inferior	2706	2730	2523	2400			
Vaca Muerta	3010	3056	3040			3083	3008
Fm Tordillo, Mb Catriel	3114	3166	3160	3120	3121	3215	3145
Fm Tordillo, Mb S. Blancas		3228	3318			3296	3282
Fm Lotena / Barda Negra				3361	3383		
Fm. Punta Rosada				3469	3491		
Fm. Lajas				3651	3670		

7.2. Atado de pozos y rotación del dato sísmico.

Dentro del área se encuentran 7 pozos, de los cuales 5 fueron amarrados con el dato sísmico (Figura 20), seleccionados por la cantidad de información que contienen. Para poder correlacionar los pozos con el dato sísmico se debió rotar el volumen sísmico -70° . Se utilizó en cada pozo una ondícula extraída del dato sísmico en la posición del pozo. (Figura 21)

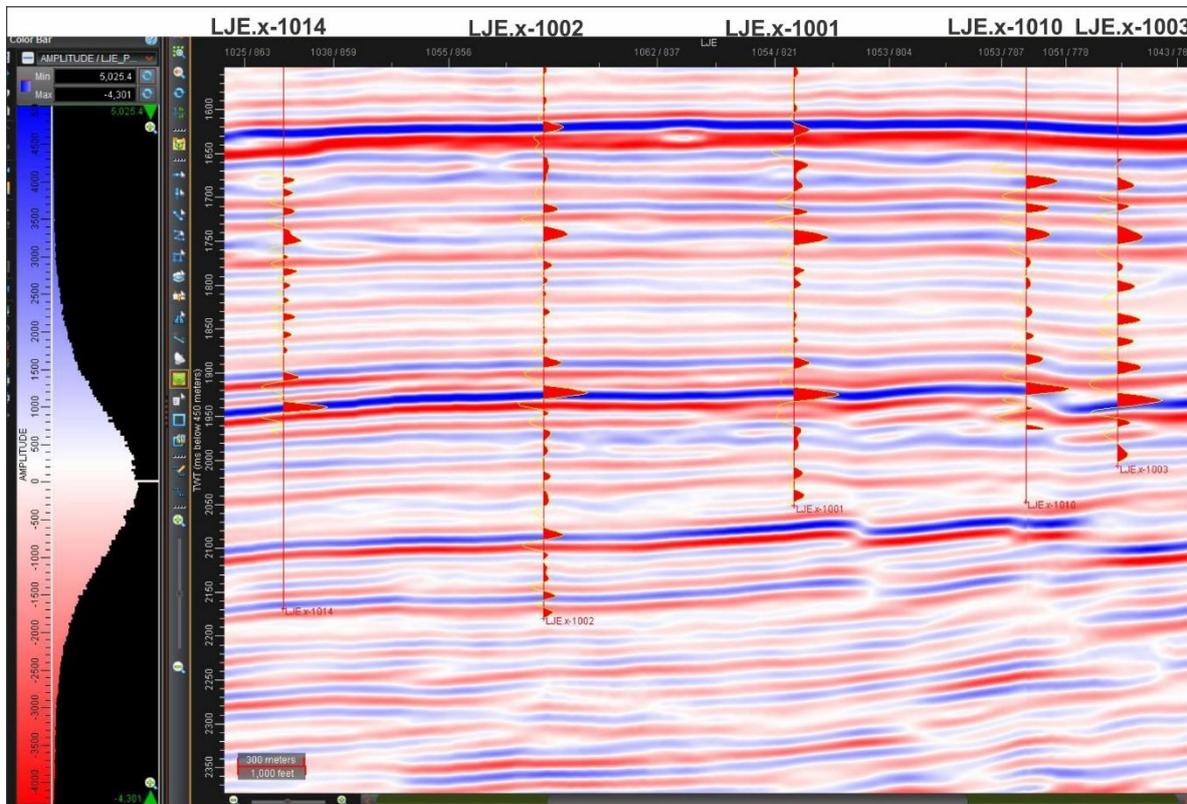


Figura 20. En esta imagen se pueden observar los cinco pozos correlacionados con el dato sísmico.

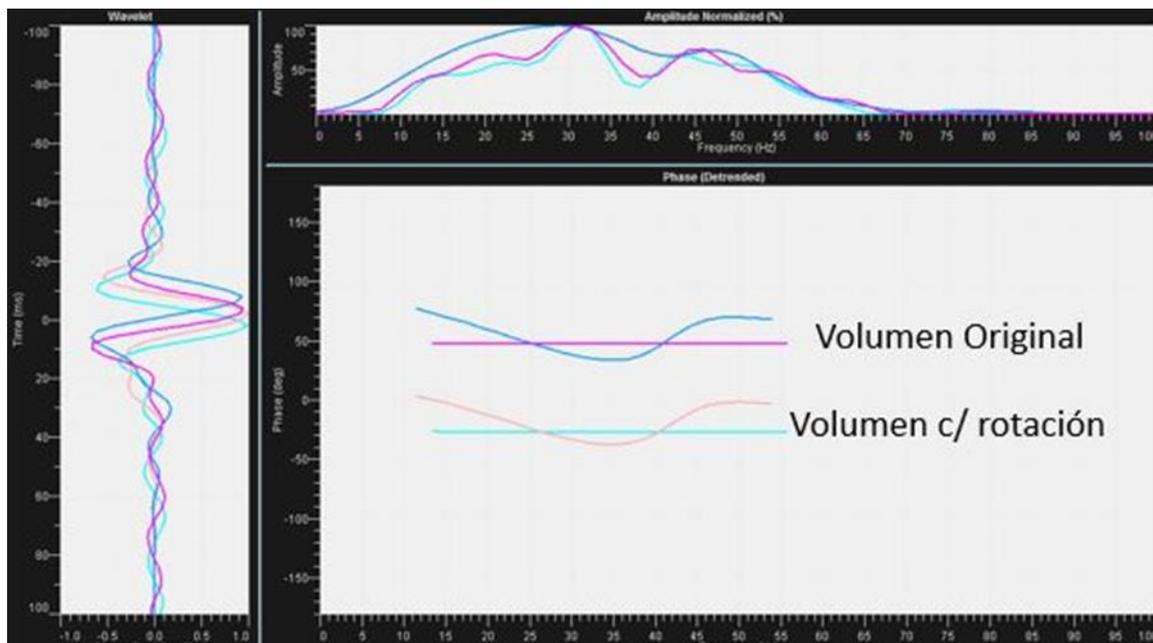


Figura 21. Ondículas correspondientes al pozo LJE.x-1001, del volumen sísmico original y del rotado (-70°)

7.3. Resolución vertical

Para calcular la resolución vertical del volumen sísmico utilizado en este trabajo, se utilizó una velocidad promedio del intervalo de estudio de todos los pozos (4000 m/s), y se utilizó la frecuencia predominante del dato sísmico (33Hz), dando como resultado una resolución vertical de 30.3 metros. (Figura 22)

$$RV = \frac{\lambda}{4} = \frac{v}{4F}$$
$$RV = \frac{4000 \text{ ms/m}}{4 * 33\text{m}} = 30.3 \text{ m}$$

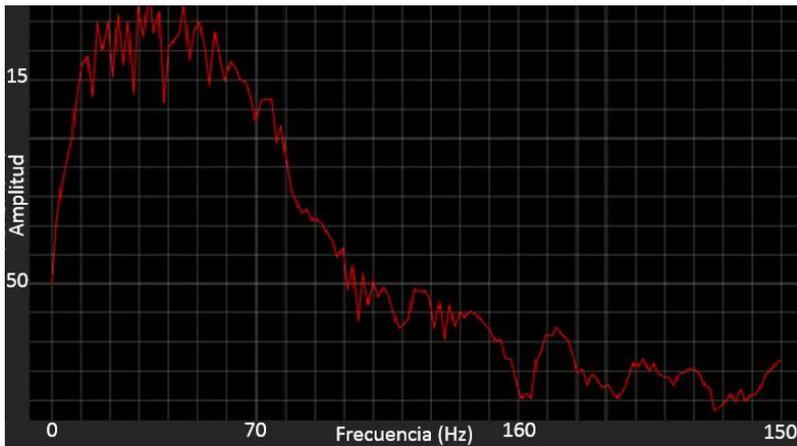


Figura 22. Frecuencia predominante del dato sísmico.

7.4. Interpretación estructural.

Con la finalidad de identificar los rasgos estructurales del área de estudio, se interpretaron fallas con el atributo de discontinuidad, siguiendo una grilla de 20 inline por 20 crossline, en los sectores de mayor complejidad estructural se densificó la grilla siguiendo 5 inline por 5 crossline. Además se realizó la interpretación con secciones los más perpendiculares posible al rumbo general de las fallas, de manera tal de observar el mayor rechazo de éstas. (Figura 23)

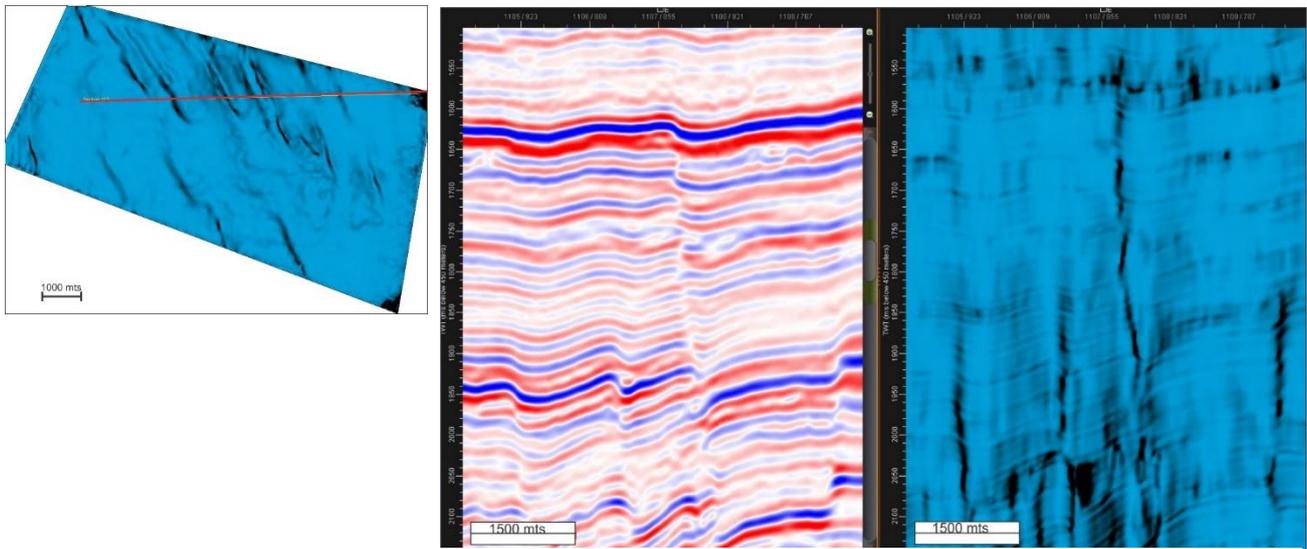


Figura 23. Interpretación estructural con atributo de discontinuidad.

En el intervalo de estudio todas las fallas poseen una orientación NO-SE, se pueden agrupar en tres zonas: norte, centro-este y sur del bloque. En el sector norte las fallas tienen un rumbo NO y son normales, entre éstas las más occidentales buzanan hacia el NE y las más orientales buzanan hacia el SO, formando una estructura en flor negativa, indicativa de un contexto trastensional (Figura 24-A). En el sector centro-este las fallas son de tipo normales, tiene la misma orientación y todas buzanan hacia el SO, con una inclinación casi vertical (Figura 24-B). En el sector sur se presenta un conjunto de fallas normales de rumbo NO, con buzamiento hacia el NE (Figura 24-C). La mayoría de las fallas inician en el basamento y se propagan hasta el tope de Fm. Catriel y algunas pocas llegan a afectar el tope de la Fm. Quintuco, por lo que la deformación estructural va atenuándose a lo largo del intervalo estudiado en este trabajo. En la base del intervalo estudiado, es decir al tope del Mb. Catriel, la deformación es más fuerte, las fallas presentan un rechazo aproximado de 20 ms en el sector norte y centro-oeste, y de 15 ms en el sector sur (Figura 24). En cambio en el tope del intervalo estudiado la deformación es menor, las fallas más importantes mantienen un rechazo aproximado de 12 ms y el resto de 5 ms (Figura 24).

