

**Universidad Nacional de Río Negro**

**Sede Alto Valle y Valle Medio**

**Carrera de Licenciatura en Geología**

**Trabajo final de grado**

**“Controles estructurales y magmáticos en reservorios de la  
Formación Mulichinco en el yacimiento Volcán Auca Mahuida,  
Provincia de Neuquén, Argentina”**

**Autora: Sabina Antonella Chiacchiera Lobos**

**Directores: Soledad Ribas y Darío Orts**

**Neuquén**

**- septiembre 2019 -**

## ÍNDICE

<b>1.</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>6</b>
1.2.	OBJETIVOS.....	6
1.3.	UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	6
1.4.	HISTORIA DE PRODUCCIÓN DE LOS YACIMIENTOS .....	9
<b>2.</b>	<b>MARCO GEOTECTÓNICO DE LA CUENCA NEUQUINA .....</b>	<b>11</b>
2.1.	CONTEXTO MORFOESTRUCTURAL .....	11
2.1.1.	Faja plegada y corrida del Agrio.....	11
2.1.2.	Dorso de Los Chihuidos .....	11
2.1.3.	Plataforma Nororiental.....	12
2.1.4.	El engolfamiento Neuquino .....	12
2.1.5.	La dorsal de Huinca .....	12
2.2.	BASAMENTO .....	13
2.3.	EVOLUCIÓN TECTÓNICA .....	13
<b>3.</b>	<b>ESTRATIGRAFÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO.....</b>	<b>18</b>
3.1.	FORMACIÓN VACA MUERTA.....	18
3.2.	FORMACIÓN QUINTUCO .....	19
3.3.	FORMACIÓN MULICHINCO .....	20
3.4.	FORMACIÓN CENTENARIO .....	23
3.5.	FORMACIÓN RAYOSO .....	24
3.6.	GRUPO NEUQUÉN .....	25
3.7.	GRUPO MALARGÜE.....	26
<b>4.</b>	<b>EVOLUCIÓN DEL VOLCÁN AUCA MAHUIDA.....</b>	<b>26</b>
<b>5.</b>	<b>SISTEMA PETROLERO.....</b>	<b>32</b>
5.1.	SISTEMA PETROLERO EN EL ENGOLFAMIENTO NEUQUINO Y EN EL VOLCÁN AUCA MAHUIDA.....	33
<b>6.</b>	<b>INTRUSIVOS.....</b>	<b>37</b>
<b>7.</b>	<b>METODOLOGÍA Y ANÁLISIS DE DATOS .....</b>	<b>38</b>
7.1.	SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA .....	38
7.2.	PERFILES .....	43
7.3.	MAPAS ESTRUCTURALES .....	47
7.4.	MAPAS ISOPÁQUICOS.....	56
7.5.	TRANSECTAS.....	59
7.6.	ENSAYOS Y CONTACTOS DE FLUIDOS .....	63
7.7.	MAPAS DE POROSIDAD EFECTIVA.....	69
7.8.	MAPAS DE ESPESOR ÚTIL.....	70
7.9.	CÁLCULO DEL OOIP Y OGIP (PETRÓLEO Y GAS ORIGINAL EN LA FORMACIÓN) .....	74
<b>8.</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>79</b>
8.1.	ESTRATIGRAFÍA.....	79
8.2.	INTRUSIVOS .....	81
8.3.	ESTRUCTURA .....	86
8.4.	FLUIDOS DEL SISTEMA PETROLERO .....	89
<b>9.</b>	<b>DISCUSIÓN Y PROPUESTAS.....</b>	<b>91</b>
<b>10.</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>92</b>
<b>11.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>95</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Ubicación del Volcán Auca Mahuida en la Provincia del Neuquén.....	8
Figura 1.2 - Área de estudio con la ubicación de los pozos analizados .....	9
Figura 1.3 – Historia de producción de los yacimientos Volcán Auca Mahuida y Risco Alto – Las Manadas.. .....	10
Figura 2.1 Esquema generalizado de la columna sedimentaria de la cuenca Neuquina.....	17
Figura 3.1 – Esquema estratigráfico para la zona de tesis.....	18
Figura 3.2 – Mapa isopáquico con tendencias de maduración para la Formación Vaca Muerta. ....	19
Figura 3.3 – Esquema estratigráfico de la Formación Mulichinco .....	21
Figura 3.4 – Modelo esquemático propuesto para la Formación Mulichinco.....	23
Figura 3.5 – Esquema generalizado de la Formación Rayoso.....	25
Figura 4.1 – Ubicación del área del Complejo Volcánico de Payenia. ....	27
Figura 4.2 – a) Reconstrucción de la migración de las placas b) Modelo geológico propuesto. ....	28
Figura 4.3 – Los depósitos volcánicos principales sobre el Volcán Auca Mahuida. ....	29
Figura 4.4 – Imagen regional en la cual se han trazado las estructuras principales. ....	30
Figura 4.5 – Esquema evolutivo de la comarca del volcán Auca Mahuida.....	31
Figura 4.6 – Esquema que muestra los planos de debilidad aprovechados por el vulcanismo. ....	32
Figura 5.1 – Diferentes tipos de sistemas petroleros ígneos relacionados a <i>sills</i> y lacolitos.....	33
Figura 5.2 – Ubicación de las regiones morfoestructurales, yacimientos de petróleo en la cuenca Neuquina. ....	34
Figura 5.3 – Sección geológica esquemática entre la faja Plegada y Corrida y la plataforma Oriental	35
Figura 5.4 - Sección geológica esquemática entre el oeste del engolfamiento Neuquino y la plataforma Oriental.....	36
Figura 5.5 - Sección geológica esquemática entre la dorsal de Huincul y la plataforma Oriental .....	36
Figura 7.1 – Imagen ASTER RGB 631.....	39
Figura 7.2 – Imagen donde fueron proyectadas fallas de datos sísmicos y los lineamientos.....	40
Figura 7.3 – Lineamientos utilizados en el GIS. ....	40
Figura 7.4 – Superposición de mapa de soluciones de Euler con <i>sill</i> intruido en la Formación Quintuco. ....	41
Figura 7.5 - Superposición de mapa de soluciones de Euler con lacolito intruido en la Formación Mulichinco. ....	41
Figura 7.6 – Correlación de una falla observada con la geología de las coladas. ....	42
Figura 7.7 – Arriba, mapa del área de trabajo. Abajo sección estructural de cuatro pozos de la zona	43
Figura 7.8 – Correlación esquemática realizada a partir de la interpretación de topes formacionales. 44	
Figura 7.9 – Vista de dos pozos con sus perfiles.....	45
Figura 7.10 – Imagen esquemática que muestra como se observa un cuerpo intrusivo en un perfil de imagen .....	46
Figura 7.11 – Interpretación de fallas propuesta para el tope de la Formación Mulichinco. ....	48
Figura 7.12 – Línea sísmica sobre el pozo VAM.x-1. ....	48
Figura 7.13 – Esquema que muestra la adquisición de la imagen sísmica por medio del método de VSP. ....	49
Figura 7.14 - VSP <i>Walkaway</i> visto con orientación E-O .....	51
Figura 7.15 – Mapas estructurales de las formaciones atravesadas.. .....	54
Figura 7.16 - Mapas estructurales de los miembros de la Formación Mulichinco.....	56

Figura 7.17 – Mapas isopáquicos efectuados en la Formación Mulichinco correspondientes a los miembros..... 58

Figura 7.18 – Mapa del área de estudio y las seis transectas utilizadas para la correlación. .... 58

Figura 7.19 – A) Correlación entre los pozos VAM-100(d) y VAM-53(d) B) Pozos VAM-73(d), VAM-100(d) y RiAIN.a-10(d)..... 59

Figura 7.20 – C) Correlación entre los pozos VAM-53(d) y RiAIN.a-10(d). D) Correlación entre los pozos VAM-75 y VAM-55(d)..... 61

Figura 7.21 – E) Correlación entre los pozos VAM-75 y VAM-62(d)(i). F) los pozos RiAIN.a-10(d) y VAM-62(d) (i)..... 62

Figura 7.22 – Tramo de los pozos VAM-54(d) y VAM-55(d) mostrando los perfiles petrofísicos..... 63

Figura 7.23 – Mapas estructurales con contacto de fluidos para los miembros Amarillo y Rojo Superior. .... 64

Figura 7.24 – Mapas estructurales con contactos de contacto de fluidos los miembros Azul y Verde.65

Figura 7.25 – Transectas esquemáticas que muestran la distribución de fluidos entre tres pozos de diferentes zonas ..... 67

Figura 7.26 – Transectas esquemáticas que muestran la distribución de fluidos entre tres pozos de diferentes zonas ..... 68

Figura 7.27 – Mapas de isopropiedades para los miembros Amarillo (A) y Rojo Superior (B)..... 68

Figura 7.28 – Mapas de isopropiedades para los miembros Azul (C) y Verde (D). .... 69

Figura 7.29 - Bloques hidráulicamente desconectados entre sí para los miembros de la Formación Mulichinco. .... 71

Figura 7.30 – Mapas de espesor útil de los miembros de la Formación Mulichinco ..... 73

Figura 7.31 – Mapa con los volúmenes de petróleo en el Miembro Amarillo para los bloques NNO y E. .... 77

Figura 7.32 – Mapa con los volúmenes de gas en el Miembro Amarillo para el bloque RiAIN..... 77

Figura 7.33 – Mapa con los volúmenes de petróleo en el Miembro Rojo Superior para todos los bloques. .... 78

Figura 7.34 – Mapa con los volúmenes de gas en el Miembro Azul de la Formación Mulichinco para todos los bloques. .... 78

Figura 7.35 - Mapa con los volúmenes de gas en el Miembro Verde de la Formación Mulichinco para todos los bloques. .... 78

Figura 8.1 - Cuello arcilloso que delimita el pase de unidades entre las formaciones Mulichinco y Centenario Inferior. .... 79

Figura 8.2 - Perfil de imagen sobre la Formación Centenario Inferior. .... 81

Figura 8.3 – Arriba imagen ASTER RGB 631 Abajo, gráfico mostrando cantidad de intrusivos por pozo. .... 82

Figura 8.4 – Mapa de espesor del lacolito intruido en la Formación Mulichinco..... 83

Figura 8.5 – Ejemplo de un esquemático que representa la alimentación de un *sill* por medio de un dique..... 84

Figura 8.6 – Geometría del subsuelo del volcán Auca Mahuida interpretado a partir de datos sísmicos.. .... 86

Figura 8.7 – Diagrama de rosas con orientaciones de fallas y fracturas para los pozos VAM-100(d) y RiAIN.a-10(d) ..... 88

Figura 8.8 – Diagrama de rosas con orientaciones de intrusivos para los pozos VAM-100(d) y RiAIN.a-10(d) ..... 88

Figura 8.9 – Ejemplo análogo de compartimerización tipo *Box-Work* ..... 90

Figura 8.10 – Arriba, funcionamiento de un sistema petrolero convencional. Abajo, el mismo sistema en el cual una intrusión aprovechó una falla previa pero a su vez generó nuevos planos de propagación. .... 91

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 7.1 – Coordenadas de las locaciones donde se encuentran los pozos. ....	43
Tabla 7.2 – Pases formacionales identificados en los pozos del área de estudio, medidos en SSTVD.	44
Tabla 7.3 – Respuestas esperables en perfiles de rayos gamma y de densidad para diferentes tipos de litologías de rocas ígneas. Tomado de Delpino y Bermúdez (2009).....	45
Tabla 7.4 – Se muestran 10 puntos ubicados en diferentes pozos y a diferentes profundidades. Junto a cada profundidad se muestran los valores de respuesta de rayos gamma (GR) y perfil sísmico (DT) para esa profundidad. Con estos valores se calculó la arcillosidad (Vsh) y la porosidad efectiva ( $\Phi_{ef}$ ) a la vez que se los comparó con la respuesta de los perfiles de petrofísica realizados por el software a fin de realizar un control de calidad. Por último se muestra el error relativo entre el cálculo del sistema y el cálculo realizado manualmente. ....	46
Tabla 7.5 – Profundidades a la que se encuentran los contactos de fluidos según cada pozo y cada miembro de la Formación Mulichinco. En verde, cotas de petróleo; en rojo, cotas de gas. ....	66
Tabla 7.6 – Datos de espesor total (ET), espesor útil (EU), la relación espesor neto / espesor bruto o <i>net to gross</i> (NTG), porosidad ( $\phi$ ), saturación de agua ( $S_w$ ), ensayos de terminación de pozo de la capa si los hubiese, el tipo de fluido y el volumen de gas o petróleo calculado para cada capa mediante los dos métodos usados en este trabajo dentro del bloque NNO. Los volúmenes de petróleo se expresan en $m^3$ y los de gas en millones de $m^3$ . ....	75
Tabla 7.7 – Datos de espesor total (ET), espesor útil (EU), la relación espesor neto / espesor bruto o <i>net to gross</i> (NTG), porosidad ( $\phi$ ), saturación de agua ( $S_w$ ), ensayos de terminación de pozo de la capa si los hubiese, el tipo de fluido y el volumen de gas o petróleo calculado para cada capa mediante los dos métodos usados en este trabajo dentro del bloque RiAIN. Los volúmenes de petróleo se expresan en $m^3$ y los de gas en millones de $m^3$ . ....	75
Tabla 7.8 – Datos de espesor total (ET), espesor útil (EU), la relación espesor neto / espesor bruto o <i>net to gross</i> (NTG), porosidad ( $\phi$ ), saturación de agua ( $S_w$ ), ensayos de terminación de pozo de la capa si los hubiese, el tipo de fluido y el volumen de gas o petróleo calculado para cada capa mediante los dos métodos usados en este trabajo dentro del bloque Este. Los volúmenes de petróleo se expresan en $m^3$ y los de gas en millones de $m^3$ . ....	76

## RESUMEN

El volcán Auca Mahuida, con su centro en los 37°45'S y 68°56'O, se desarrolla al noreste de la cuenca Neuquina, dentro del engolfamiento Neuquino. El relleno sedimentario de la cuenca en esta zona compone un sistema petrolero el cual fue afectado por este magmatismo durante el Plioceno – Pleistoceno. El análisis de datos de pozo, imágenes satelitales y antecedentes geológicos ha permitido la interpretación de estructuras sobre un área situada al noreste del cráter principal, y establecer el control que ejercen junto al magmatismo en las condiciones de reservorio de la Formación Mulichinco. Se muestra en este trabajo que los datos de perfiles de imágenes de pozo e imágenes satelitales constituyen una herramienta de ayuda en zonas donde la adquisición sísmica no es aplicable debido a la topografía y a la alta impedancia acústica de la cubierta basáltica superior. Los cuerpos intrusivos identificados, poseen las mismas orientaciones que las estructuras lo que indica que el magma aprovechó estos planos de debilidad para emplazarse. Producto del estudio estructural enfocado en la Formación Mulichinco, se delimitan en el área cuatro bloques que desconectan los fluidos en los reservorios. El metamorfismo de contacto no alteró las condiciones petrofísicas de la roca, pero la presencia del hidrotermalismo produjo una remigración del hidrocarburo. La fuerte presencia de volúmenes de gas indica que el aumento térmico generado por las intrusiones, aumentó la maduración en rocas generadoras ubicadas a mayor profundidad pasando de la ventana de petróleo a la de gas. El estudio de los fluidos y su interacción con la estructura de subsuelo permite ampliar el conocimiento del modelo estructural para tener mayor precisión en el desarrollo del yacimiento.

## ABSTRACT

*The Auca Mahuida volcano, 37°45'S and 68°56'W, is developed northeast of the Neuquén basin, in the Neuquén Embayment. The sedimentary filling of the basin in this area comprises a petroleum system which was affected for this Pliocene – Pleistocene magmatism. The analysis of well data, satellite images and geological background information has allowed interpretation of structures in an area located northeast of the main crater, and establishes the control they exert together with the magmatism in the reservoir conditions of the Mulichinco Formation. This work shows that borehole imaging and satellite images constitutes an essential tool in areas where seismic acquisition is not applicable due to the topography and the high acoustic impedance of the upper basaltic cover. The identified intrusive bodies have the same strike and dip that the previous structures which indicates that the magmas used these ways to intrude. Because of the structural study focused on the Mulichinco Formation, four blocks that disconnect the fluid in the reservoirs were defined. The petrophysical conditions were not altered by metamorphism but the presence of hydrothermal activity produced a hydrocarbon remigration. Large amounts of gas indicate that the increased heat generated by the intrusion, increased the maturation in source rocks, going to from the oil window to the gas window. The study of the fluids and their interaction with the subsurface structure allows expanding the knowledge of the structural model and to give a greater precision in the development of the oilfield.*

## 1. INTRODUCCIÓN

El volcán Auca Mahuida es un centro eruptivo del Plioceno – Pleistoceno que corresponde a uno de los numerosos volcanes que conforman la sierra del Auca Mahuida. Este es un extenso relieve mesetiforme con numerosos conos eruptivos pertenecientes a la provincia volcánica de retroarco de Payenia, ubicada en el sector oriental de la cuenca Neuquina en Argentina.

Este centro eruptivo se emplazó en las sedimentitas de la cuenca Neuquina junto con diferentes intrusiones laminares. Las intrusiones ígneas se presentan en muchas cuencas sedimentarias donde la explotación y exploración de hidrocarburos se desarrolla activamente (Senger *et al.* 2017). Esta actividad magmática puede afectar de manera positiva o negativa a cualquiera de los componentes del sistema petrolero. Los yacimientos Volcán Auca Mahuida y Risco Alto – Las Manadas pertenecen a uno de estos tantos casos donde un magmatismo posterior se emplazó y generó modificaciones sobre la estructura, las rocas y fluidos preexistentes.

La complejidad estructural asociada al volcán y el interés petrolero, han dado lugar a numerosos estudios y a la propuesta de diversos modelos que explican la evolución tectónica de la zona (Pallares *et al.* 2016; Longo, 2017; Ventura *et al.* 2013). En este contexto, el presente trabajo incorpora el estudio de un pequeño sector ubicado al noreste del cráter principal, el cual cuenta de nueve pozos. En esta zona, basándose en el análisis de diferentes perfiles de pozo, información regional e interpretación por imágenes se intenta esclarecer el comportamiento estructural de los cuerpos intrusivos y su correlación con el resto del volcán.

### 1.2. Objetivos

El objetivo del presente trabajo es estudiar mediante perfiles eléctricos, imágenes de pozo, ensayos de terminación, *cutting* e imágenes satelitales, el sistema petrolero que se encuentra infrayacente a una fracción del área volcán Auca Mahuida, al noreste de la provincia del Neuquén. Se analizarán las características composicionales y petrológicas de las formaciones Mulichinco, Centenario Inferior, Centenario Superior y Rayoso, como así también los cuerpos ígneos producto del vulcanismo plio-pleistoceno que se emplazaron dentro de estas formaciones. Gracias a estos datos se caracterizará mediante mapas y secciones esquemáticas la geología y el sistema petrolero de la Formación Mulichinco, con los miembros principales desarrollados en esta zona, sus propiedades petrofísicas, estructuras, trampas, desconexiones entre fluidos y procesos de migración. Esto es muy importante ya que en este sistema petrolero los cuerpos intrusivos no actúan como reservorios, como sí ocurre en otros lugares de la cuenca (Spacapan *et al.* 2018), sino que genera el efecto contrario, lo compartimentaliza. Se calculará el volumen de petróleo y el casquete de gas del área de tesis y se intentará proponer nuevos pozos o la reactivación de pozos abandonados que sean potencialmente productores. Con esta última tarea se busca realizar una prognosis y predecir espesores de cada formación, sus características petrofísicas como porosidad, arcillosidad y sus respectivos contenidos de agua, petróleo o gas.

### 1.3. Ubicación del área de estudio

El volcán Auca Mahuida se localiza en el sector noreste de la provincia del Neuquén (Figura 1.1) y constituye un alto geomorfológico en el retroarco andino. Está conformado por rocas volcánicas y su punto más elevado es el cráter situado en los 37°45'S y 68°55'O con una altura de 2200 m.s.n.m. Al noreste de este cráter se encuentra el área de estudio (Figura 1.2) entre las latitudes 37°43'41" S y

37°43'47" S y entre las longitudes 68°55'29" O y 68°54'24" O, comprendiendo un área de 10 km<sup>2</sup>, que es atravesada por nueve pozos con objetivos petroleros. En línea recta se ubica a 37 km al sudeste de la localidad de Rincón de los Sauces y a 150 km al noroeste de la ciudad de Neuquén.

La zona de interés se encuentra sobre la concesión petrolera Volcán Auca Mahuida (VAM), excepto por un pozo que inicia en esta área, pero finaliza dentro del yacimiento Risco Alto – Las Manadas a causa de que se halla dirigido. Estos pozos son desviados debido a que las complicaciones geográficas y el carácter de área natural de reserva en donde se encuentran, no permiten la construcción de gran cantidad de locaciones. Las formaciones atravesadas verticalmente son basaltos aflorantes y parte del Grupo Neuquén, Formación Rayoso, Formación Centenario, Formación Mulichinco y Formación Quintuco. A su vez, las sedimentitas de estas formaciones se encuentran intruidas por múltiples diques, filones capa y un lacolito el cual se aloja dentro de la Formación Mulichinco.

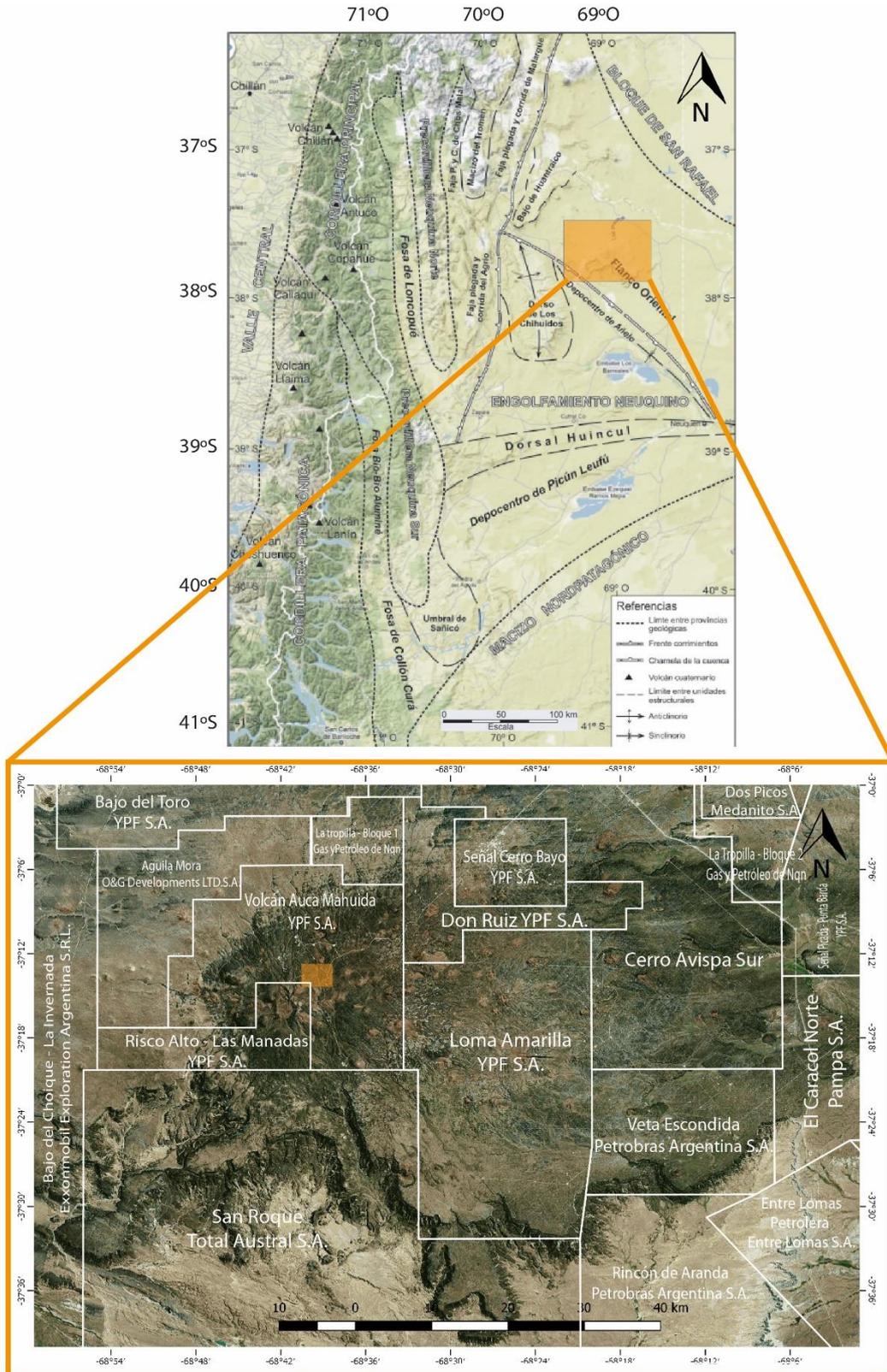


Figura 1.1 – Arriba: en naranja, ubicación la sierra del Auca Mahuida en la provincia del Neuquén junto con las regiones morfoestructurales de la cuenca Neuquina. Imagen tomada y modificada de Ramos *et al.* (2011). Abajo: imagen satelital de la sierra del Auca Mahuida con los yacimientos petroleros delimitados por líneas blancas. El rectángulo naranja muestra el área de estudio (Figura 1.2). Imagen tomada y modificada de Google Earth.

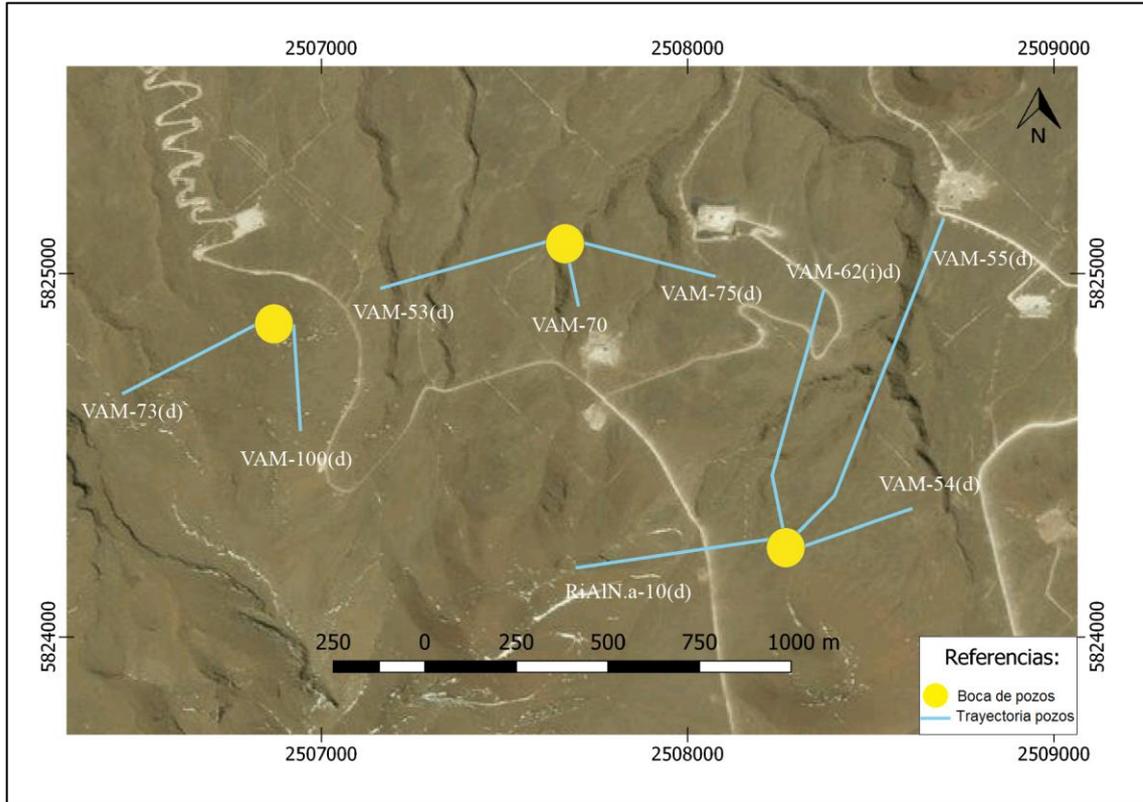


Figura 1.2 - Área de estudio con la ubicación de los pozos analizados y la proyección en planta de sus trayectorias. Ver ubicación en la figura 1.1. Coordenadas en sistema de proyección UTM, datum: WGS84.

#### 1.4. Historia de producción de los yacimientos

La historia del área de reserva (AdR) Volcán Auca Mahuida (VAM) (Figura 1.3) comienza a principios de los 80's con las perforaciones de los pozos LAn.x-1 y VAM.x-1. Estos pozos no tuvieron éxito, por lo tanto, en la década del 90 se perforaron cuatro pozos más: el VAM.x-2 se realizó en 1992; EV.x-1 en 1993; VAM.x-3 en 1994 siendo descubridor de petróleo y VAM.a-4 se perfora en 1999 como el primer pozo de avanzada Ribas *et al.* (2018).

Esto llevó a que la actividad principal en el campo VAM tuviera lugar entre los años 1999 y 2005, siendo los objetivos principales las capas de la Formación Mulichinco. A finales de 2009, se descubre petróleo en la Formación Centenario Inferior Ribas *et al.* (2018).

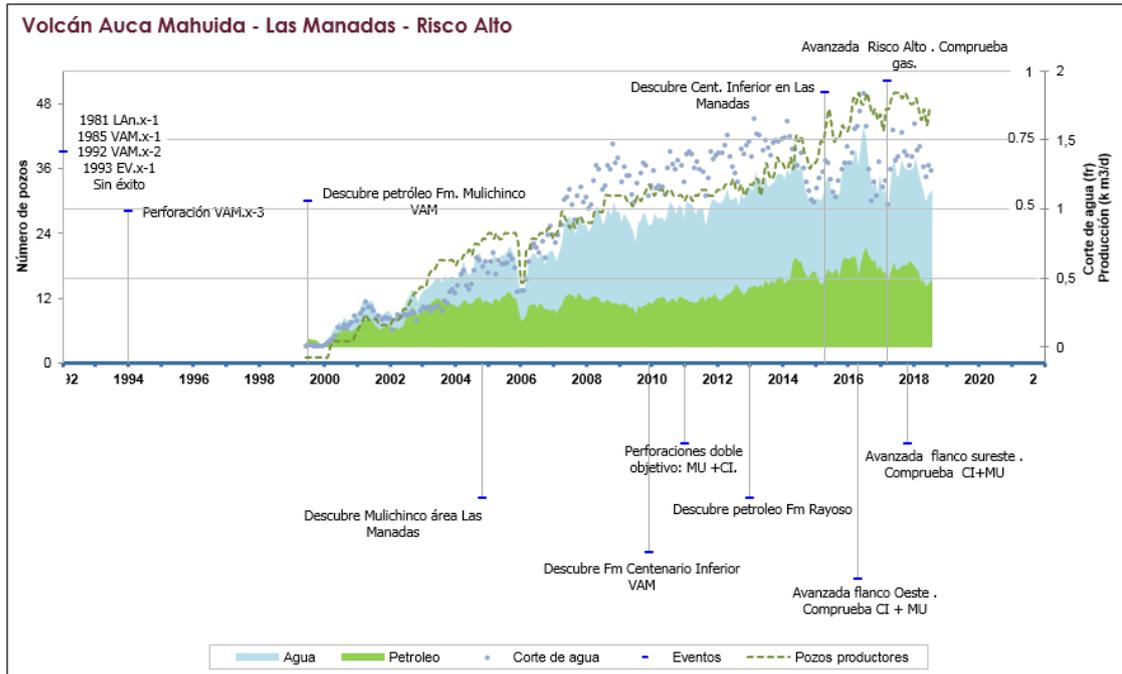


Figura 1.3 – Historia de producción de los yacimientos Volcán Auca Mahuida y Risco Alto – Las Manadas. MU: Formación Mulichinco, CI: Formación Centenario Inferior, VAM: Volcán Auca Mahuida. Tomado de Ribas *et al.* (2018).

En 2013 se descubre petróleo y gas en la Formación Rayoso. Ese mismo año, la empresa Gas Medanita comienza la gestión para comprar gas natural del yacimiento VAM, logrando la evaluación de potencial gasífero para dicha formación Ribas *et al.* (2018).

Entre el año 2009 y el primer semestre del 2018 ingresaron al sistema de producción 17 nuevos pozos. Actualmente, VAM cuenta con 71 pozos perforados de los cuales la mitad son dirigidos. Esto se debe a que la concesión se encuentra sobre un área de Reserva Natural Protegida, restringiendo la construcción de nuevas locaciones. Los valores de producción del yacimiento VAM alcanzan los 443m³/d de petróleo, 1085m³/d de líquido, 108km³ de gas total, y un corte de agua del 59,2 % Ribas *et al.* (2018).

En cuanto al yacimiento Risco Alto – Las Manadas, el mismo tiene un comienzo de la actividad a principios del 2000 y ya en 2005, se descubre la presencia de hidrocarburos en la Formación Mulichinco. Durante el 2011 y 2017 se perforaron siete pozos nuevos, siendo el pozo RiAIN.a-10, el último en realizarse Ribas *et al.* (2018).

Actualmente, el AdR Risco Alto – Las Manadas presenta un total de 11 pozos perforados, de los cuales la mitad corresponden a pozos con trayectoria dirigida, ya que al igual que en VAM, el área de concesión se encuentra dentro de una reserva natural. El yacimiento cuenta con cinco pozos en producción efectiva de petróleo. Los valores de producción alcanzan a 9,1 m³/d de petróleo; 23,0 m³/d de líquido; 1,8 km³/d de gas disuelto; 195,0 m³/ m³ de GOR (relación petróleo – gas por sus siglas en inglés *Gas – Oil Ratio*) y un corte de agua del 60,3 % Ribas *et al.* (2018).

Dentro del área de trabajo, en la zona de AdR VAM, todos los pozos fueron perforados entre 2014 y 2016. Las capas de interés a las que están dirigidos son pertenecientes a las formaciones Mulichinco y Centenario Inferior. Todos se encuentran produciendo petróleo con una acumulada promedio por pozo

de 17,000 m<sup>3</sup> y una acumulada total de todos los pozos de 135,700 m<sup>3</sup>. En cambio, el pozo ubicado en el AdR Risco Alto – Las Manadas se perforó con posterioridad, en el año 2017, siendo descubridor de gas. Actualmente se encuentra en reserva, pero nunca fue un pozo productor Ribas *et al.* (2018).

En ambas áreas, los pozos se encuentran subpresionados, pero con un gradiente normal. La Formación Rayoso posee una presión aproximada de 20 kg/cm<sup>2</sup>, Centenario Superior posee una presión de 60 kg/cm<sup>2</sup>, Centenario Inferior 80 kg/cm<sup>2</sup> y Mulichinco 120 kg/cm<sup>2</sup> Ribas *et al.* (2018).

## **2. MARCO GEOTECTÓNICO DE LA CUENCA NEUQUINA**

### **2.1. Contexto morfoestructural**

En la cuenca Neuquina se pueden reconocer cinco regiones morfoestructurales: la faja plegada y corrida del Agrio, el dorso de Los Chihuidos, la plataforma Nororiental, el engolfamiento Neuquino y la dorsal de Huincul (Casadío y Montagna 2015) (Figura 1.1).

#### **2.1.1. Faja plegada y corrida del Agrio**

La faja plegada y corrida del Agrio se ubica en la región occidental de la provincia del Neuquén (Ramos 1978), entre las localidades de Las Lajas y Chos Malal. Esta región se caracteriza por una gran deformación con anticlinales y sinclinales alargados afectados por fallamiento. Se desarrolla en proximidades del arco volcánico, y coincide con las posiciones más profundas de los ciclos sedimentarios. La faja plegada y corrida del Agrio constituyó uno de los principales depocentros de la cuenca, por causa de la compresión andina, muchos tramos de la sucesión presentan un excelente nivel de exposición (Casadío y Montagna 2015).

La estructura de la faja plegada del Agrio está caracterizada por una combinación de estructuras de piel gruesa y piel fina, lo que ha permitido separarla en dos instancias de deformación: una en la zona interna, donde la estructura está controlada por bloques de basamento, y la otra en la zona externa, donde dominan pliegues que despegan de la Formación Auquilco (Ramos 1978, 1999, Zapata *et al.* 2002, Zamora Valcarce *et al.* 2006).

#### **2.1.2. Dorso de Los Chihuidos**

También conocido como alto de Los Chihuidos, es una gran estructura anticlinal de 15 a 20 km de ancho y 70 km de largo con orientación norte – sur. Se conforma casi enteramente por la Formación Candeleros del Grupo Neuquén. Su flanco occidental posee una mayor inclinación, para luego horizontalizarse, mientras que el flanco oriental conserva una curvatura más suave entre 2° y 3° (Casadío y Montagna 2015).

La morfología, topografía y drenajes del dorso indican un levantamiento relativamente reciente (Cristallini *et al.* 2005). Esta estructura ha sido explicada como un gran anticlinal cuya génesis sería una inversión tectónica de los hemigrábenes Precuyanos (Cristallini *et al.* 2005). Mosquera y Ramos (2006) relacionan esta estructura a una inversión transpresiva, la cual se vincula a subducción oblicua entre el Jurásico Inferior y el Valanginiense (Cretácico Inferior). Sigismondi (2012) propone que la carga de la topografía producto del emplazamiento de la faja plegada y corrida del Agrio sería, al menos en parte,

responsable de la migración de la deformación 100 km al este, y por consiguiente del relieve topográfico del dorso de Los Chihuidos.

### **2.1.3. Plataforma Nororiental**

La plataforma Nororiental es también conocida como plataforma de Catriel. Al encontrarse ubicada al borde de cuenca, la cubierta sedimentaria no es tan espesa como en otras regiones (2000 m aproximadamente) (Casadío y Montagna 2015). Tiene una composición estructural de menor complejidad que las zonas anteriores. Su estructura se ha dado por el movimiento diferencial de bloques del basamento por fallamiento extensional, lo cual generó pliegues supratenuos de escaso relieve, suaves anticlinales tipo *rollover* y estructuras con cierre contra falla. Las estructuras estuvieron activas durante la mayor parte de la historia geológica de esta parte de la cuenca (Legarreta y Uliana 1999), lo que repercutió en un marcado control estructural del registro sedimentario, ayudando al sistema petrolero al preservar las condiciones petrofísicas propicias para la formación de reservorios (Vergani *et al.* 2011).

### **2.1.4. El engolfamiento Neuquino**

El engolfamiento Neuquino comprende una superficie importante de la provincia del Neuquén. En él se produce un acuñaamiento de toda la columna sedimentaria en una “*Hinge Zone*” que separa esta región morfoestructural de la plataforma Nororiental (Urien y Zambrano 1994). En la zona de transición entre el norte de la dorsal de Huincul y esta región, existen estructuras correspondientes a hemigrábenes jurásicos que han sufrido inversión tectónica.

La deformación es moderada y relacionada a los últimos eventos estructurales que ocurrieron en el Neógeno de tipo compresivos y extensivos, donde se suma la actividad volcánica con efectos importantes en la existencia de los yacimientos (Vergani *et al.* 2011). El registro sedimentario en este sector es muy completo y de gran espesor, ya que no han sufrido discordancias estratigráficas o tectónicas (Casadío y Montagna 2015).

### **2.1.5. La dorsal de Huincul**

La dorsal de Huincul constituye un lineamiento estructural de 300 km de longitud ubicado a los 39°S, con una orientación OSO-ENE, cuya actividad tectónica, en un intervalo de tiempo que ocurre desde el Jurásico a comienzos del Terciario, controló la sedimentación del margen sur de la cuenca Neuquina, desarrollando variadas series de estratos de crecimiento y discordancias (Silvestro y Zubiri 2008).

La dorsal ha sido interpretada como una falla de rumbo dextral, donde coexisten estructuras compresionales y extensionales debido a la variación de rumbo en la falla principal. En algunos casos, las estructuras compresionales corresponden a hemigrábenes afectados por inversión tectónica. Las diferentes discordancias jurásicas y cretácicas acentuaron la geometría tipo cuña del registro sedimentario. Las estructuras extensionales podrían explicarse por fallas antiguas que, por su tipo de relación dextral, no se vieron afectadas por la inversión tectónica. También podrían deberse a fallas tensionales moderadas, subordinadas y con un ángulo de 30° a 40° con respecto a la falla compresiva principal (Casadío y Montagna 2015).

## 2.2. Basamento

El basamento de la cuenca Neuquina se constituye por una amalgama de terrenos conformados por Cuyania (Astini 1996), Chilenia (Ramos *et al.*, 1986) y Patagonia (Ramos 1984) que imprimen una estructura previa para la posterior subsidencia y acumulación de sedimentos (Arregui *et al.*, 2011a). Los afloramientos se encuentran distribuidos de manera aislada a lo largo de la cuenca. Se lo puede dividir en tres sectores, el tramo norte de la Cordillera Patagónica donde se expone la faja batolítica occidental, los granitoides de la Cordillera del Viento en Precordillera Neuquina Norte y la Dorsal de Huincul (Ramos *et al.* 2011).

El basamento está compuesto, principalmente, por las unidades Colohuincul, Guaraco Norte – Piedra Santa y Mamil Choique. Las dataciones isotópicas para estas rocas corresponden a una edad de transición entre los ciclos fini-Famatiniano (Silúrico Devónico) y el inicio del Gondwánico (Paleozoico superior – Triásico). Esta etapa de la evolución está vinculada a la fase Chánica mostrando diferentes grados de deformación relacionado a la evolución de un margen convergente, procesos de fusión, reciclaje cortical y colisiones de terrenos alóctonos o para-autóctonos (Chilenia, Patagonia) (Cingolani *et al.* 2011).

El sector sur que corresponde a la Cordillera Patagónica Norte posee una historia diferente debido a que la placa Patagónica no se encontraba adosada a Gondwana en el Devónico. El bloque Patagónico es atravesado por la faja batolítica occidental, la cual se interpreta como un arco volcánico que se extendió a lo largo de la Patagonia y que duró del Devónico al Carbonífero Inferior (Pankhurst *et al.*, 2006; Ramos 2008). En el Carbonífero Medio a Superior se ve interrumpido por una colisión con un bloque continental en el sudoeste, el cual puede tratarse el Macizo del Deseado (Pankhurst *et al.*, 2006; García Sansegundo *et al.* 2009) o por la Península Antártica (Ramos 2008).

## 2.3. Evolución tectónica

La cuenca Neuquina está localizada al este de la cadena andina argentina, entre los 32°S y 40°S en proximidad del margen occidental de la placa Sudamericana. Ocupa gran parte del territorio de la provincia del Neuquén, alcanzando también el sur y suroeste de Mendoza, norte y noroeste de Río Negro y el suroeste de La Pampa. Está delimitada al oeste por la cordillera de los Andes, al sur por el macizo Norpatagónico y al noreste por el sistema de la sierra Pintada. Su desarrollo comprende desde el Triásico tardío – Jurásico temprano hasta el Paleoceno. Su evolución tectónica registra tres periodos principales, comenzando con una fase de *Synrift* (Triásico tardío –Jurásico temprano), continuando con una fase de *Postrift* y subsidencia lenta (Jurásico medio – Cretácico temprano) y culminando con una fase de *Foreland* (Cretácico tardío – Cenozoico) (Howell *et al.* 2005).

La estructuración de la cuenca comienza en el Carbonífero medio con una subducción a lo largo del margen occidental de Gondwana, producida por un régimen extensional en el retroarco. Esta extensión se relaciona a un retroceso de la trinchera oceánica (Ramos 2010) siendo responsable de la migración del arco hacia el margen pacífico a los 310 Ma. Un cambio de régimen de extensivo a compresivo llevaría a la deformación sanrafaélica, asociada a una disminución de inclinación de la losa subductada (Llambías *et al.* 2007).

De forma posterior a la fase sanrafaélica, que generó un frente de deformación adosado equivalente a los movimientos Gondwánides (Keidel 1922, Windhausen 1929), se registra un episodio de extensión asociado a un vulcanismo ácido (Kay *et al.* 1989; Mpodozis y Kay 1990) caracterizado por extensos

*plateaux* riolíticos y flujos ignimbríticos. Este vulcanismo da origen a la provincia magmática del Choiyoi que forma parte del basamento de la cuenca. Este magmatismo se desarrolló durante el Pérmico y parte del Triásico sobre el margen continental activo del continente de Gondwana (Llambías y Sato 2011). Los controles en la fábrica del basamento darían lugar a los diferentes estadios evolutivos de la dorsal de Huincul, mientras que los otros depocentros estarían condicionados por la deformación dúctil del basamento que se desarrolló durante la acreción paleozoica de los terrenos de Cuyania y Chilenia al margen gondwánico (Ramos y Kay 1991).

Durante esta etapa hay una interrupción o disminución de la velocidad de subducción de la losa, lo que permite un magmatismo bimodal que continúa hasta el Triásico Tardío - Jurásico temprano. El sistema tectónico es dominado por un régimen subparalelo de fallas de rumbo en el oeste del margen. En el área de extensión de la cuenca se producen hemigrábenes (Howell *et al.* 2005) que marcan el fin del ciclo Gondwánico, asociado a la fase Huárpica, para dar comienzo al ciclo Ándico y a la etapa de *rift* (Llambías *et al.* 2007). Estos hemigrábenes son rellenados con rocas clásticas y volcánicas asociadas con flujos de lava extensivos (Howell *et al.* 2005). Los depósitos de esta etapa son agrupados en lo que se denomina Ciclo Precuyano (Gulisano 1981).

Después de la fase de *rifting* del Triásico - Jurásico temprano, el inicio de la subducción y las primeras evidencias de un arco magmático activo en el margen occidental de América del Sur, se observan aproximadamente a los 183 Ma, y se las puede asociar al inicio de la separación entre Gondwana Occidental y Oriental relacionada a la actividad de la pluma de Karoo (Mpodozis y Ramos 2008). Una configuración cinemática de placas y un retroceso de la trinchera serían las responsables de la subducción asociada a la extensión que caracteriza a la mayor parte del margen andino en este periodo, hasta la separación definitiva de América del Sur de África que marcó la fragmentación definitiva del Gondwana Occidental durante el desarrollo de la pluma de Paraná y la apertura final del océano Atlántico sur (Ramos *et al.* 2011). En este periodo la cuenca Neuquina experimenta una deformación de intraplaca como resultado de la oblicuidad del vector de convergencia de la zona de subducción en esta área (Mosquera y Ramos 2006).

A partir del Jurásico temprano hasta el Cretácico temprano se produce la fase de *post-rift*. En esta etapa, el margen andino habría estado asociado a un retroceso de la trinchera oceánica en la zona de subducción, con extensión y subsidencia detrás del arco (Mpodozis y Ramos 1989, Ramos y Kay 2006).

En este mismo periodo hay una deformación de intraplaca en la cuenca Neuquina condicionada por la heterogeneidad de su basamento y por la oblicuidad de la zona de subducción que proviene de un vector de convergencia del noroeste (Zonenshajn *et al.* 1984, Scheuber *et al.* 1994). Producto de estos esfuerzos, ocurren procesos de deformación en algunos sectores. Por ejemplo, en la plataforma oriental, que pasa de predominantemente transcurrente en el Jurásico a compresiva con inversión tectónica positiva en el Cretácico medio a Superior. La dorsal de Huincul se caracterizó por una transpresión dextral dominante en casi todo su desarrollo (Ploszkiewicz *et al.* 1984, Mosquera y Ramos 2006, Silvestro y Zubiri 2008).

Durante el Jurásico temprano a medio se inició el régimen de subducción a lo largo del margen oeste de Gondwana, y hacia fines del Jurásico el arco magmático Andino estaba casi completamente desarrollado (Howell *et al.* 2005).

La subsidencia en el retroarco lleva al desarrollo de la primera ingresión marina que inunda la cuenca desde el sur de Mendoza, a través del estrecho de Curepto (Vicente 2005) durante el Sinemuriano -

Hettangiano (Riccardi *et al.* 1997) y en Neuquén para tiempos del Pliensbachiano – Toarciano (Gulisano y Gutiérrez Pleimling 1995). Los depósitos fueron afectados inicialmente por el diseño de los depocentros de la etapa de *rift* en sus espesores y distribución areal (Arregui *et al.* 2011a) pero posteriormente la subsidencia térmica y la extensión del tras arco generaron las condiciones para la depositación de espesas sucesiones sedimentarias (Howell *et al.* 2005) correspondientes al Grupo Cuyo (Dellapé *et al.* 1978). Dicho grupo se ubica entre las discordancias Intraliásica (Rioatuélica) e Intracalloviana respectivamente (Arregui *et al.* 2011b) y representa un ciclo completo transgresivo – regresivo.

La siguiente sucesión en depositarse corresponde al Grupo Lotena (Leanza 1992), de edad caloviana media a oxfordiana tardía. Dentro de este grupo, el contraste entre las espesas formaciones de calizas marinas normales y espesos paquetes de yeso, implica una fuerte restricción del mar abierto Pacífico. No se descarta que el crecimiento del arco volcánico en el oeste hubiera servido de umbral para la espesa sedimentación evaporítica (Arregui *et al.* 2011a).

Posteriormente y luego de la discordancia Intramálmica (155 Ma) comienza el desarrollo del ciclo Ándico (Groeber 1946), momento en el que se produce un gran cambio paleogeográfico que es considerado por numerosos autores como una nueva etapa evolutiva del relleno de la cuenca Neuquina. Los registros de este ciclo inician con la depositación del Grupo Mendoza (Arregui *et al.* 2011a).

Subsiguientemente, se fueron desarrollando ciclos que alternaban etapas de continentalización parcial con depósitos marinos someros y que, a su vez, se hicieron más restringidos en la paleogeografía. A partir del Barremiano Tardío y el Aptiano-Albiano ocurre la depositación del Grupo Bajada del Agrio, el cual marca una etapa de progresiva somerización y desconexión de margen proto – Pacífico, dando lugar a depósitos de calizas, evaporitas y capas rojas. Desde entonces, tiene lugar el inicio de una nueva etapa en la historia de la cuenca, la cual no vuelve a recibir transgresiones marinas desde el oeste (Arregui *et al.* 2011a).

Hacia el final del Cretácico temprano los cambios en las tasas de propagación del Atlántico sur y una reorganización de las placas del Pacífico, incluida una disminución en el ángulo de subducción de la losa, dieron como resultado el desarrollo de un régimen tectónico compresivo que causó la inversión de estructuras extensionales anteriores (Vergani *et al.* 1995). El sistema depositacional activo en ese momento fue controlado por la compresión. Esto, junto con el levantamiento de los Andes en el oeste, llevó a la depositación posterior de más de 2000 metros de sedimentos continentales del Grupo Neuquén (Howell *et al.* 2005), correspondiendo a los primeros depósitos sinorogénicos de la cuenca de antepaís (Ramos 1981). Dicha sucesión se encuentra limitada en su base por la discordancia Patagónica y en su techo por la discordancia Huantráiquica (Leanza 2009), ubicadas respectivamente en la base del Cenomaniano (Leanza 2009; Tunik *et al.* 2010) y en el Campaniano medio (Dingus *et al.* 2009).

El cambio en el régimen estructural fue el responsable de la inversión de estructuras extensionales previas generando la faja plegada y corrida del Agrio. La misma está caracterizada por una combinación de estructuras de piel gruesa y piel fina, lo que ha permitido separarla en dos sectores; uno interno con predominio de estructuras de basamento, y uno externo con predominio de pliegues despegados en niveles evaporíticos del Grupo Cuyo (Zamora Valcarce *et al.* 2009).

La culminación de este ciclo sedimentario, se vincula al desarrollo de un importante arco magmático occidental asociado a una fuerte subsidencia de la cuenca (Garrido 2011) y a un cambio en la pendiente regional, factores que, hacia el fin del Cretácico, junto con un muy alto nivel del mar y el proceso de

apertura y separación de Sudamérica de África (Ramos 1999), resultaron en la primera ingresión marina desde el Océano Atlántico (Howell *et al.* 2005) iniciada durante el Maastrichtiano (Arregui *et al.* 2011a). Por lo tanto, entre el Campaniano y parte del Paleoceno, una porción de la Patagonia estuvo cubierta por un mar epicontinental somero cuyo registro sedimentario está contenido en los depósitos del Grupo Malargüe (Uliana y Dellapé 1981), así como en unidades equivalentes fuera del ámbito de la cuenca Neuquina (Rodríguez 2011). La base del Grupo Malargüe está dada por una discordancia de carácter regional, denominada Huantráiquica o Intracampaniana (Méndez *et al.* 1995, Leanza 2009). La ingresión fue acompañada por una expansión del arco magmático hacia el este, producto de una horizontalización de la losa entre el Cretácico Superior y el Paleógeno (Ramos y Folguera 2005, Ramos y Kay 2006, García Morabito 2010), que estuvo acompañada por un engrosamiento de la corteza (Franchini *et al.* 2003). Esta deformación habría completado el desarrollo de la faja plegada y corrida del Agrio en el Paleógeno y forma parte de la orogenia Incaica (Ramos *et al.* 2011).

Entre el Oligoceno y el Mioceno inferior se produce un periodo de extensión generado por una disminución en la velocidad del régimen subductivo (Kay *et al.* 2006) y un empinamiento de la placa (Ramos y Folguera, 2005), dando como resultado el desarrollo de cuencas extensionales de intraarco y retroarco (Ramos *et al.* 2011).

Para el Mioceno tardío ocurre la orogenia Quechua (Steinmann 1910) y con ella, una reactivación de la faja plegada y corrida del Agrio. Esta fase de deformación produce uno de los últimos pulsos de levantamiento del dorso de los Chihuidos (Mosquera y Ramos 2006), la estructuración final de la faja plegada y corrida del Agrio (Zapata y Folguera 2005) y sectores del sur de la misma (García Morabito y Ramos 2011). Finalmente, entre el Plioceno tardío y el Cuaternario, se desarrolla la fosa de Loncopué, una depresión de 40 km de ancho por 200 km de largo en el piedemonte de la Cordillera Principal (Ramos 1978). Este sector de la cuenca preserva la historia más reciente de la evolución, con un sector sur de relieve negativo producto del empinamiento de la placa subducida después de la orogenia Quechua y una parte norte reactivada por neotectónica, que en los últimos 1,4 Ma ha comenzado a invertir estructuras extensionales (Ramos *et al.* 2011).

La evolución de la cuenca Neuquina a lo largo de sus diferentes estadios dejó un espesor de sedimentitas que supera los 7000 m hacia el centro de cuenca y disminuye hacia los bordes. Toda la historia de la cuenca puede verse resumida en la figura 2.1 tomada de Arregui *et al.* (2011a) la cual es representativa para el engolfamiento Neuquino.



### 3. ESTRATIGRAFÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO

La estratigrafía del área de interés es similar a la columna estratigráfica propuesta por Arregui *et al.* (2011a) en la figura 2.1, sin embargo, se diferencian algunas unidades que allí se presentan debido a variaciones laterales de la cuenca. El sector de estudio se acerca más a la columna de la figura 3.1. Debido a que los pozos perforados en la zona de interés sólo llegan hasta la Formación Quintuco (y en yacimientos aledaños hasta la Formación Vaca Muerta) sólo se describirá la estratigrafía a partir del Grupo Mendoza.

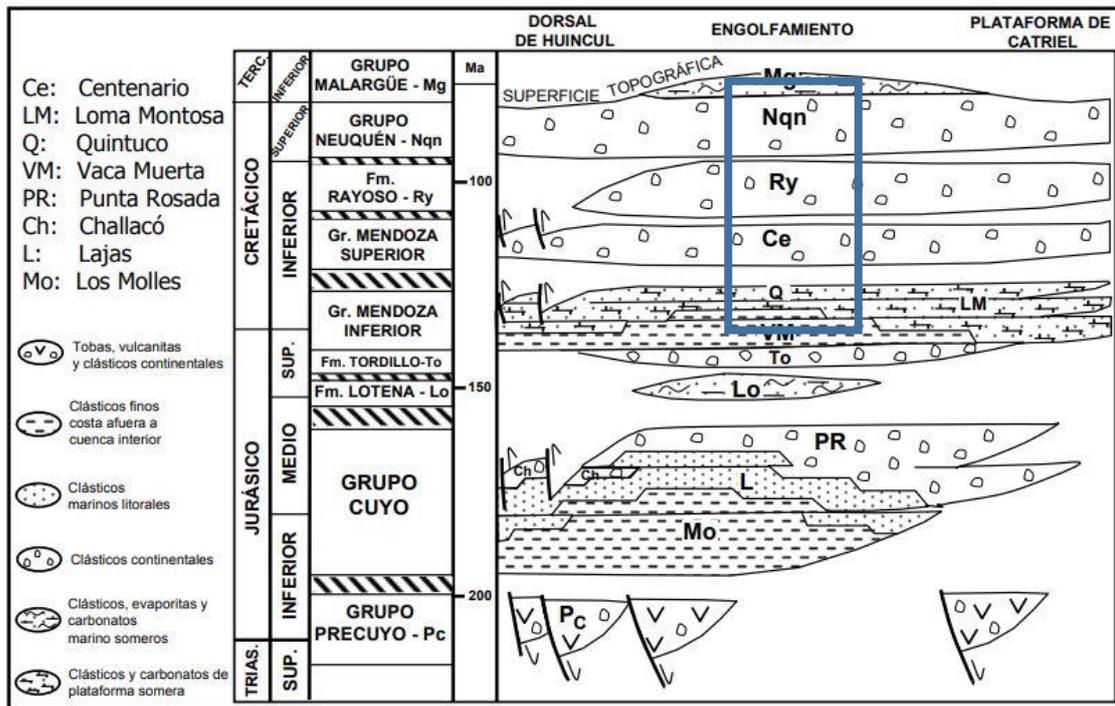


Figura 3.1 – Esquema estratigráfico para la zona de tesis. En azul se marca la sección de la columna presente en los pozos perforados en los activos Volcán Auca Mahuida y Risco Alto – Las Manadas.

Tomado de Cruz *et al.* (2002).

#### JURÁSICO SUPERIOR – CRETÁCICO INFERIOR

##### Grupo Mendoza

##### 3.1. Formación Vaca Muerta

La Formación Vaca Muerta fue definida por Weaver (1931) como los estratos tithonianos constituidos por lutitas calcáreas grisáceas y oscuras que presentaban una amplia distribución en las provincias de Mendoza y Neuquén, siendo su localidad tipo la pendiente occidental de la sierra de la Vaca Muerta (Aguirre Urreta *et al.* 2014).

La Formación Vaca Muerta se compone mayormente de pelitas depositadas en un ambiente anóxico en condiciones de plataforma marina. Posee altos valores de contenido orgánico total (COT 3–8% alcanzando valores de hasta 10–12%) y un kerógeno tipo I-II (Rodríguez Montreal *et al.* 2009). Hacia la base son comunes las concreciones calcáreas y niveles radiactivos. En la región de los cerros Mulichinco y Mocho existen abundantes niveles de calcita fibrosa conformando estructuras tipo *beef in shale* (Leanza *et al.* 2011).

Posee espesores variables (Figura 3.2) desde 11 m en la comarca de Carrín Curá hasta 1250 m en áreas depocentrales (sierra de la Vaca Muerta, Huncal, Trahuncurá). Sobre la base de su fauna de amonites, su edad abarca desde el Tithoniano temprano a medio en el arroyo Picún Leufú, hasta alcanzar el Valanginiano temprano en el norte neuquino (Leanza 1973, Leanza y Wiedmann 1989). Sin embargo, Aguirre Urreta *et al.* (2014), sobre la base de circones detríticos datados, propone que la edad máxima de la Formación Vaca Muerta es de 144 Ma, cambiando a su vez, la edad para el límite Jurásico – Cretácico de la cuenca Neuquina. La maduración se supone que ocurrió durante el Cretácico tardío y el Mioceno. (Rodríguez Montreal *et al.* 2009).

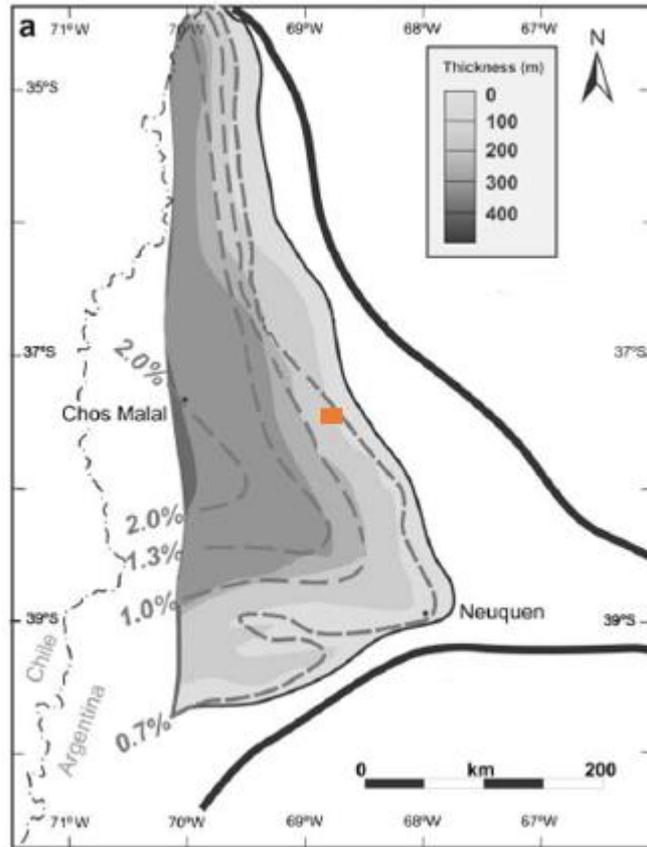


Figura 3.2 – Mapa isopáquico con tendencias de maduración para la Formación Vaca Muerta. En naranja se muestra la ubicación de la zona de estudio. Las líneas negras gruesas corresponden a los límites de la cuenca. Tomado y modificado de Rodríguez Montreal *et al.* (2009).

### 3.2. Formación Quintuco

Definida por Weaver (1931), se conforma por las sedimentitas silicoclásticas marinas acumuladas en segmentos del *nearshore* durante el Berriasiano tardío al Valanginiano temprano. Es la sección más somera de la segunda inundación marina registrada en esta época, que instala una plataforma carbonática de baja pendiente (Estrada *et al.* 2008).

Se divide en tres miembros, basal, medio y superior. En la base se compone de niveles conglomerádicos con *grainstones* a *mudstones* mostrando cambios de energía en el ambiente. Su composición es predominantemente calcítica, ya que no sufrió procesos frecuentes de dolomitización. En el nivel medio predominan niveles dolomíticos sobre los calcáreos, mientras que el miembro superior se encuentra

conformado por una intercalación de dolomitas con areniscas, lutitas y algunos niveles de anhidrita (Estrada *et al.* 2008).

En el subsuelo del volcán Auca Mahuida, el tope de esta formación se encuentra representado por fangolitas hasta areniscas finas con abundantes fragmentos de pelecípodos, en algunos lugares, desarticulados y confinados a niveles delgados. Estos depósitos podrían pertenecer a un ambiente marino de baja a moderada energía con posibles eventos de tormenta que generarían retrabajo de los fósiles (Schwarz 2007).

En la zona de estudio, el tope de la Formación Quintuco se encuentra en casi todos los pozos excepto en el pozo VAM-53(d), pero no se encuentran registradas las bases, por lo que no se pueden obtener datos de espesores certeros. El tope más elevado se encuentra a -962,5 m.s.n.m y desciende en altura desde el SE hacia el NO.

### 3.3. Formación Mulichinco

Descrita por primera vez por Weaver (1931), es una formación del Cretácico Inferior (Valanginiano inferior a Valanginiano superior) de la cuenca Neuquina originalmente definida en el sector de la faja plegada y corrida del Agrío. Se desarrolló durante e inmediatamente después de un descenso relativo rápido del nivel del mar (Gulisano *et al.* 1984), probablemente por un alzamiento tectónico que generó una secuencia de mar bajo de segundo orden, que muestra rápidos cambios de facies laterales y verticales con compleja arquitectura (Schwarz 2007).

En el sector del volcán Auca Mahuida se compone de areniscas finas a medias, y en menor proporción de conglomerados finos y fangolitas. En algunos casos son comunes los conglomerados intraformacionales compuestos por fenoclastos de fangolitas. La composición de las areniscas es poco variable, predominan arenas feldespático-líticas y en menor proporción lítico-feldespáticas. Las areniscas, por lo general, poseen bajo contenido de matriz. Los cementos de la Formación Mulichinco son crecimiento secundario de cuarzo y feldespato, dolomita, siderita, yeso, arcilitas y bitumen. En algunos niveles finos y en pocos niveles conglomerádicos y arenosos se registra una fuerte dolomitización, de hasta el 50%, tanto en poros como por reemplazo (Schwarz 2007).

Esta formación constituye una de las rocas reservorios del área de estudio. Son areniscas con porosidad promedio de 18% (Vottero y González, 2002) mientras que la permeabilidad varía entre 5 a 280 mD (Malimachi *et al.* 2017). Se caracterizan por una alta continuidad areal y dispuestas de manera tabular que son separadas por niveles impermeables finos (sellos locales). Estos sellos cumplen aparentemente un rol de suma importancia en la compartimentalización del reservorio, y tal parece ser su eficiencia que cada uno de los niveles productivos tiene su propio contacto de fluidos (Vela *et al.* 2006). Dentro de algunas facies arenosas, la cementación dolomítica irregular ha resultado en una mayor heterogeneidad en la distribución de valores de porosidad y permeabilidad produciendo barreras de flujo de fluidos (Schwarz 2007).

En el sector del volcán Auca Mahuida, esta formación se localiza en el subsuelo. Apoya en contacto neto sobre los depósitos de la Formación Quintuco, base que se asigna a la discontinuidad Intravalanginiana (Gulisano *et al.* 1984).

Todos los pozos del área de estudio atraviesan esta formación con un tope máximo a los -715 m.s.n.m y desciende en estructura antiforme hacia el noreste y los laterales noroeste y sudeste. El espesor máximo es de 250 m y el mínimo de 215 m que decrece desde el NO hacia el SE.

La Formación Mulichinco se divide en cuatro miembros. De base a techo estos miembros son Miembro Verde, Miembro Azul, Miembro Rojo (subdivido en miembros Rojo Inferior, Rojo Medio y Rojo Superior), y Miembro Amarillo. A su vez, se la ha dividido en 19 capas que coinciden con cambios en los perfiles eléctricos y nucleares que representan pequeños cambios a nivel local (Figura 3.3) (Schwarz 2007).

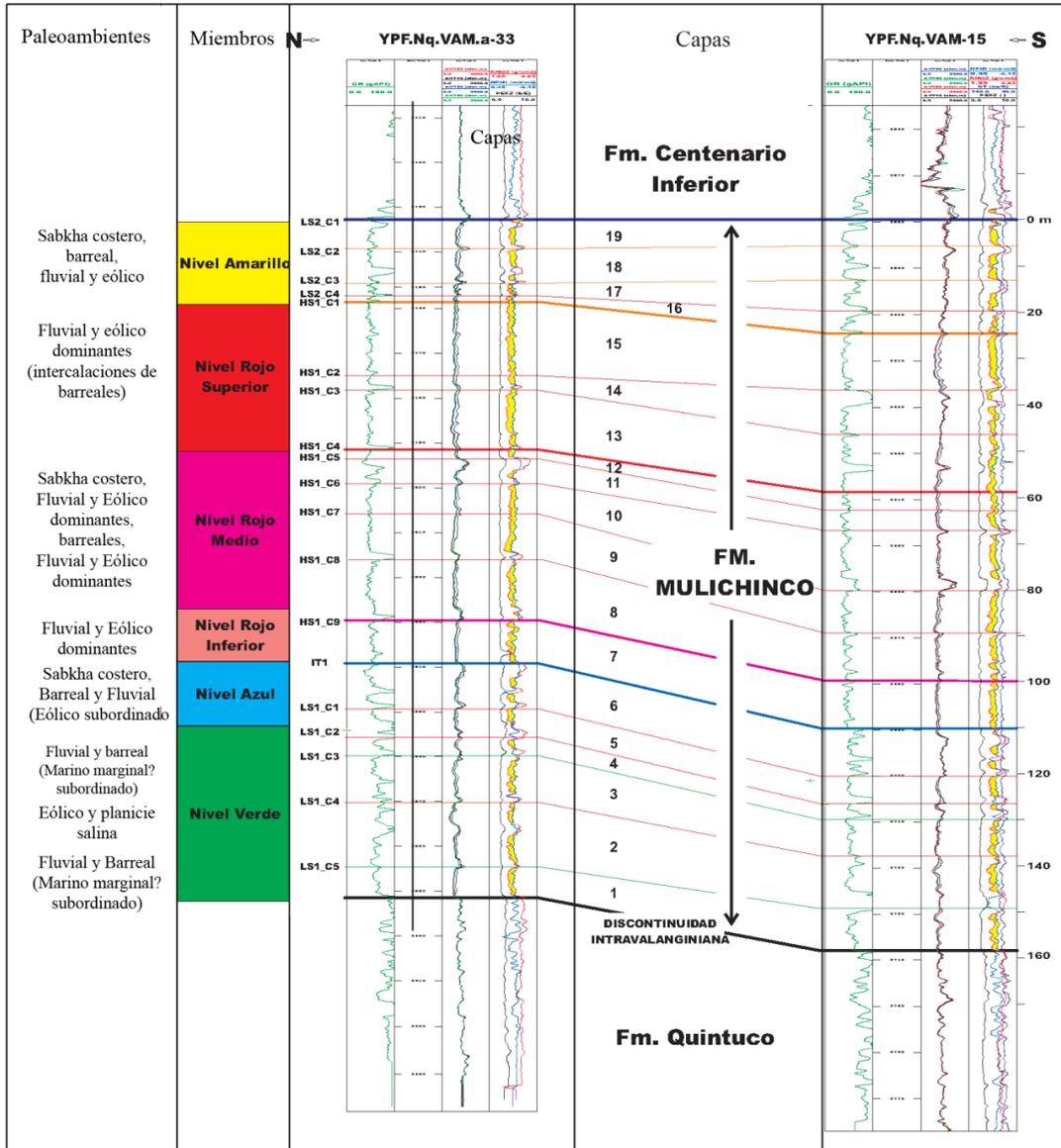


Figura 3.3 – Esquema estratigráfico de la Formación Mulichinco volcado sobre las respuestas de perfiles eléctricos de dos pozos del yacimiento Volcán Auca Mahuida; uno situado al sur, VAM-15 y el otro situado al norte, VAM.a-33. En un espesor de 160 m, se identifican los cuatro miembros de la formación, las 19 capas y la distribución vertical de los paleoambientes sobre la base de las asociaciones de facies reconocidas. Tomado y modificado de Schwarz (2007).

Del mismo modo, se han reconocido 11 facies y seis asociaciones de facies que representan los siguientes sistemas depositacionales: (1) fluvial de bajo régimen de flujo, (2) fluvial de alto régimen de flujo, (3) eólico, (4) planicie fangosa y lacustre, (5) planicie salina e intermareal y (6) marino marginal. Estas asociaciones reconocidas para la Formación Mulichinco en el sector del volcán Auca Mahuida representan tres ambientes de depositación principales. El primer sistema se compondría de canales fluviales, con mayoría de efímeros controlados por crecidas. Son canales poco canalizados a no confinados, con probable baja a moderada sinuosidad. Las lluvias estacionales activarían estos cursos de aguas que erosionan en un comienzo para luego acumular sedimentos gruesos en la merma. Durante los periodos secos, donde el flujo de agua disminuye o desaparece, comienza el retrabajo eólico generando mantos de arena (asociación eólica), donde si la disponibilidad de arena es alta generan dunas aisladas y de escasa altura (Schwarz 2007).

En los lugares donde se generan los barreales conformados por salinas y/o planicies fangosas se asume una tabla de agua muy pronta a la superficie (asociación planicie fangosa y planicie salina). Se depositan delgadas capas de arenas representantes de las porciones distales de las crecidas. Cuando el cuerpo de agua es duradero y forma lagunas se crean lóbulos pequeños que gradan hacia el centro de este. Las planicies salinas pudieron haberse formado como halos alrededor de cuerpos lacustres o marginales a las planicies fangosas (Schwarz 2007).

Estas condiciones de sedimentación continental se suelen ver interrumpidas por la ingesión de agua marina. Durante estos episodios se desarrollan *sabkhas* costeros que gradan distalmente a planicies intermareales, asociados a cuerpos protegidos de lagunas y barreras costeras. Lo único que puede utilizarse como diferenciación entre estas planicies salinas y las continentales son la presencia de nódulos de anhidrita, aparte de esto, no se observan modificaciones sustanciales entre ambos depósitos (Schwarz 2007). Estos *sabkhas* se encuentran fuertemente dolomitizados en el registro, lo que pudo haberse producido por el aporte de aguas marinas, formándose en una diagénesis temprana por reemplazo de anhidrita, o bien haberse producido de forma coetánea con la sedimentación (Zonneveld *et al.* 2001).

En las planicies intermareales se forman intercalaciones de arcillas y limos con desarrollo de trazas de *Thalassinoidea* y *Teichichnus* y niveles ricos de materia orgánica producto de la presencia de tapetes algales muy comunes en actuales planicies intermareales altas (Goodall *et al.* 2000). Los ambientes de lagunas y barras costeras tienen poca expresión y su asignación es dudosa.

El abundante registro de canales fluviales efímeros, depósitos eólicos y planicies evaporíticas sugieren un clima semiárido, con un probable régimen estacional (Figura 3.4) (Schwarz 2007).

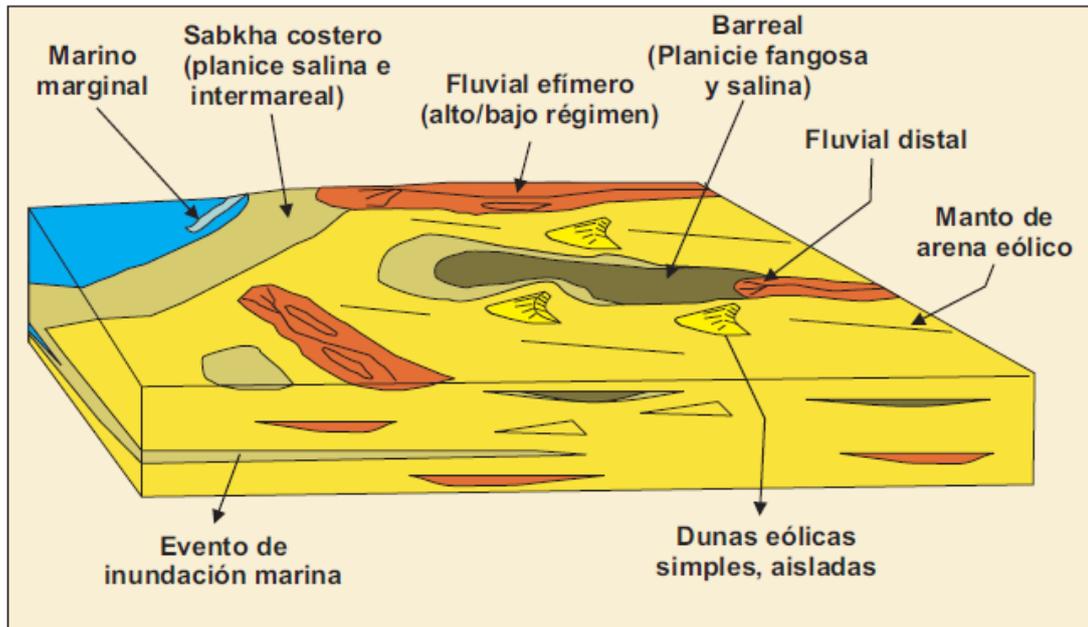


Figura 3.4 – Modelo esquemático propuesto por Schwarz (2007) para la Formación Mulichinco inferido a partir de los testigos de pozo del yacimiento Volcán Auca Mahuida.

Las facies arenosas fluviales y eólicas contienen la mayoría de los niveles mineralizados. En los perfiles de pozo se observan paquetes fluvio-eólico de hasta 20 m de potencia. La distribución de los valores de permeabilidad de dichas facies es muy heterogénea. Las facies de mantos de arenas poseen valores relativamente bajos de permeabilidad, de alrededor de 50 mD mientras que depósitos fluviales adyacentes poseen permeabilidades de 445 mD (Schwarz 2007).

En la laminación de óndula eólica típica de los mantos arenosos, la base de cada lámina tiende a aglutinar el material más fino disponible. Esta segregación textural puede decantar en una cementación de significativa importancia durante la diagénesis temprana. Si existiesen procesos de disolución posteriores; estas facies pueden ser muy buen reservorio. Por el contrario, si la cementación no se disuelve la permeabilidad vertical podría ser baja. Este parece ser el caso de los niveles eólicos de la Formación Mulichinco y es de suma importancia para la producción, ya que, la presencia de dichas facies podría ser la causal para valores de producción por debajo de lo esperado (Schwarz 2007).

### 3.4. Formación Centenario

La Formación Centenario (Digregorio 1972) constituye la variación lateral de la Formación Agrio y forma parte de la sedimentación durante el Valanginiano superior al Aptiano inferior. Es una formación de subsuelo que se encuentra en el este, noreste y sureste de la cuenca Neuquina con espesores entre 400 m y 1000 m (Shchepetkina 2018). En el área de estudio todos los pozos atraviesan esta formación, dando un espesor bastante constante de 400 m que disminuye desde el NO hacia el SE.

La Formación Centenario apoya en forma neta sobre la Formación Mulichinco con un espeso paquete pelítico de 25 a 30 m. Este intervalo se relaciona con la inundación producida dentro de la cuenca para el Valanginiano Tardío (Aguirre Urreta y Rawson 1997). Este intervalo comprende depósitos de plataforma externa generando un sello de carácter regional para los paquetes arenosos infrayacentes (Schwarz 2007).