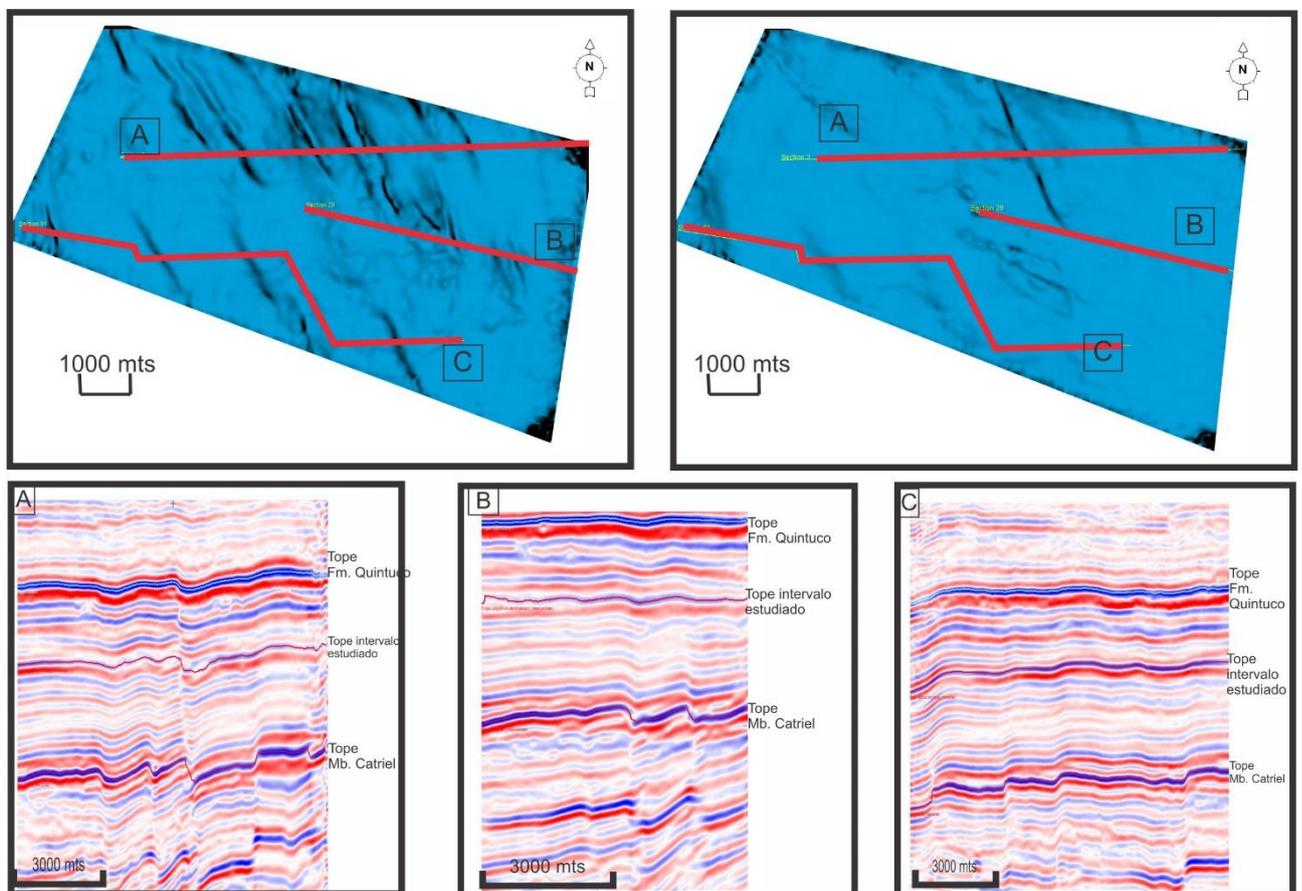


Figura 24. Superior- Izquierda: Time slice de discontinuidad (1950ms), Tope de Mb. Catriel. Superior- derecha: Time slice de discontinuidad (1750 ms), Tope intervalo estudiado. A-Fallas sector Norte, B-Fallas sector centro-este, C-Fallas sector sur.

7.5. Correlación entre registros de pozo

Se realizó una correlación entre los pozos, teniendo en cuenta los perfiles de rayos gamma, densidad, sónico, SP, Impedancia Acústica y Cruce de Passey. Se trabajó con los pozos LJE.x-1001, LJE.x-1002, LJE.x-1010, LJE.x-1014, el pozo LJE.x-1003 fue descartado ya que en el intervalo de estudio posee solo registro de densidad.

En el intervalo estudiado (desde el tope de Mb. Catriel hasta la transición entre Fm. Vaca Muerta y Fm. Quintuco), se han interpretado 10 intervalos, separados por reflectores sísmicos. Cada uno de ellos se diferencia por sus valores en los registros de GR, SP, Densidad, Sónico, Impedancia Acústica y cruce de Passey. (Figura 25)

Realizando una descripción general, los valores de GR y sónico aumentan hacia el Tope del Mb. Catriel, en cambio la densidad y resistividad disminuyen. En cuanto al cruce de Passey (sónico e ILD) hacia la base del intervalo el sónico disminuye y la resistividad aumenta, esta combinación es indicativa de la presencia de una roca con alto contenido de materia orgánica (roca madre), ya que el sónico disminuye por la baja velocidad de la materia orgánica y la resistividad aumenta porque el material orgánico no es conductivo.

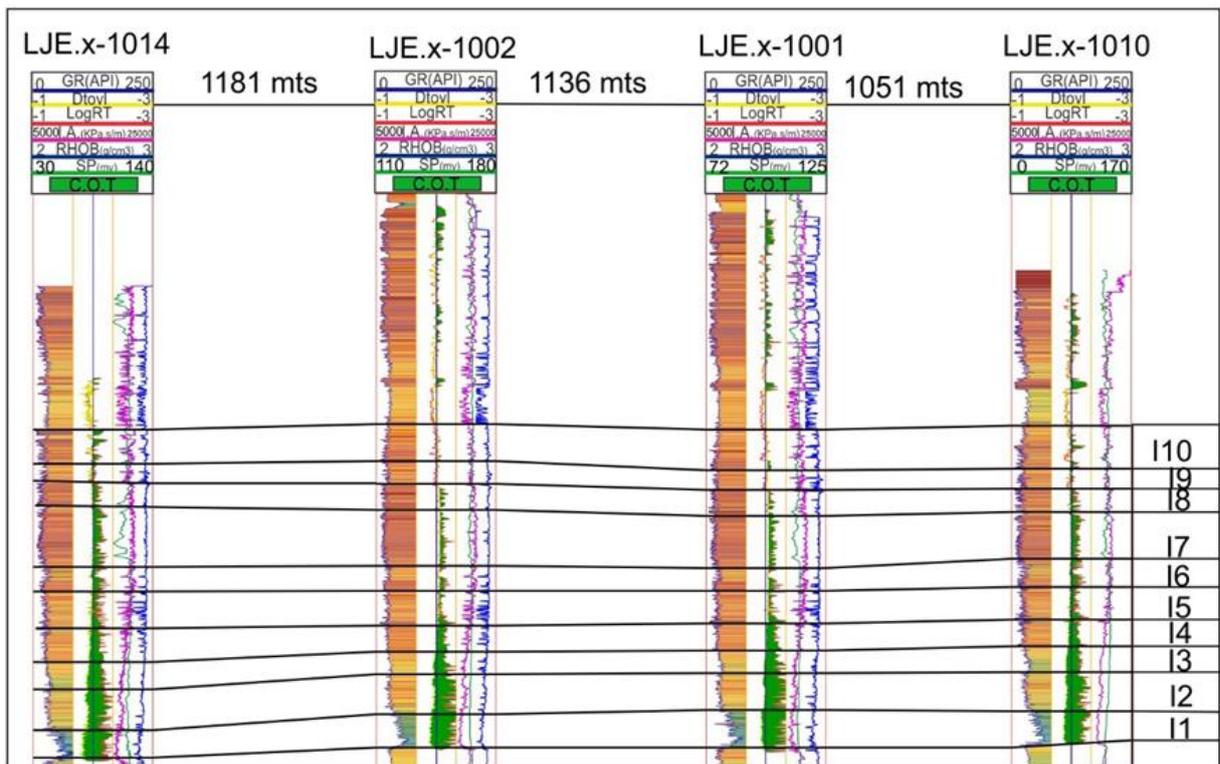
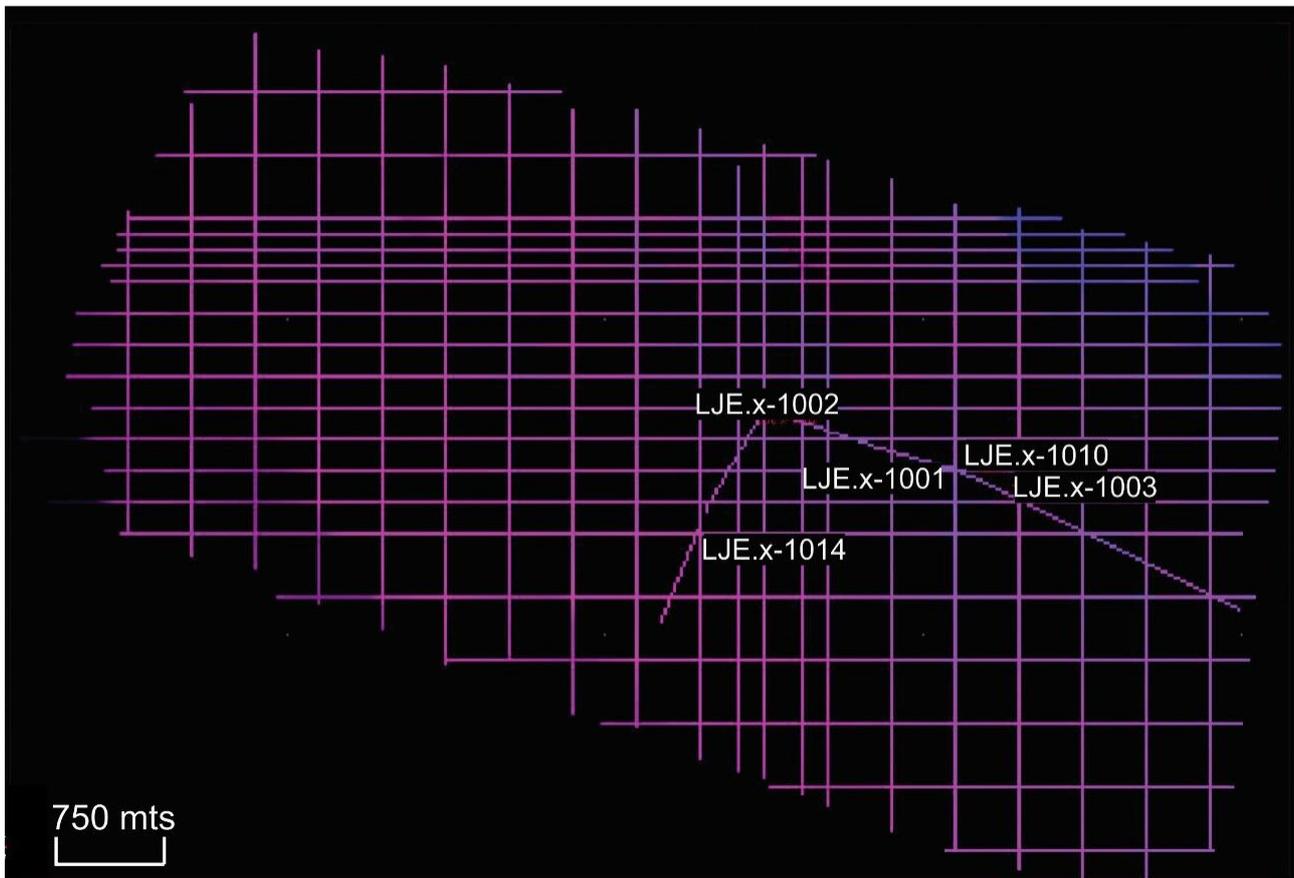