Recientemente, se han reconocido 11 facies y tres asociaciones de facies indicando 3 ambientes de depositación. La asociación de facies uno indica que para la parte noreste se encuentran depósitos de ambientes continentales tales como canales fluviales efímeros, *crevasses splays*, canales abandonados, llanuras de inundación y paleosuelos. Estas facies no se encuentran en el área del volcán Auca Mahuida, sino que son de borde de cuenca y se pueden encontrar en el Miembro Centenario Inferior en el yacimiento Cerro Bayo y en el Miembro Centenario Superior en el yacimiento Cerro Hamaca Oeste. Hacia el sudoeste se encuentra la asociación de facies dos que se interpreta como un ambiente depositacional marino a marino marginal constituido por depósitos de lagos efímeros poco profundos, *mud flats*, pequeños deltas terminales que entran en lagos y lagunas, lagunas costeras y sabkhas. Esta asociación existe en el Miembro Centenario Inferior en la zona del volcán Auca Mahuida. Finalmente, hacia el este y sudoeste se encuentra la tercera asociación de facies que representa un ambiente marino somero con depósitos de un delta fluviadoinado, influenciado por tormentas, y sus sub-ambientes como canales tributarios, *mouth bars*, frente deltaico y prodelta. Esta asociación de facies se encuentra en la parte más baja del miembro Centenario Inferior, en el sector del volcán Auca Mahuida (Shchepetkina 2018).

## CRETÁCICO INFERIOR-PALEOCENO INFERIOR

### 3.5. Formación Rayoso

La Formación Rayoso (Herrero Ducloux 1946) es una unidad clástica – evaporítica con espesores de hasta 1200 m y una amplia distribución en la cuenca Neuquina. Esta unidad se compone de areniscas finas, limolitas, carbonatos y evaporitas acumuladas en un ambiente mayormente continental durante el Cretácico Tardío (Barremiano – Aptiano). Conforman la unidad superior del grupo Bajada del Agrio y suprayace los yesos que componen al Miembro La Tosca, a nivel regional, por una leve discordancia (Beatove *et al.* 2016).

La Formación Rayoso se habría acumulado en un cuerpo lacustre somero y perenne de salinidad variable, en el cual alternaban períodos húmedos y de extrema aridez. Este arreglo cíclico se compone de tres secuencias clástico – evaporíticas denominadas R1, R2 y R3 (Figura 3.5). La primera secuencia (R1), se integra por niveles pelíticos con intercalaciones de areniscas, anhídritas y carbonatos. Las dos secuencias restantes, están integradas por una sección clástica basal con areniscas medias a finas y delgados niveles de fangolitas, la cual es sucedida por una sección evaporítica integrada por fangolitas, carbonatos, anhídritas y de manera subordinada, areniscas. Estas secuencias representan cortejos de expansión y contracción. En los primeros se engloban los depósitos de arenas finas y lutitas acumuladas en un cuerpo lacustre salobre perenne por flujos hiperpícnicos de larga duración (delta subacuático). El aporte de volúmenes considerables de agua dulce durante este cortejo resultaría en una dilución y transgresión relativa del lago. El cortejo de contracción se compone de depósitos de carbonatos masivos, estromatolitos, anhídrita y halita, los cuales alternan con lutitas rojas y areniscas (Zavala y Ponce 2011).

Estudios paleoambientales y regionales previos de la Formación Rayoso propusieron para esta unidad un origen relacionado con sistemas fluviales meandriformes y efímeros dentro de llanuras de inundación (Leanza 2003).

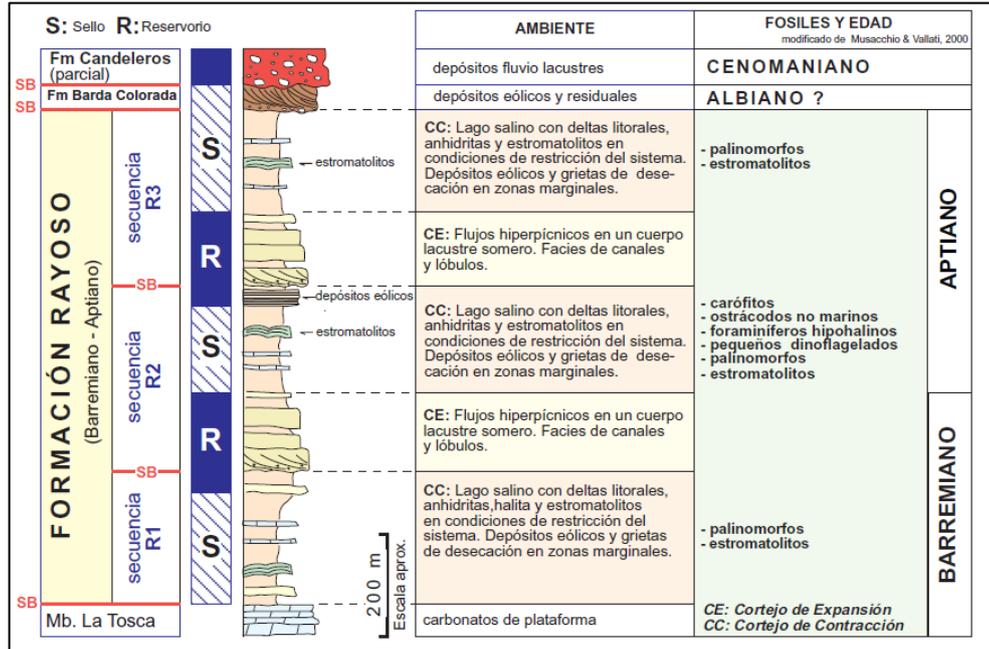


Figura 3.5 – Esquema generalizado de la Formación Rayoso donde se muestran las secuencias de depositación, el ambiente, fósiles y edad. – Tomado de Zavala y Ponce 2011.

En el área de estudio, el pozo VAM-100 posee una corona de esta formación donde se observan tres facies. La primera se compone de areniscas finas a medias con estratificación entrecruzada en artesas. Las areniscas de mayor calidad petrofísica se encuentran fracturadas, siendo levemente friables. El color varía de gris a gris verdoso, con composición cuarzo – feldespática y moderada selección. La facies dos también se compone de areniscas de aspecto masivo con moteado diagenético y fracturas inducidas. El color varía entre gris amarillento y rojizo. Se incluyen conglomerados de intraclastos pelíticos en matriz arenosa, de colores gris verdoso y rojo grisáceo. Presentan líticos volcánoclasticos y cemento de ankerita. La última facies se compone de fangolitas masivas y finas laminaciones subordinadas. Presentan nódulos arcillosos de color rojo grisáceo. Tiene grietas de desecación hacia el tope. Estas descripciones se pueden correlacionar con el perfil de imagen resistiva que se encuentra relevado para dicho pozo (Beatove *et al.* 2016). En esta zona, al encontrarse más al centro de cuenca no se registran las facies evaporíticas típicas de la Formación Rayoso, sino que se encuentran facies clásticas.

Todos los pozos del área atraviesan esta formación entre 408 m.s.n.m. y los 393,35 m.s.n.m dando una estructura antiformal con un alto estructural en RiAIN.a-10(d) que desciende ligeramente hacia el NE y los flancos descienden hacia el NO y SE. Los espesores son cercanos a los 400 m con un ligero aumento hacia el NO.

### 3.6. Grupo Neuquén

En la denominación de Grupo Neuquén (Stipanovic *et al.* 1968) se reúne a una sucesión de depósitos continentales del tipo fluvial, lacustre somero y eólico desarrollados en la cuenca Neuquina en gran parte del Cretácico Superior (Cenomaniano temprano y Campaniano medio), conformando los afloramientos mesozoicos de mayor distribución areal dentro de la cuenca Neuquina (Cazau y Uliana 1973). Se divide en tres subgrupos: Río Limay, Río Neuquén y Río Colorado (Garrido 2011).

Las rocas del Grupo Neuquén no han sido estudiadas para esta zona de trabajo debido a que se conoce su base (tope de la Formación Rayoso) pero su techo se encuentra cubierto por los basaltos del volcán. A su vez, dentro del grupo se encuentra una alta cantidad de cuerpos ígneos. Esto, sumado a que no posee características de reservorios ha generado la falta de estudios sobre los mismos.

### **3.7. Grupo Malargüe**

El grupo Malargüe (Uliana y Dellapé 1981) ha sido una sucesión de, aproximadamente 400 m de depósitos continentales y marinos depositados durante Campaniano – Paleoceno en la cuenca Neuquina (Legarreta y Uliana 1999).

Esta sedimentación ocurrió durante la etapa de antepaís de la cuenca, misma etapa que fue controlada, tanto por la actividad tectónica como por el magmatismo en la cordillera durante el Cretácico Tardío. La depositación de sedimentitas de origen marino (esta vez, desde el océano Atlántico) se produjo por el cambio de pendiente regional (Rodríguez 2011).

La primera formación corresponde a los depósitos continentales y marinos marginales de las formaciones Allen – Loncoché (Campaniano - Maastrichtiano), las cuales se apoyan en discordancia sobre el Grupo Neuquén. Continúa la Formación Jagüel (Maastrichtiano-Daniano), constituida por depósitos marinos de plataforma externa. Siguen los depósitos de la Formación Roca, de la misma edad que la formación anterior, sedimentos carbonáticos y mixtos de plataforma interna. En la cumbre del grupo se depositan las formaciones El Carrizo y Pircala correspondientes a sedimentitas fluviales y evaporíticas (Rodríguez 2011).

En el área de estudio, los pozos no atraviesan este grupo, pero afloran en el sureste del volcán Auca Mahuida.

## **4. EVOLUCIÓN DEL VOLCÁN AUCA MAHUIDA**

El registro volcánico en el ámbito de la provincia de Neuquén desde el Oligoceno hasta la actualidad puede dividirse en tres grupos: el primero involucra secuencias volcánicas reunidas en la cuenca de Cura Mallín ligadas a la evolución de depocentros extensionales del Oligoceno Superior y Mioceno Inferior. Se desarrollan en la actual región de arco y retroarco. El segundo grupo involucra secuencias emplazadas en el retroarco, lejanas al actual frente volcánico, que poseen afinidad de tipo arco. Estas secuencias tienen edades miocenas inferiores a superiores. El último grupo involucra secuencias plioceno-cuaternarias emplazadas en la región de las altas cumbres y sector de piedemonte y, aquellas que constituyen la provincia volcánica de Payenia (Folguera *et al.* 2011).

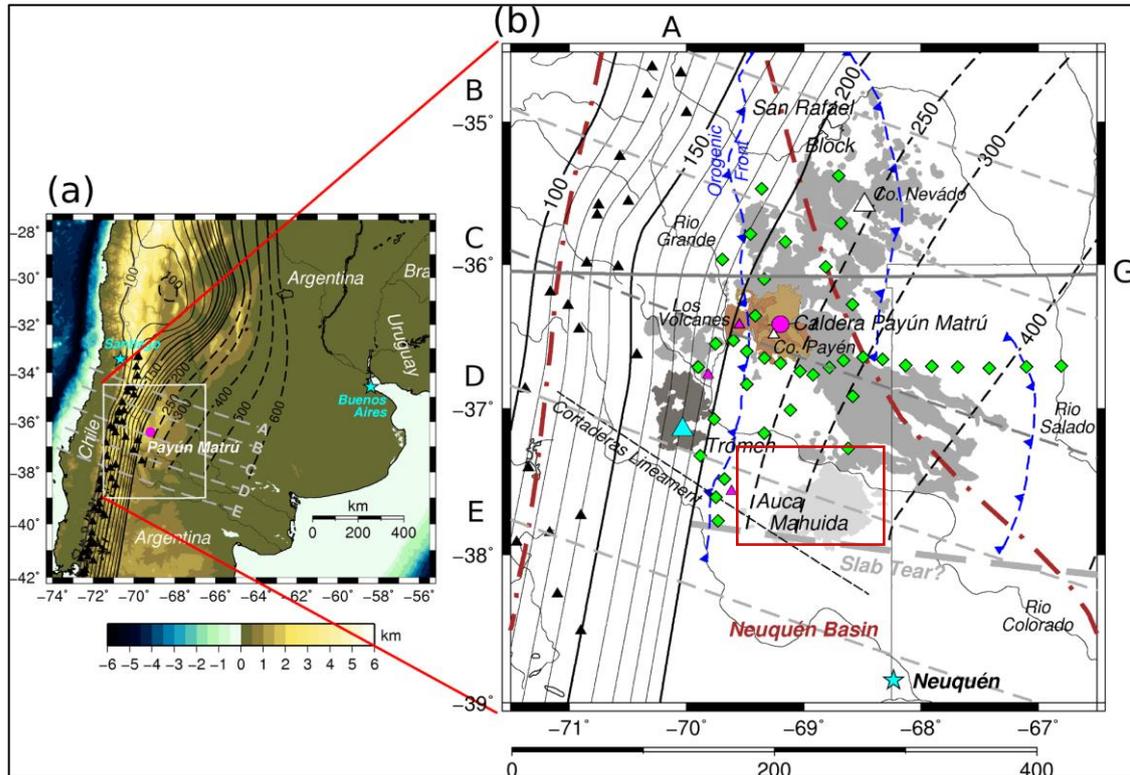


Figura 4.1 – Ubicación del área del Complejo Volcánico de Payenia en el recuadro gris. La caldera del volcán Payún Matrú está representada con el círculo magenta mientras que el volcán Tromén posee un triángulo cian. Por último, los volcanes de la actual zona volcánica activa, se representan con triángulos negros. Con líneas negras se muestran los contornos de la losa subductada mientras que, con línea cortada, la locación de la losa con incertidumbres. La línea marrón de rayas y puntos intercalados indica los bordes de la cuenca Neuquina y en azul el fallamiento del basamento. Los rombos verdes representan zonas con información utilizada por Burd *et al.* (2014) para el modelado con datos magnetotéluricos. Tomado de Burd *et al.* (2014).

La provincia volcánica de Payenia se desarrolló mayormente en una faja N-S deprimida, denominada depresión central, en los Andes entre los  $33^{\circ}40'S$  y los  $38^{\circ}S$ . Es una típica asociación de retroarco con dos picos de actividad, el más antiguo es mayormente mioceno (26 a 8 Ma) y el más joven es plioceno-holoceno (<5 Ma). La Payenia está integrada por más de 800 conos basálticos monogenéticos y por unos pocos poligenéticos (Llambías *et al.* 2010).

Esta provincia ígnea puede explicar su origen debido a un evento de deformación neógeno (18 – 5 Ma) producto de la somerización de la losa, la cual produjo una expansión anormal del frente orogénico migrando el arco magmático 300 km del frente actual y deformando el interior del continente (Figura 4.1). Durante el Plioceno esta configuración cambia con el empinamiento de la placa de Nazca. Este estadio produce el retiro del arco y una inyección astenosférica que en los últimos dos millones de años genera el gran flujo basáltico del Complejo Volcánico de Payenia (Gianni *et al.* 2017).

Gracias a datos magnetotéluricos aportados por Burd *et al.* (2014) se identificaron dos anomalías resistivas interpretadas como plumas en el subsuelo. La primera denominada SWAP (*Shallow Western Asthenospheric Plume* o Pluma Astenosférica Somera Occidental), la cual se aproxima a la superficie debajo de la Caldera de Payún Matrú y el volcán Tromén con una inclinación al oeste, hacia la losa subductada de la placa de Nazca. La otra estructura es la denominada DEEP (*Deep Eastern Plume* o Pluma Profunda Oriental), que se aproxima a la superficie a unos 100 km al sur del volcán Payún Matrú

se inclina abruptamente a este permaneciendo sobre la subductada placa de Nazca (Figura 4.2). Se cree que SWAP y DEEP fueron una sola pluma hasta que la parte superior de DEEP fue decapitada durante el empujamiento de la losa. Además, Pesicek *et al.* (2012) propone, en base a tomografías sísmicas, el desgarramiento de la losa en el Plioceno Tardío a los 38°S que podría haber provocado el desprendimiento y la separación de SWAP hacia el noroeste. Todos estos eventos de deformación pudieron ser causados por la subducción de esta pluma por debajo del continente (Gianni *et al.* 2017).

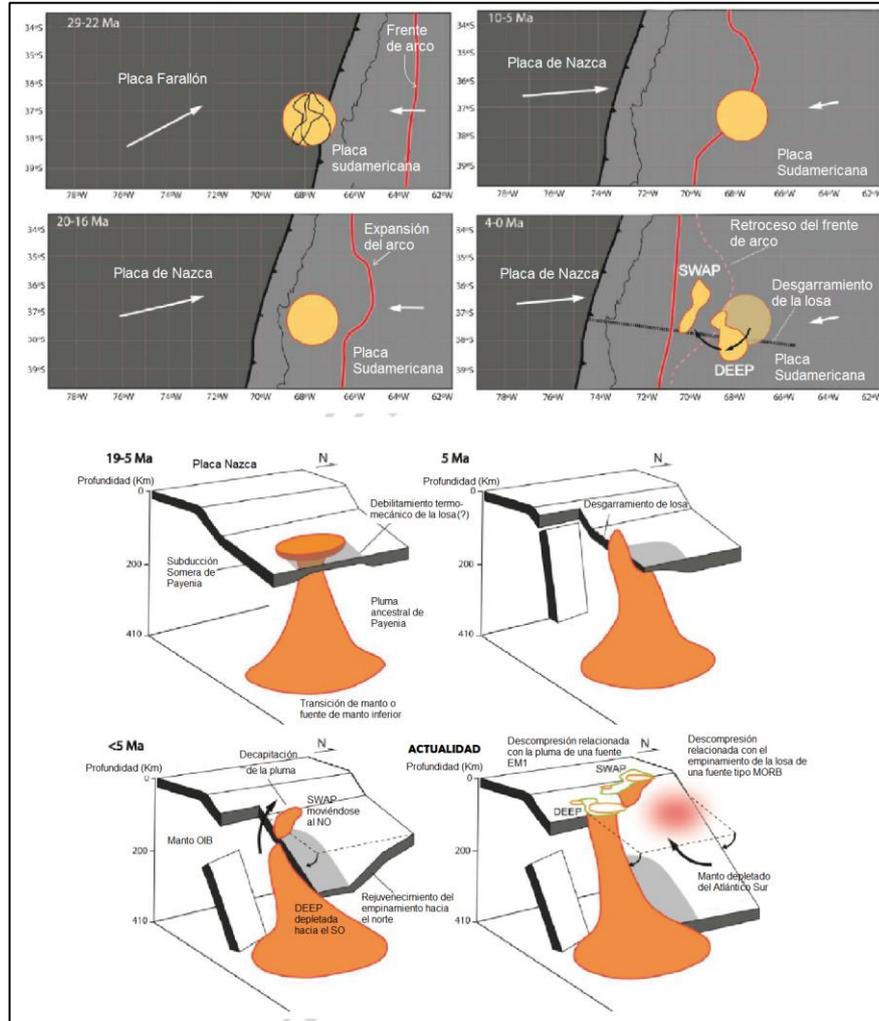


Figura 4.2 – a) Reconstrucción de la migración de las placas y de la primera pluma única durante el Neógeno con su posterior separación en SWAP y DEEP. b) Modelo geológico propuesto que relaciona la subducción de la pluma de Payenia, la somerización de la losa y posterior desgarramiento, empujamiento y decapitación de la pluma. Tomado de Gianni *et al.* (2017).

Entre los grandes volcanes plioceno–cuaternarios presentes en la provincia volcánica de Payenia, el volcán Auca Mahuida es el único volcán tipo escudo y aparece como un edificio clave debido a su posición, volumen y tipo de magma. Formado entre los 1,87 y 0,88 Ma (Bermúdez *et al.* 2000, Rossello *et al.* 2002, Kay *et al.* 2006), se encuentra aislado de la zona andina, a unos 100 km al este del frente de deformación actual. Se localiza en el extremo sur de la provincia volcánica de Payenia. El vulcanismo de Payenia está ausente al sur del volcán Auca Mahuida, donde el lineamiento de Cortaderas de rumbo N100°E, marca el límite austral de una subducción somera del Mioceno (Kay *et al.* 2006).



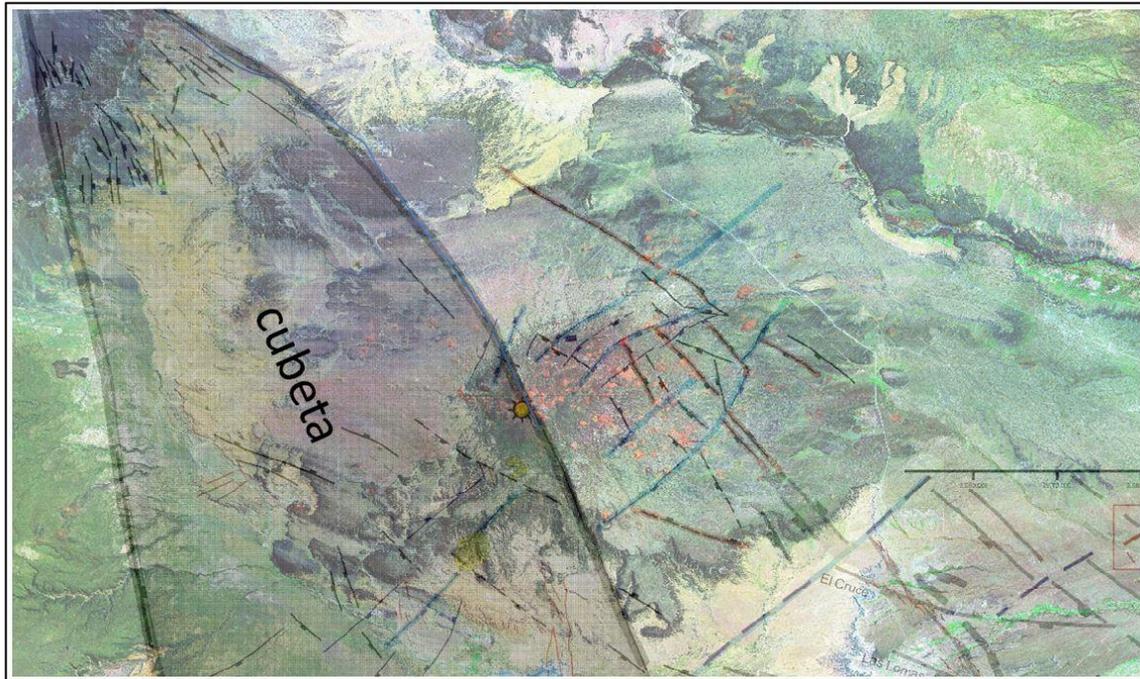


Figura 4.4 – Imagen regional en la cual se han trazado las estructuras principales y se delinea la cubeta precuyana NNO-SEE en la cual se observa que su borde oriental atraviesa el centro del volcán Auca Mahuida. Tomado de Cristallini *et al.* (2014).

Respecto a la geoquímica, los magmas que formaron el volcán Auca Mahuida provienen, de al menos, dos fuentes diferentes de manto tipo OIB con diferentes profundidades y diferentes contenidos de granate y espinelo. Después de su extracción, los magmas almacenados en la base de la litosfera fueron equilibrados y diferenciados por cristalización fraccionada. La mayoría de los productos en erupción son basaltos con alto contenido de MgO (basaltos primitivos), basaltos con bajo contenido de MgO (basaltos evolucionados, rocas andesíticas basálticas) y rocas traquíticas. Todas las fases volcánicas, con excepción de la primera) se caracterizan por una emisión primitiva de basaltos (con alto contenido de MgO) para, posteriormente, evolucionar a una composición con mayor concentración de productos diferenciados y bajo contenido de MgO (Pallares *et al.* 2016).

En cuanto al control estructural del volcán Auca Mahuida y sus alrededores, la historia se remonta al Triásico superior, con el desarrollo de una cubeta con dirección NNO-SSE. El borde oriental de esta cubeta pasa por encima del cráter del volcán (Figura 4.4). La misma, como en muchos otros sectores de la cuenca, habría albergado grandes cantidades de sedimentación. Cristallini *et al.* 2014, proponen que se generó previamente al fallamiento de los hemigrábenes precuyanos con dirección NO-SE a ONO-ESE y al de las zonas de transferencia NE-SO. La cubeta y los hemigrábenes del ciclo Precuyano se generaron en direcciones oblicuas. Durante toda la historia de la cuenca, la cubeta NNO-SSE, los hemigrábenes del ciclo Precuyano y el estadio de sag de la propia cuenca actuaron generando subsidencia en diferentes longitudes de onda condicionando rasgos topográficos (Figura 4.5) (Cristallini *et al.* 2014).

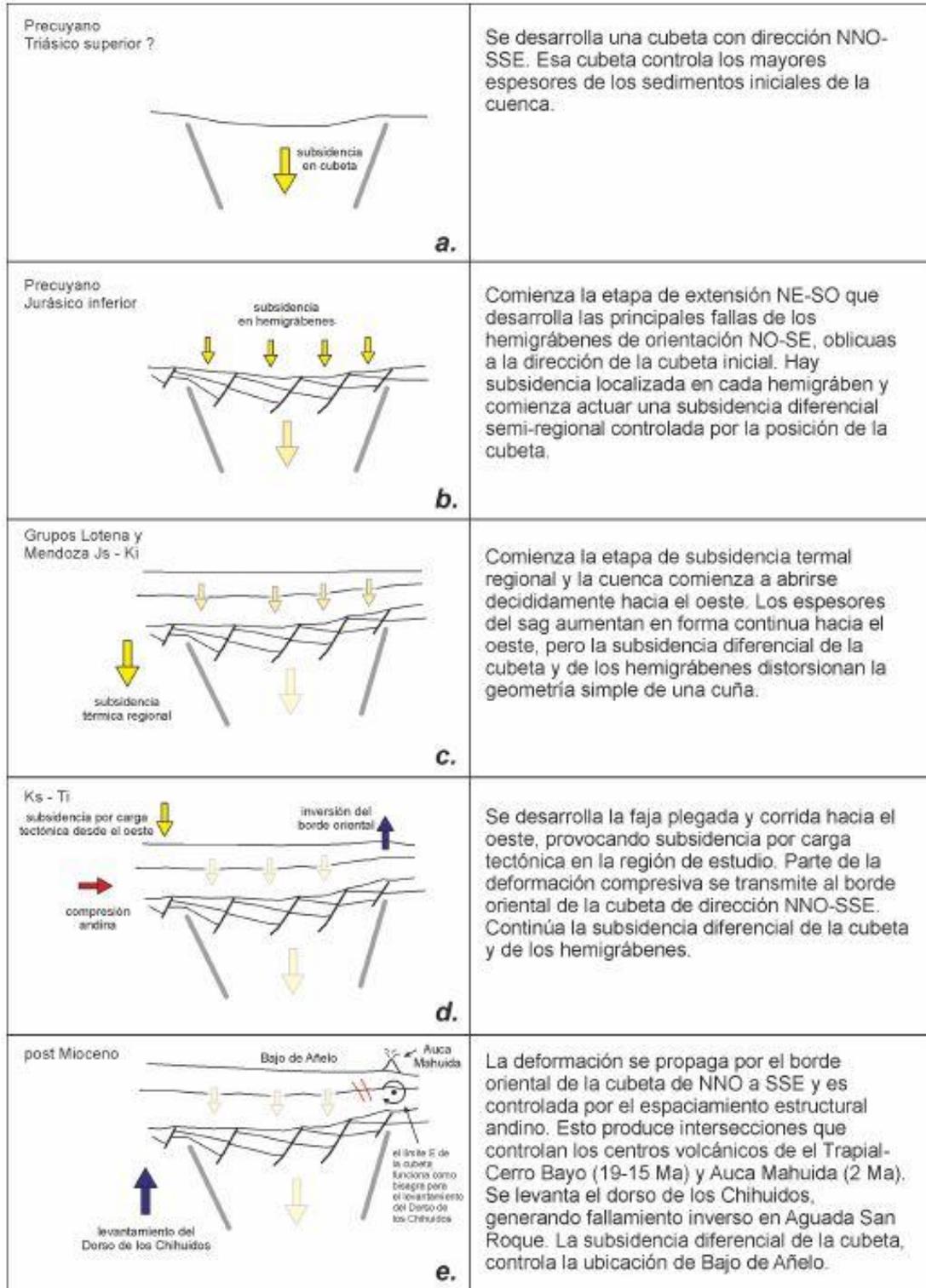


Figura 4.5– Esquema evolutivo de la comarca del volcán Auca Mahuida. Tomado de Cristallini *et al.* (2014).

A partir del Cretácico tardío comienza a desarrollarse la faja plegada y corrida del Agrio que somete a la comarca del volcán a una subsidencia por carga tectónica a medida que se desarrollan los grupos Neuquén y Malargüe. Esta compresión aprovecha los bordes de la cubeta como zonas débiles y deformables, pero al ser oblicua a la compresión no la afecta en toda su magnitud, sino que hay zonas

de concentración de deformación, produciendo inversiones. Estos sectores que son el resultado de una intersección entre ambas estructuras, funcionan de control para el vulcanismo del volcán Trapial Cerro Bayo y del Volcán Auca Mahuida (Figura 4.6).

Coetáneamente, se produce el levantamiento del dorso de los Chihuidos, provocando fallas antitéticas en el borde oriental de la cubeta que funcionan como bisagra para este levantamiento. La subsidencia de la cubeta continúa actuando y se expresa en el bajo de Añelo (Cristallini *et al.* 2014).

Estas intersecciones de esfuerzos producen el levantamiento de una estructura dómica previa a la actividad magmática, teniendo que haberse producido entre los 63 y los 2 Ma. Este levantamiento junto al alzamiento producido por el emplazamiento de la cámara magmática generó la erosión del grupo Malargüe que no se encuentra en los pozos petroleros que atraviesan el Volcán Auca Mahuida (Figura 4.6) (Cristallini *et al.* 2014).

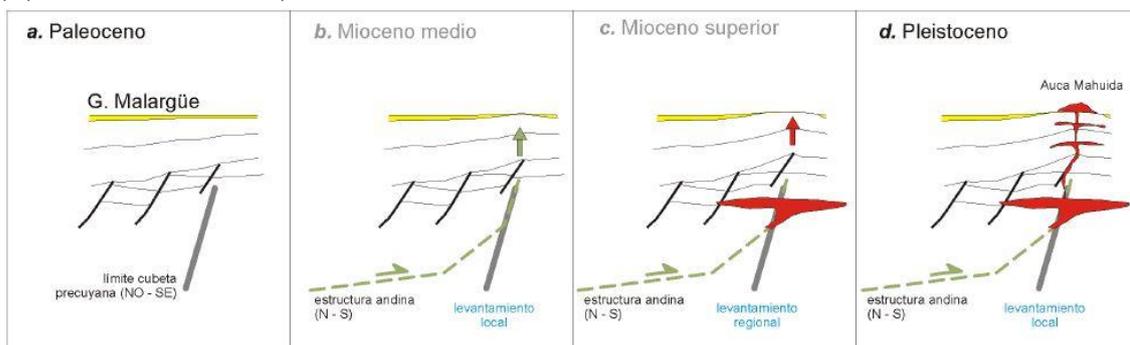


Figura 4.6 – Esquema que muestra los planos de debilidad aprovechados por el vulcanismo, la explicación del alto del Auca Mahuida y la ausencia del Grupo Malargüe en la zona. Tomado de Cristallini *et al.* (2014).

## 5. SISTEMA PETROLERO

El concepto general de sistema petrolero es definido por Magoon y Dow (1994) como un sistema natural que involucra los componentes geológicos y los procesos necesarios para generar hidrocarburos. Los componentes son un grupo de elementos esenciales e independientes: roca generadora (o roca madre), roca reservorio y roca sello. Los procesos son la formación de trampa, la maduración, migración y acumulación de hidrocarburos. Todo el sistema debe evolucionar de acuerdo a un tiempo o *timing* apropiado para que se produzca la acumulación y preservación. Estos autores también proponen la clasificación de sistemas petroleros atípicos o, en el caso de Delpino y Bermúdez (2009), sistemas petroleros ígneos. En este trabajo se seguirá la clasificación de estos últimos autores. Los sistemas petroleros ígneos a su vez se subclasifican en dos tipos (Figura 5.1):

Tipo 1: Cuando la roca ígnea se intruye en una roca potencialmente generadora. A su vez, este tipo se subdivide en tres debido al grado relativo de madurez termal de la potencial roca madre. El subtipo 1A se define cuando la roca generadora potencial es inmadura o está cercana a la ventana de petróleo en el momento de la intrusión. El subtipo 1B se genera cuando una roca ígnea intruye una roca generadora madura. Finalmente, el subtipo 1C se produce cuando la intrusión ocurre en una roca generadora sobremadura. En este caso, dependiendo del grado relativo de sobremaduración sólo se podrían generar pequeñas cantidades de hidrocarburo gaseoso debido al calor aportado por los intrusivos.

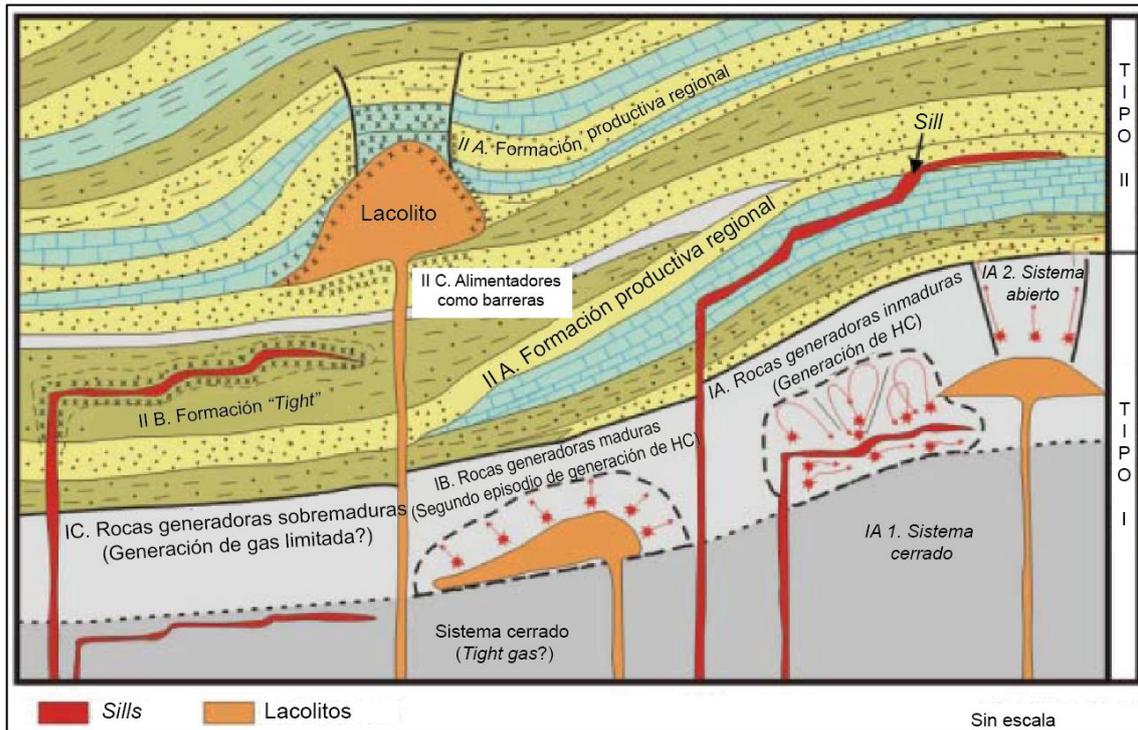


Figura 5.1 – Diferentes tipos de sistemas petroleros ígneos relacionados a sills y lacolitos. Tomado y modificado de Delpino y Bermúdez (2009).

Tipo 2: Cuando la roca ígnea se ha intruido en otro tipo de roca que no actúa como una generadora. En este caso también se subdivide en tres subtipos. El subtipo 2A acaece donde sills y lacolitos intruyen en formaciones que son conocidas como rocas reservorio, como areniscas o carbonatos. El subtipo 2B sucede cuando el nivel donde se producen las intrusiones corresponde a arenas *tight*. Por último, el subtipo 2C está relacionado con *feeders* que pueden actuar como barreras que forman parte de las trampas.

En el caso del área de estudio, el sistema petrolero corresponde al tipo 2, con más relación al subtipo 2A. También podría asociarse al 2C en los casos en los que los diques interactúan como trampas. No se descarta que a mayor profundidad en el subsuelo exista también un sistema tipo 1 ya que trabajos previos (Bermúdez y Delpino 1998, Bermúdez y Delpino 2002, Longo 2015 y Longo 2017) han realizado estudios sobre el yacimiento Volcán Auca Mahuida a mayores profundidades (sobre las formaciones Quintuco - Vaca Muerta y más profundas) y han descubierto la existencia de cuerpos intrusivos laminares dentro de estas formaciones con potencial generador.

### 5.1. Sistema petrolero en el engolfamiento Neuquino y en el volcán Auca Mahuida

En este apartado se considera la bibliografía disponible que caracterizan a los componentes de los sistemas petroleros ubicados en la región morfoestructural del engolfamiento Neuquino.

Esta región de la cuenca comprende una gran superficie de la provincia. La deformación es moderada y relacionada a los últimos eventos estructurales que sucedieron durante el Neógeno del tipo compresivo y extensivo donde la sumatoria de la actividad volcánica afectó los yacimientos. La región se ha subdividido en tres sectores: norte, centro y sur (Figura 5.2) (Vergani *et al.* 2011).

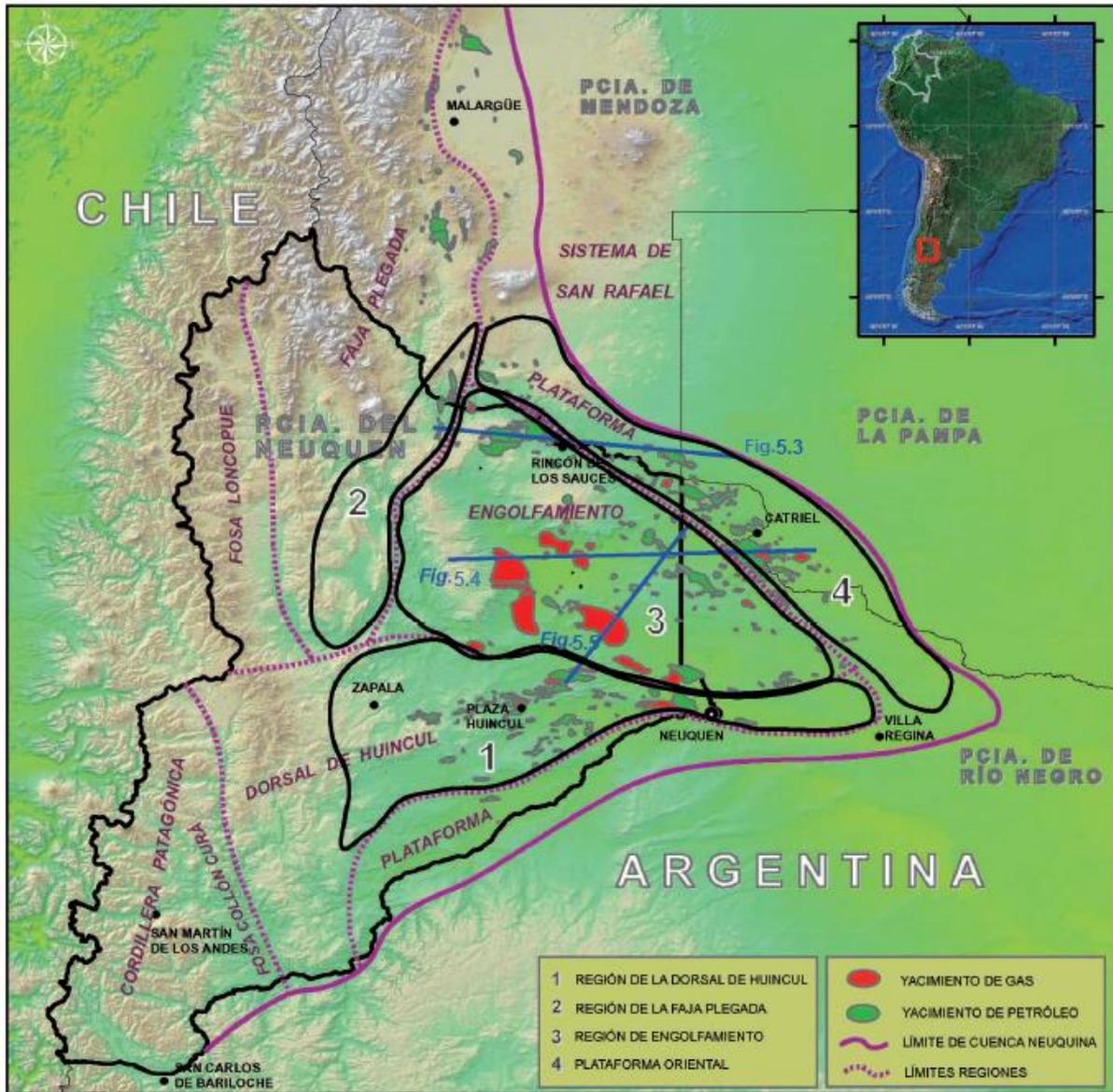


Figura 5.2 – Ubicación de los principales yacimientos de petróleo y gas en la cuenca Neuquina. Se observa su disposición con respecto a las regiones morfoestructurales y ambientes de la cuenca. Se indican las transectas dónde están situadas las figuras 5.3, 5.4 y 5.5. Tomada y modificada de Vergani *et al.* (2011).

El *play* petrolero característico de la región norte del engolfamiento (Figura 5.3) puede ser descrito como aquellos yacimientos ubicados en reservorios cretácicos y con generación en rocas de las formaciones Vaca Muerta y Agrio. Es la región más rica en yacimientos, donde los mismos se encuentran agrupados en altos estructurales mayores o espolones con diferentes reservorios superpuestos y múltiples contactos de agua debido a la partición del entrampamiento relacionados a fallas en los flancos. Las profundidades donde existe la acumulación circundan los 2000 m y la producción se encuentra en declive, sostenida por recuperación secundaria (Vergani *et al.* 2011).

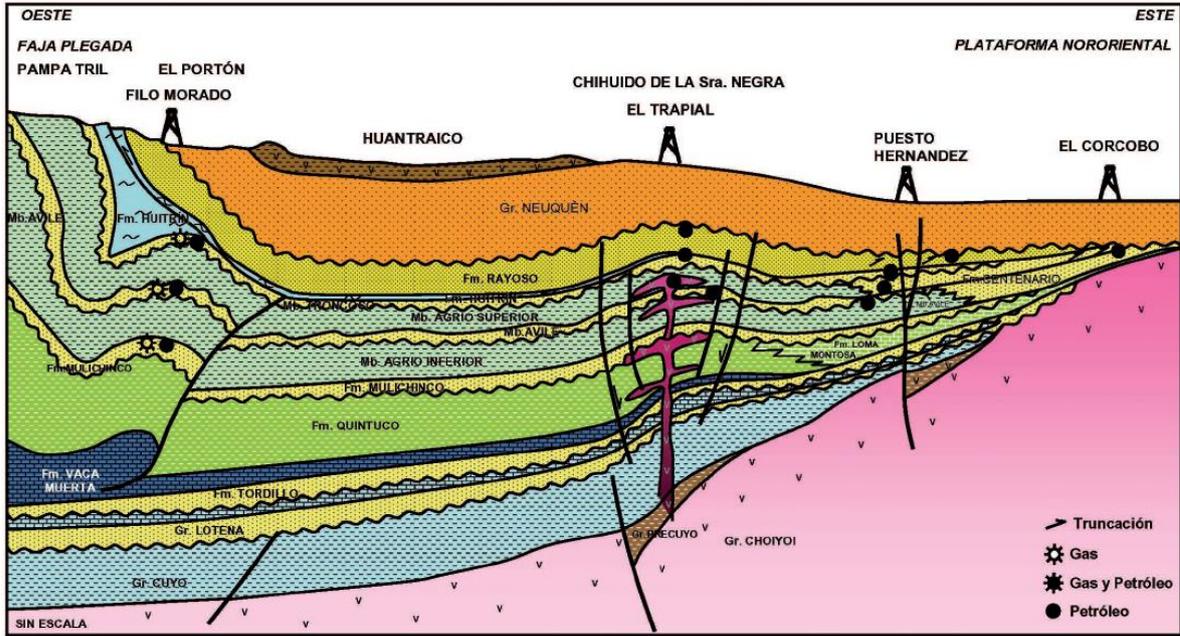


Figura 5.3 – Sección geológica esquemática situada entre la faja Plegada y Corrida y la plataforma Oriental. Tomada de Vergani *et al.* (2011).

El tipo de *play* de la región central (Figura 5.4) se caracteriza por múltiples reservorios principalmente cretácicos, en estructuras terciarias, relacionados a anticlinales con pobre migración y proveniente de la Formación Vaca Muerta. Esta región posee yacimientos más profundos con trampas relacionadas a cuerpos volcánicos, variaciones laterales de la petrofísica y, en menor medida, fracturamiento de rocas carbonáticas. Hacia el este las acumulaciones comienzan a asociarse a reservorios clásticos con porosidad secundaria, alojados en anticlinales relacionados a estructuras con fallas de basamento. En el límite oriental se desarrolla un eje de anticlinales (Charco Bayo – El Caracol) donde la migración proveniente de la Formación Vaca Muerta es lateral y llena múltiples reservorios jurásico – cretácicos y un pequeño aporte de gas proveniente de la Formación Los Molles en reservorios jurásicos (Vergani *et al.* 2011).

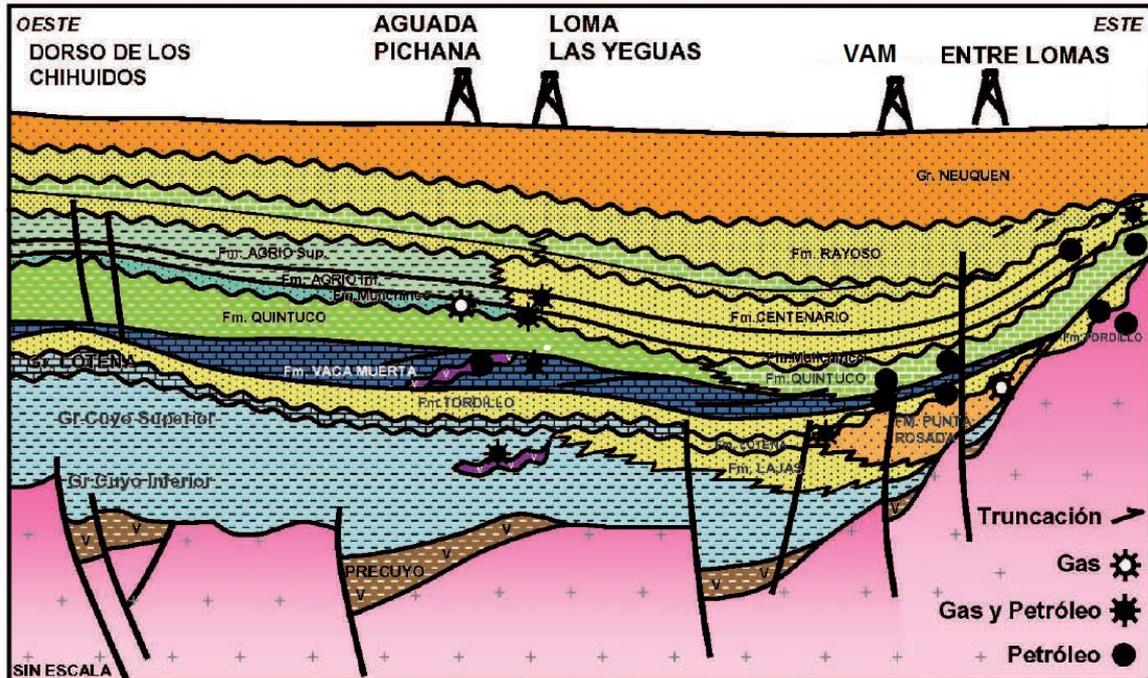


Figura 5.4 - Sección geológica esquemática situada entre el oeste del engolfamiento Neuquino y la plataforma Oriental, con los principales *plays* productivos. Aunque el yacimiento VAM se encuentra más al norte se lo colocó en una zona de similar geología. Tomado y modificado de Vergani *et al.* (2011).

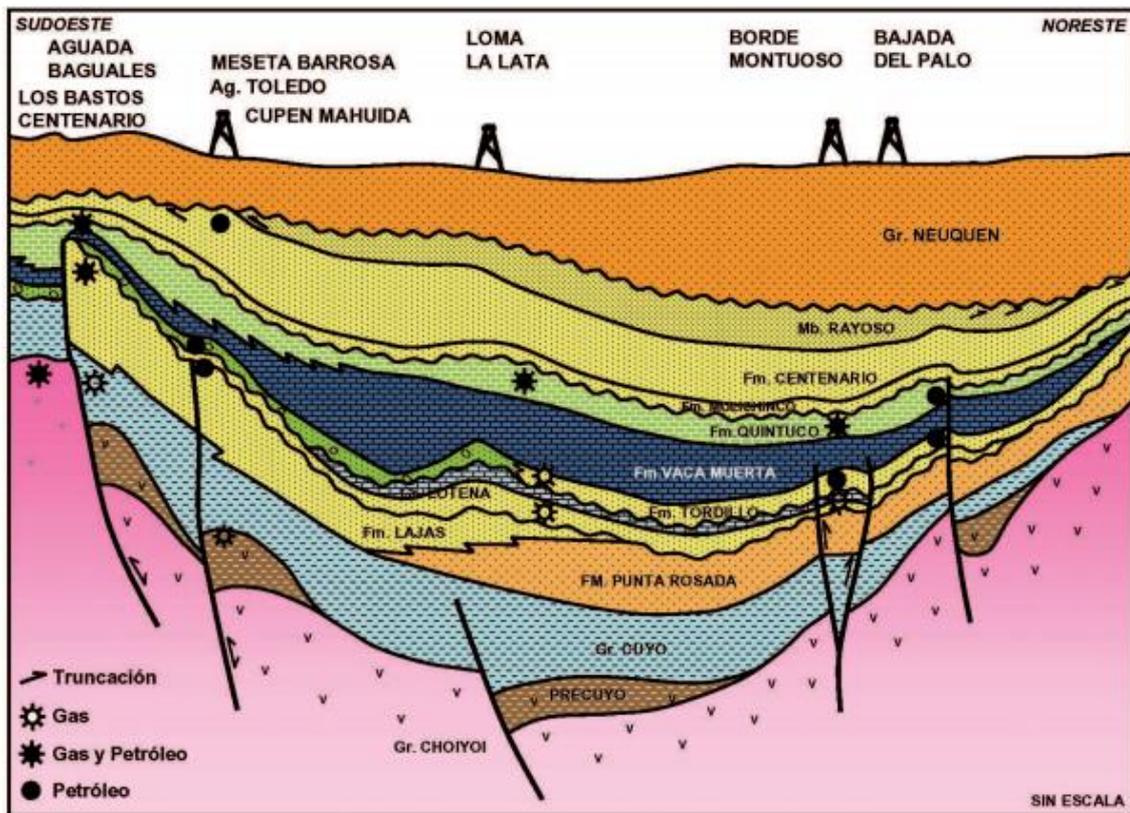


Figura 5.5. Sección geológica esquemática entre la dorsal de Huincul y la plataforma Oriental con los principales *plays* productivos. Tomado de Vergani *et al.* (2011).

En la región sur del engolfamiento Neuquino (Figura 5.5) se presenta un *play* petrolero caracterizado, mayormente, por reservorios del Grupo Mendoza, donde las rocas generadoras pertenecen a las formaciones Los Molles y Vaca Muerta y la migración se produce de manera lateral y vertical por estructuras jurásicas reactivadas durante el Paleógeno - Neógeno. En esta zona se encuentran importantes yacimientos de gas, como el de Loma La Lata. También existen acumulaciones menores pero importantes tanto por debajo, en el Grupo Lotena, como por encima, en Formación Quintuco que producen gas y petróleo en reservorios sobrepresionados. Asociados, en el sur del engolfamiento Neuquino con transición a la dorsal de Huincul, aparecen acumulaciones en los yacimientos de Lindero Atravesado y Río Neuquén con producción de gas y petróleo en varios reservorios de los grupos Cuyo y Mendoza (Vergani *et al.* 2011).

El Yacimiento volcán Auca Mahuida se emplaza en la región central del engolfamiento Neuquino (Figura 5.4). Como se mencionó anteriormente, la roca generadora por excelencia es la Formación Vaca Muerta. Los reservorios se componen de múltiples formaciones que incluyen Mulichinco, Centenario y Rayoso. La carga de estos reservorios se asume que ocurrió en el Neógeno para luego ser afectada por la actividad ígnea. Las trampas son combinadas, por un lado, se encuentran trampas estructurales conformadas por un anticlinal regional afectado por la posterior actividad ígnea que crea un domo en toda la estructura y emplaza diques y filones que compartimentalizan las arenas reservorio. Por otro lado, se encuentran las trampas estratigráficas que se componen por cambios de facies y diagenéticos. Existen migraciones primarias y secundarias que utilizan *carriers* arenosos y fracturas. También se encuentra una migración cenozoica que comenzó cuando se instauró la actividad ígnea produciendo un reacomodamiento de estructuras y una re-migración. Finalmente, los sellos no se limitan a una formación o miembro, sino que son sellos locales debido a la presencia de estratos de lutitas o cambios diagenéticos. Además, existen barreras sellantes producidas por los diques ígneos.

## 6. INTRUSIVOS

El emplazamiento del complejo volcánico Auca Mahuida produjo la intrusión de diferentes cuerpos en el subsuelo, afectando las sedimentitas. Entre los cuerpos involucrados se encuentran los laminares (diques y filones capa o *sills*) y un cuerpo que podría caracterizarse como lacolito.

El análisis de estos cuerpos intrusivos es útil para el conocimiento de la evolución de la zona. En zonas circundantes al cráter muy cercanas a la zona de estudio del presente trabajo se realizó un estudio de *cutting* en 14 pozos contemplando 84 muestras en diferentes formaciones entre la Formación Mulichinco y el Grupo Neuquén (Ribas *et al.* 2018).

Las rocas plutónicas, componen casi el 10% de las muestras que se observan en la descripción de *cutting*. Son de tipo intermedias y corresponden a sienitas, que sólo se encontraron en la Formación Mulichinco. En cuanto a rocas volcánicas y subvolcánicas, las máficas comprenden basaltos y corresponden al 15% de las muestras mientras que el porcentaje restante de las muestras corresponde a rocas intermedias del tipo traquitas y traquiandesitas. Según Longo (2017) también existen, en un marco de estudio más generalizado, rocas plutónicas máficas correspondientes a gabros y sieno-dioritas. En cuanto a las rocas volcánicas también se encuentran traquibasaltos y traquiandesitas basálticas.

En el estudio de Ribas *et al.* (2018) se establece que la mayoría de los cuerpos corresponden a diques y en menor medida filones capa, que son pasivos al campo de esfuerzos regionales, adaptándose a las

estructuras de la caja. La mayoría de estos cuerpos laminares tienen composición traquítica (algunas más evolucionadas que otras) y con una alta frecuencia de aparición en la Formación Centenario, aunque en Longo (2017) esta frecuencia cambia para focalizarse en las formaciones Quintuco y Vaca Muerta (formaciones que no han sido alcanzadas en el trabajo de Ribas *et al.* 2018) debido a que su composición pelítica las hace más fáciles para ser intruidas desde el punto de vista mecánico.

## 7. METODOLOGÍA Y ANÁLISIS DE DATOS

### 7.1. Sistema de información geográfica

En primera instancia se confeccionó un proyecto en un sistema de información geográfica, o GIS por sus siglas en inglés (*geographic information system*) utilizando el software libre QGIS Desktop™. En este, se colocaron imágenes satelitales obtenidas de Google Earth del volcán Auca Mahuida y una imagen ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*), obtenida de la página del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS por sus siglas en inglés: *United States Geological Service*). Sobre las imágenes se plotearon: los rumos de los cuerpos ígneos obtenidos de antecedentes bibliográficos, un dique vertical al sur del área de estudio denominado CoBy.x-1 en base a su pozo descubridor (Figura 7.2), datos de fallas y desconexiones y datos aeromagnéticos y gravimétricos tomados del trabajo de Longo (2017). Se generaron combinaciones RGB con las bandas que componen la imagen ASTER mediante el uso del software ENVI™ (Figura 7.1).

También se realizaron superposiciones de mapas para buscar nuevos resultados. Para este caso se utilizó un mapa tomado de Longo (2017) el cual muestra soluciones de deconvolución de Euler. Estas soluciones representan o permiten reconocer contrastes en los gradientes de datos potenciales, en este caso de las anomalías magnéticas. Las soluciones obtenidas mediante esta técnica representan la profundidad a las fuentes que generan dichos contrastes. Cuando las soluciones se encuentran alineadas pueden interpretarse como correspondientes a estructuras geológicas, pudiendo utilizarse como una ventana para ver el subsuelo. Este mapa fue superpuesto a dos mapas más: un mapa de un *sill* intruido en la Formación Quintuco, tomado de la misma autora y un mapa tomado de Ribas *et al.* (2018) de un cuerpo ígneo alojado en la Formación Mulichinco.

Lo mismo se realizó con otras dos imágenes. La primera, tomada de Ventura *et al.* (2013) que muestra una falla que atraviesa el volcán a lo largo en sentido NNO-SSE (también observada en los lineamientos de superficie) y la segunda tomada de Pallares *et al.* (2016) (Figura 2.7).

La combinación que mostró mejores resultados corresponde a RGB-631. Esta composición sumada a la sísmica regional, (Figura 7.2), a los lineamientos de superficie obtenidos por Bermúdez y Delpino (1998) y a datos de fallas obtenidas de pozos aledaños, permitieron mejorar el conocimiento de la estructura superficial del volcán (Figura 7.3).

La superposición del mapa de deconvoluciones de Euler junto con los cuerpos intrusivos permiten observar ciertas correlaciones entre estos (Figura 7.4 y 7.5). Finalmente, la correlación entre los trabajos de Pallares *et al.* (2016) y Ventura *et al.* (2013) mostraron un control de la falla de la primera imagen sobre las coladas basálticas mapeadas por el segundo autor (Figura 7.6).

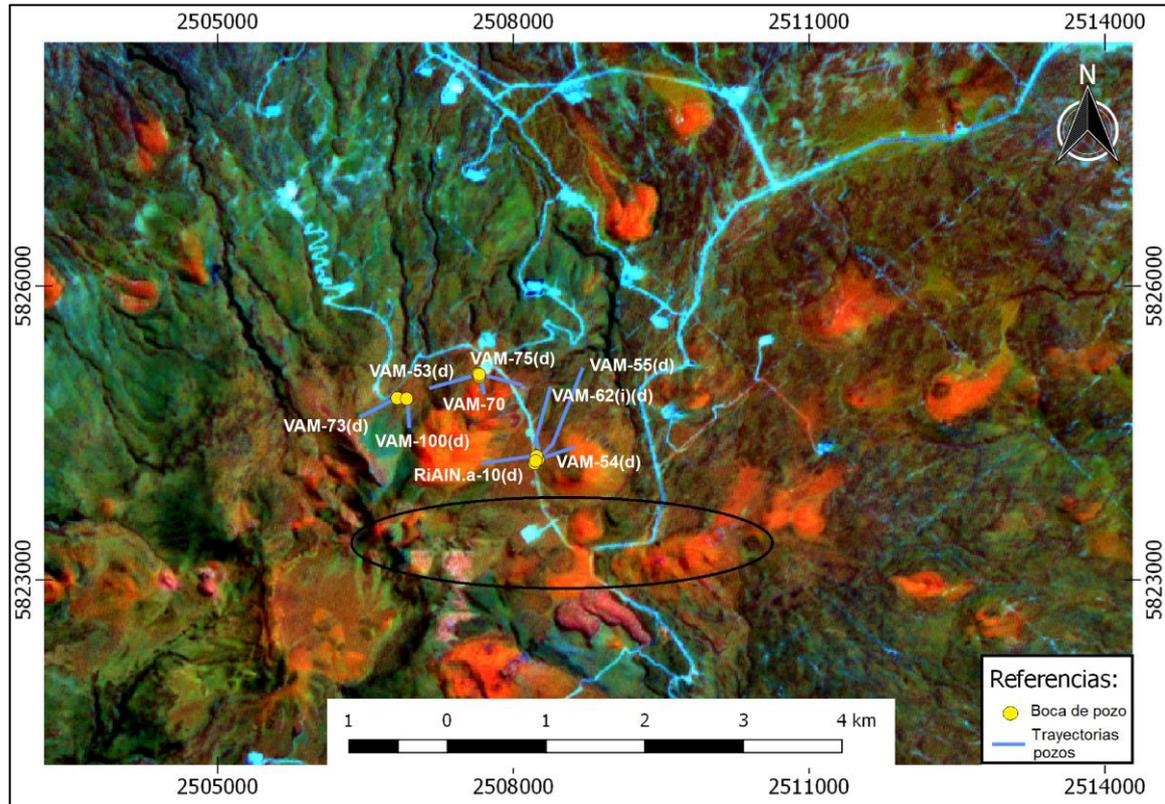


Figura 7.1 – Imagen ASTER RGB 631. Dentro de la elipse de color negro se puede observar un ejemplo de cómo esta imagen resalta lineamientos en superficie que no se ven en una imagen satelital con bandas del espectro visible.

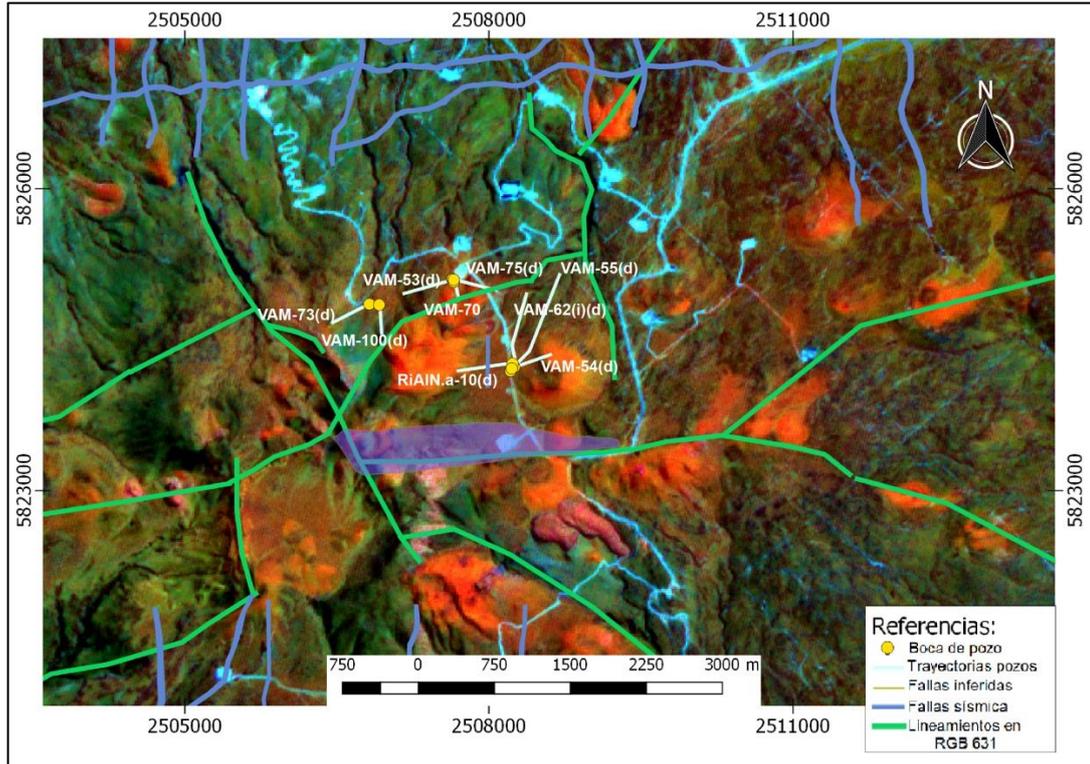


Figura 7.2 – Imagen donde fueron proyectadas las fallas interpretadas a partir de datos sísmicos (en azul) y los lineamientos interpretados mediante la imagen ASTER RGB 631 (en verde). Dique CoBy.x-1 (en violeta).

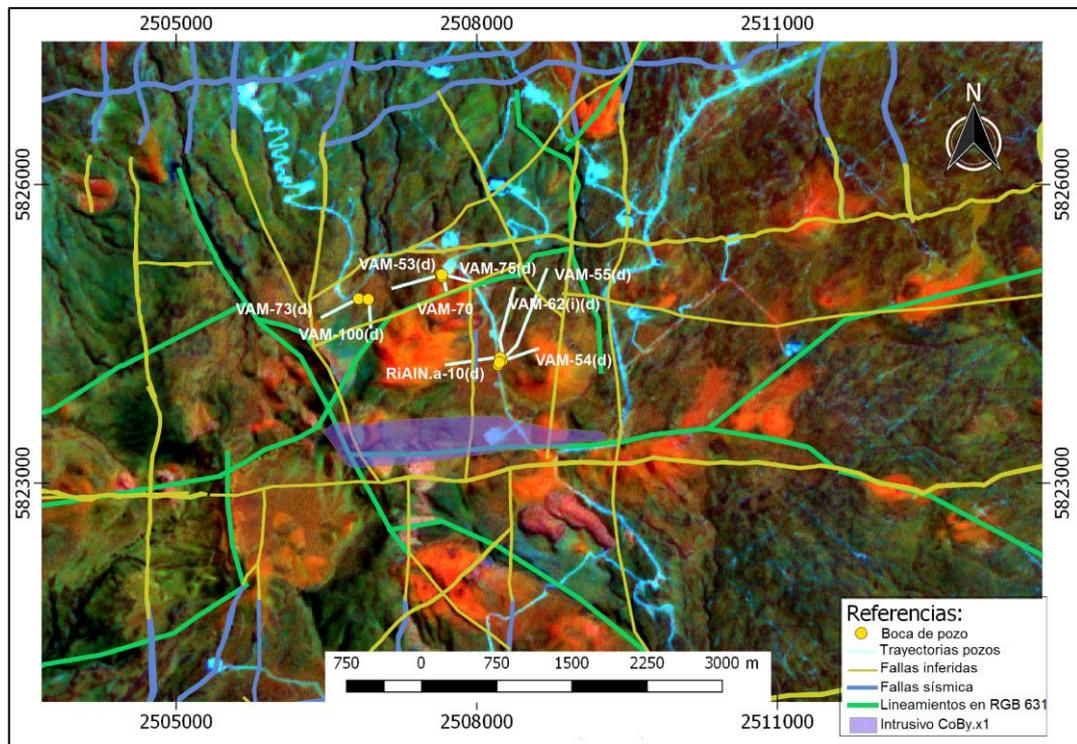


Figura 7.3 – Lineamientos utilizados en el GIS. En amarillo, fallas inferidas por correlación sísmica traídas de Roth (2017), en verde y azul los lineamientos y fallas obtenidos en la figura 7.2. Dique CoBy.x-1 (en violeta).

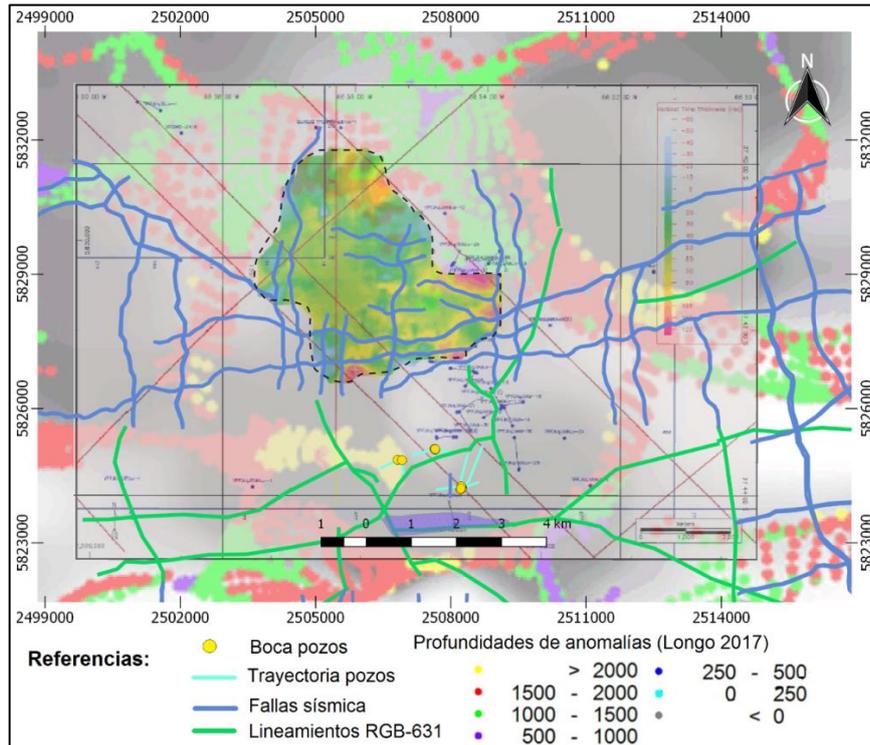


Figura 7.4 – Superposición de mapa de soluciones de Euler (Longo 2017) con *sill* intruido en la Formación Quintuco, al norte del área de estudio. El perímetro norte del intrusivo parece corresponderse con la curva generada en la misma zona, pero sobre el mapa suprayacente.

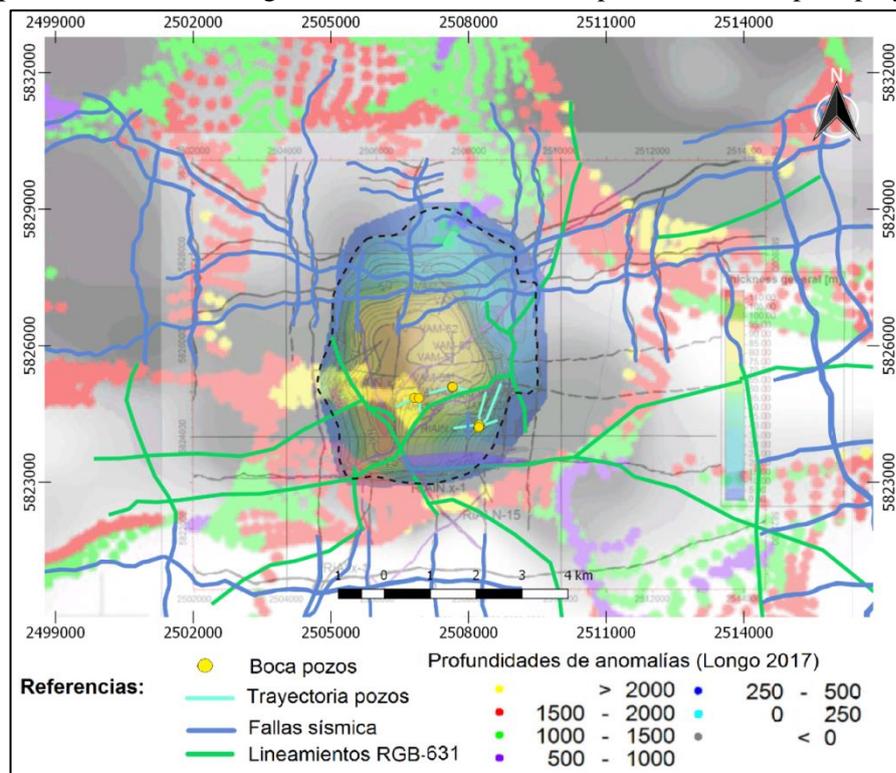


Figura 7.5 - Superposición de mapa de soluciones de Euler (Longo 2017) con lacolito intruido en la Formación Mulichinco, sobre el área de estudio (delimitado con línea punteada). El perímetro sur del intrusivo parece corresponderse con la curva generada en la misma zona, pero sobre el mapa de anomalías.

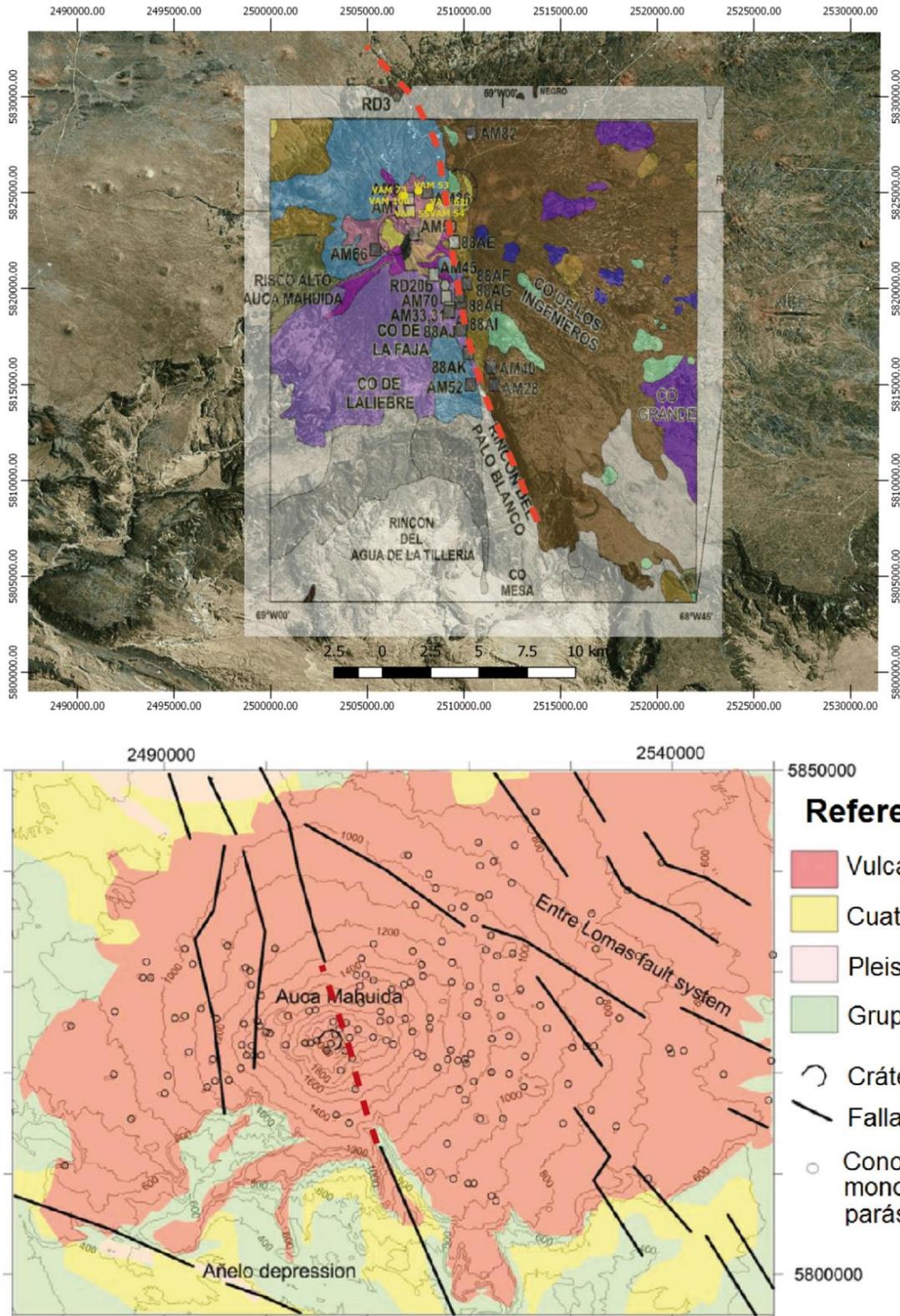


Figura 7.6 – Correlación de una falla observada en el trabajo de Ventura *et al.* (2013) y en los lineamientos de superficie de la imagen ASTER RGB 631 con la geología de las coladas mapeadas por Pallares *et al.* (2016). Parece existir un control de esta falla regional sobre la extrusión de las vulcanitas.

## 7.2. Perfiles

Para el trabajo con perfiles se utilizó principalmente Petrel® E&P Software Platform 2015 donde se trabajó con la información de perfiles eléctricos de nueve pozos: VAM-73(d), VAM-100(d), VAM-53(d), VAM-70, VAM-75(d), VAM-55(d), VAM-62(d)(i), VAM-54(d) y RiALN.a-10(d) que salen de 3 locaciones (Tabla 7.1). Lo primero que se realizó al crear el proyecto fue cargar los perfiles eléctricos de los pozos. Las respuestas utilizadas fueron los perfiles de rayos gamma, resistividad, densidad y neutrón (figura 7.7).

	VAM-73(d)	VAM-100(d)	VAM-53(d)	VAM-70	VAM-75(d)	VAM-62(d)(i)	VAM-55(d)	VAM-54(d)	RiALN.a-10(d)
Latitud	37°43'34.53"S			37°43'26.27"S			37°43'55.86"S		
Longitud	68°55'17.51"O			68°54'48.03"O			68°54'24.56"O		

Tabla 7.1 – Coordenadas de las locaciones donde se encuentran los pozos.

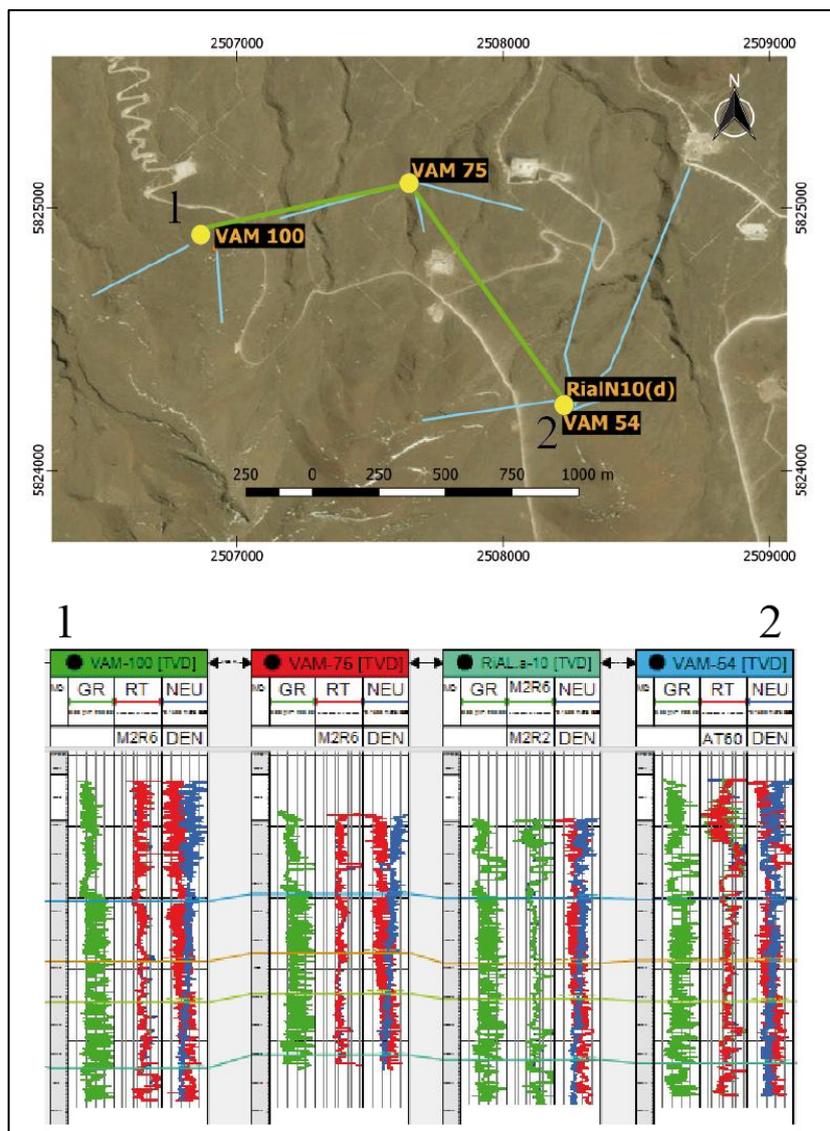


Figura 7.7 – Arriba, mapa del área de trabajo donde se muestra con un círculo amarillo las locaciones donde se encuentran los pozos estudiados, representados con líneas celestes. En verde, se muestra la trayectoria de la sección esquemática de abajo. Abajo sección estructural de cuatro pozos de la zona mostrando las respuestas eléctricas utilizadas. Las líneas de colores representan los topes formacionales.