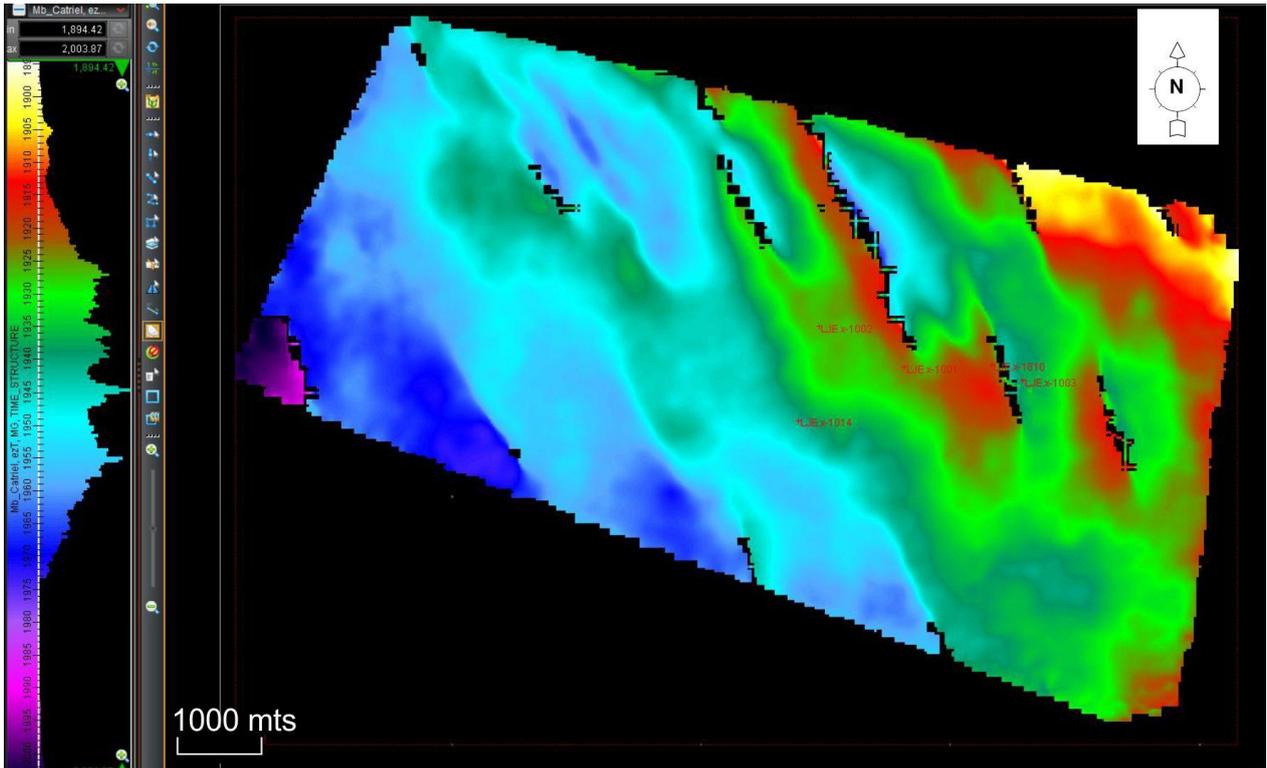
Figura 25. Intervalos interpretados dentro de la Fm. Vaca Muerta de acuerdo a los registros de cada pozo.

7.6. Interpretación de horizontes

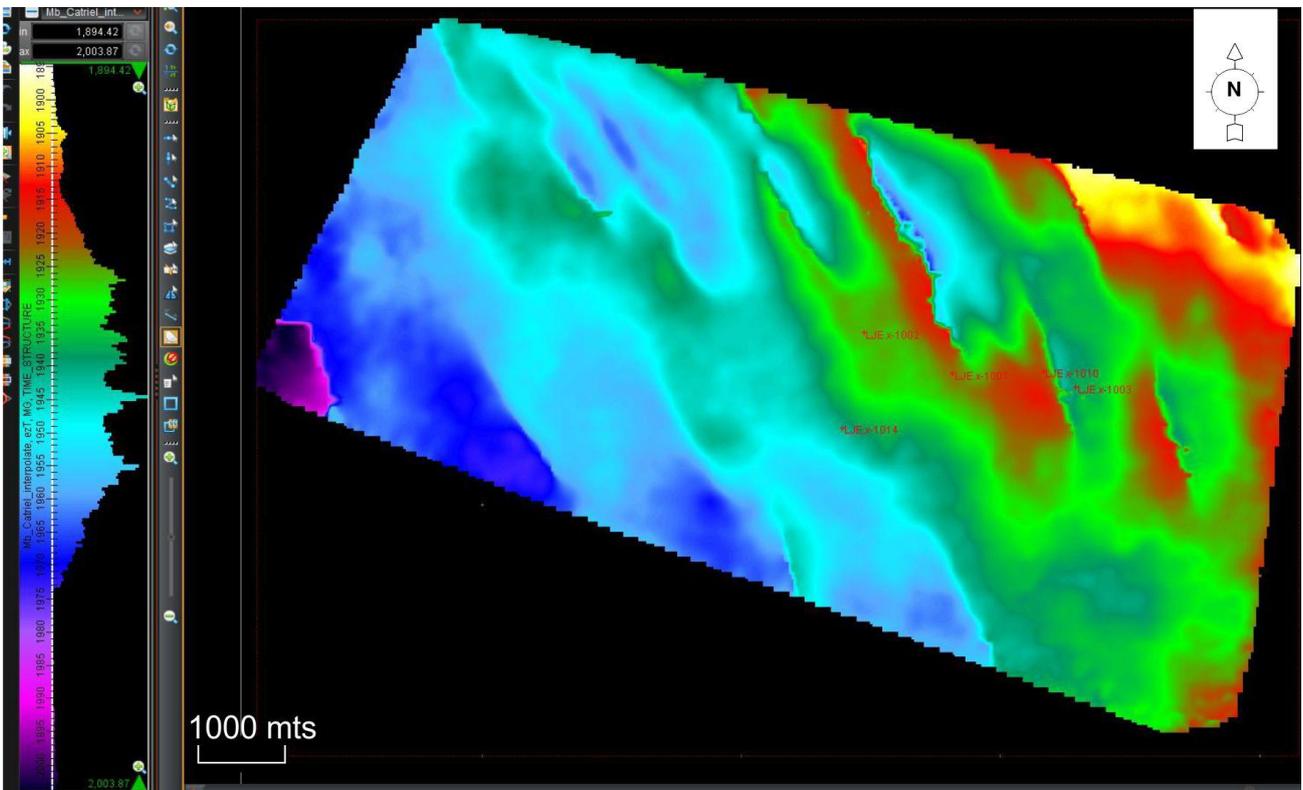
En primer lugar se interpretaron horizontes correspondientes al tope del Mb. Catriel, Tope de la Fm. Quintuco, tomando como referencia los topos formacionales en los pozos. Luego se interpretaron los 10 intervalos, obtenidos de la correlación entre los registros de pozo. Los horizontes fueron interpretados siguiendo una grilla de 20 inline por 20 crossline de manera general, en aquellos lugares de mayor complejidad estructural se siguió una grilla de 5 inline por 5 crossline, (Mapa 2) Luego se utilizó la herramienta eztracker la cual toma el dato interpretado y lo extrapola al dato sísmico, (Mapa 3). Posteriormente se realizó un interpolado, con el fin de que no quede dato sísmico sin interpretar, (Mapa 4).



Mapa 2. Grilla con la que se interpretó el tope del Mb. Catriel.



Mapa 3. Horizonte del Tope de Mb. Catriel creado a partir de la grilla vista en el mapa 3, aplicando el método automático.



Mapa 4. Horizonte del Tope del Mb. Catriel, creado con la herramienta de interpolado.

7.7. Crossplot entre registros de pozo

Con el fin de encontrar alguna relación entre los registros de pozos, se realizaron correlaciones entre ellos. Las correlaciones realizadas fueron: GR vs. Impedancia Acústica, Densidad, Sonico, SP, C.O.T; Impedancia acústica vs Densidad, Sonico, SP, C.O.T; C.O.T vs Densidad, Sonico, SP; Sonico vs Densidad, SP.

De los crossplot realizados entre los registros de pozos se observó que la correlación entre los datos de GR y valores de Impedancia acústica muestra una relación inversamente proporcional entre estos dos parámetros, y que se pueden agrupar los datos en tres grupos distintos. Esto nos permite segregar los intervalos de acuerdo a sus valores de GR e impedancia acústica y definir tres secciones diferentes. La sección 1 posee valores intermedios y altos de GR pero de muy baja impedancia y abarca al intervalo II. La sección 2 presenta valores intermedios de GR e impedancia acústica, correspondiéndose con los intervalos I2 e I3. La sección 3 posee bajos valores de GR y altos de impedancia acústica, ésta sección abarca desde el intervalo I4 hasta el tope del intervalo de estudio. (Figura 26, 27, 28,29,30)

Esta correlación nos indica que sería factible realizar una inversión sísmica para obtener mayor detalle de la distribución de las secciones correspondientes a la Fm. Vaca Muerta, el cual no pudo realizarse en este trabajo porque no se contó con el software correspondiente.

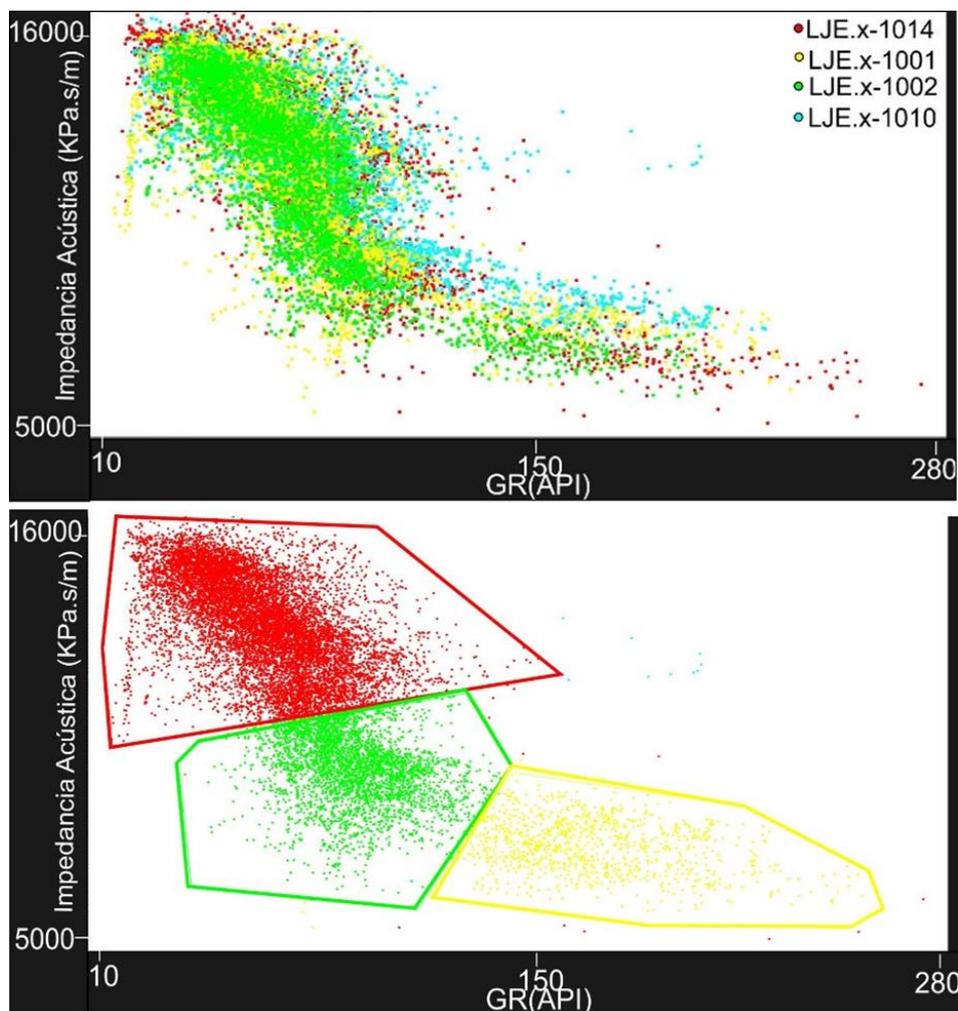


Figura 26 Correlación entre los valores de GR e impedancia acústica de los pozos LJE.x-1001 LJE.x-1002, LJE.x-1010 y LJE.x-1014. En la imagen inferior se observan los polígonos en los que se pueden agrupar los datos. Amarillo=Secc.1; Verde= Secc.2; Rojo=Secc.3