Con estas respuestas y la ayuda de los informes de control geológico, donde se describe el *cutting*, se efectuó la identificación de los pases formacionales en cada uno de los pozos (tabla 7.2 y figura 7.8). Las unidades presentes en esta área corresponden a las formaciones Rayoso, Centenario Superior, Centenario Inferior, Mulichinco y Quintuco y a su vez, a cuatro de los topes de los miembros que subdividen a la Formación Mulichinco, denominados Amarillo, Rojo Superior, Verde y Azul. En este trabajo no se delimitaron los miembros Rojo Medio e Inferior debido a que los topes eran difusos a causa de la intrusión de un cuerpo ígneo localizado en esta formación entre los miembros Rojo Inferior y Superior y que los perfiles muestran que todo este sector de roca se encuentra altamente saturado en agua, motivo por el cual se desestimó.

Fm-Mbro	Pozo	VAM-73(d)	VAM-100(d)	VAM-53(d)	VAM-70	VAM-75(d)	VAM-62(d)(i)	VAM-55(d)	VAM-54(d)	RiAIN.a-10(d)
Fm. Rayoso		402	398,37	396,06	394,47	394,86	402,9	393,12	396,82	408,23
Fm. Centenario Sup.		-25,51	-20,04	-19,53	-19,53	-16,87	-9,85	-22,37	-15,56	1,57
Fm. Centenario Inf.		-315,99	-305,84	-309,05	-306,47	-301,95	-297,13	-311,96	-299,41	-283,92
Fm. Mulichinco		-748,41	-736,96	-743,12	-736,47	-730,39	-730,55	-747,8	-736,35	-714,26
Mbro. Amarillo		-748,34	-736,96	-743,15	-736,5	-730,39	-729,19	-747,83	-737,64	-714,26
Mbro. Rojo		-767,36	-756,67	-762,8	-756,2	-754,19	-749,97	-768,44	-759,87	-736,27
Mbro. Azul		-949,79	-931,74	-934,31	-928,23		-905,68	-907,52	-901,97	-899,55
Mbro. Verde		-959,58	-945,49	-949,92	-946,74		-921,82	-924,95	-915,72	-913,66
Fm. Quintuco		-998,88	-980,14		-981,63		-959,45	-962,02	-951,87	-949,96

Tabla 7.2 – Pases formacionales identificados en los pozos del área de estudio, medidos en SSTVD.

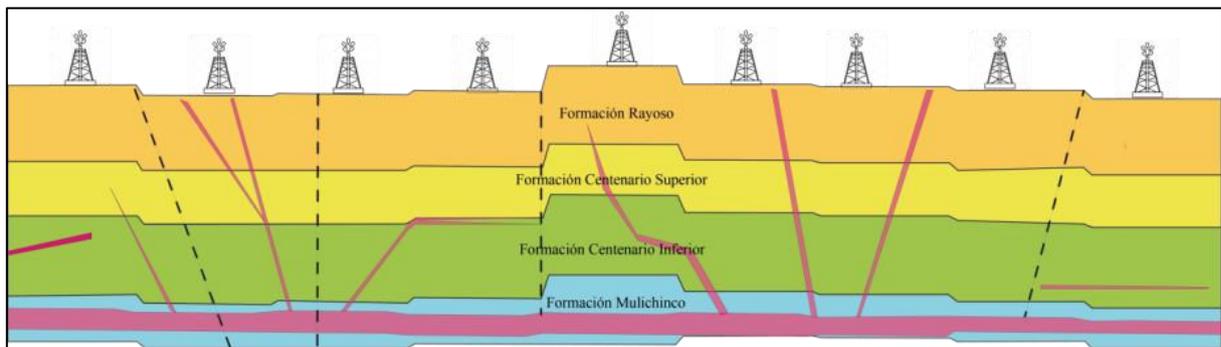


Figura 7.8 – Correlación esquemática realizada a partir de la interpretación de topes formacionales en los pozos del área. En violeta se muestra el lacolito dentro de la Formación Mulichinco y otros cuerpos intrusivos y fallas representativas.

Posteriormente, en base al mismo método utilizado para diferenciar los distintos horizontes, se procedió al reconocimiento de cuerpos ígneos. Se creó un nuevo *track* en cada pozo y se marcaron las profundidades donde se encontraron litologías ígneas (Figura 7.9). Para esto, los perfiles de pozo junto con la descripción de *cutting* son esenciales. Los contactos generalmente están relacionados con cambios bruscos en los registros que permiten determinar el grosor atravesado y, a su vez, las variaciones de los perfiles dentro de estos cuerpos suelen permitir observar diferenciaciones composicionales. En cuanto al perfil resistivo, al encontrarse con un cuerpo intrusivo tiene un pico elevado de resistividad atípico para las rocas sedimentarias, independientemente de su contenido de fluidos. En el caso de los perfiles de rayos gamma, los cuales detectan las emisiones radiactivas de los elementos potasio, uranio y torio, permiten ver la variación sistemática del potasio que aumenta de rocas máficas a félsicas. El uranio y el torio no son útiles para la identificación, pero ambos aumentan sistemáticamente en la misma proporción a medida que aumenta el contenido de sílice de las rocas. Del mismo modo funciona el perfil de densidad donde esta propiedad en la matriz varía sistemáticamente de las rocas máficas a félsicas (Delpino y Bermúdez 2009). Aunque existe un registro regional de la litología de los intrusivos confeccionado por

medio del *cutting*, se utilizó la tabla 7.3 para corroborar de otra forma estas composiciones, aunque este método puede tener variaciones según los grados de alteración de las rocas.

Tipo de rocas variaciones composicionales	Gabro/ basalto	Andesita/ Diorita	Granodiori- ta/Dacita	Granito/ Riolita	Gabro alcalino/ Basalto Alcalino	Latita/ Traquiande- sita	Sienita/ Traquita	Sienita nefelínica/ Fonolita
Potasio (%)	0,92	1,34	1,8	3,57	1,31	3,32	4,13	4,61
Thorio (ppm)	3,5	6,3	10	18	3,9	13,5	17,6	23,4
Uranio (ppm)	0,34	1,78	2,2	5,2	1,5	4	4,3	9,6
Perfil Gamma Ray	21	42	59	119	34	96	118	175
Rho (g/cm3)	2,925	2,687	2,517	2,374	2,904	2,537	2,482	2,501
SiO <sub>2</sub> (%)	45 - 52% (Rocas básicas)	52 - 63% (Rocas mesosilí- ceas)	63 - 75% (Rocas ácidas)	(Rocas ácidas)	(Rocas básicas)	(Rocas mesosilí- ceas)	(Rocas ácidas)	(Rocas ácidas)

Tabla 7.3 – Respuestas esperables en perfiles de rayos gamma y de densidad para diferentes tipos de litologías de rocas ígneas. Tomado de Delpino y Bermúdez (2009).

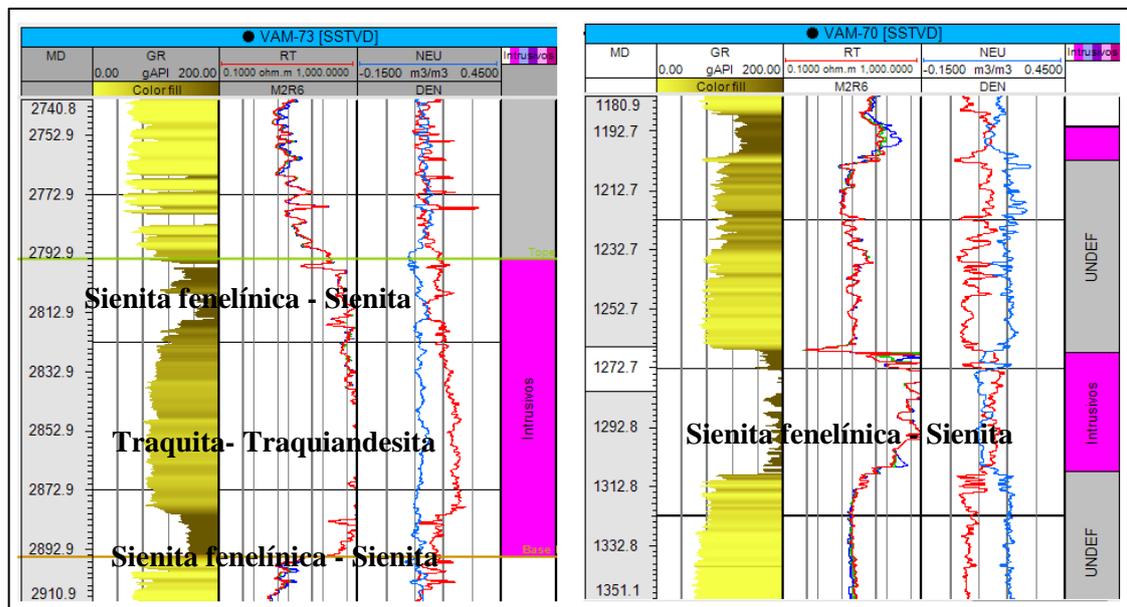


Figura 7.9 – Vista de dos pozos con sus perfiles (de izquierda a derecha) de rayos gamma, resistivos y de neutrón – densidad donde se ven las variaciones que permitieron identificar los cuerpos ígneos.

Además de la información previamente descrita, dos pozos de la zona de interés, VAM-100(d) y RiAIN.a-10(d), cuentan con perfiles de imágenes, logrando así, una mejor delimitación de los cuerpos ígneos. Estos registros también fueron de interés para conocer la geometría y estructura de las capas sedimentarias y de los cuerpos intrusivos debido a la ausencia de datos sísmicos. El registro fue realizado por la compañía Baker Hughes. En ambos pozos, la herramienta utilizada corresponde al GeoXplorer™. Consta de seis patines con 10 botones receptores cada uno, siendo la cobertura de esta imagen de un 79% para un pozo de 8 pulgadas. Estas imágenes se generan en base a la resistividad de la roca, las imágenes tienen una escala de colores que van desde blanco / amarillo a marrón / negro (figura 7.10). Cuanto más claro es el color, más resistivo es el material que se está midiendo (Nicolini 2017). Se debe destacar que la imagen representa el interior del pozo desplegado, por lo cual, si un plano (estratigráfico o ígneo) lo atravesase; este se vería como una línea sinusoidal. Dicha curva, será más alargada cuanto más alto sea el ángulo de intercepción. El tipo de curva, por lo tanto, permite conocer buzamiento y

dirección de buzamiento de los cuerpos, fallas y fracturas. Además, al medir muy cerca de la pared del pozo se obtiene mayor detalle (Brown *et al.* 2015). La utilización de estos perfiles permitió una determinación más certera de los cuerpos ígneos y principalmente aportaron información sobre la textura, tipo de cuerpo (dique, filón o *sill*) y orientación (figura 7.10). Esta información fue utilizada y cargada al software como un nuevo perfil.

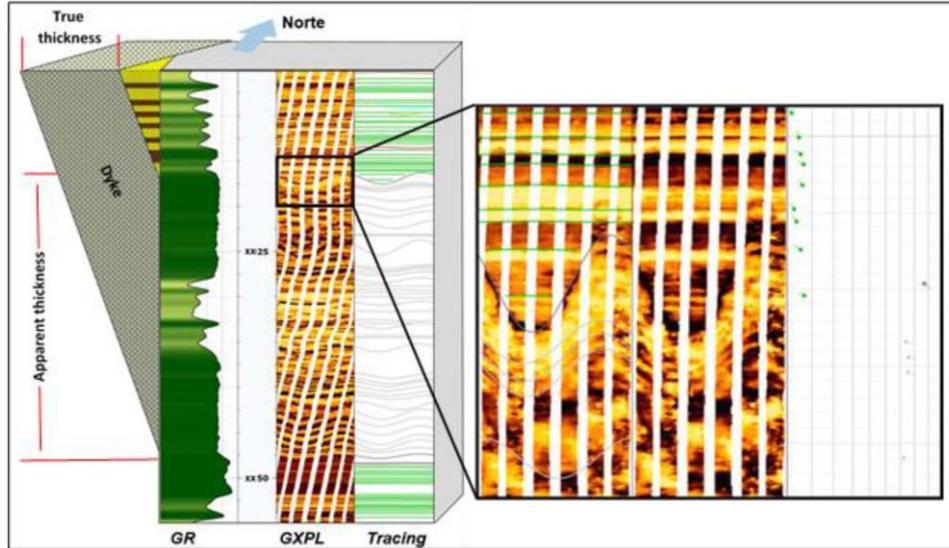


Figura 7.10 – Imagen esquemática que muestra como se observa un cuerpo intrusivo en un perfil de imagen. Se puede observar que la amplitud de la sinusoide se debe al ángulo con el cual este atraviesa el pozo. Tomado de Malimachi *et al.* (2017).

Seguidamente, se cargaron los perfiles de petrofísica. Estos corresponden a la arcillosidad (Vsh), la porosidad efectiva ( $\Phi_{ef}$ ) y la saturación de agua ( $S_w$ ) a lo largo de todos los pozos. A fin de tener más certeza sobre los datos, se realizó un control de calidad tomando 10 puntos aleatorios del perfil de rayos gamma en diferentes pozos y a diferentes profundidades, para luego, realizar los cálculos de forma manual. Los parámetros fueron brindados por el área de petrofísica de la empresa y son: resistividad del agua ( $R_w$ ) por zona entre 0.11-0.18 a 77°F, el gradiente geotérmico es de 0,048°F/m y la permeabilidad (k) de  $3.61E+8 \cdot \Phi_{ie}^{\wedge}(8.551)$ . Los resultados se muestran en la tabla 7.4.

Pozo	Profundidad (m)	GR medido	DT	Vsh medida (%)	Vsh calculada (%)	Vsh Error relativo (%)	$\Phi_{ef}$ Medida (%)	$\Phi_{ef}$ Calculada (%)	$\Phi_{ef}$ Error relativo (%)
VAM 73	1550	155,43	91,66	66	75,36	9,36	1	10,8	9,8
VAM 100	2153	92,73	79,4	16,23	23,11	6,88	19	13,1	32,1
53	1634	72,67	87,62	0	6,39	6,39		22,9	22,9
VAM 70	1545	88,71	80,23	10,54	19,76	9,22	24	14,5	9,5
VAM 75	2672	74,91	69,05	3,6	8,26	4,66	14	8,7	5,3
VAM 55	1484	66,83	82,12	13,7	1,53	12,18	20	19,9	0,1
VAM 55	1764	92,91	92,67	0	23,26	23,26	23	23,0	0,0
VAM 54	1329	182,1	85	80	97,58	17,58	10	0,9	9,1
RiAlN.a-10	3054	116	82	19,38	42,50	23,12	5	10,8	5,8
RiAlN.a-10	2621	160,66	90	55,1	79,72	24,62	16	8,6	7,4
<b>Promedios</b>						<b>13,73</b>	<b>14,67</b>		<b>10,2</b>

Tabla 7.4 – Se muestran 10 puntos ubicados en diferentes pozos y a diferentes profundidades. Junto a cada profundidad se muestran los valores de respuesta de rayos gamma (GR) y perfil sísmico (DT) para esa profundidad. Con estos valores se calculó la arcillosidad (Vsh) y la porosidad efectiva ( $\Phi_{ef}$ ) a la

vez que se los comparó con la respuesta de los perfiles de petrofísica realizados por el software a fin de realizar un control de calidad. Por último, se muestra el error relativo entre el cálculo del sistema y el cálculo realizado manualmente.

### 7.3. Mapas estructurales

En primera instancia se confeccionó un mapa estructural para cada tope de los miembros de la Formación Mulichinco, una actividad que se vio dificultada por la escasa información estructural derivada de la falta de información sísmica 2D y 3D.

Debido a la complejidad topográfica, la capa basáltica y las limitaciones de trabajar sobre un área de reserva natural, la sísmica sólo abarca la zona norte del centro del volcán y la calidad disminuye a medida que se acerca al mismo. En el centro del volcán Auca Mahuida no se cuenta con datos sísmicos, por lo que la interpretación estructural se limitó a las zonas con buenos registros. En base a esto, YPF posee una interpretación realizada con la sísmica circundante en donde las fallas interpretadas en estos relevamientos, fueron interpoladas sobre la superficie sin datos (Figura 7.11) (Roth 2017). Además, mediante el uso de un perfil sísmico vertical (*Vertical Seismic Profile* o VSP) en otros pozos se pudieron validar algunas de estas fallas. Gracias a estas interpretaciones se eligió un tamaño para los mapas que abarque las fallas más cercanas al área para evaluar su relación con las desvinculaciones de fluidos observadas en los pozos del área.

En perfil también se cuenta con interpretaciones de publicaciones como la de Longo (2017) que muestra una sísmica al norte del área, sobre el pozo VAM.x-1, en la cual se pueden observar fallas de alto ángulo y desplazamiento inverso que afectan toda la columna sedimentaria (Figura 7.12).

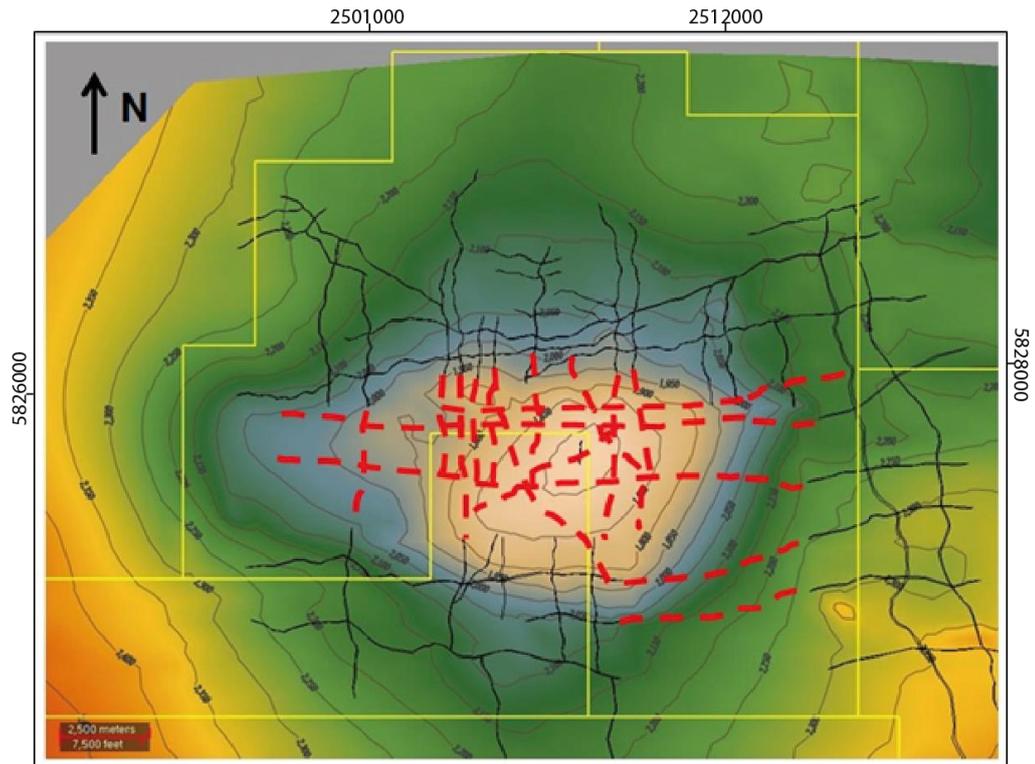


Figura 7.11 – Interpretación de fallas propuesta para el tope de la Formación Mulichinco. Tomado de Roth (2017).

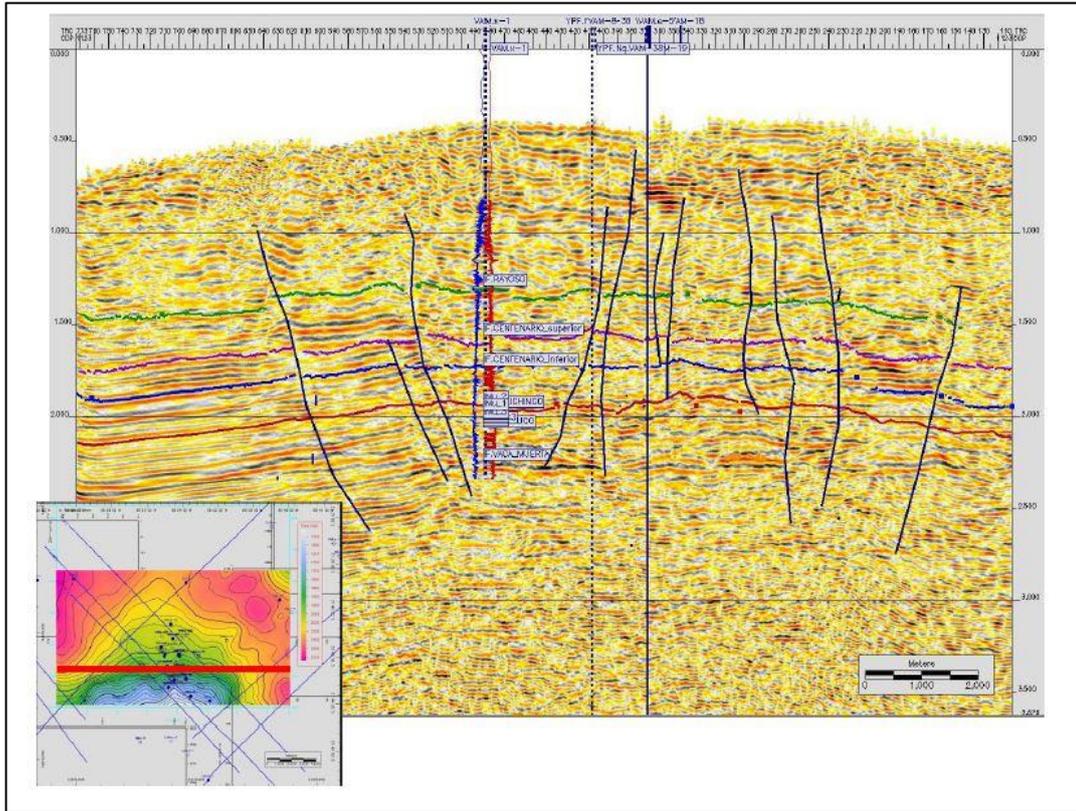


Figura 7.12 – Línea sísmica sobre el pozo VAM.x-1 marcada en la imagen inferior izquierda. Se pueden observar que las fallas que cortan la estratificación poseen alto ángulo y parecen ser predominantemente inversas.

A fin de aumentar el volumen de datos sobre la estructura de esta zona, YPF ordenó el registro de un VSP *Walkaway* en el pozo RialN.a-10(d) durante el año 2017. El objetivo de esta adquisición fue obtener una imagen sísmica sobre el plano de trayectoria del pozo para conocer posibles desvinculaciones de bloques.

El VSP *Walkaway* es la técnica mediante la cual se registra el tiempo que tarda una onda acústica en viajar al interior del subsuelo, desde una fuente de energía en superficie hasta los receptores que se encuentran dentro del pozo (Figura 7.13A). En estudios terrestres la fuente es usualmente un camión. Los VSP's varían de acuerdo a la configuración del pozo, el número y localización de las fuentes y geófonos (Lorenzo Pulido *et al.* 2013). En este caso se llevó a cabo con 20 geófonos en cuatro direcciones distintas (Figura 7.13B).

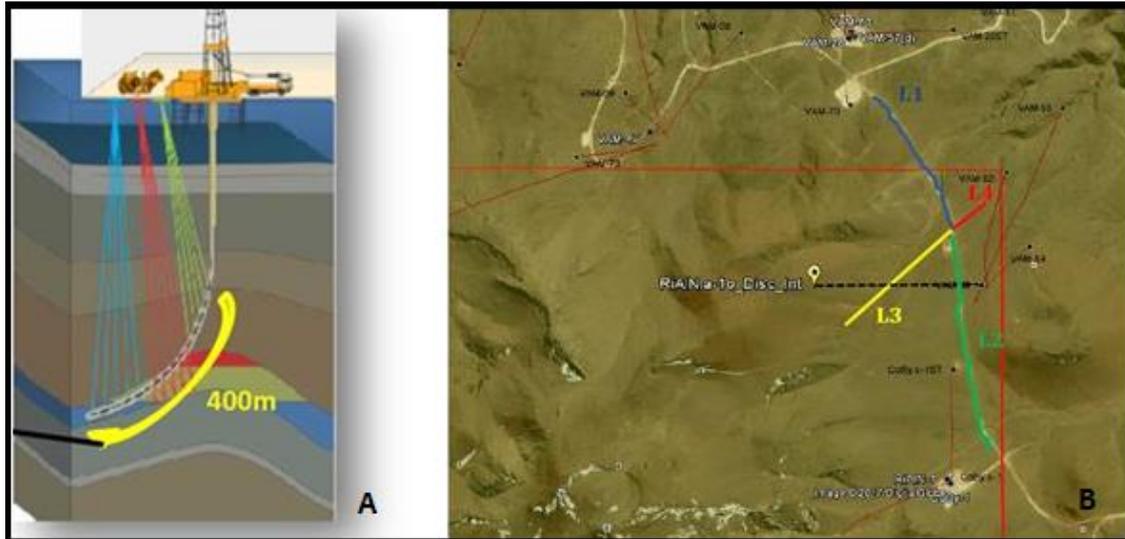


Figura 7.13 – A. Esquema que muestra la adquisición de la imagen sísmica por medio del método de VSP. B. Trayectorias L1, L2, L3 y L4 utilizadas en el pozo RialN.a-10(d).

Producto del procedimiento descrito, se obtuvieron dos imágenes en dos planos diferentes, uno con orientación NNO-SSE (de L1 a L2) y otro NE-SO (de L3 a L4), tal como se ve en la figura 7.13B. En este VSP *Walkaway* se observan dos fallas inversas con orientación N-S que inclinan hacia el oeste. No se puede confirmar mediante este método si existe componente de desplazamiento lateral. La primera falla está ubicada dentro de la Formación Centenario Inferior y la segunda en la Formación Mulichinco. Además, dentro de esta última formación y más abajo del alcance de las perforaciones, probablemente en la Formación Vaca Muerta, se puede observar la presencia de cuerpos intrusivos que tienen un alto contraste por sobre las demás capas (Figura 7.14).

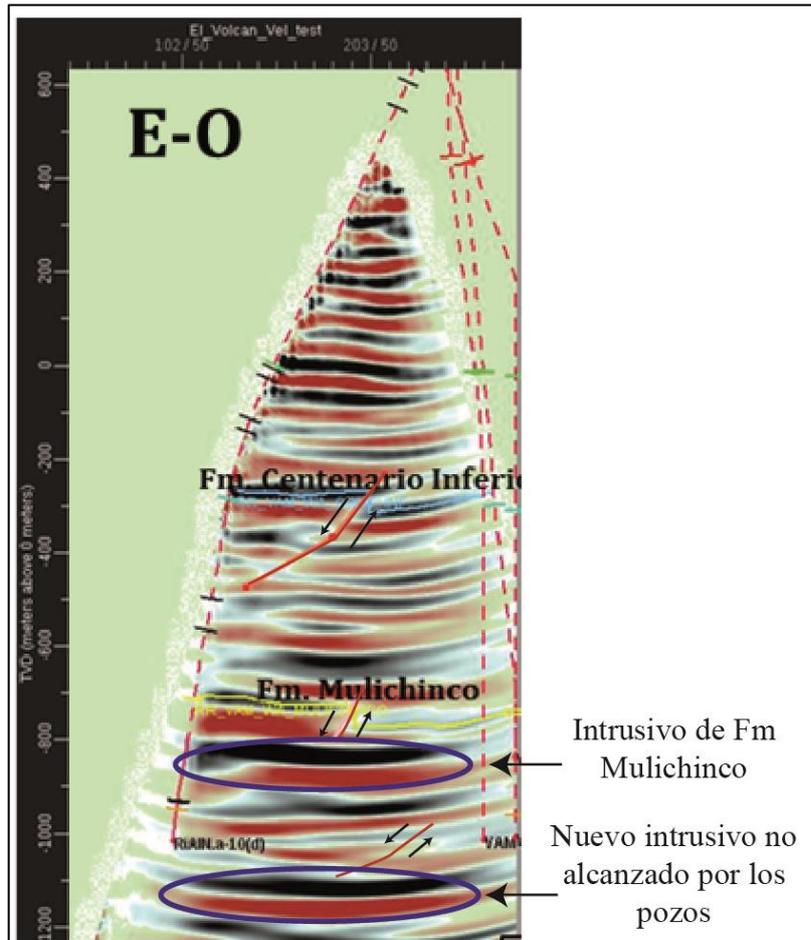
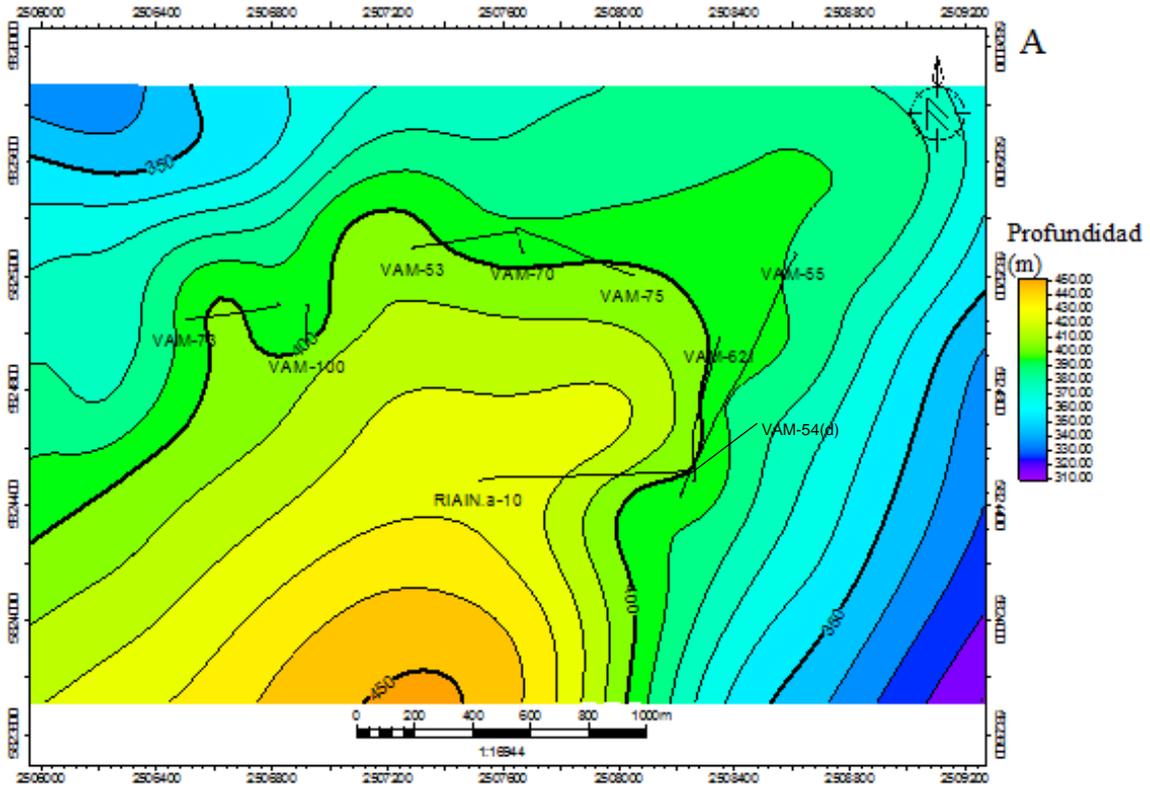


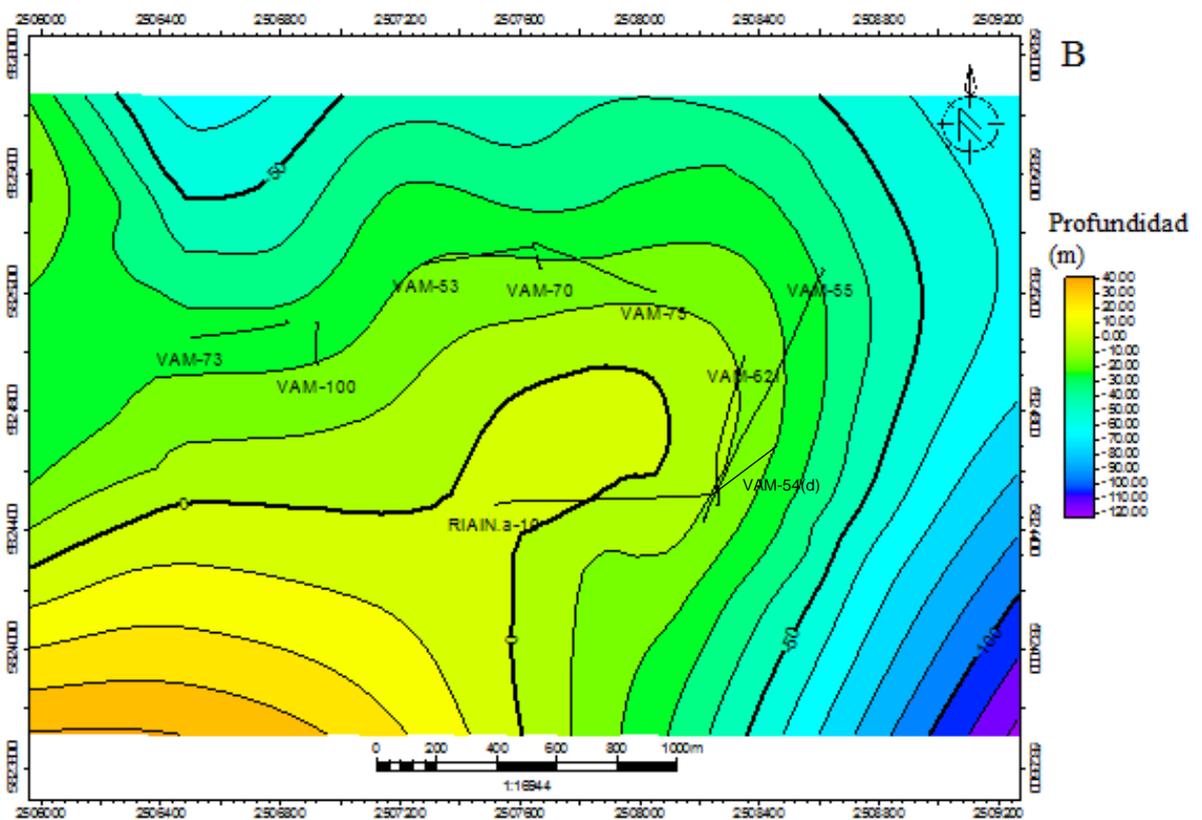
Figura 7.14 - VSP Walkaway visto en dirección E-O donde se observan las fallas descritas en el texto y dos cuerpos intrusivos de gran potencia. Tomado y modificado de Roth (2017).

Mediante el uso de Petrel, se generaron mapas estructurales para los topes de las formaciones atravesadas (Figura 7.15) y en los topes de los miembros de la Formación Mulichinco (Figura 7.16). En estos últimos, se trabajó junto con los análisis de terminación de pozos (ensayos) para realizar mapas de fluidos.

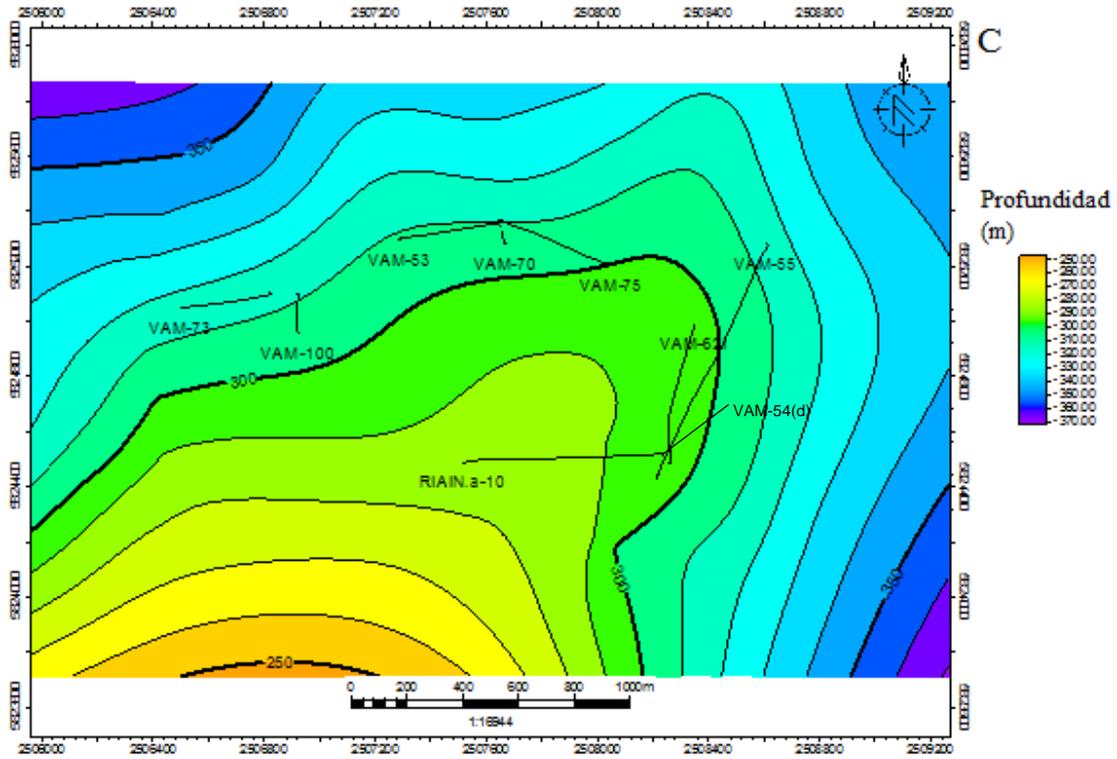
### Formación Rayoso



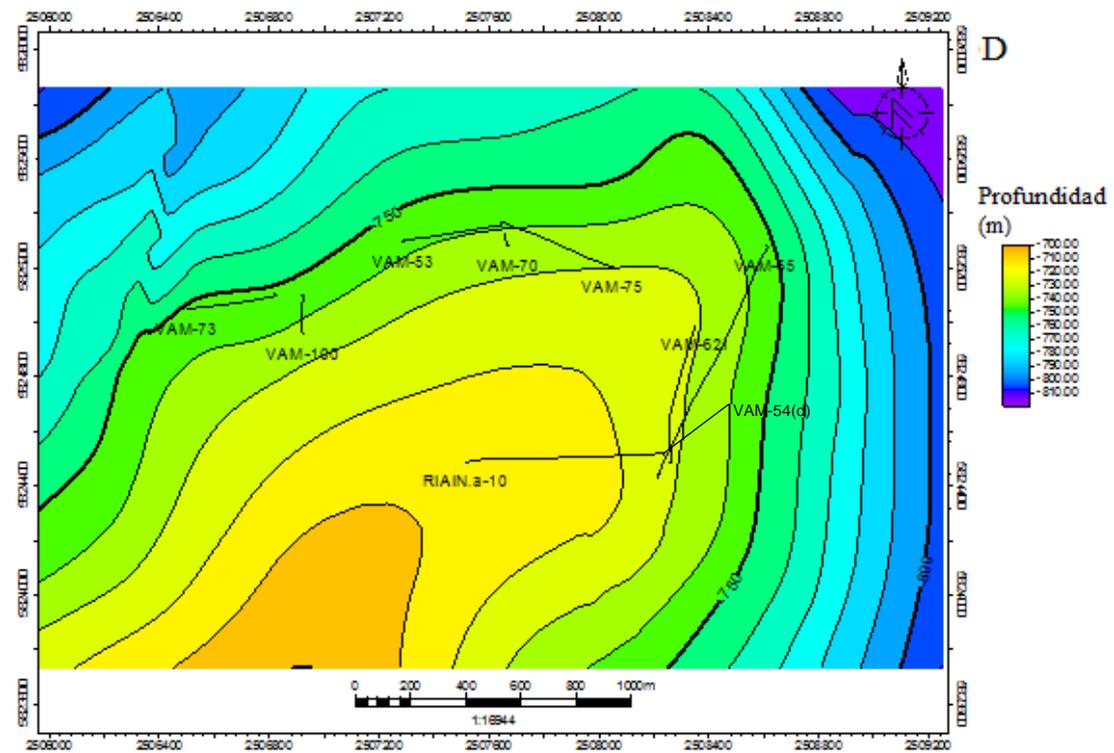
### Formación Centenario Superior



### Formación Centenario Inferior



### Formación Mulichinco



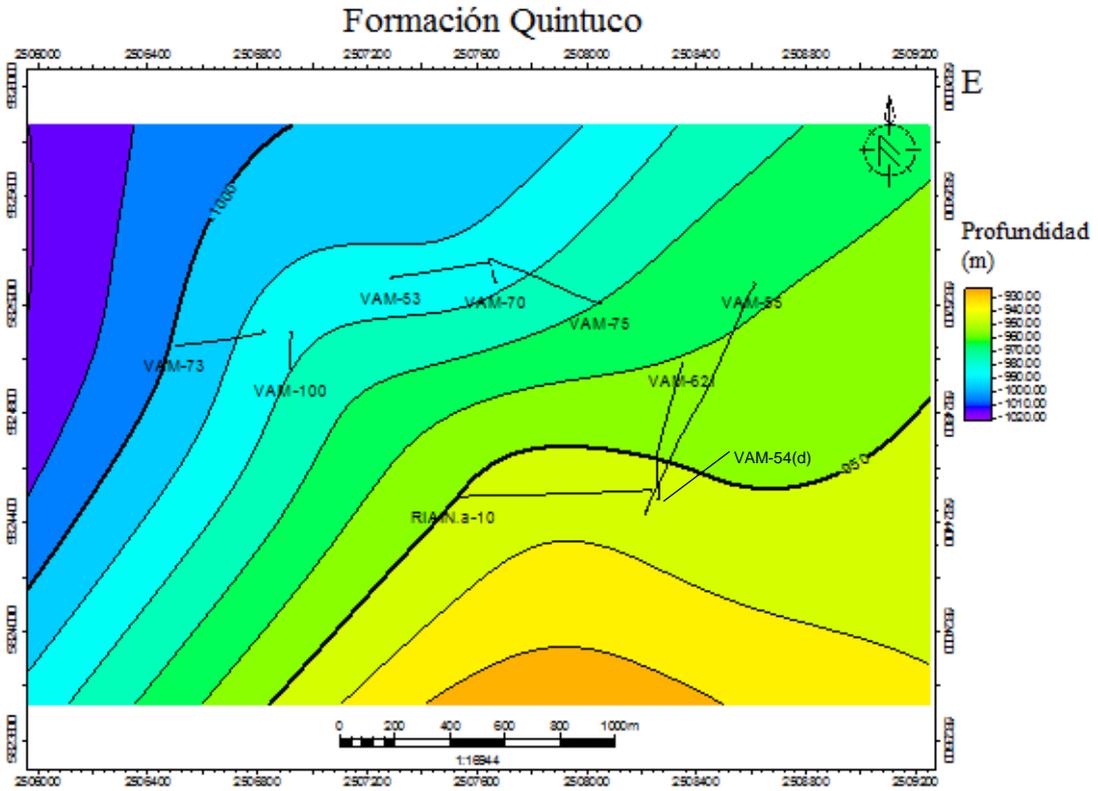
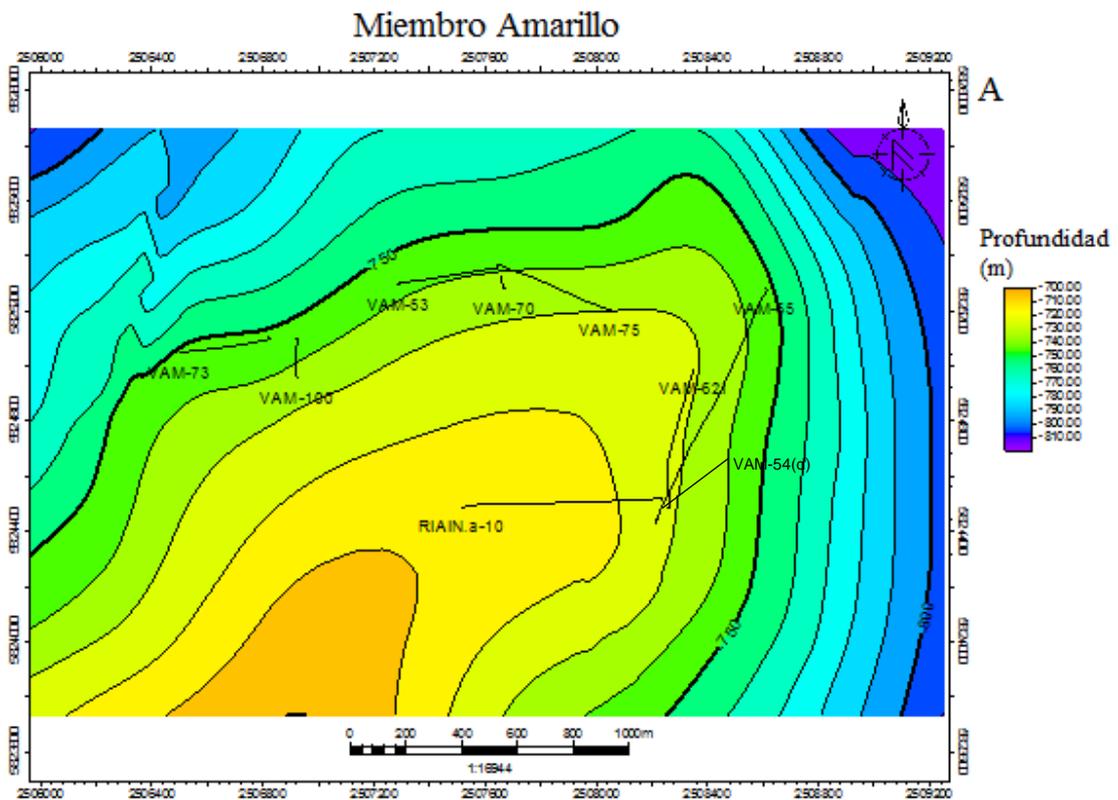
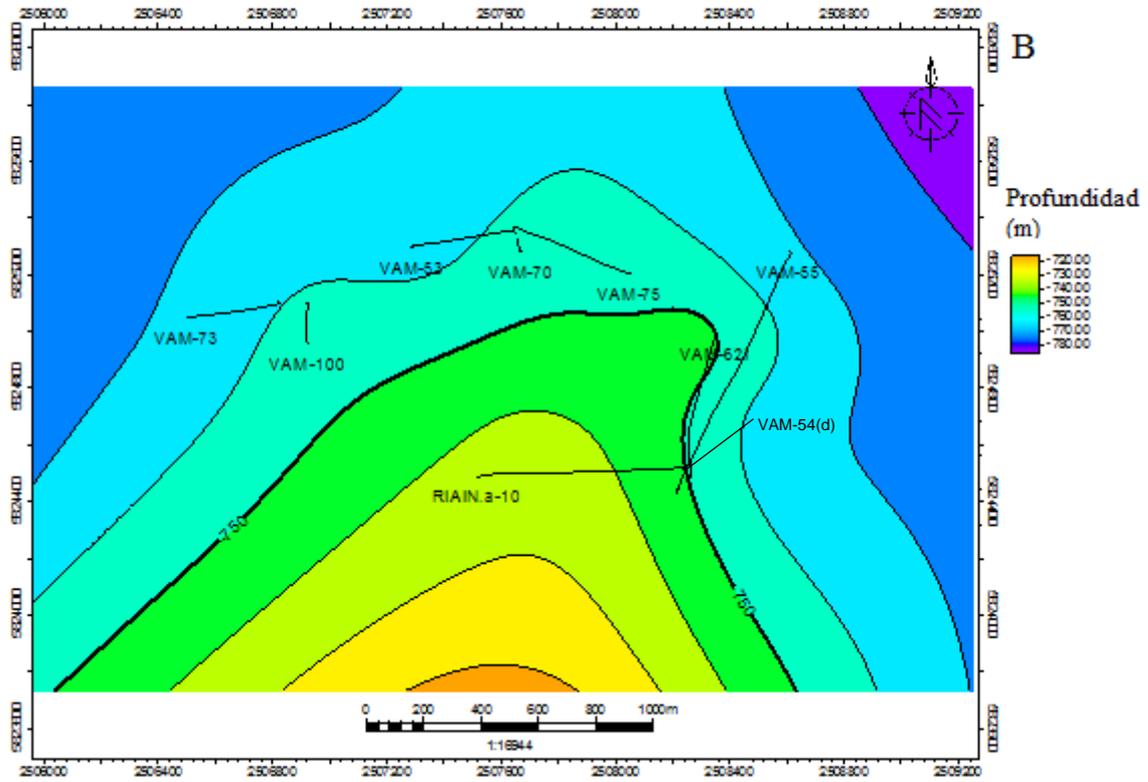


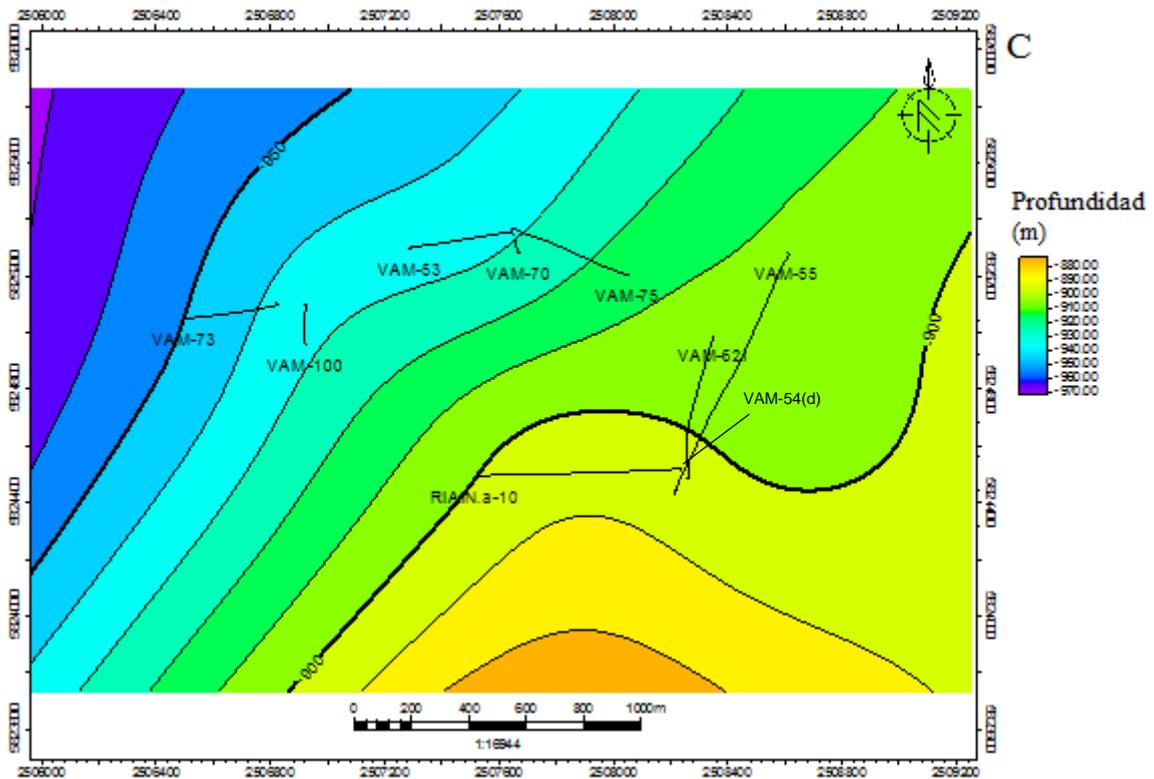
Figura 7.15 – Mapas estructurales de las formaciones atravesadas. A – Formación Rayoso. B – Formación Centenario Superior. C – Formación Centenario Inferior. D – Formación Mulichinco. E – Formación Quintuco.



### Miembro Rojo Superior



### Miembro Azul



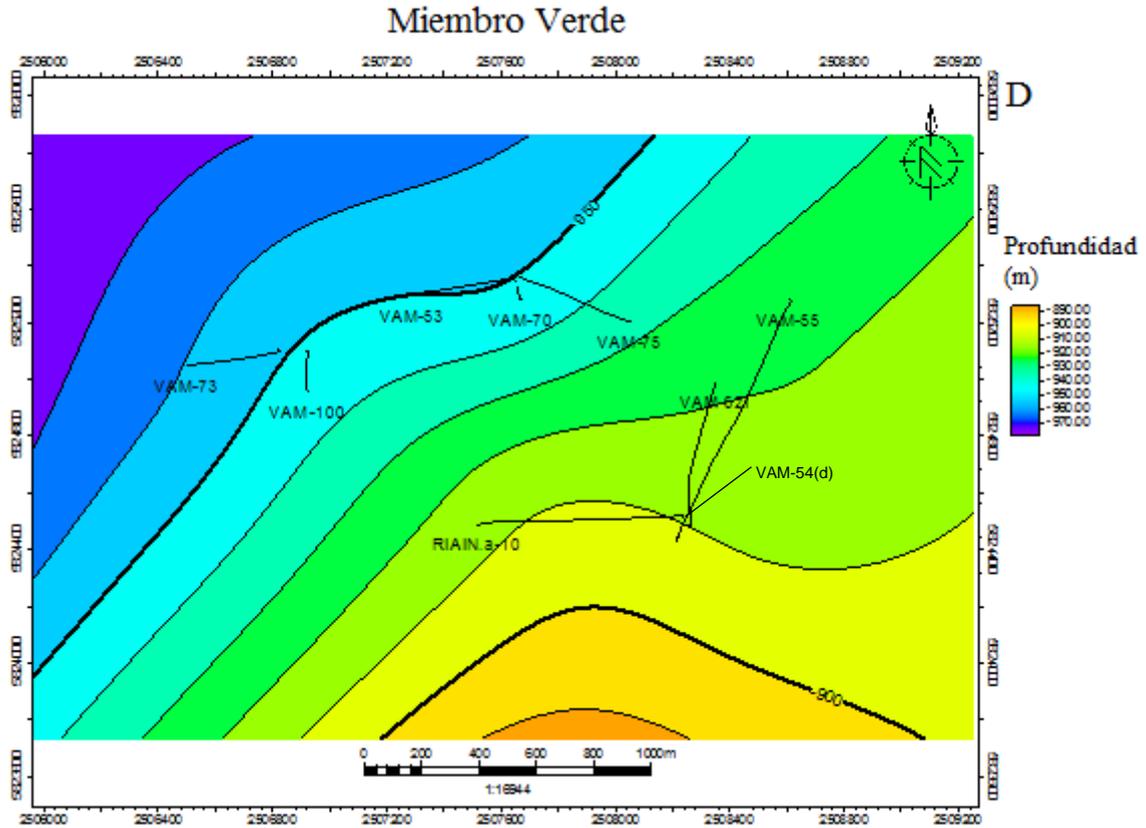
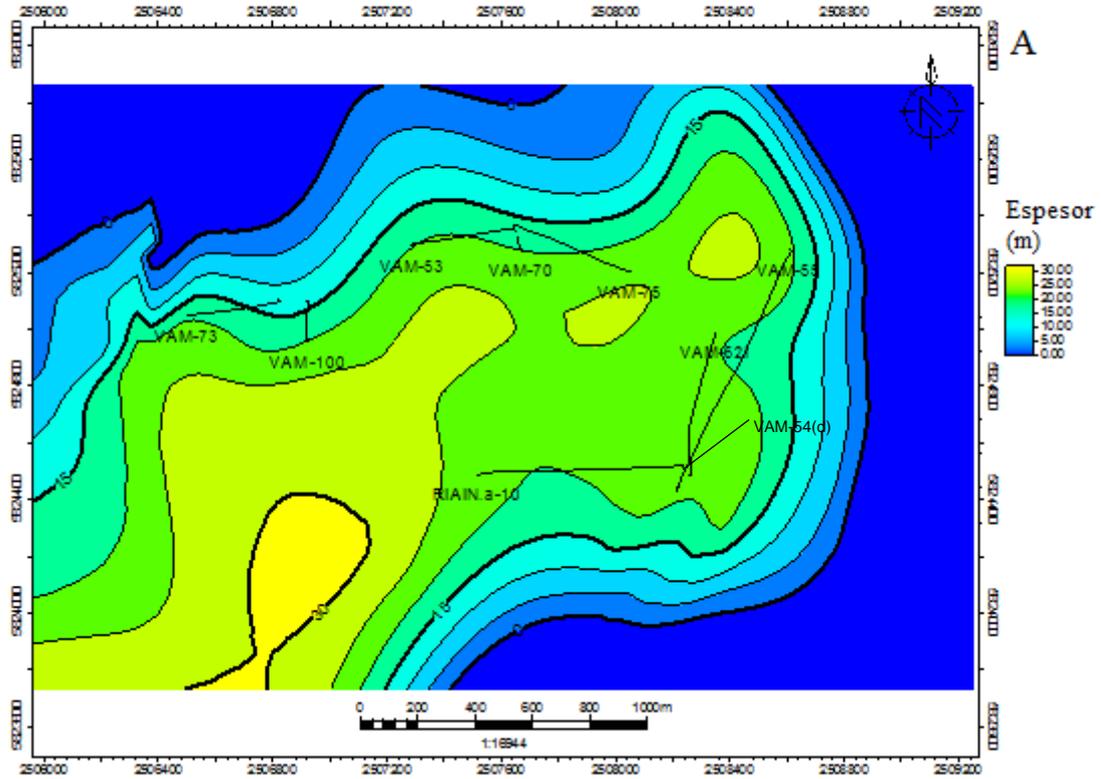


Figura 7.16 - Mapas estructurales de los miembros de la Formación Mulichinco utilizados en este trabajo. A – Miembro Amarillo (ídem al tope de la Formación Mulichinco). B – Miembro rojo superior. C – Miembro Azul. D – Miembro Verde.

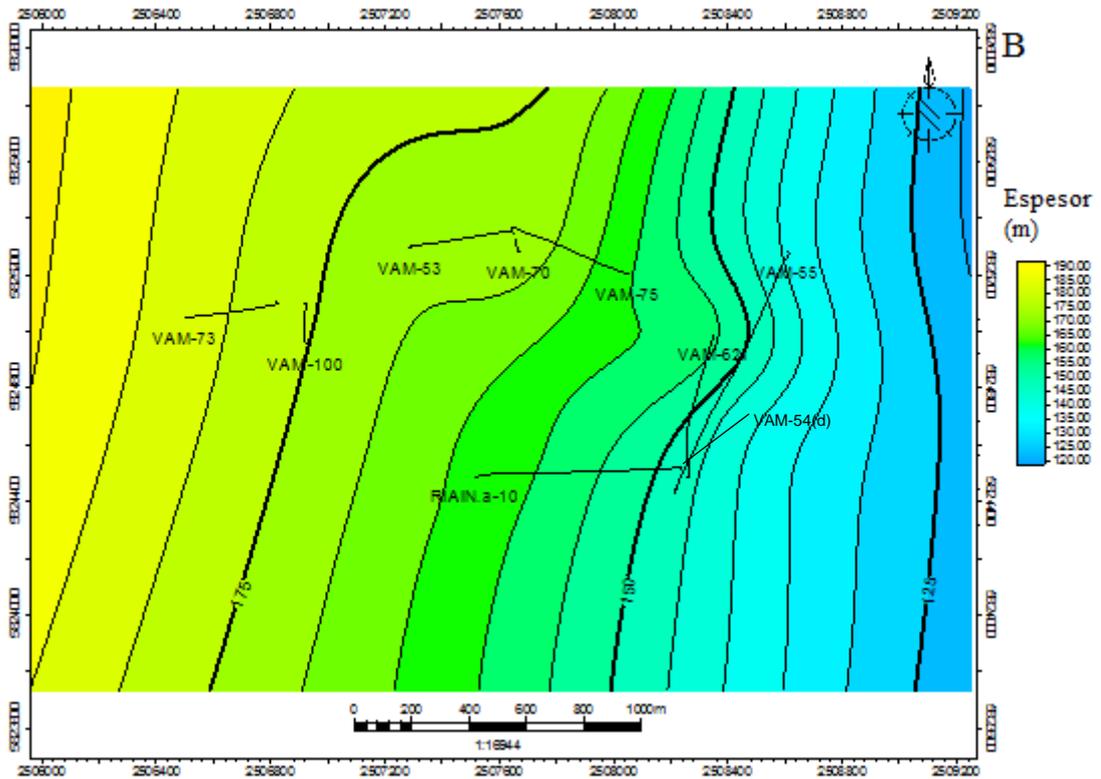
#### 7.4. Mapas isopáquicos

Usando los mapas estructurales como referencia, se realizaron mapas de espesor o isopáquicos. Se realizaron, además, de forma manual y se constató la veracidad de la información que dichos brindaban. Como el objetivo de este trabajo es centrar el análisis en la Formación Mulichinco, sólo se trabajó con sus miembros (Figura 7.17).

### Miembro Amarillo



### Miembro Rojo Superior



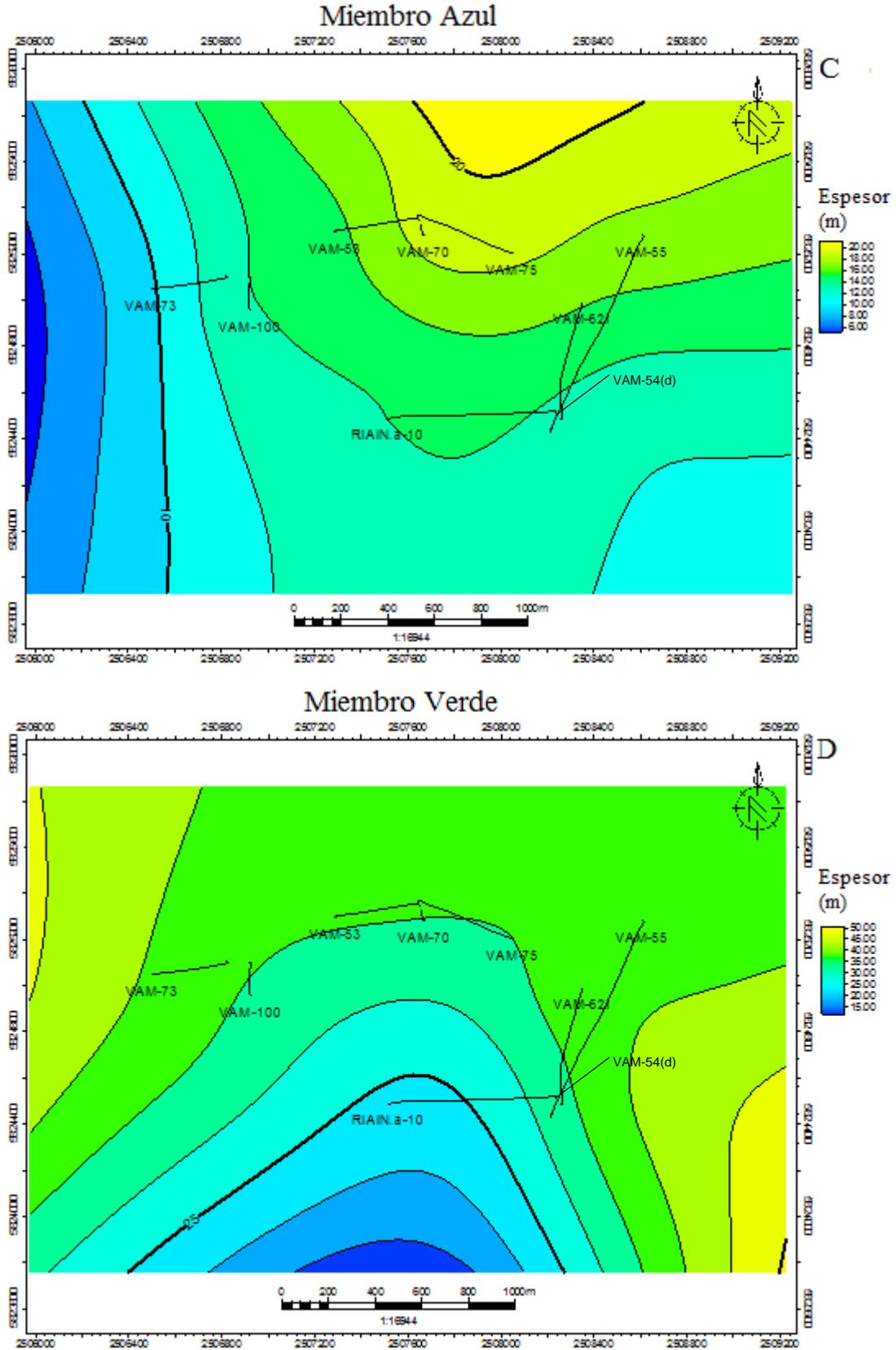


Figura 7.17 – Mapas isopáquicos en la Formación Mulichinco correspondientes a los miembros A) Amarillo, B) Rojo Superior, C) Verde y D) Azul

### 7.5. Transectas

Con el objetivo de estudiar posibles correlaciones, principalmente, entre los cuerpos ígneos que afectan la zona, se generaron transectas en Petrel®, las cuales se proyectaron en diferentes direcciones uniendo dos o más pozos (Figura 7.18), en estas se activó el perfil de rayos gamma para tener una ligera diferenciación entre arcillas y arenas y el perfil previamente generado para los cuerpos ígneos. Las transectas obtenidas fueron editadas mediante el uso de Adobe *Illustrator*™ CS5, donde se correlacionaron los cuerpos ígneos (Figura 7.19, 7.20 y 7.21). Como sólo se contó con información de inclinaciones en dos de los nueve pozos estudiados, se complementó la información faltante con antecedentes bibliográficos, la falla del VSP *Walkaway* y siguiendo los ángulos de inclinación predominantes de los cuerpos con presencia de datos de otros pozos.

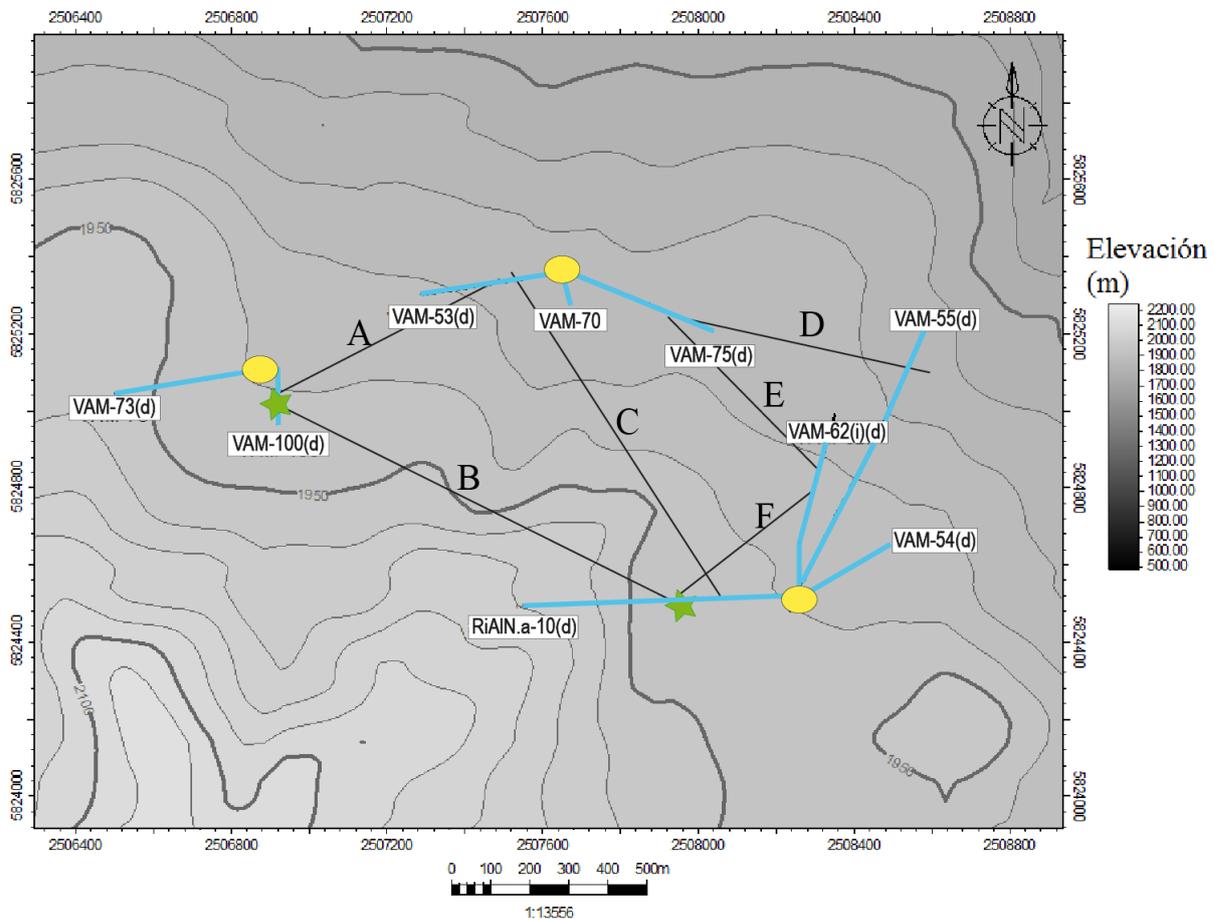


Figura 7.18 – Mapa del área de estudio donde se observan las bocas de pozo (elipses amarillos) con las desviaciones para cada uno en el subsuelo (líneas celestes) y las seis transectas principales utilizadas para la correlación (líneas negras). A – Transecta entre pozos VAM-100(d) y VAM-53(d). B – Transecta entre pozos VAM-73(d), VAM-100(d) y RiAIN.a-10(d). C – Transecta entre pozos RiAIN.a-10(d) y VAM-53(d). D – Transecta entre pozos VAM-75(d) y VAM-55(d). E – Transecta entre pozos VAM-75(d) y VAM-62(d) (i). F – Transecta entre pozos RiAIN.a-10(d) y VAM-62(d) (i). Con estrellas se muestran los pozos que contienen datos de inclinación en base a los perfiles de imágenes.

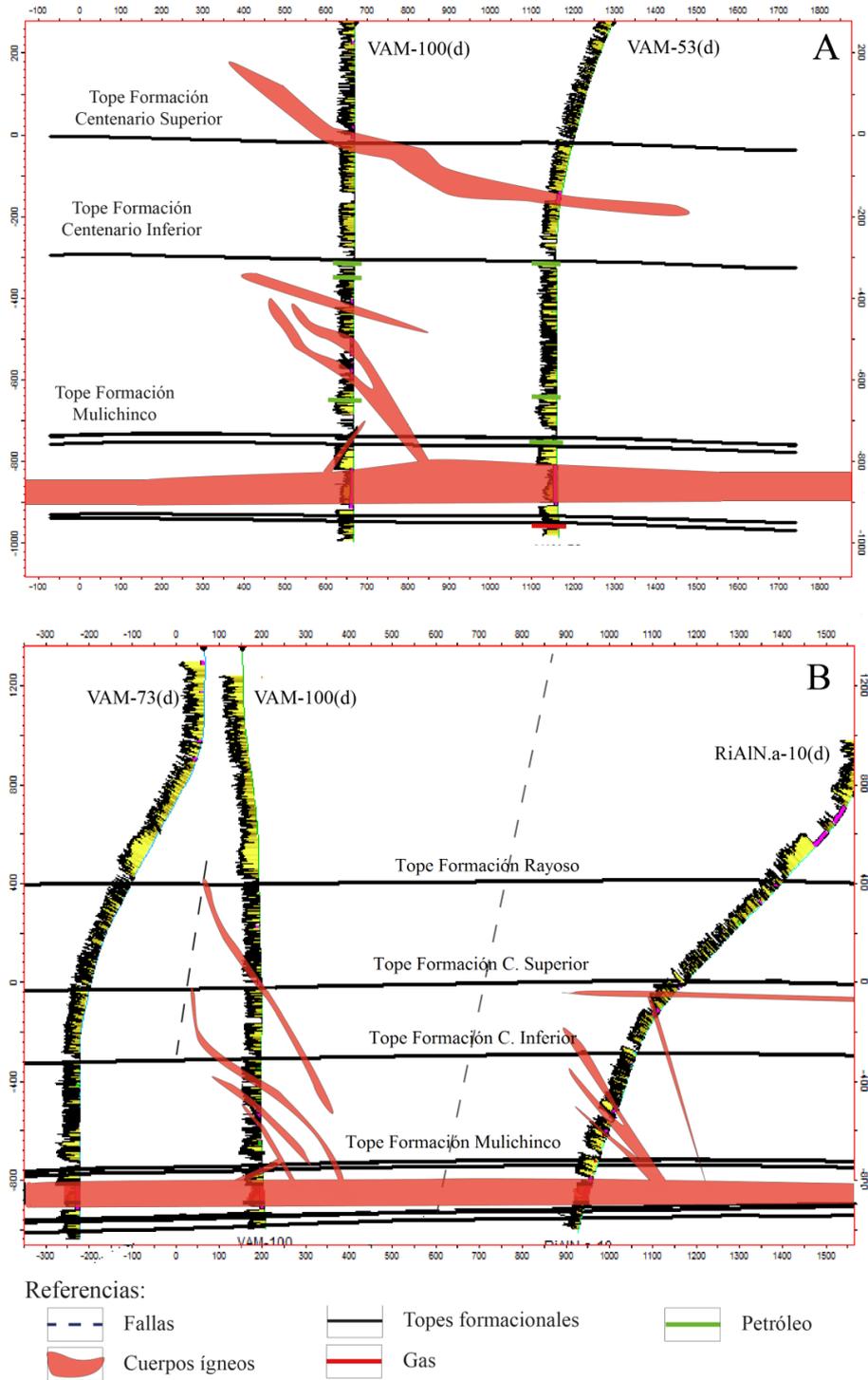


Figura 7.19 – A) Correlación entre los pozos VAM-100(d) y VAM-53(d) con interpretación las posibles disposiciones de los cuerpos ígneos en subsuelo. VAM-100(d) cuenta con datos de inclinación de cuerpos intrusivos. B) Pozos VAM-73(d), VAM-100(d) y RiAIN.a-10(d) con interpretación de las posibles disposiciones de los cuerpos ígneos en subsuelo. En línea discontinua se infieren fallas de alto ángulo (como se muestran en la sísmica de la figura 7.12 y en el VSP *Walkaway* de la figura 7.14) que desvincula estos pozos debido a la imposibilidad de correlacionarlos por el ángulo de sus cuerpos intrusivos. Además, entre los pozos VAM-100(d) y RiAIN.a-10(d) existe desvinculación hidráulica. VAM-100(d) y RiAIN.a-10(d) poseen datos de inclinación de cuerpos ígneos.