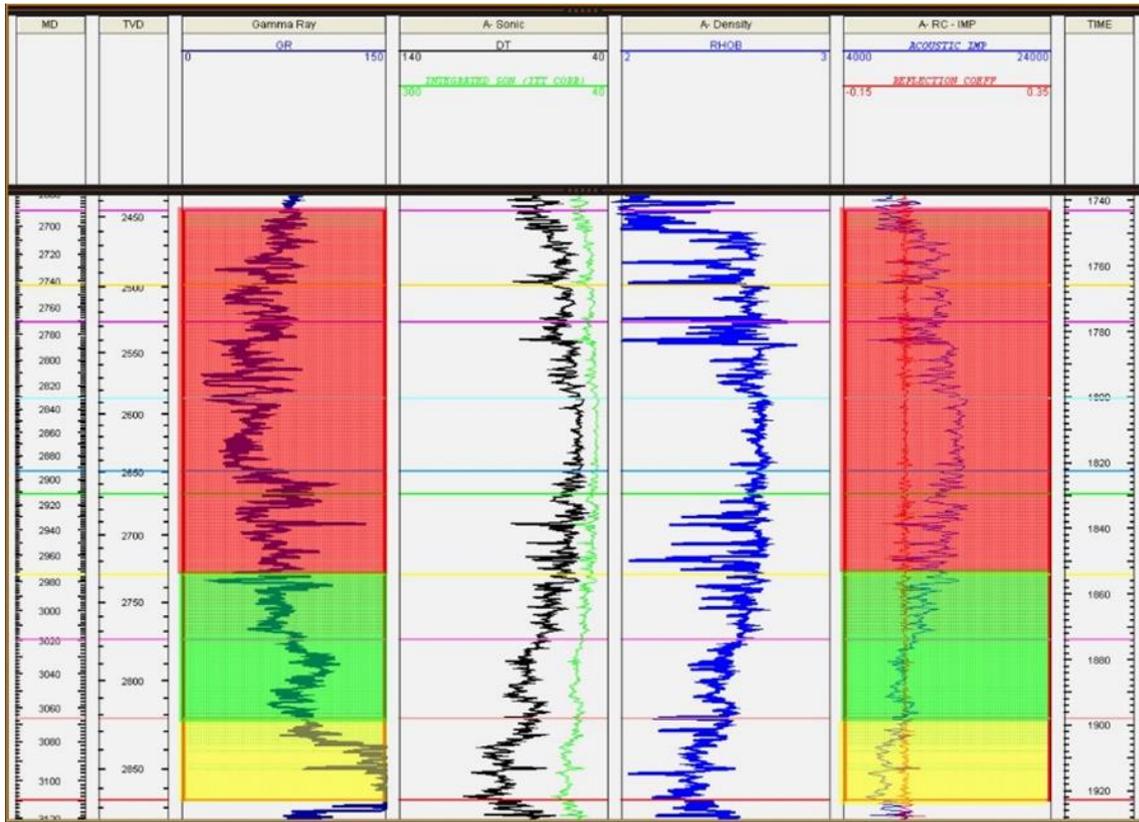


Figura 27. Visualización de las secciones en el pozo LJE.x-1001.

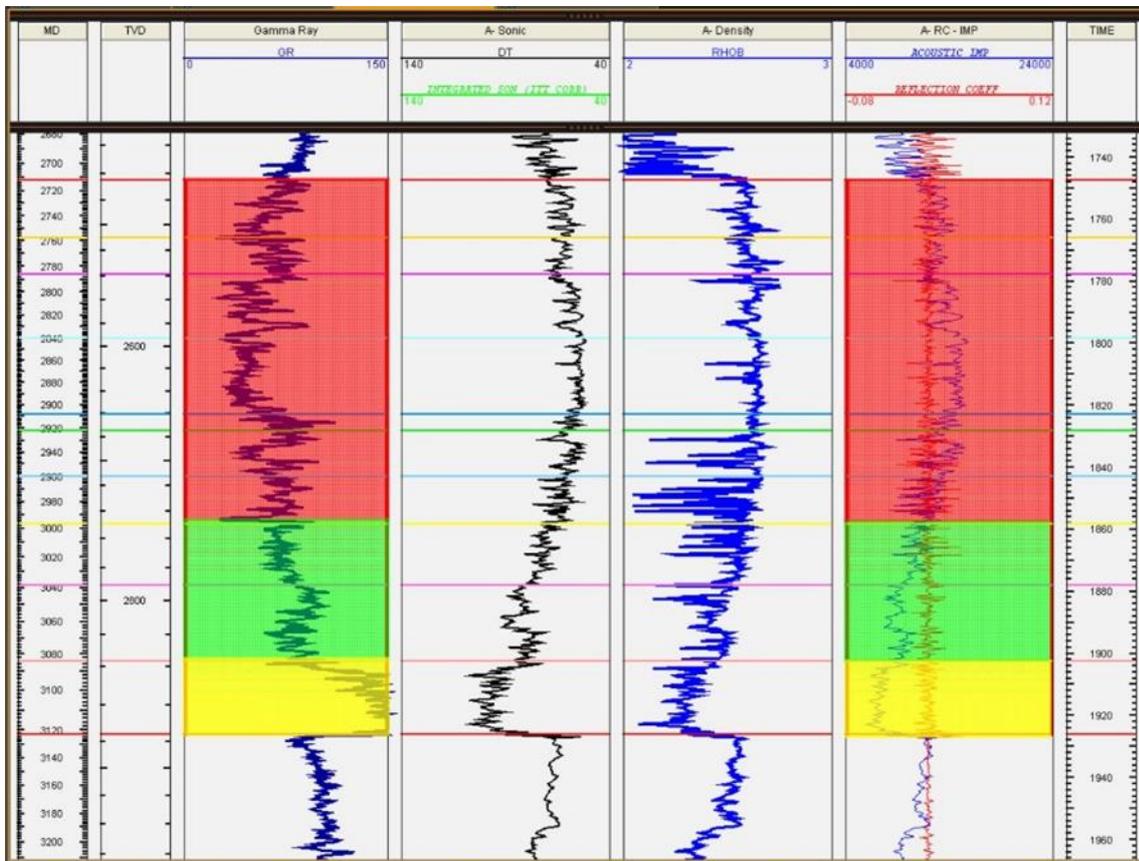


Figura 28. Visualización de las secciones en el pozo LJE.x-1002.

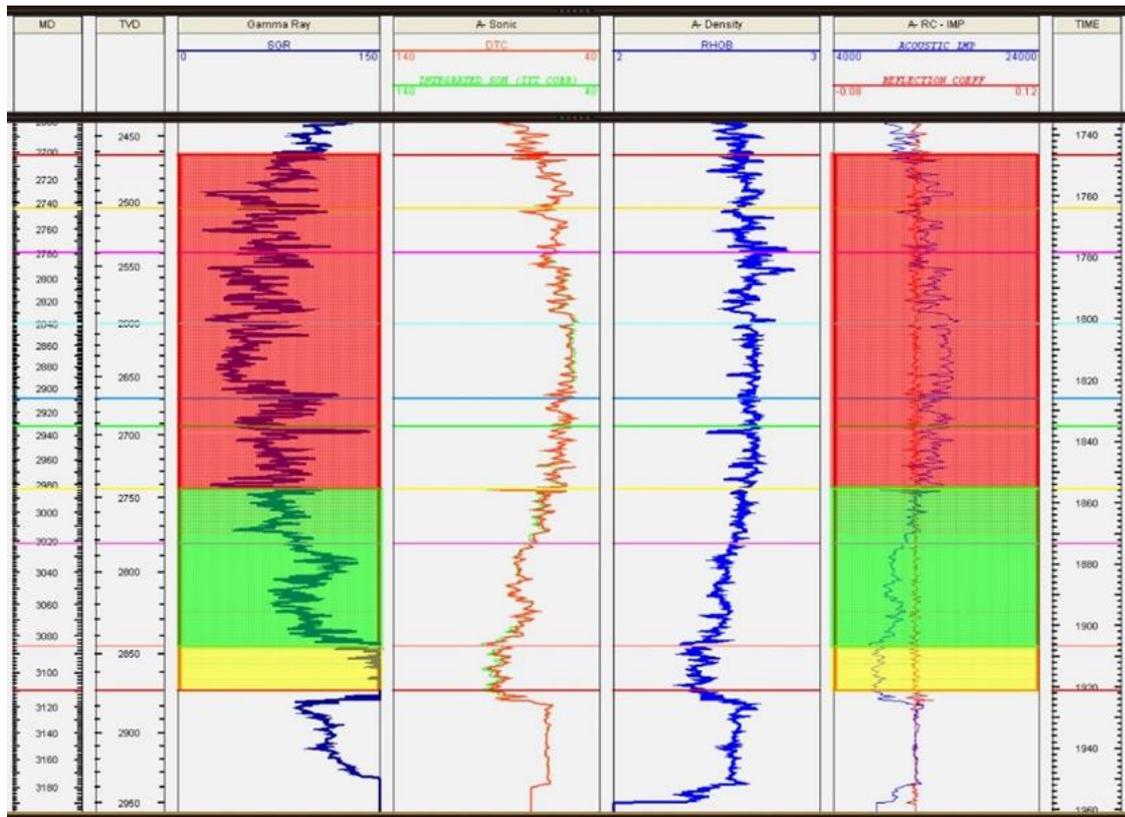


Figura 29. Visualización de las secciones en el pozo LJE.x-1010.

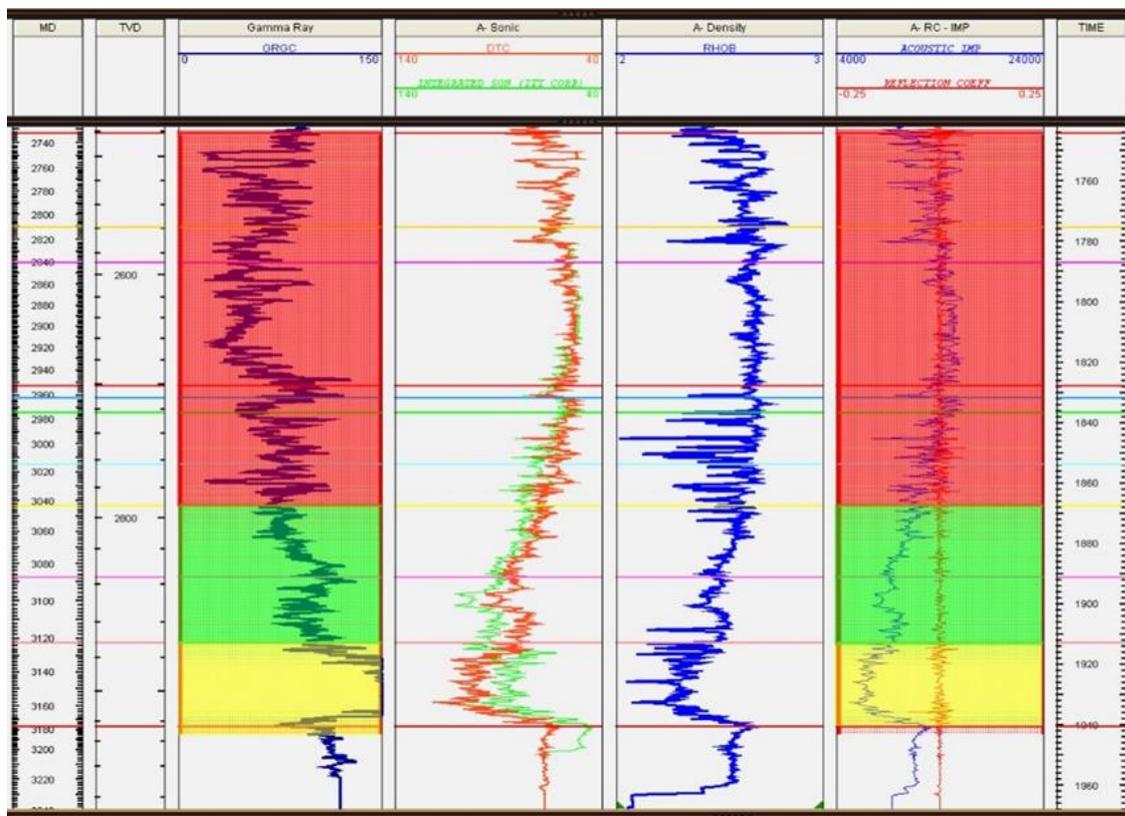


Figura 30. Visualización de las secciones en el pozo LJE.x-1014.

7.8. Descripción de secciones.

Como se ha mencionado anteriormente se ha podido identificar en el intervalo de estudio, tres secciones diferentes, en cuanto a valores de rayos gamma e Impedancia acústica, el primero nos indica litología y el segundo el comportamiento de una roca al ser estimulada por una onda sísmica. (Figura 31)

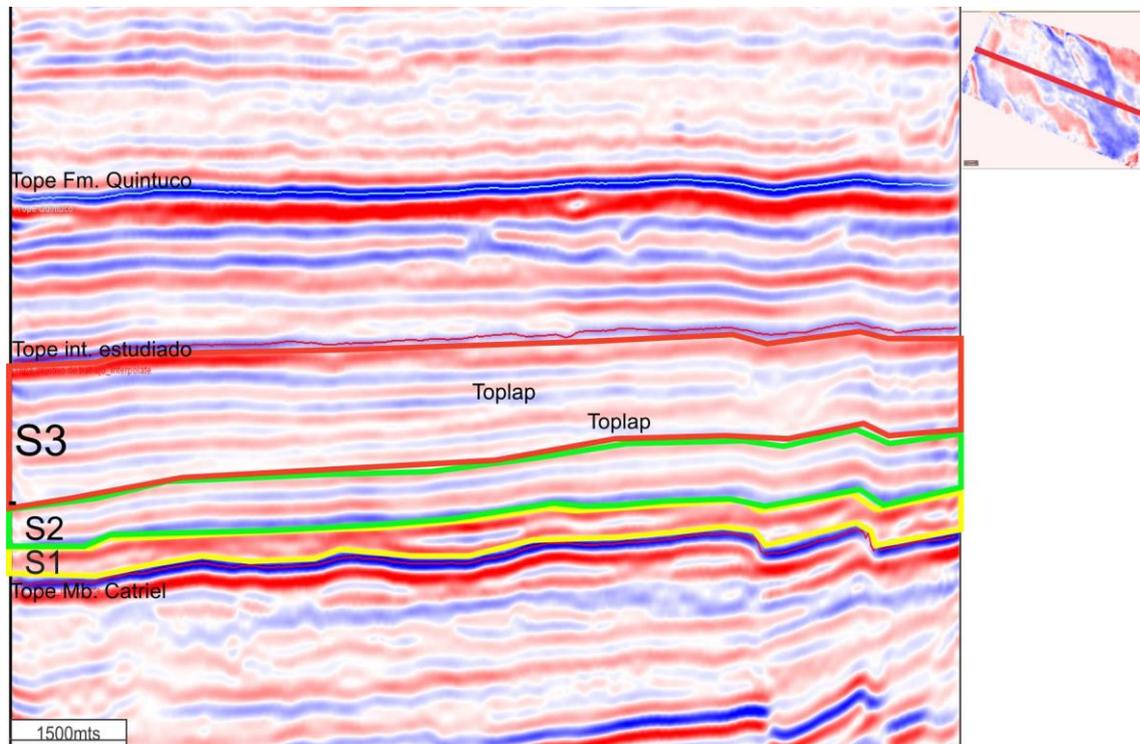
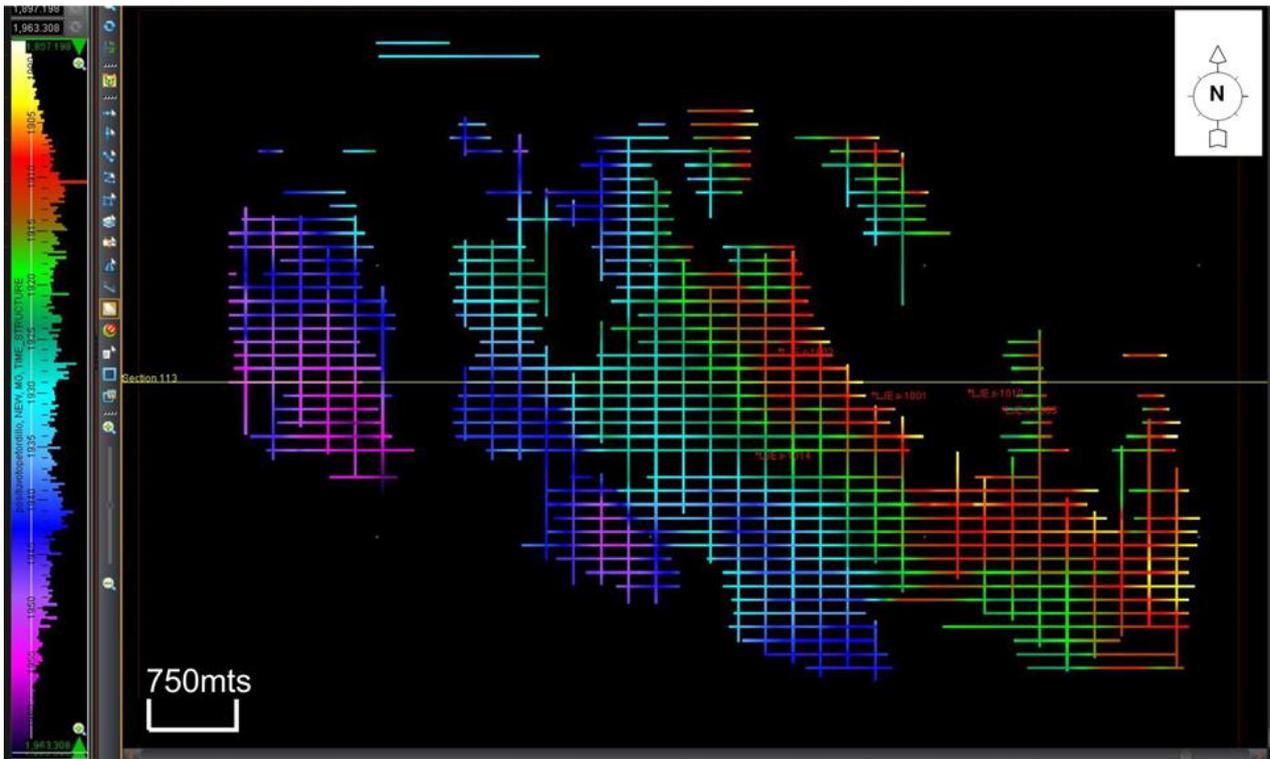


Figura 31. Secciones definidas a partir de la correlación GR vs. Impedancia Acústica, en sección sísmica.

Sección 1: Esta sección posee altos valores de rayos gamma y bajos de impedancia acústica. Los valores altos de GR, son indicativos de sedimentos finos y de presencia de materia orgánica. En dos pozos que poseen rayo gamma espectral, se puede observar que los valores de GR altos se corresponden con un aumento del contenido de Uranio, este elemento en particular está asociado a la materia orgánica, el Torio también aumenta en cambio, la concentración de Potasio es baja en esta sección, por lo que se descarta que sean depósitos inmaduros. Con estos datos podemos decir que los valores altos de GR son indicativos de una unidad rica en materia orgánica compuesta preferentemente por depósitos finos pero con moderada participación de arcillas y con aporte de sedimentos volcánicos indicados por los valores de Torio. Los valores bajos de impedancia acústica se deben a que esta sección presenta valores bajos de velocidad y densidad, debido a la presencia de materia orgánica. El cruce de Passey nos indica que esta unidad posee características de roca madre, debido a que la resistividad aumenta y el sónico disminuye. Con respecto a la sísmica, esta unidad presenta reflectores de alta amplitud, en su mayoría continuos interrumpidos por fallas normales. Se observó en dicha sección un reflector positivo no continuo, el cual es visible en gran extensión del volumen pero no está presente en ciertos sectores, ver Mapa 5. Como se puede ver en sección (Figura 32), este cuerpo se presenta en aquellos lugares donde la Fm. Vaca Muerta esta relleno del paleorelieve del miembro Catriel, donde el tope de este posee depresiones y también se encuentra cercano a las zonas de fallas.



Mapa 5. Reflector positivo discontinuo en la base de la Fm. Vaca Muerta.

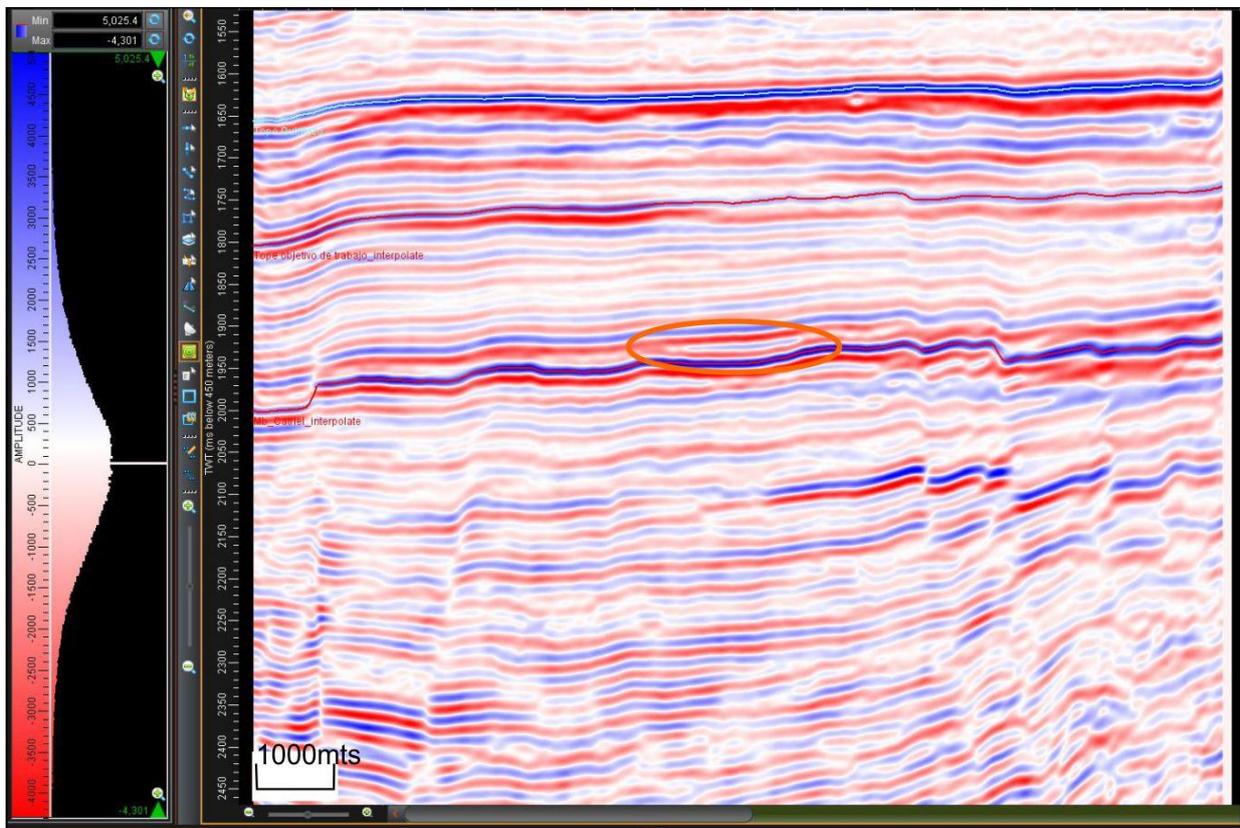


Figura 32. En esta sección dentro del círculo rojo, puede observarse el reflector positivo discontinuo en la base de la Fm. Vaca Muerta.

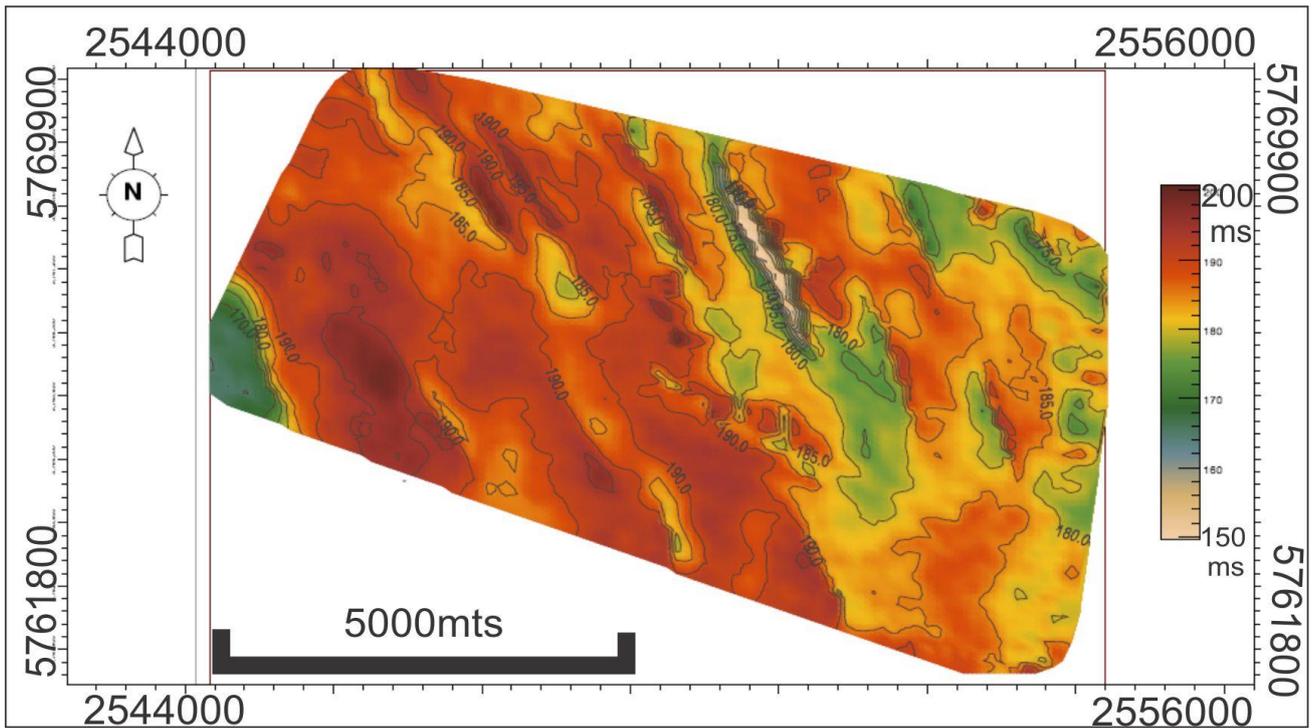
Sección 2: Posee valores intermedios de rayos gamma e impedancia acústica. Los valores de Uranio y Torio en esta sección comienzan a disminuir, mientras que el Potasio aumenta. Estos valores intermedios de GR y bajos de Uranio, indican una disminución del contenido de materia orgánica y un aumento del contenido carbonático en dicha unidad. Con respecto al cruce de Passey el sónico es bajo y la resistividad alta, lo que indica que esta unidad también posee materia orgánica, pero menor a la sección 1, debido a los valores de Uranio que presenta. En cuanto a la sísmica los reflectores son continuos, paralelos, poseen poca inclinación y amplitud media.