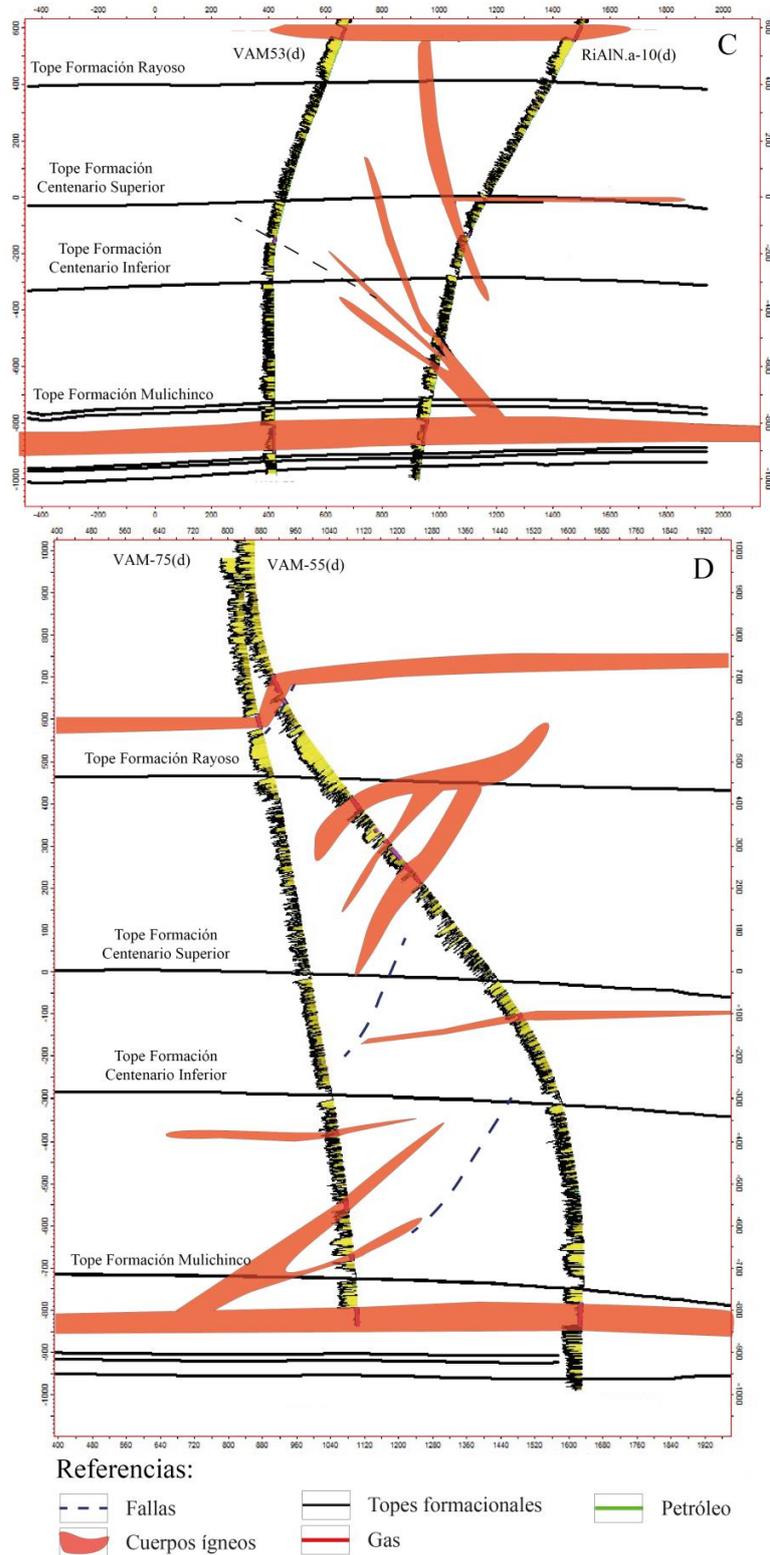


Figura 7.20 – C) Pozos VAM-53(d) y RiAIN.a-10(d) sobre los cuales se dibujaron las posibles disposiciones de los cuerpos ígneos en subsuelo. D) Pozos VAM-75 y VAM-55(d) sobre los cuales se dibujaron las posibles disposiciones de los cuerpos ígneos en subsuelo. En línea discontinua se infieren fallas de alto ángulo (como se muestran en la sísmica de la figura 7.12 y en el VSP *Walkaway* de la figura 7.14) que desvincula estos pozos, ya que, entre estos existe desvinculación hidráulica.

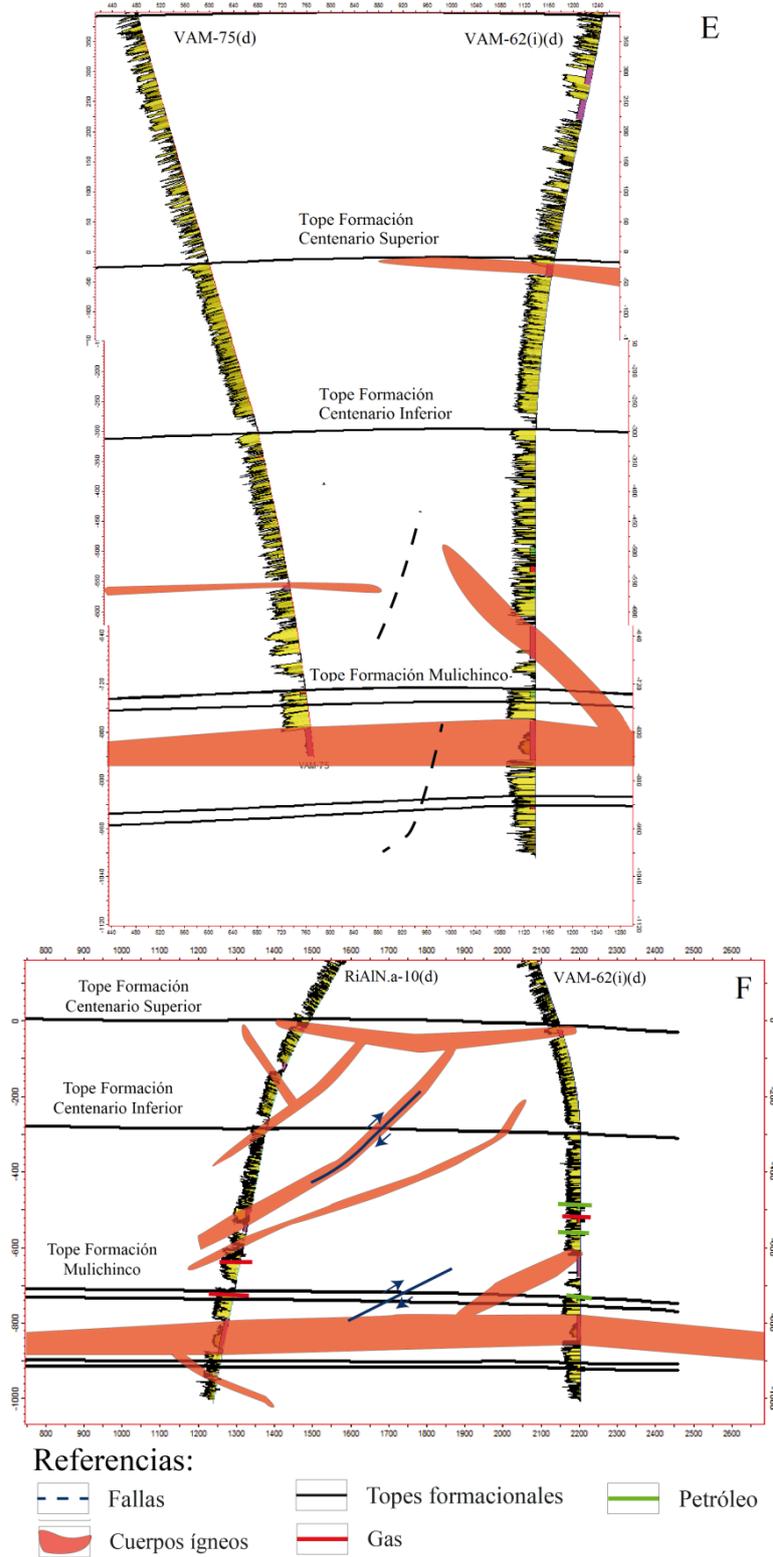


Figura 7.21 – E) Pozos VAM-75 y VAM-62(d) (i) sobre los cuales se dibujaron las posibles disposiciones de los cuerpos ígneos en subsuelo. F) los pozos RiAIN.a-10(d) y VAM-62(d) (i) sobre los cuales se dibujaron las posibles disposiciones de los cuerpos ígneos en subsuelo. En línea azul continua se infieren fallas obtenidas del VSP *Walkaway* corrido sobre el pozo del yacimiento de Risco Alto – Las Manadas. Estos pozos poseen, además, desvinculación hidráulica.

### 7.6. Ensayos y contactos de fluidos

Al finalizar el proceso de perforación de un pozo, comienza la etapa de terminación. Allí, en base a los perfilajes realizados, se estudia la petrofísica y se eligen zonas a punzar donde se estima la existencia de hidrocarburos. Una vez punzada una capa, se ensaya durante un periodo de tiempo estipulado; con el fin de determinar los tipos de fluidos, caudal y presión correspondiente. Este trabajo se denomina “ensayo” y sirvió para conocer la existencia de hidrocarburo o agua en los diferentes miembros de la Formación Mulichinco (Figura 7.22). En cada mapa estructural, se marcaron los fluidos encontrados en cada pozo y se analizaron los contactos entre ellos en el plano horizontal en función de la estructura presente (Figuras 7.23 y 7.24). En capas sin datos de ensayos se interpolaron los contactos definidos en los pozos vecinos. Con este análisis se lograron proponer distintos bloques, los cuales se encontrarían hidráulicamente desconectados.

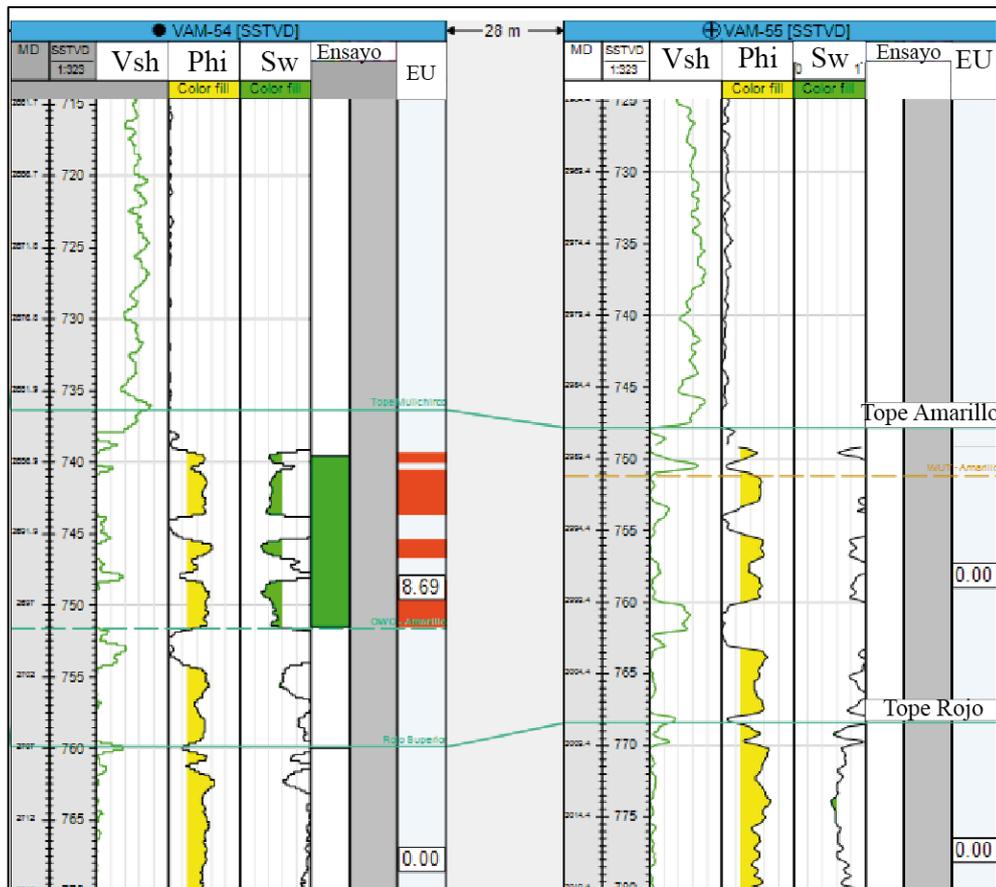
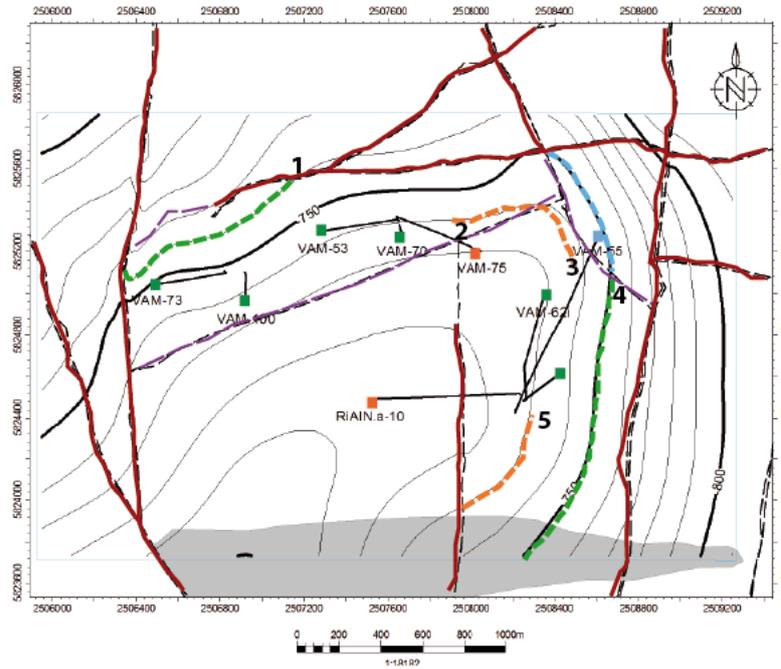
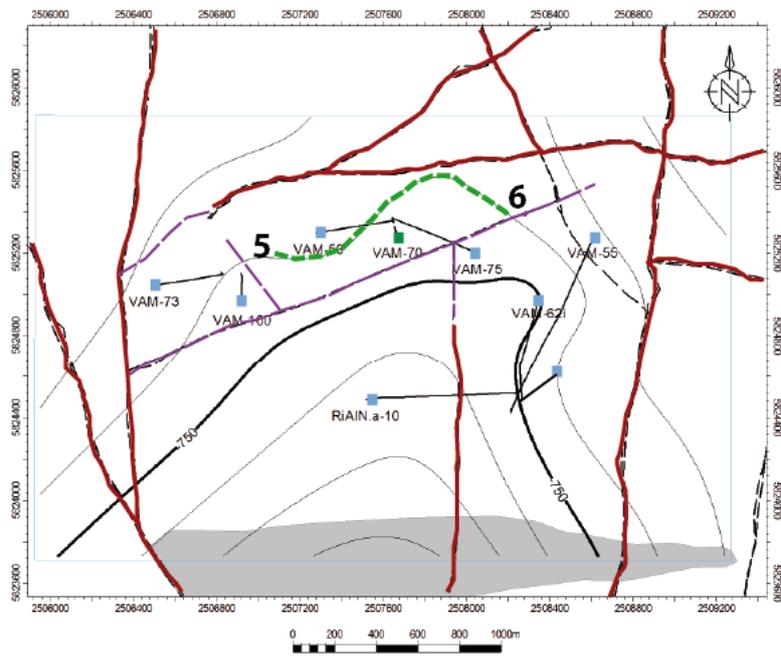


Figura 7.22 – Tramo de los pozos VAM-54(d) y VAM-55(d) mostrando los perfiles petrofísicos de arcillosidad, porosidad efectiva y saturación de agua. La franja verde muestra la zona donde existe un ensayo exitoso de petróleo y en rojo el espesor útil (en metros) calculado en base a la petrofísica. El pozo de la derecha no tiene ensayos, pero por el perfil de Sw se puede observar que se encuentra saturado en agua.

### Miembro Amarillo



### Miembro Rojo Superior

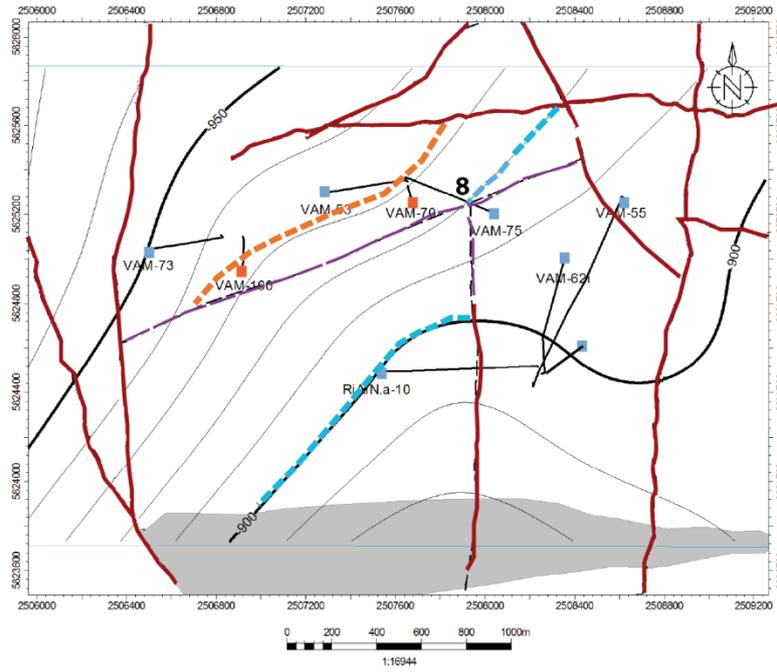


#### Referencias:

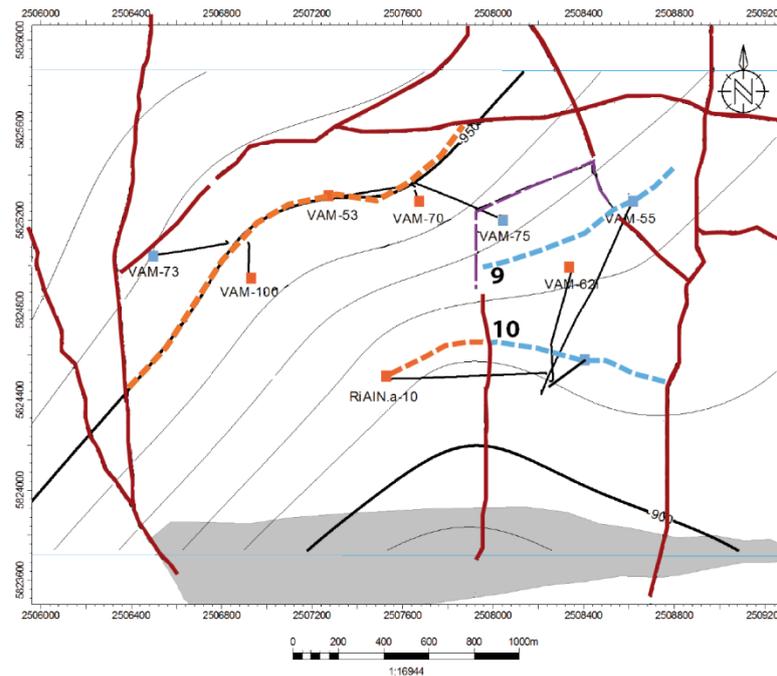
- |                   |                              |                                     |
|-------------------|------------------------------|-------------------------------------|
| Contacto petróleo | pozo agotado                 | Pozo con petróleo                   |
| Contacto gas      | Pozo con gas                 | Pozo con agua                       |
| Contacto de agua  | Desvinculaciones hidráulicas | Fallas inferidas por pozos cercanos |

Figura 7.23 – Mapas estructurales con contacto de fluidos para los miembros Amarillo y Rojo Superior. Las curvas de nivel representan los contornos estructurales. En gris se muestra el cuerpo intrusivo vertical encontrado en el pozo Coby.x-1. Las numeraciones son discutidas en el texto.

### Miembro Azul



### Miembro Verde



#### Referencias:

- |                   |                              |                                     |
|-------------------|------------------------------|-------------------------------------|
| Contacto petróleo | Pozo con petróleo            | Pozo con agua                       |
| Contacto gas      | Pozo con gas                 | Fallas inferidas por pozos cercanos |
| Contacto de agua  | Desvinculaciones hidráulicas |                                     |

Figura 7.24 – Mapas estructurales con contactos de contacto de fluidos los miembros Azul y Verde. Las curvas de nivel representan los contornos estructurales. En gris se muestra el cuerpo intrusivo vertical encontrado en el pozo Coby.x-1. Las numeraciones son discutidas en el texto.

Pozos	Amarillo	Rojo	Azul	Verde
VAM-73(d)	760	Agua	Agua	Agua
VAM-100(d)	760	Agua	933	950
VAM-53(d)	760	Agua	Agua	950
VAM-70	760	765	933	950
VAM-75(d)	750	Agua	Agua	Agua
RiAIN.a-10(d)	731	Agua	Agua	950
VAM-62(i)(d)	750	Agua	Agua	930
VAM-54(d)	750	Agua	Agua	Agua
VAM-55(d)	Agua	Agua	Agua	Agua

Tabla 7.5 – Profundidades a la que se encuentran los contactos de fluidos según cada pozo y cada miembro de la Formación Mulichinco. En verde, cotas de petróleo; en rojo, cotas de gas.

Para vincular fluidos pozo a pozo, se considera que estos deben mantenerse a la misma profundidad en la cota estructural, por lo que su incumplimiento, se asocia a una desconexión hidráulica. En el miembro Amarillo (Figura 7.23, arriba), el contacto de petróleo – agua, comienza a los -760 m, en los pozos VAM-73(d), VAM-100(d), VAM-53(d) y VAM-70. El número 1 muestra la interrupción de la cota por una estructura previamente conocida por pozos vecinos. VAM-75(d), posee la cota de contacto de petróleo – agua 10 m más arriba, por lo que se asume por este hecho que existe una desconexión hidráulica (2). 3 y 4 muestran que el pozo VAM-55(d) se encuentra desconectado debido a que a los -750 m este pozo tiene agua mientras que a ambos lados hay petróleo. Además, se ha confirmado previamente, por correlaciones vecinas que este pozo está hidráulicamente desconectado a lo largo de toda la Formación Mulichinco. El pozo RiAIN.a-10(d) contiene gas, su nivel de fluido más bajo se encuentra a los -731 m. Para esta profundidad, todos los pozos contienen petróleo, por lo que se considera desvinculado del resto (5) mediante la falla encontrada en este pozo por el VSP. En el Miembro Rojo Superior (Figura 7.23, abajo) casi todos los pozos están saturados en agua, excepto VAM-70 que posee el contacto petróleo – agua a los -765 m. (Tabla 7.5) Este fluido se interrumpe al oeste debido a que a la misma profundidad se encuentra agua (6) y al este, por el mismo motivo (7). Como el resto de los pozos contiene agua no se pueden analizar otras desconexiones y se mantienen las de la capa anterior. El Miembro Azul (Figura 7.24, arriba) posee dos de los pozos con gas con el contacto gas – agua a los -933 m. Esta cota de hidrocarburo se interrumpe al noreste debido a que por encima se encuentra agua y por densidades no es posible (8). El resto de los pozos se encuentran saturados en agua, por lo que no se pueden analizar las estructuras y se mantienen las de la capa anterior. En el Miembro Verde (Figura 7.24, abajo) comienza al noroeste con un comportamiento similar a la capa anterior. El pozo VAM-73(d) posee agua, pero por encima, a partir de los 950 m, VAM-100(d), VAM-53(d) y VAM-70 existe el contacto gas – agua. En este nivel el pozo RiAIN.a-10(d) se encuentra con el contacto de gas al mismo nivel por lo que en este plano están conectados. Al este, las cotas comienzan a tener agua mostrándose una desconexión de fluidos relacionada con la falla encontrada en el pozo RiAIN.a-10(d) mediante el VSP (9 y 10).

Para comprobar que, en casi todas las capas, pueden observarse cuatro bloques hidráulicamente independientes este trabajo también se realizó en transectas verticales. El objetivo fue conocer mejor la distribución vertical y el comportamiento de los fluidos pozo a pozo (Figuras 7.25 y 7.26).

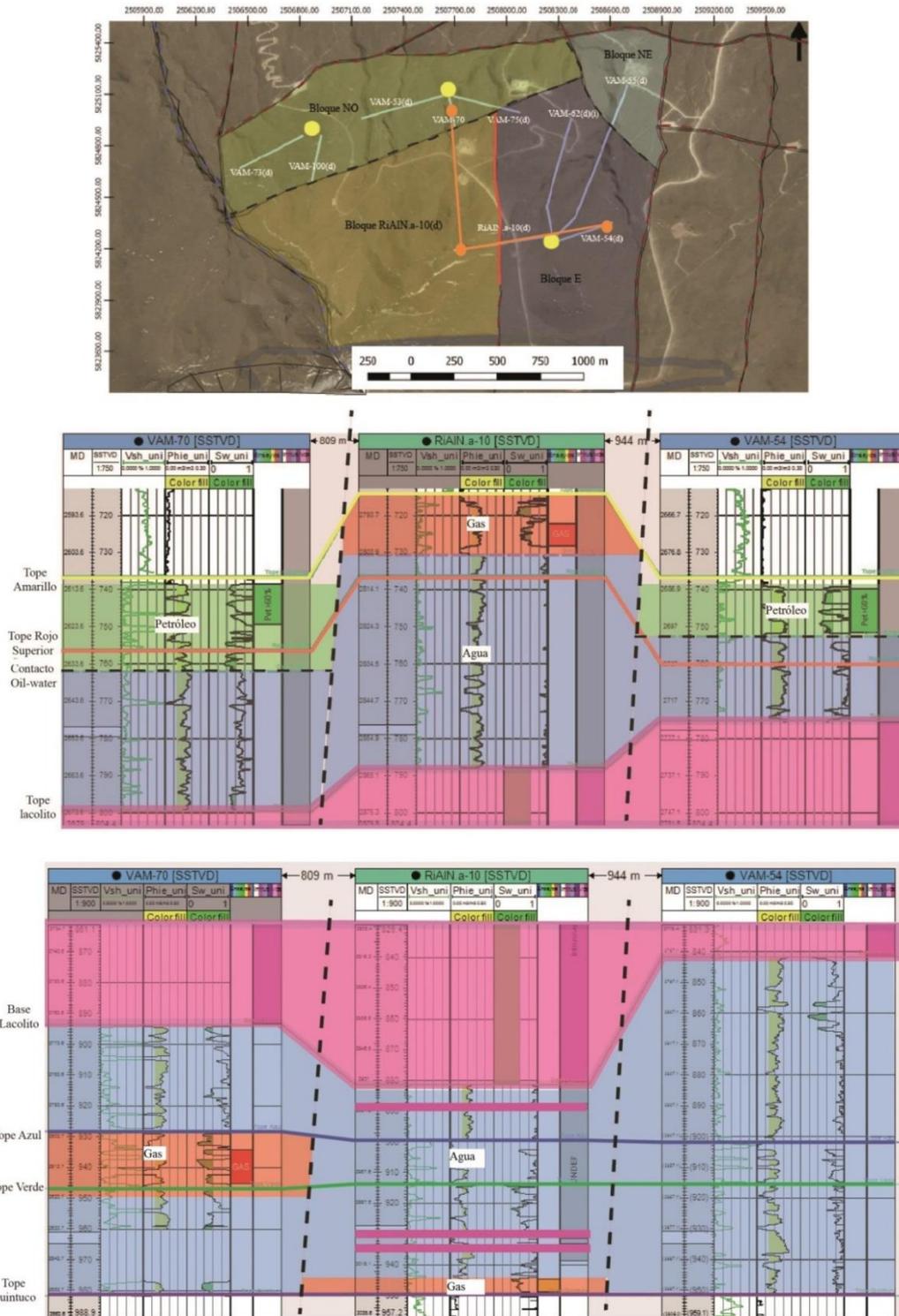


Figura 7.25 – Transectas esquemáticas que muestran la distribución de fluidos entre tres pozos de diferentes zonas dentro de la Formación Mulichinco. En el mapa se puede observar la transecta que une a los pozos. En verde se identifica el petróleo; en azul, el agua y en rojo, el gas. En fucsia, se muestra un intrusivo. Se puede divisar la incongruencia de fluidos en las laterales lo que hace suponer posibles fallas o diques (líneas punteadas) que desconectan los reservorios entre los pozos y crean bloques independientes entre sí. Sin escala.

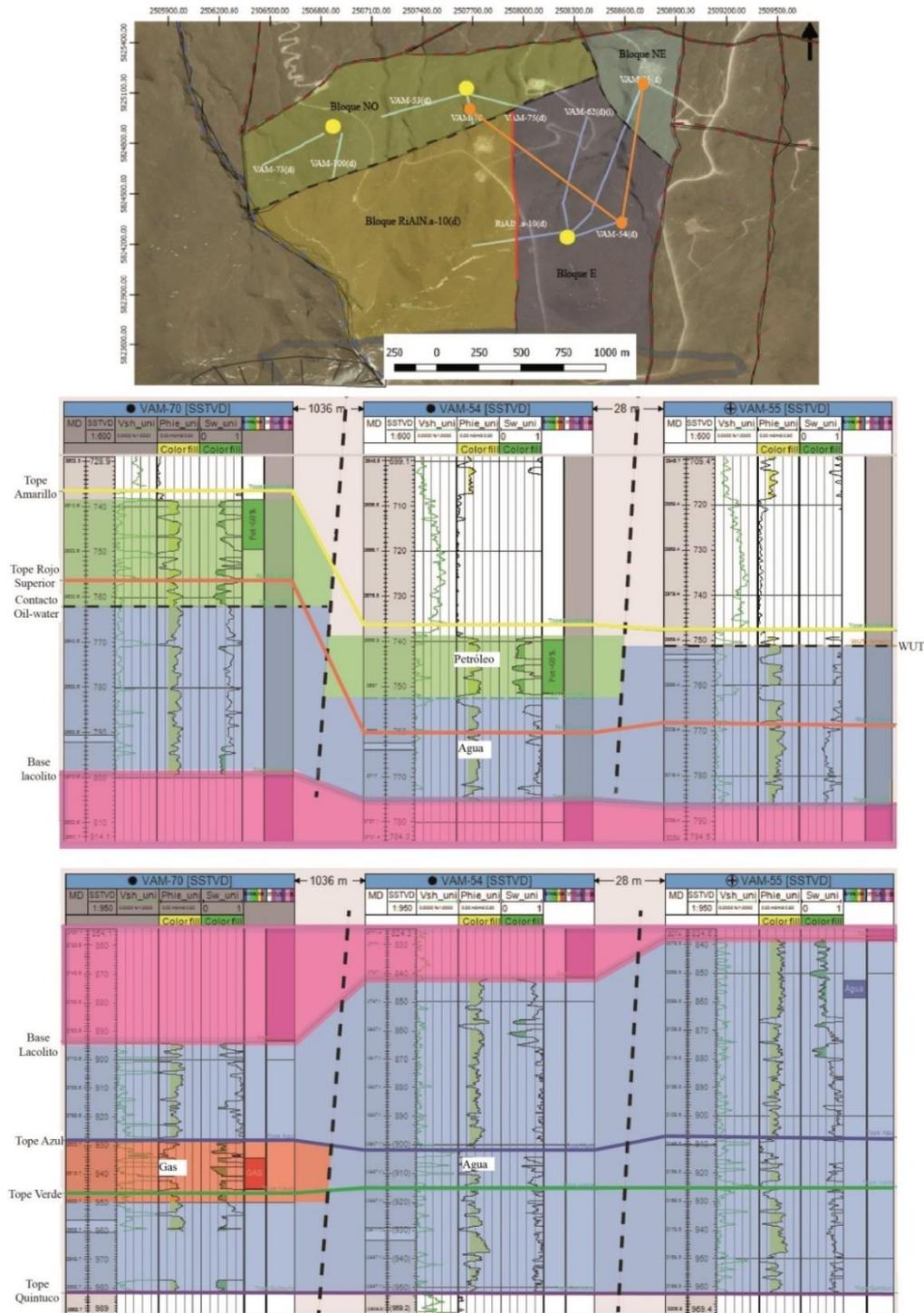


Figura 7.26 – Transectas esquemáticas que muestran la distribución de fluidos entre tres pozos de diferentes zonas dentro de la Formación Mulichinco. En el mapa se puede observar la transecta que une a los pozos. En verde se identifica el petróleo; en azul, el agua y en rojo, el gas. En fucsia, se muestra un intrusivo. Se puede divisar la incongruencia de fluidos en las laterales lo que hace suponer posibles fallas o diques (líneas punteadas) que desconectan los reservorios entre los pozos y crean bloques independientes entre sí. Sin escala.

### 7.7. Mapas de porosidad efectiva

Para la realización de los mapas de porosidad efectiva, se utilizaron los valores de esta magnitud ( $\phi$ ) del perfil petrofísico previamente cargado al software, para cada miembro de la Formación Mulichinco (Figura 7.27 – 7.28). Estos mapas fueron de gran utilidad a la hora de trabajar con cálculos de la obtención de los volúmenes de hidrocarburos.

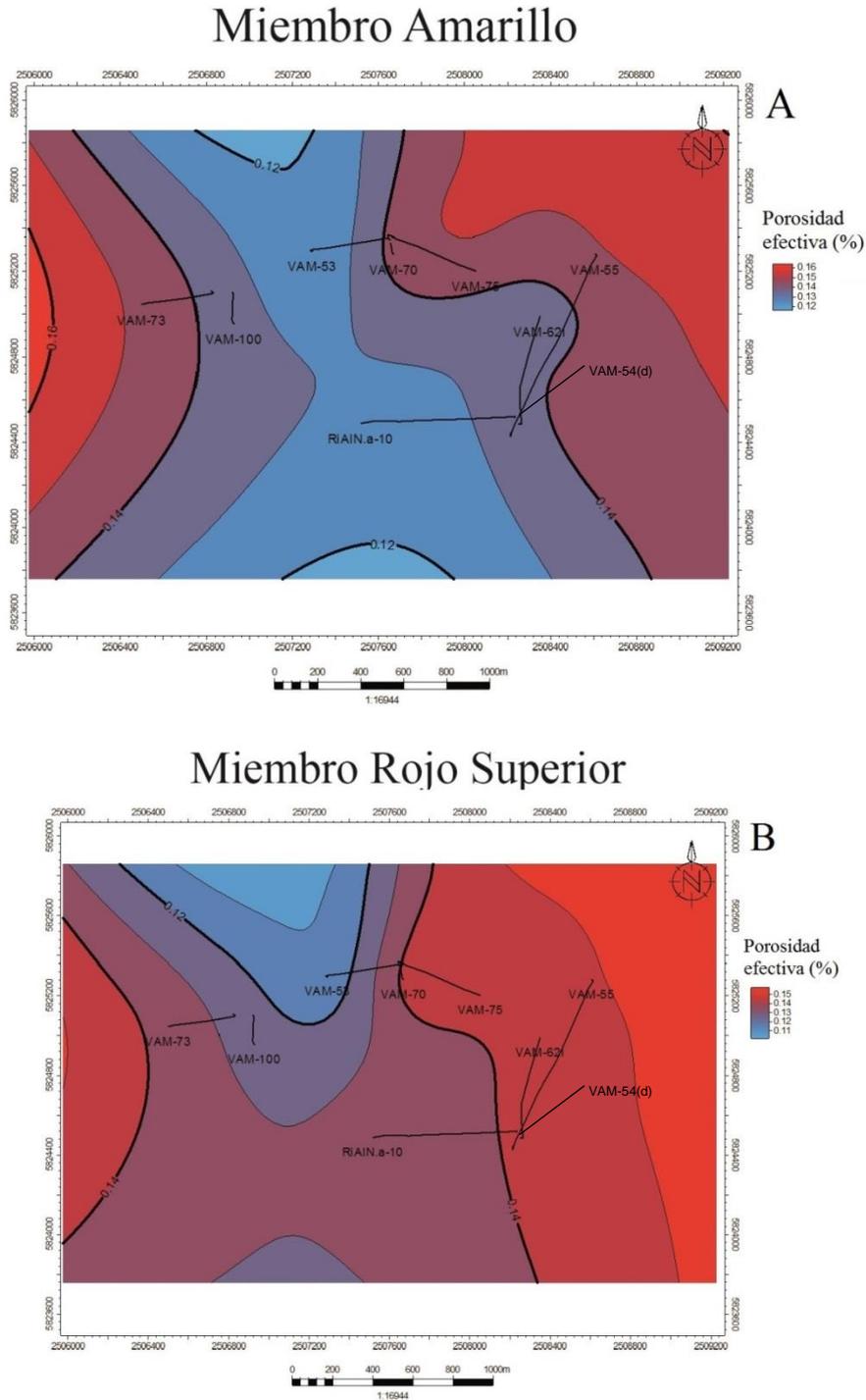
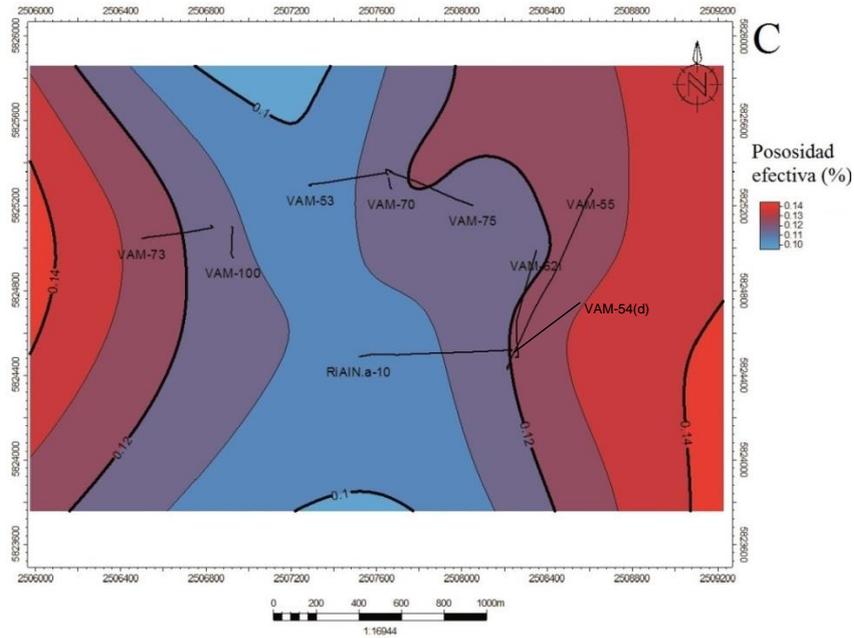


Figura 7.27 – Mapas de isopropiedades, en este caso porosidad efectiva, efectuados dentro de la Formación Mulichinco para los miembros Amarillo (A) y Rojo Superior (B).

### Miembro Azul



### Miembro Verde

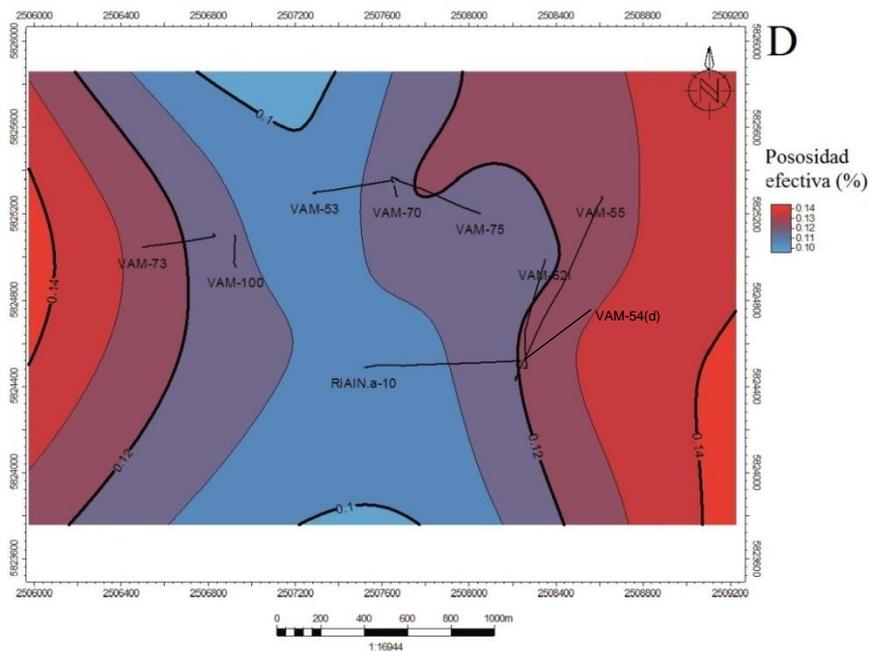


Figura 7.28 – Mapas de isopropiedades, en este caso porosidad efectiva, efectuados dentro de la Formación Mulichinco para los miembros Azul (C) y Verde (D).