La sección 3 posee valores bajos de rayos gamma y altos de Impedancia acústica. El uranio y Torio disminuyen paulatinamente hasta el tope de la sección, mientras que el Potasio aumenta hacia el tope. En cuanto al Cruce de Passey el sónico aumenta y la resistividad disminuye hacia el tope de la sección. Lo anteriormente descrito indica que la unidad contiene un mayor aporte carbonático y que no posee una cantidad de materia orgánica significativa. En cuanto a la sísmica en esta sección los reflectores se encuentran inclinados con terminaciones en toplap que indican un sistema de baja tasa de progradación en dirección noroeste (Figura 31). En el sector Este del volumen, se observaron reflectores con terminaciones poco definidas, los cuales pueden interpretarse como reflectores en terminación downlap hacia el NO y luego de toplap hacia el SE, esta interpretación coincide con el contexto estratigráfico de la Fm. Vaca Muerta debido a que inicia con apilamiento retrogradacional-agradacional y luego evoluciona a un apilamiento progradacional. Otra interpretación posible es que la forma que poseen estos reflectores se debe a la combinación de resolución vertical grande e influencia del contexto estructural trastensional. (Figura 31)

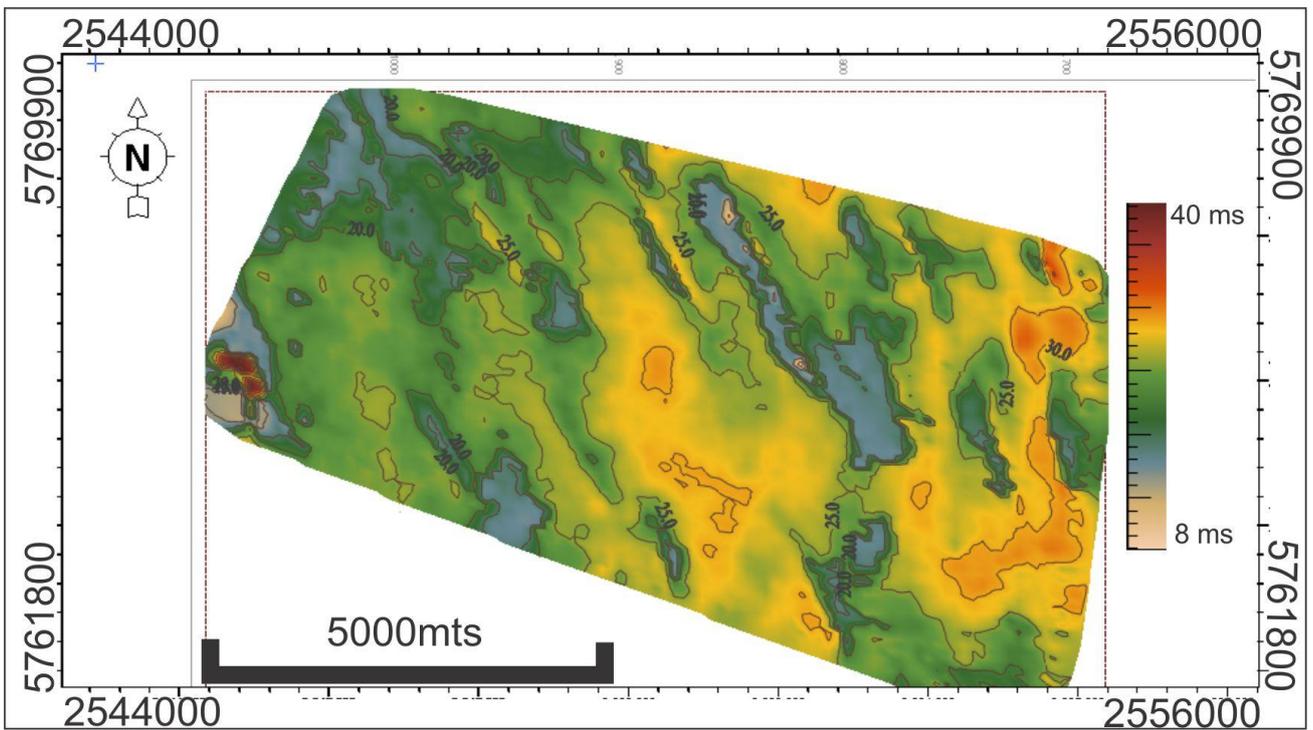
La mayor parte del intervalo analizado (sección 1 y 2) se halla dentro de lo que fue definido por Gonzales et al., 2016 como secciones de *topset* en los intervalos basales y de *forset* muy proximal en los términos superiores (sección 3). Además la base y tope del intervalo 1 y el tope del intervalo 2 interpretados en este trabajo coinciden con los reflectores sísmicos definidos en la Transecta regional de la Fm. Vaca Muerta como T1, T2 y T3(González et al., 2016.)

7.9. Mapas isocronopáquicos

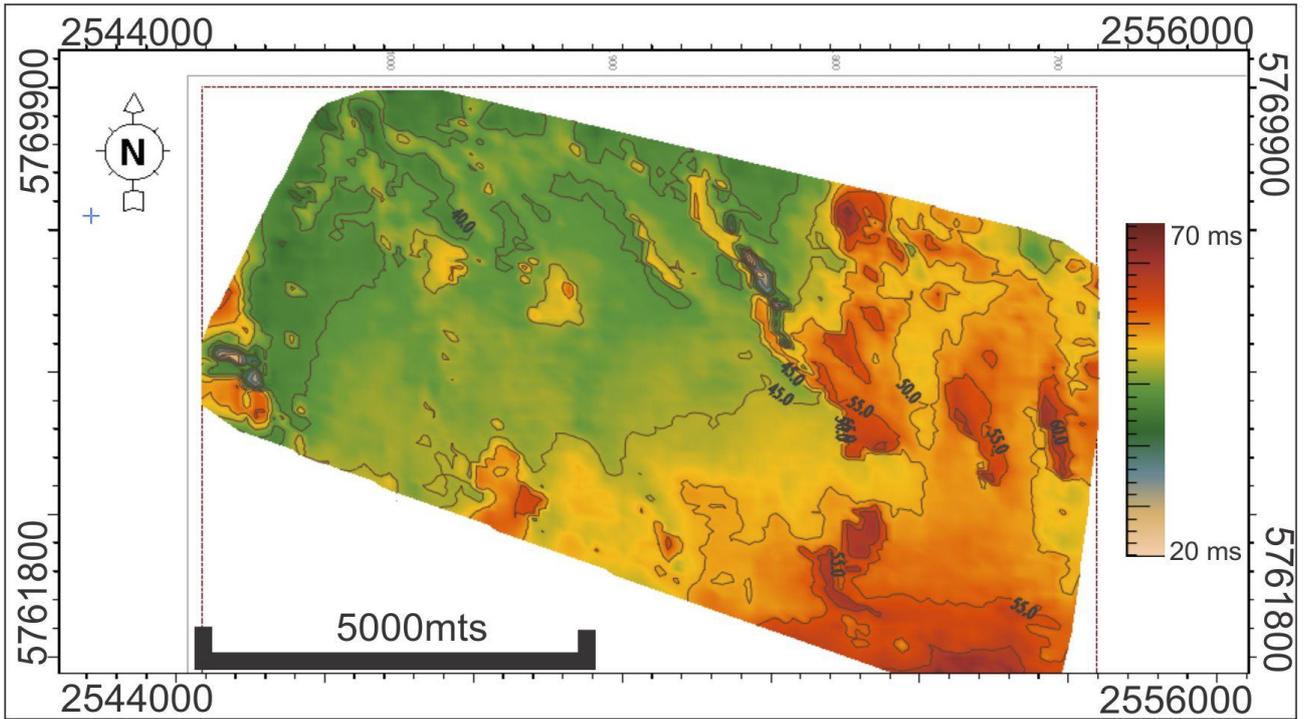
El espesor en tiempo del intervalo de trabajo varía entre 200 y 150 ms, aumenta desde el NE hacia el SO, en este extremo disminuye nuevamente. (Mapa 6). En los mapas isócronos se observa que el espesor en tiempo de la sección 1, está fuertemente afectado por fallas normales y por el paleorelieve de la Fm. Catriel, en general el espesor aumenta de SE a NO, los espesores mayores toman la forma de cuerpos orientados de NO a SE y los menores espesores se encuentran cercanos a las fallas (Mapa 7). El espesor del intervalo que corresponde a la sección 2 aumenta desde NO hacia el SE, siendo los límites entre ellos irregulares, con una disminución en las áreas afectadas por las fallas, (Mapa 9). En la sección 3 aumenta gradualmente el espesor en tiempo desde el SE hacia el NO, esto se debe a que las progradaciones se dirigen hacia el NO, indicando la procedencia del aporte sedimentario desde el SE, (Mapa 8).



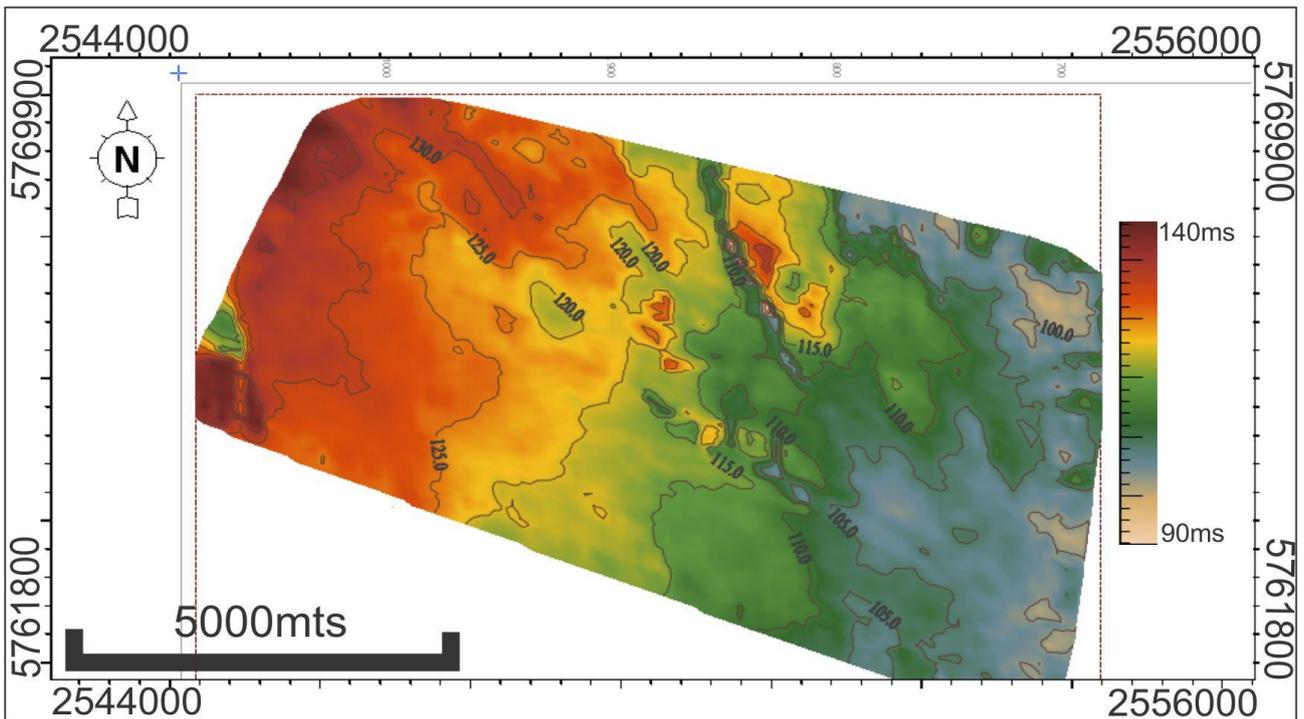
Mapa 6. Espesor en tiempo del intervalo estudiado.



Mapa 7. Espesor en tiempo de la Sección 1.



Mapa 9. Espesor en tiempo de la sección 2.



Mapa 8. Espesor en tiempo de la sección 3.

7.10. Mapas de atributos

Para extrapolar los datos de los registros de pozo a todo el volumen sísmico, se buscaron correlaciones entre los valores de los registros de pozo y los mapas de atributos. La correlaciones fueron efectuadas, en un principio, para las secciones 1, 2 y 3, posteriormente se analizaron intervalos menores de tiempo para lograr un mayor detalle. Los atributos utilizados fueron de amplitud Mean y RMS.

En la sección 1 se encontró correlación entre el mapa de amplitud mean de dicha sección y los valores promedio de C.O.T curva calculada a partir del cruce de Passey y un dato del pozo LJE.x-1001, la cual posee un coeficiente de correlación de 0,84, (Figura 33). Esto posibilitó la realización un mapa de C.O.T (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), a partir del mapa de amplitud mean (Mapa 11). Es importante tener en cuenta que en esta correlación se consideraron todos los pozos exceptuando el LJE.x- 1003 que no posee curva de C.O.T y el pozo LJE.x-1010 muestra como si tuviera una anomalía en su valor de amplitud, esto se debe a que en la posición del pozo la sísmica presenta efecto de tuning, donde varias capas de pocos espesor se ven como un solo reflector. Es importante destacar que los valores más altos de C.O.T además de corresponderse con valores altos de amplitud, coinciden con los valores de menores espesores de la sección 1, los cuales se encuentran en la crestas del paleorelieve del Mb. Catriel. También se presentan valores altos de amplitud en las zonas de fallas, pero estos deben ser descartados para el análisis de contenido de materia orgánica, ya que los valores se deben a los picos de amplitud en las zonas de fallas.

En el resto de las secciones no se encontraron correlaciones entre atributos y registros de pozo.

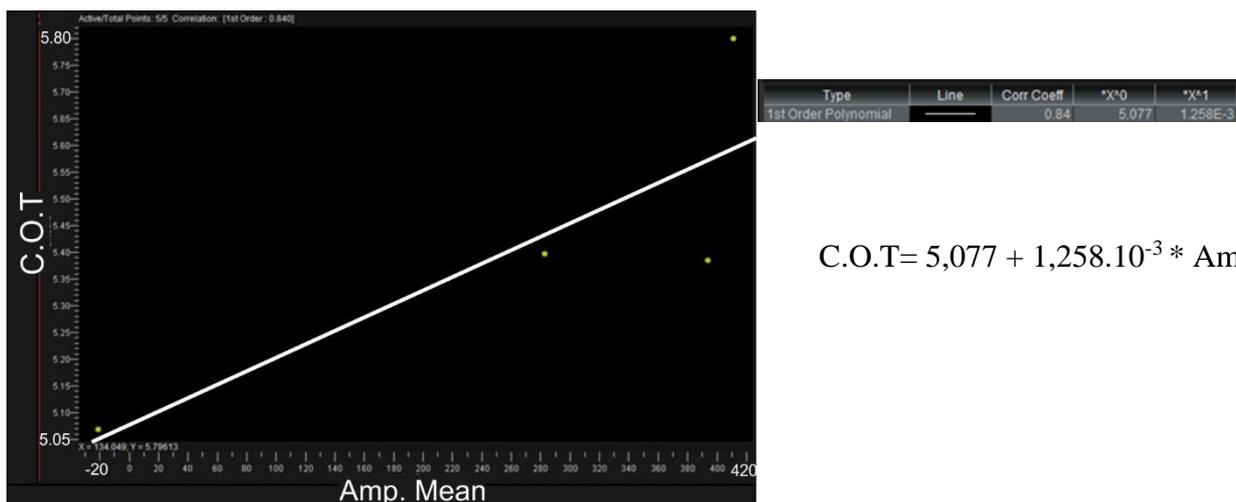
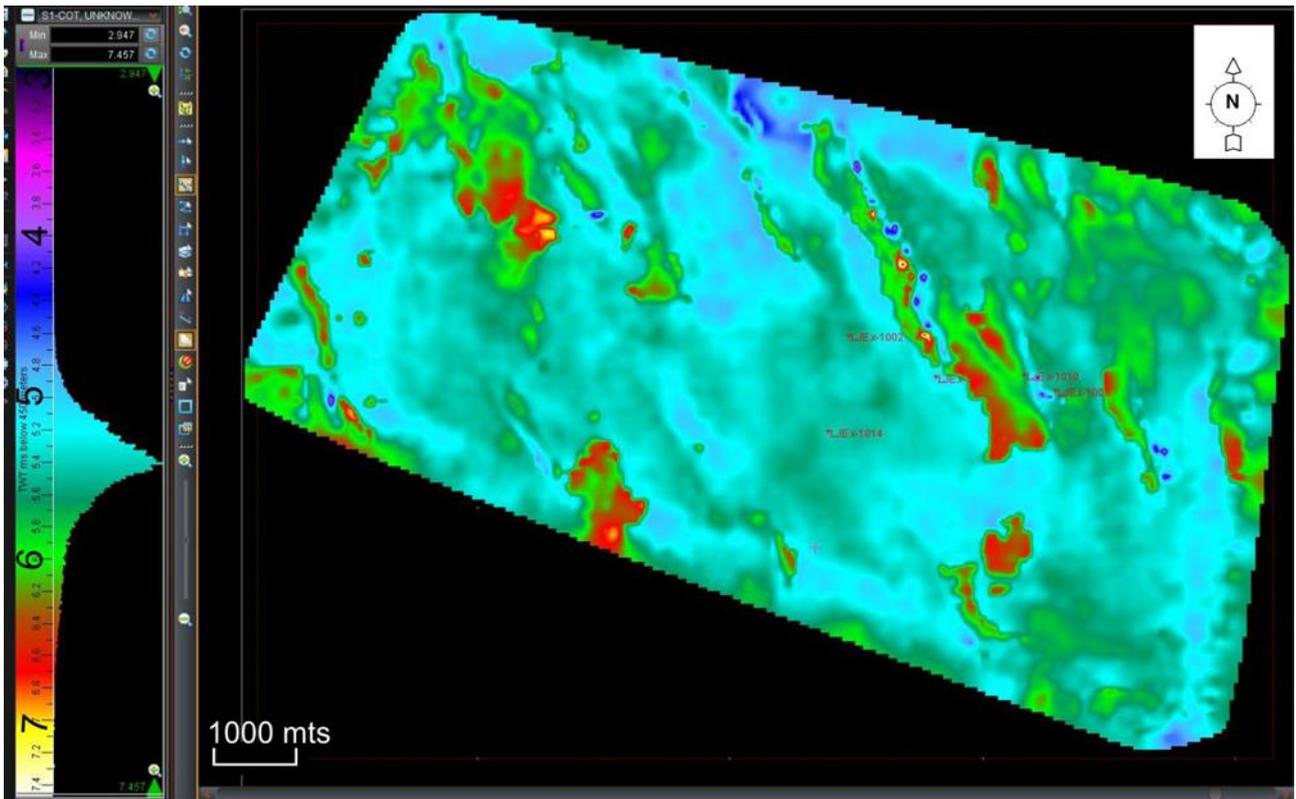
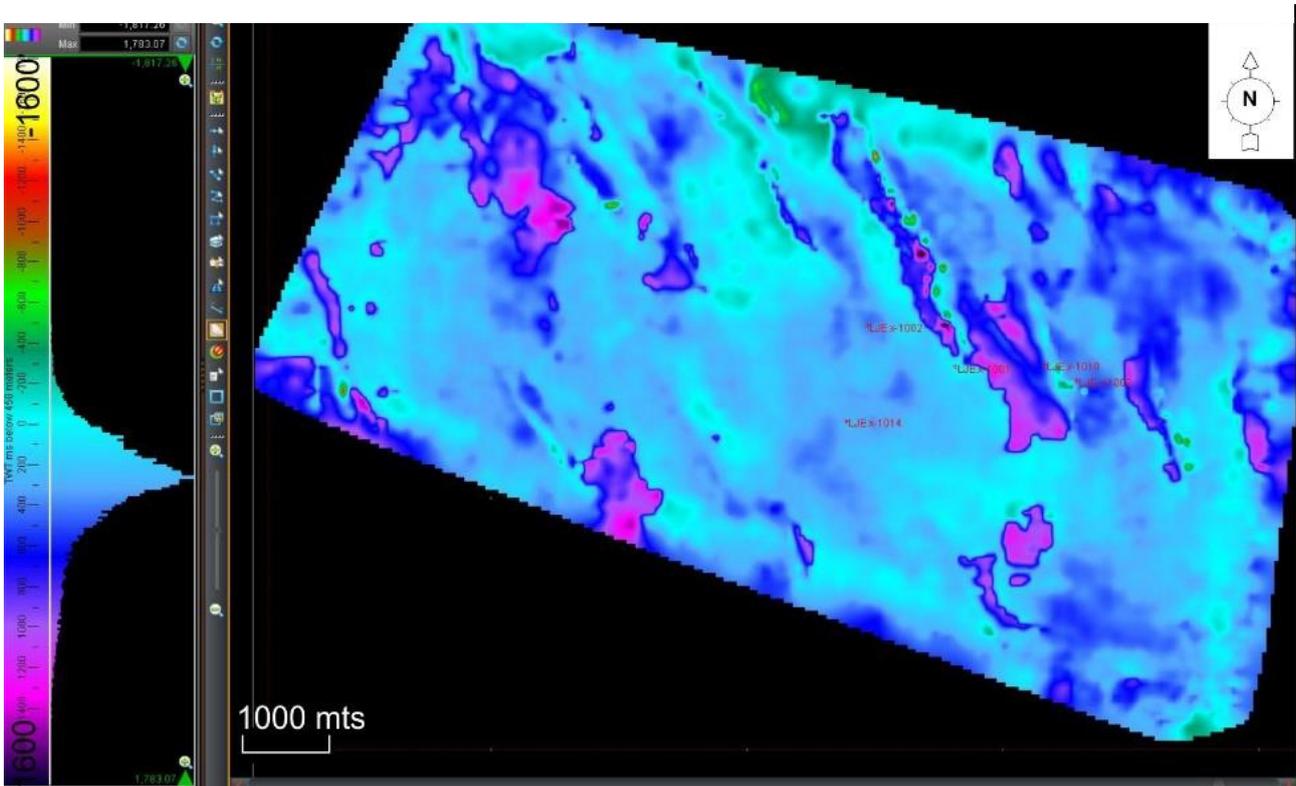


Figura 33. Correlación entre los valores de Amplitud mean y C.O.T, para la sección 1.



Mapa 10. Mapa de C.O.T de la Sección 1, construido a partir de su correlación con los valores de amplitud mean



Mapa 11. Mapa de Amplitud mean para la sección 1.

7.11. Análisis sismoestratigráfico

A partir de la interpretación del dato sísmico, se pudieron individualizar, un intervalo compuesto por reflectores horizontales continuos, interrumpidos solamente por fallas, formando un apilamiento retrogradacional- agradacional. Estos reflectores pertenecen a la base de la Fm. Vaca Muerta y abarcan la sección 1 y 2, mencionadas en este trabajo anteriormente. Por encima del apilamiento agradacional se comienzan a presentar reflectores en terminaciones de toplap, la cuales provienen desde el NO y se extienden hasta el centro del área, mostrando un patrón de evolución vertical suavemente progradacional. Hacia el SE del mismo intervalo, se observaron reflectores con geometrías poco definidas en la totalidad del volumen sísmico, los cuales pueden interpretarse como reflectores en terminación downlap hacia el NO y luego de toplap hacia el SE, esta interpretación coincide con el contexto estratigráfico de la Fm. Vaca Muerta debido a que inicia con apilamiento retrogradacional- agradacional y luego evoluciona a un apilamiento progradacional. Otra interpretación es que la forma que poseen estos reflectores se debe a la combinación de resolución vertical grande e influencia del contexto estructural. Luego los reflectores son paralelos y continuos hasta el tope del intervalo de estudio (Figura 34). Si se toma como referencia la terminología tradicional de los modelos de secuencias de estratigrafía secuencial, al primer intervalo con apilamiento retrogradacional- agradacional podría clasificarse como un cortejo transgresivo y al segundo intervalo de apilamiento progradacional como un cortejo de mar alto o *highstand*. Estos conceptos están asociados a la variación del nivel de base en una cuenca. La escala de la sísmica nos ha permitido distinguir los dos intervalos anteriormente mencionados, pero en los registros de perfiles, preferentemente en el GR, se consigue discriminar ciclos delgados que representan variaciones de alta frecuencia, la cuales no pueden ser analizadas a escala sísmica. Estas variaciones han sido estudiadas con otras herramientas que permiten hacer análisis cicloestratigráficos de alta frecuencia, Kietzmann (et al., 2011) describió en la Fm. Vaca Muerta en el área Arroyo Loncoche, tres frecuencias en 20 (precesión), 90 y 120 k.y (excentricidad), por lo que sugiere que los ciclos de alta frecuencia encontrados en la Fm. Vaca Muerta fueron producidos por cambios climáticos impulsados por la precesión modulada por la excentricidad orbital de alta frecuencia del planeta Tierra.

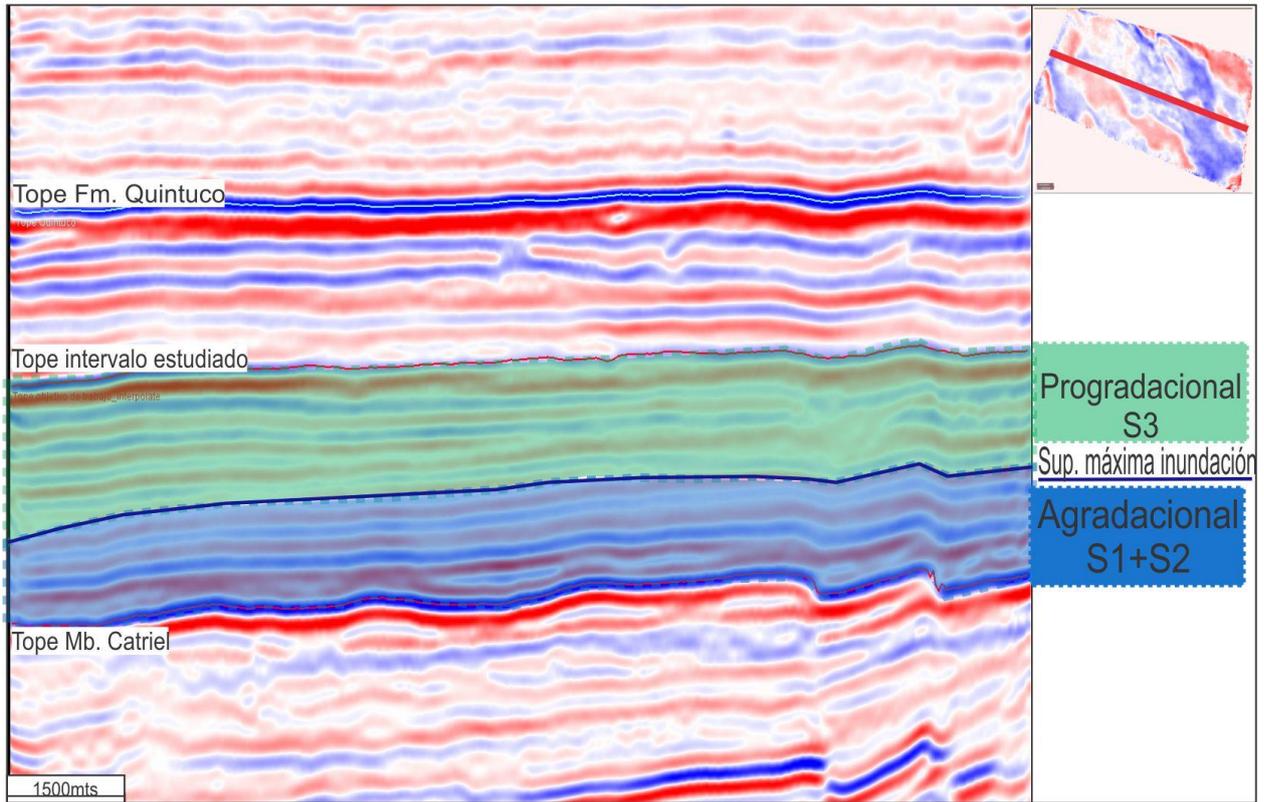


Figura 34. Sección general del volumen sísmico, en la cual puede visualizarse los cortejos interpretados y las secciones que lo componen.

8. Conclusiones.

- La deformación estructural trastensional predomina en la base de la Fm. Vaca Muerta y disminuye hacia el tope de dicha unidad.
- De la correlación entre los registros de pozo se pudieron diferenciar 10 intervalos (I-I10), de los cuales I1 e I2, se corresponden con los reflectores T2 Y T3 respectivamente, interpretados en la Transecta Regional de la Fm. Vaca Muerta (Gonzalez, G., et al., 2016)
- Estos intervalos pueden agruparse en tres secciones, de acuerdo a la correlación entre los valores de rayos gamma y de impedancia acústica. Sección 1: valores altos de rayos gamma y bajos de impedancia acústica, Sección 2: valores intermedios de rayos gamma e impedancia acústica, Sección 3: Valores bajos de rayos gamma y altos de impedancia acústica.
- En el volumen sísmico se interpretó un cortejo inferior agradacional y sobreyaciendo un cortejo progradacional.
- La sección 1, denominada por otros autores como “la cocina” (Acevedo H. y Bande A., 2018) posee cuerpos de mayor espesor que tienen orientación NO-SE, esto se debe a que ésta sección rellena el paleo relieve de la Fm Catriel. A su vez esta sección, con respecto a los registros de pozo y el cruce de Passey, se la puede identificar como una unidad de depósitos finos rica en hidrocarburos. De acuerdo con el mapa de C.O.T de dicha sección se puede inferir que los sectores más redituables para la explotación No Convencional de los recursos de hidrocarburos, son aquellos donde se encuentran los espesores más bajos de la sección, es decir en la crestas del paleorelieve del Mb. Catriel. La Sección 2, llamada “el orgánico” (Acevedo H. y Bande A., 2018), también posee características de una unidad rica en materia orgánica de acuerdo a lo indicado por el cruce de Passey, pero posee composición litológica distinta, ya que posee menor contenido de material clástico, y mayor aporte carbonático, con respecto a la sección 1. La sección 1 y 2 conforman un cortejo agradacional. Por último la Sección 3, compone el cortejo progradacional en su totalidad, no presenta características de una unidad rica en hidrocarburos, solo en su base puede contener materia orgánica y es la sección más carbonática del intervalo.
- Los valores más altos de COT, en la sección 1 se alojan en los sectores de mayor aptitud mean y menor espesor de dicha sección.

9. Bibliografía

Acevedo, H., Bande, A., 2018. Characterization of lower Vaca Muerta at Fortin de Piedra in Neuquén Basin, Argentina. The leading edge, 2018, special section: Latin America.

Apuntes Catedra de Geofísica de la Universidad Nacional del Comahue, Facultad de Ingeniería, Departamento de Geología y Petróleo, Lic. Ciencias Geológicas.

Arregui, C., Carbone, O., Leanza, H.A., 2011. Contexto tectosedimentario. XVIII Congreso Geológico Argentino. Relatorio: 29-35, Neuquén 2011.

Bechis, F. 2009. Deformación transtensiva de la cuenca Neuquina: análisis a partir de ejemplos de campo y modelos análogos. Tesis Doctoral, Universidad de Buenos Aires (inérita), 250 p., Buenos Aires.

Cristallini, E., Tomezzoli, R., Pando, G., Gazzera, C., Martínez, J.M., Quiroga, J., Buhler, M., Bechis, F., Barredo, S., Zambrano, O., 2009. Controles precuianos en la estructura de la Cuenca Neuquina. Revista de la Asociación Geológica Argentina 65 (2): 248-264.

Fossa Mancini, E., Feruglio, E., Yusen de Campana, J.C. 1938. Una reunión de geólogos de YPF y el problema de la terminología estratigráfica. Boletín de Informaciones Petroleras 15(171):1-67. Buenos Aires.

González, G., Desjardins, P., Vallejo, M.D., González Tomassini, F., Kietzmann, D., Gómez Rivarola, L., Marchal, D., Domínguez, R.F., Fantín, M. (eds.) 2016. Transecta Regional de la Formación Vaca Muerta: Integración de sísmica, registros de pozos, coronas y afloramientos. Instituto Argentino del Petróleo y el Gas. Asociación Geológica Argentina, 244 pp., Buenos Aires

Gulisano, C.A., Gutiérrez Pleimling, A., Digregorio, R.E. 1984. Análisis estratigráfico del intervalo Tithoniano - Valanginiano (Formaciones Vaca Muerta - Quintuco y Mulichinco) en el suroeste de la provincia del Neuquén. IX Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 221-235. Buenos Aires.

Introducción a la interpretación de los registros de pozos, Schlumberger, 2005.

Introducción al análisis de los registros de pozos, Halliburton, 2010.

Kietzmann, D.A., Martín-Chivilet, J., Palma R.M., López-Gómez, J., Lescano, M., Concheyro A., 2011. Evidence of precessional and eccentricity orbital cycles in a Tithonian source rock: The mid-outer carbonate ramp of the Vaca Muerta Formation, northern Neuquén Basin, Argentina. AAPG Bulletin, v. 95, no. 9, pp 1459-1474.

Leanza, H. A., Marchese, H. G., Riggi, J.C., 1977. Estratigrafía del Grupo Mendoza con especial referencia a la Formación Vaca Muerta entre los Paralelos 35° y 40° l.s. Cuenca Neuquina-Mendocina. Revista de la Asociación Geológica Argentina 32, 190-208.

Legarreta, L. y Villar, H.J., 2012, The Vaca Muerta Formation (Late Jurassic- Early Cretaceous), Neuquén Basin, Argentina: Sequences, Facies and Source Rock Characteristics. Unconventional Resources Technology Conference, URTEC:2170906.

Legarreta, L., Uliana, M.A. 1991. Jurassic / Cretaceous marine oscillations and geometry of a back-arc basin fill, central Argentine Andes. En: Mc Donald, D.I.M.(Ed.): Sedimentation, Tectonics and Eustacy. I.A.S. Special Publication 12: 429-450. London.

Mitchum, R.M., Uliana, M.A. 1982. Estratigrafía sísmica de las Formaciones Loma Montosa, Quintuco y Vaca Muerta, Jurásico Superior y Cretácico Inferior de la Cuenca Neuquina, Argentina, 1° Congreso Nacional de Hidrocarburos, Petróleo y Gas, Actas 439-484. Buenos Aires.

Mitchum, R.M., Uliana, M.A. 1985. Seismic stratigraphy of carbonate depositional sequences. Upper Jurassic / Lower Cretaceous. Neuquén Basin, Argentina. En: Berg B.R. & Woolverton, D.G. (Eds.): Seismic stratigraphy, II. An integrated approach to hydrocarbon analysis. A.A.P.G. Mem. 39: 255-274. Tulsa.

Mosquera, A., Ramos, V.A. 2006. Intraplate deformation in the Neuquén Embayment. En: Kay, S.M., Ramos, V.A. (Eds.): Evolution of an Andean margin: A tectonic and magmatic view from the Andes to the Neuquén Basin (35°-39° S latitude), Geological Society of America Special Paper 407: 97-123.

Pángaro, F., Martínez, R., Sattler, F., Bettini, F.H., 2011. El flanco oriental. XVIII Congreso Geológico Argentino. Relatorio: 407-418.

Uliana, M. A., Dellape, D. A., Pando, G. A., 1977. Análisis estratigráfico y evaluación del potencial petrolífero de las Formaciones Mulichinco, Chachao y Agrio, Cretácico Inferior de las Provincias de Neuquén y Mendoza. *Petrotecnia* 1-2, 41-46.

Uliana, M. A., Legarreta, L., Laffite, G. A., Villar, H. J., 1999. Estratigrafía y geoquímica de las facies generadoras de hidrocarburos en las cuencas petrolíferas de Argentina. IV Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Actas, 1, 1-61.

Vail, P.R., Mitchum, R.M., Thomson, S. 1977. Seismic stratigraphy and global changes of sea level. Part 4. Global cycles of relative changes of sea level. *American Association of Petroleum Geologist Memoir*, 26: 83-97. Tulsa.

Weaver, C., 1931. Paleontology of the Jurassic and Cretaceous of West Central Argentina. *Memoir, University of Washington* (469 pp.).