### 7.8. Mapas de espesor útil

En los perfiles mencionados en la sección 7.1 se creó un nuevo *track* donde se introdujo un cálculo en base a los datos de porosidad efectiva y saturación de agua (Figura 7.22). Esto generó datos discretos de 1 y 0. Se utilizó 1 donde hay un porcentaje de porosidad mayor al 8% y que a su vez tenga una saturación de agua menor al 60% y 0 en zonas donde no se cumpla la sentencia anterior. Este cálculo fue restringido sólo a la formación de interés.

Con esta información sumada a los ensayos de producción de pozo se corroboró que estos espesores serían potencialmente productores de hidrocarburos. Además, se consideraron los mapas de contacto de fluidos para saber qué grado de desconexiones hidráulicas había.

Con estos datos, se generó una vista en planta donde se proyectaron los siguientes datos:

- Ubicación de las bocas de pozo y sus desviaciones.
- Fallas interpretadas a partir de información sísmica que están disponibles al norte del área de interés.
- Fallas inferidas por pozos cercanos que no se encuentran dentro de esta área de estudio.
- Un cuerpo intrusivo de orientación E-O e inclinación vertical que se encuentra al sur encontrado en el pozo Coby.x-1 el cual no pertenece a este trabajo, pero marca una desconexión de bloques al sur del área.
- La falla con rumbo N-S obtenida en el pozo RiAIN.a-10(d) mediante el VSP *Walkaway*.
- Desconexión hidráulica que ocurre entre los fluidos de los pozos en base a los datos de ensayos de terminación de pozos.

El resultado fue la delimitación de cuatro bloques en el área de estudio (Figura 7.29) denominados: Bloque Noroeste, Bloque Noreste, Bloque RiAIN.a-10(d) y Bloque Este. Cada uno de estos bloques fue delimitado con un polígono y dentro del mismo, con los datos de espesores útiles calculados recientemente, se realizaron mapas de espesor útil tanto para cada bloque como para cada miembro de la Formación Mulichinco (Figura 7.30).

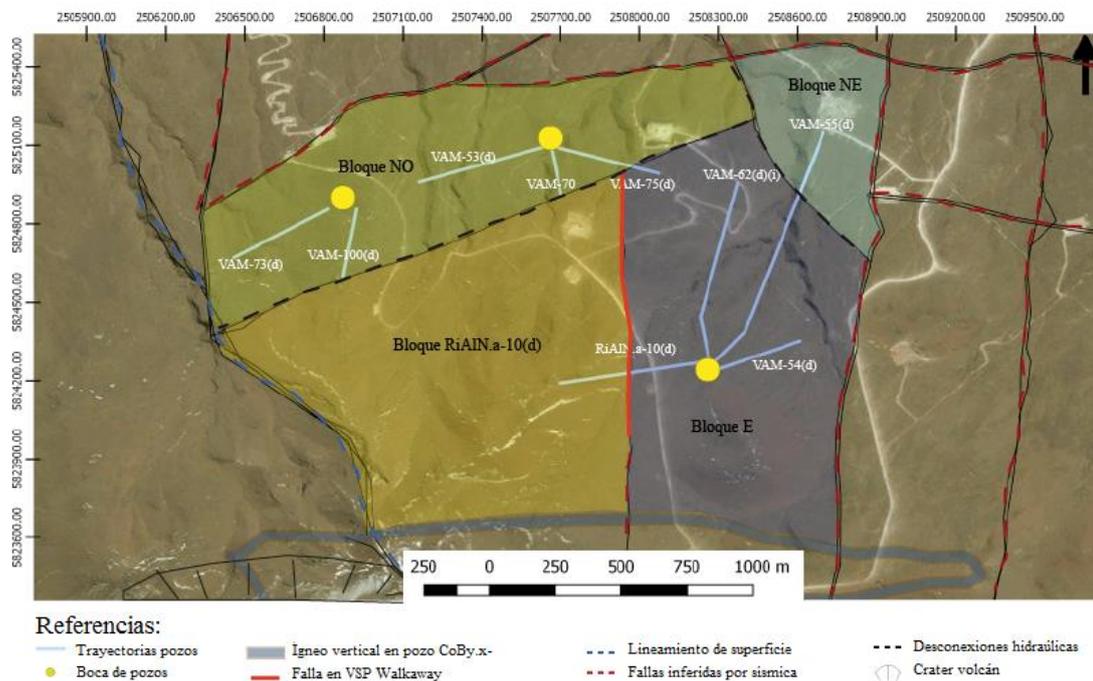
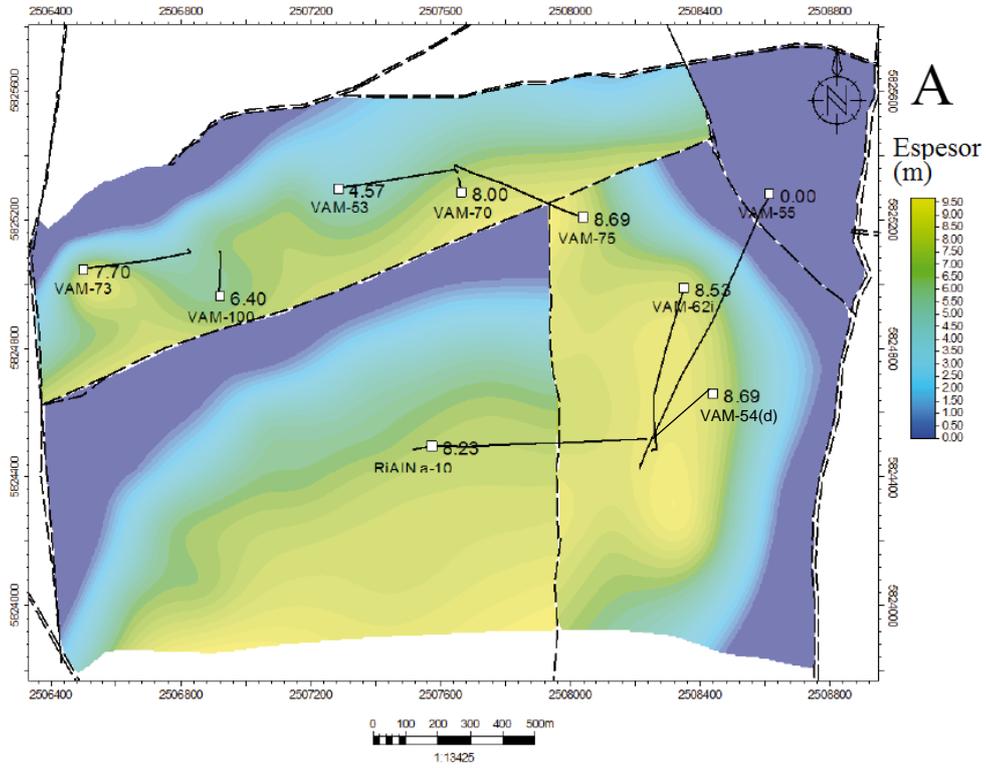
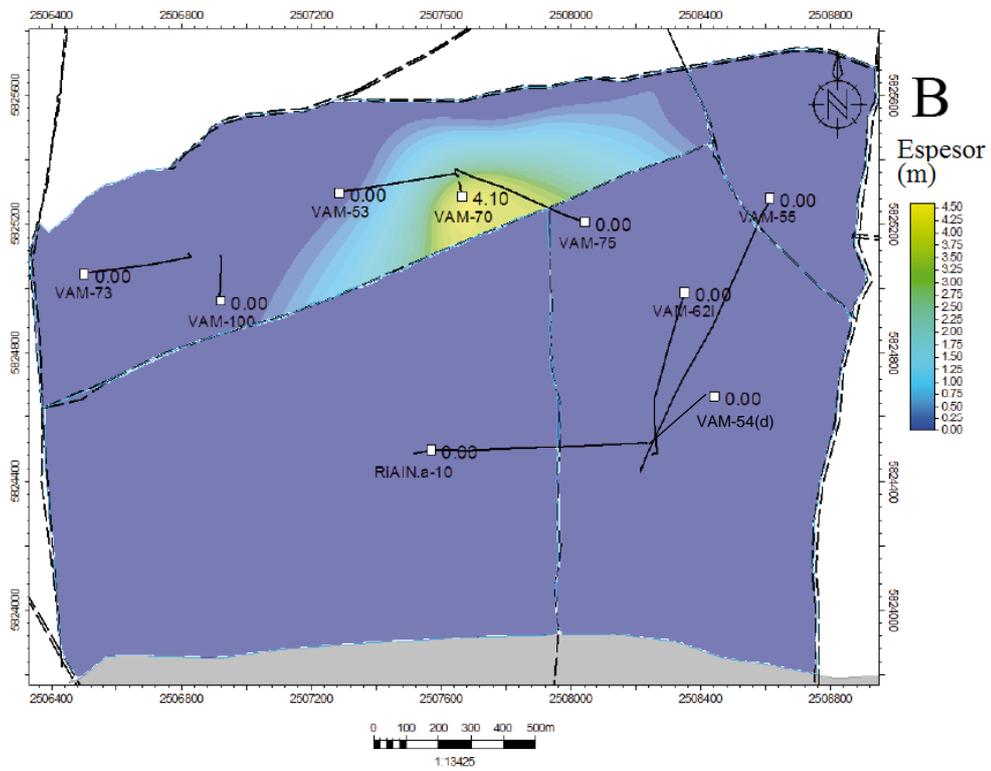


Figura 7.29 - Bloques hidráulicamente desconectados entre sí para los miembros de la Formación Mulichinco.

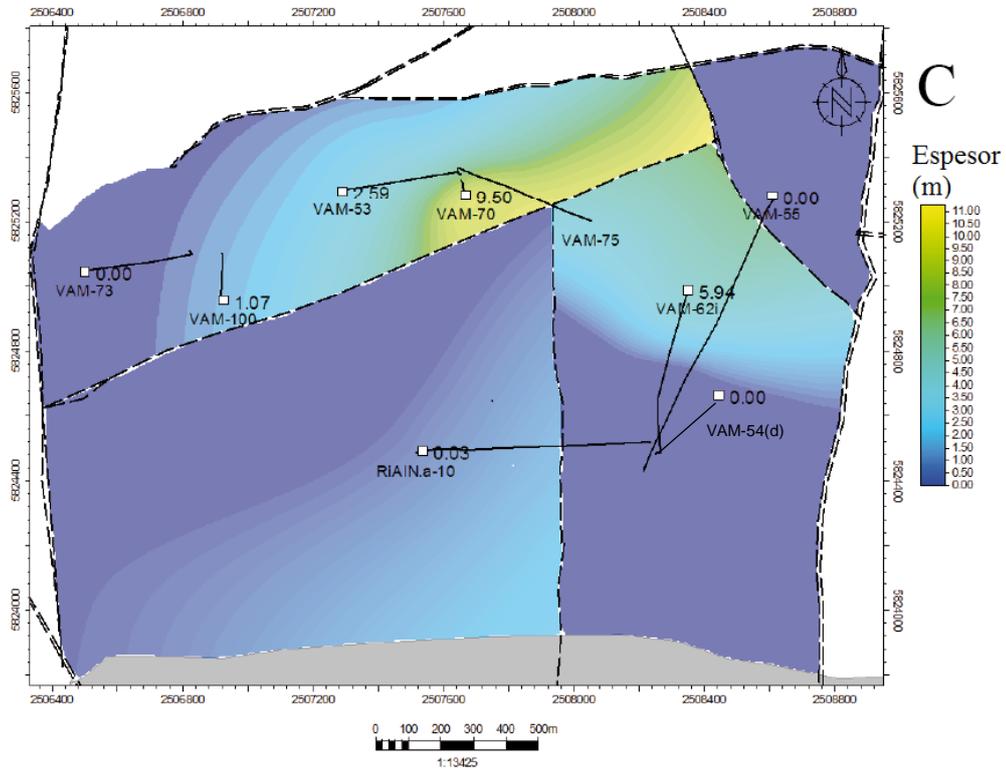
# Miembro Amarillo



# Miembro Rojo Superior



## Miembro Azul



## Miembro Verde

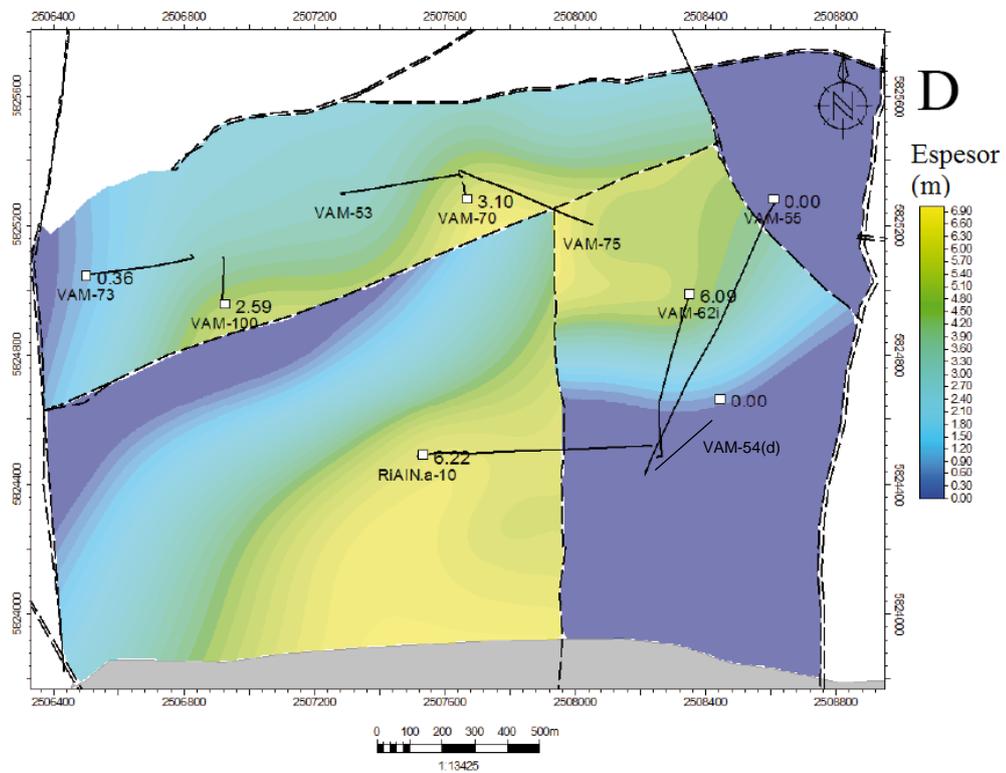


Figura 7.30 – Mapas de espesor útil de los miembros de la Formación Mulichinco utilizados en este trabajo. A – Miembro Amarillo. B – Miembro Rojo Superior. C – Miembro Azul. D – Miembro Verde. En gris se muestra el cuerpo intrusivo vertical encontrado en el pozo Coby.x-1

### 7.9. Cálculo del OOIP y OGIP (petróleo y gas original en la formación)

Para este paso fue requerido del uso de gran parte de la información previa. El cálculo del petróleo (o gas) original en el sitio (OOIP – OGIP por *original oil in place/original gas in place*) se lleva a cabo mediante la siguiente ecuación:

$$OOIP - OGIP = \frac{A \times EU \times Phi \times (1 - Sw)}{Bo \text{ o } B\rho} \quad (1)$$

Donde:

A: área de cada uno de los bloques hidráulicos en km<sup>2</sup>

EU: espesor útil en metros

Phi: porosidad efectiva

Sw: saturación de agua

Bo: factor volumétrico de petróleo. En el caso de este yacimiento el factor es de 1,18

B $\rho$ : factor volumétrico de gas. En el caso de este yacimiento el factor es de 0,01

El cálculo del OOIP-OGIP consiste en calcular el volumen de hidrocarburos presentes en el yacimiento, o en este caso, en la zona de estudio. Para esto se utilizaron dos métodos: el determinístico por un lado y la multiplicación de mapas por el otro. Para el primer método todos los parámetros de la ecuación anterior resultan del cálculo de promedios. Este método homogeniza el área y se utiliza para arribar a un valor aproximado del volumen presente. Para esto, se confeccionaron tablas por cada uno de los bloques de interés (Figura 7.29) separados, a su vez, por los miembros que subdividen a la Formación Mulichinco. La información volcada corresponde al área del bloque, espesor total (ET), espesor útil (EU), la relación espesor neto / espesor bruto o *net to gross* (NTG), porosidad, saturación de agua, ensayos de terminación de pozo de la capa si los hubiese y el tipo de fluido (tablas 7.6, 7.7 y 7.8). En el caso del bloque NE no se realizaron cálculos ya que en la sección anterior se determinó que no poseía espesor útil, es decir, todas las areniscas reservorio de este bloque se encuentran saturadas de agua.

Bloque	Área	Pozos	Capa	ET	EU	(NTG)	Phie	Sw	Ensayo	Fluido	Volumen por método determinístico	Volumen por multiplicación de mapas	
Bloque NNO	1,024Km 2	VAM-100	Amarillo	19,83	6,4	0,32	0,14	0,47	Petróleo	Petróleo			
		VAM-53		19,65	4,57	0,23	0,12	0,49	Petróleo				
		VAM-70		19,7	8	0,41	0,14	0,49	Petróleo				
		VAM-73		19,02	7,7	0,40	0,15	0,39	Petróleo				
		Promedio				6,67	0,34	0,14	0,46			438.000,00	326.471,00
		VAM-100	Rojo Superior	61,35	0,00	0,00	0,13	0,57		Agua			
		VAM-53		45,1	0,00	0,00	0,11	0,23		Agua			
		VAM-70		43,38	4,10	0,09	0,14	0,49	Petróleo	Petróleo			
		VAM-73		54,35	0,00	0,00	0,14	0,34		Agua			
		Promedio				1,03	0,02	0,13	0,41			68.557,00	38.408,20
		VAM-100	Tope Azul	13,75	1,07	0,08	0,11	0,50		Gas			
		VAM-53		15,61	2,59	0,17	0,1	0,51		Agua			
		VAM-70		18,51	9,5	0,51	0,12	0,42	Gas	Gas			
		VAM-73		9,79	0	0,00	0,13	0,52		Agua			
		Promedio				3,29	0,19	0,12	0,49			20,68 M	18,23M
		VAM-100	Tope Verde	34,38	2,59	0,08	0,11	0,52		Gas			
		VAM-53		0					Gas	Gas			
		VAM-70		34,89	3,1	0,09	0,14	0,46		Gas			
		VAM-73		39,42	0,36	0,01	0,13	0,55		Agua			
		Promedio				2,02	0,06	0,13	0,51			13,18M	11,03M

Tabla 7.6 – Datos de espesor total (ET), espesor útil (EU), la relación espesor neto / espesor bruto o *net to gross* (NTG), porosidad (phi), saturación de agua (Sw), ensayos de terminación de pozo de la capa si los hubiese, el tipo de fluido y el volumen de gas o petróleo calculado para cada capa mediante los dos métodos usados en este trabajo dentro del bloque NNO. Los volúmenes de petróleo se expresan en m<sup>3</sup> y los de gas en millones de m<sup>3</sup>.

Bloque	Área	Pozos	Capa	ET	EU	(NTG)	Phie	Sw	Ensayo	Fluido	Volumen por método determinístico	Volumen por multiplicación de mapas
Bloque RiAIN	1,656Km 2	RiAIN.a-10	Amarillo	22,06	8,23	0,37	0,13	0,44	Gas	Gas	99,22 M	67,72 M
			Rojo Superior	51,92	0	0,00	0,13				No tiene espesor útil	
			Azul	14,11	0	0,00	0,11	0,57			No tiene espesor útil	
			Verde	36,3	6,22	0,17	0,12	0,49	S/E	Gas	64,28 M	35,41

Tabla 7.7 – Datos de espesor total (ET), espesor útil (EU), la relación espesor neto / espesor bruto o *net to gross* (NTG), porosidad (phi), saturación de agua (Sw), ensayos de terminación de pozo de la capa si los hubiese, el tipo de fluido y el volumen de gas o petróleo calculado para cada capa mediante los dos métodos usados en este trabajo dentro del bloque RiAIN. Los volúmenes de petróleo se expresan en m<sup>3</sup> y los de gas en millones de m<sup>3</sup>.

Bloque	Área	Pozos	Capa	ET	EU	(NTG)	Phie	Sw	Ensayo	Fluido	Volumen por método determinístico	Volumen por multiplicación de mapas	
Bloque E	1.18Km <sup>2</sup>	VAM-54	Amarillo	22,23	8,69	0,391	0,14	0,445	Petróleo	Petróleo			
		VAM-62i		20,78	8,53	0,410	0,13	0,464	Petróleo	Petróleo			
		VAM-75		23,8	8,69	0,365	0,15	0,447					
					8,64	0,39	0,14	0,45			665.280,00	415.959,00	
		VAM-54	Rojo Superior	15,42	0	0,00	0,15	0,504					
		VAM-62i		26,99	0	0,00	0,14	0,449	Petróleo	Petróleo			
		VAM-75		38,55	0	0,00	0,14						
					0	0	0,143	0,477	No tiene espesor útil				
		VAM-54	Azul	13,75	0	0,00	0,13	0,533					
		VAM-62i		16,14	0	0,37	0,12	0,482					
					0,00	0,18	0,13	0,51	No tiene espesor útil				
		VAM-54	Verde	36,11	0	0,00	0,14	0,597					
		VAM-62i		37,57	6,09	0,16	0,13	0,479	Gas	Gas			
					3,05	0,08	0,14	0,54			23,18 M	14,10	

Tabla 7.8 – Datos de espesor total (ET), espesor útil (EU), la relación espesor neto / espesor bruto o *net to gross* (NTG), porosidad (phi), saturación de agua (Sw), ensayos de terminación de pozo de la capa si los hubiese, el tipo de fluido y el volumen de gas o petróleo calculado para cada capa mediante los dos métodos usados en este trabajo dentro del bloque Este. Los volúmenes de petróleo se expresan en m<sup>3</sup> y los de gas en millones de m<sup>3</sup>.

Para el cálculo determinístico se realizaron promedios del EU, Phi y saturación de agua. Estos valores fueron reemplazados en la ecuación y se obtuvieron los resultados, expresados en m<sup>3</sup> para el petróleo y millones de m<sup>3</sup> para el gas, mostrados en las tablas anteriores excepto en los lugares donde no había espesor útil.

El segundo método para cálculo de OOIP - OGIP, denominado multiplicación de mapas, se realizó mediante el uso de Petrel®, haciendo uso de la calculadora del programa para poder multiplicar los mapas. La ecuación utilizada para calcular el volumen de hidrocarburo en cada bloque y para cada capa fue derivada de la fórmula 1:

$$OOIP - OGIP = \frac{\text{Mapa EU del bloque y la capa} \times \text{Mapa de porosidad} \times (1 - Sw)}{Bo \text{ o } Bp} \quad (2)$$

En este método el uso de los mapas hace posible que se tenga en cuenta las variaciones de espesor útil y porosidad a lo largo de la capa, aunque para la saturación de agua se utiliza un promedio. Este valor resulta inferior al obtenido de con el primer método, pero posee mayor precisión. Como resultado, además de un valor numérico se puede obtener un mapa que muestre las variaciones del volumen obtenido para cada bloque (Figura 7.31, 7.32, 7.33 y 7.34).

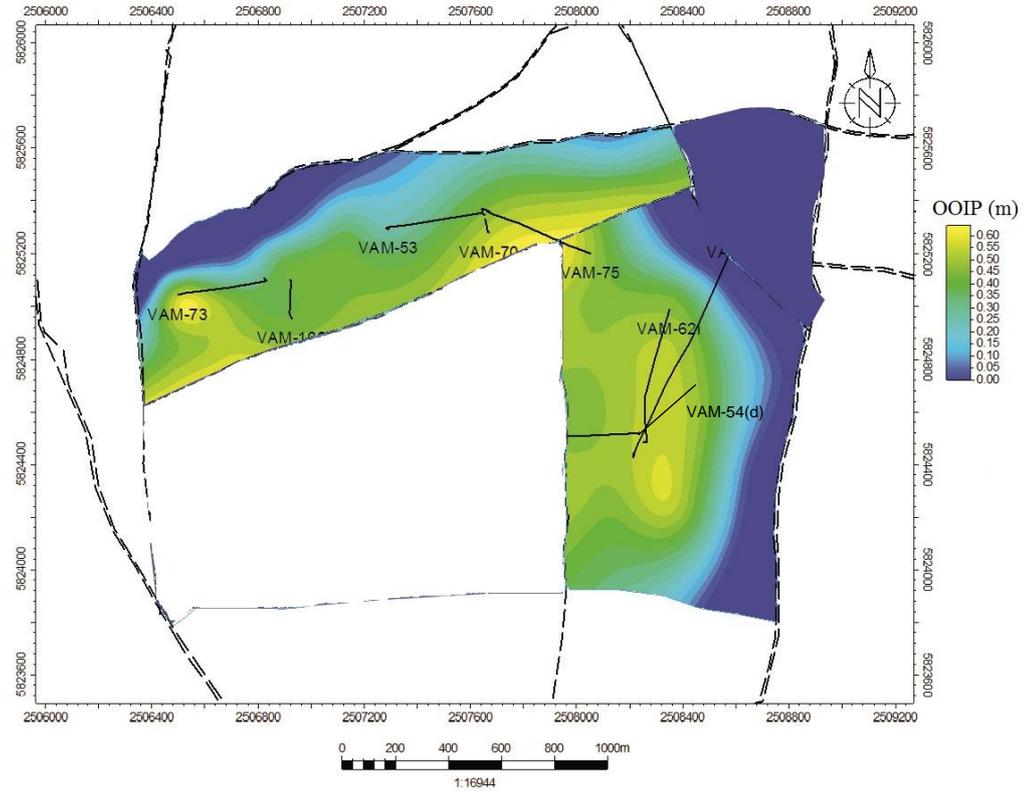


Figura 7.31 – Mapa con los volúmenes de petróleo en el Miembro Amarillo de la Formación Mulichinco para los bloques NNO y E.

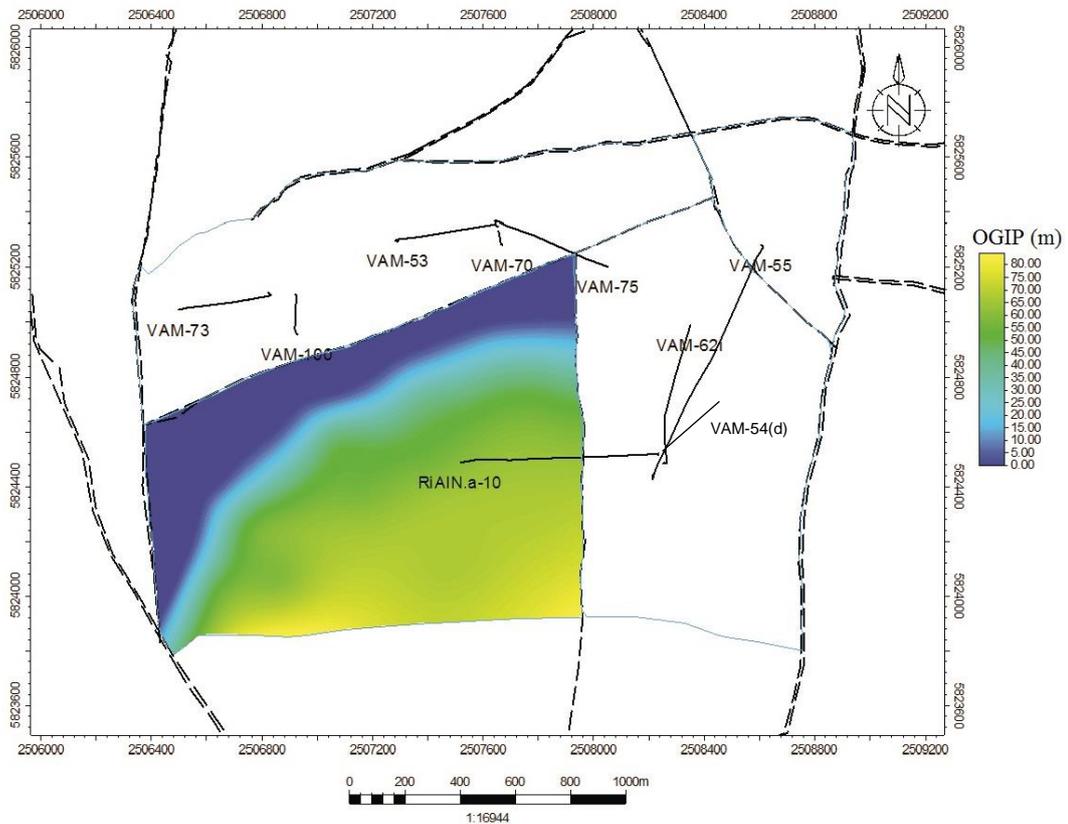


Figura 7.32 – Mapa con los volúmenes de gas en el Miembro Amarillo de la Formación Mulichinco para el bloque RiAIN.

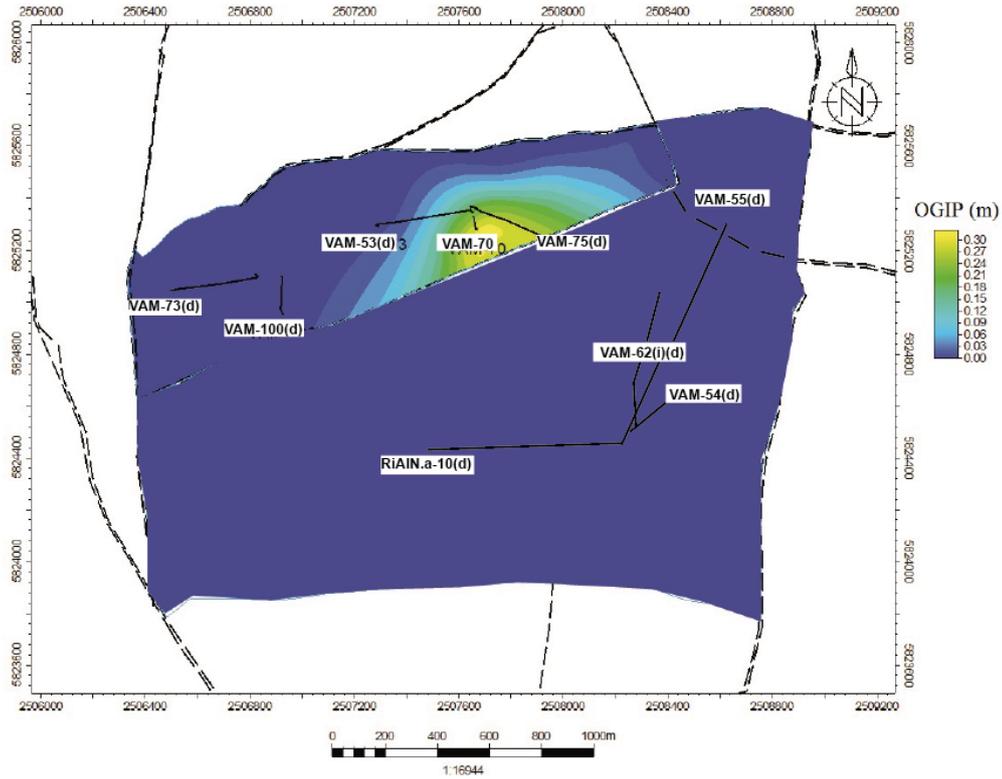


Figura 7.33 – Mapa con los volúmenes de petróleo en el Miembro Rojo Superior de la Formación Mulichinco para todos los bloques.

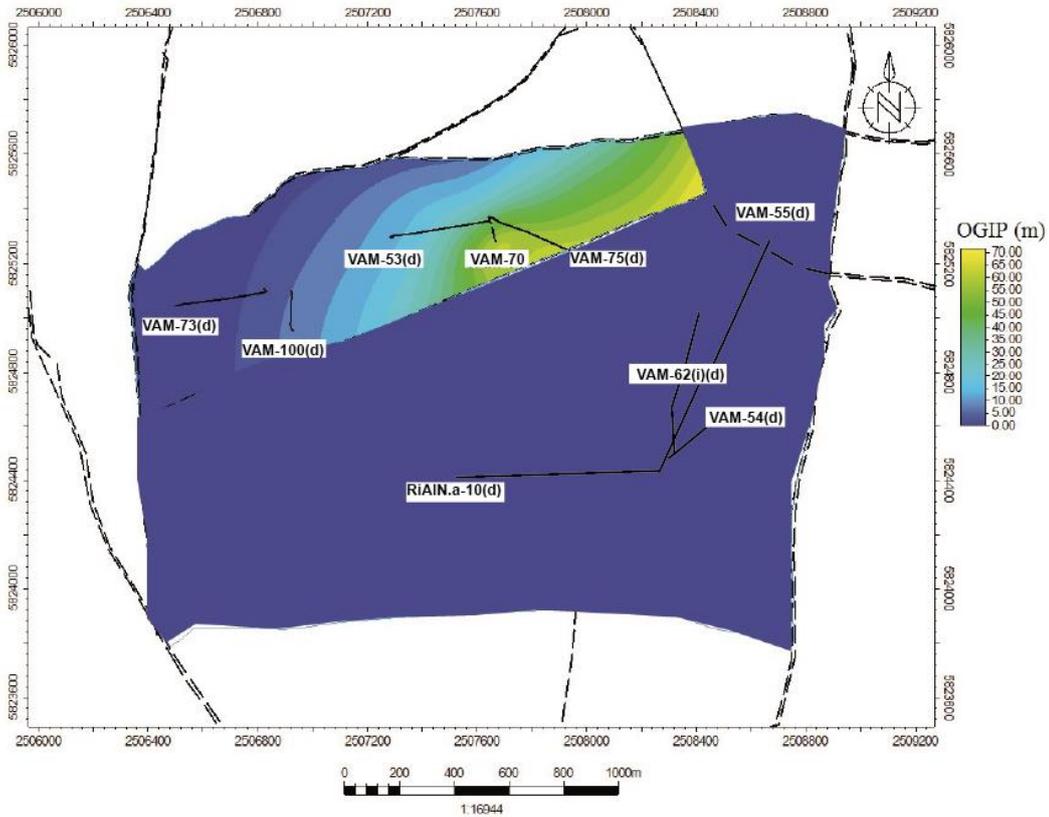


Figura 7.34 – Mapa con los volúmenes de gas en el Miembro Azul de la Formación Mulichinco para todos los bloques.

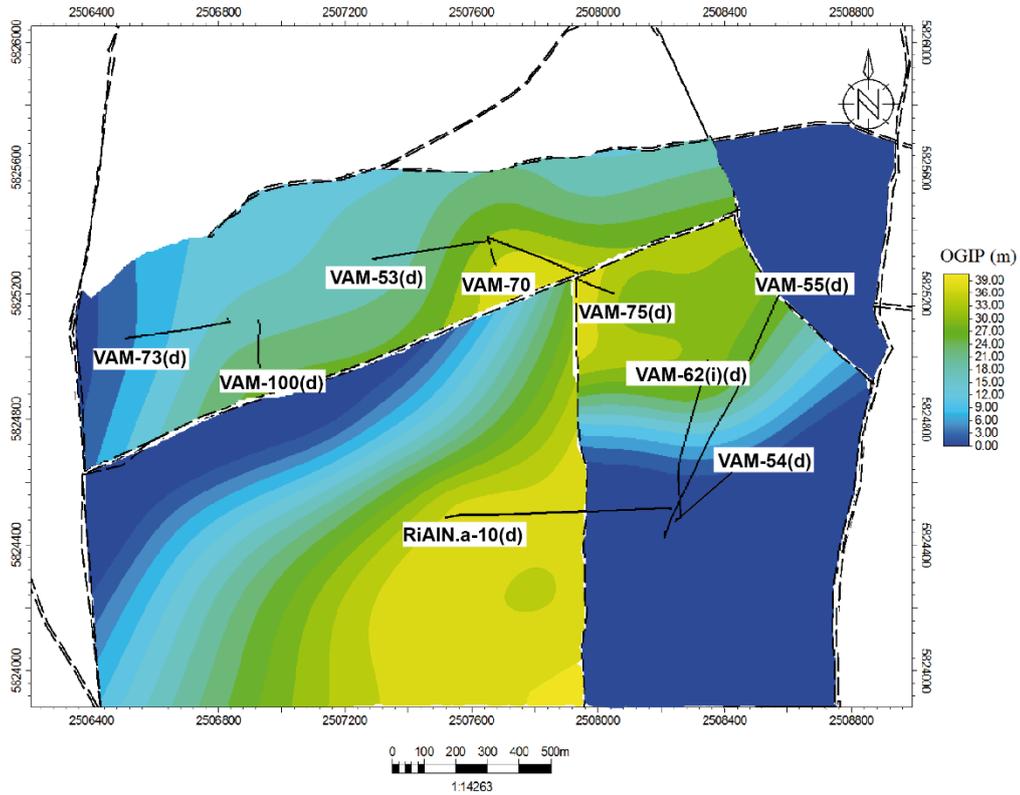


Figura 7.35 - Mapa con los volúmenes de gas en el Miembro Verde de la Formación Mulichinco para todos los bloques.

## 8. RESULTADOS

### 8.1. Estratigrafía

Los mapas estructurales e isopáquicos fueron de gran utilidad para visualizar las tendencias estructurales y el comportamiento del relleno sobre cada capa trabajada. Se pudo observar que todos los mapas estructurales a los topos de las formaciones tienen una estructura del tipo antiforme, con un alto en el sur. En la Formación Quintuco la estructura es monoclin, aunque su alto se encuentra en la misma orientación que en las demás formaciones. Para la Formación Mulichinco, en las profundidades correspondientes a los miembros Azul y Verde, se observa que ambas unidades corresponden a una morfología monoclin que aumenta su profundidad hacia el noroeste (muy similar a lo ocurrido en la estructura de la Formación Quintuco). Esta aptitud cambia en los miembros Rojo y Amarillo de dicha formación, donde la estructura pasa a ser de tipo antiforme o con estructura de domo, para ambas capas. Esta variación se atribuye a que por debajo del Miembro Rojo Superior se intruye un gran cuerpo ígneo que es atravesado por todos los pozos del área de trabajo y que tiene un espesor promedio de 80 m. Su rumbo es N34E y es concordante con la estratificación.

Mediante el registro de control geológico, perfiles eléctricos y de imágenes se pudo analizar la litología de la columna estratigráfica para esta zona de trabajo y determinar en qué profundidades se encuentran aquellas rocas que podrían actuar como reservorios. Estas litologías se encuentran en las formaciones

Rayoso, Centenario y Mulichinco. Estas capas a su vez, tienen sellos locales arcillosos e ígneos (Figura 8.2).

En base a los perfiles de imágenes se pudo establecer que todas las estratificaciones del pozo VAM-100(d) poseen un rumbo NO con muy baja inclinación (<10°), mientras que en el pozo RiAIN.a-10 el rumbo es SE, pero mantiene la misma inclinación.

Los pozos no atraviesan la base de la Formación Quintuco, pero su techo se compone de un cuerpo arcilloso que marca el pase a la Formación Mulichinco. La Formación Mulichinco se encuentra delimitada en el techo por capas que responden a los perfiles eléctricos como rocas arcillosas. En el tope de la formación, mediante el perfil de imágenes se puede distinguir que éste es una intercalación de limo y arcillas (figura 8.1). Esta intercalación actúa como sello regional para los reservorios contenidos en los miembros superiores de esta formación.

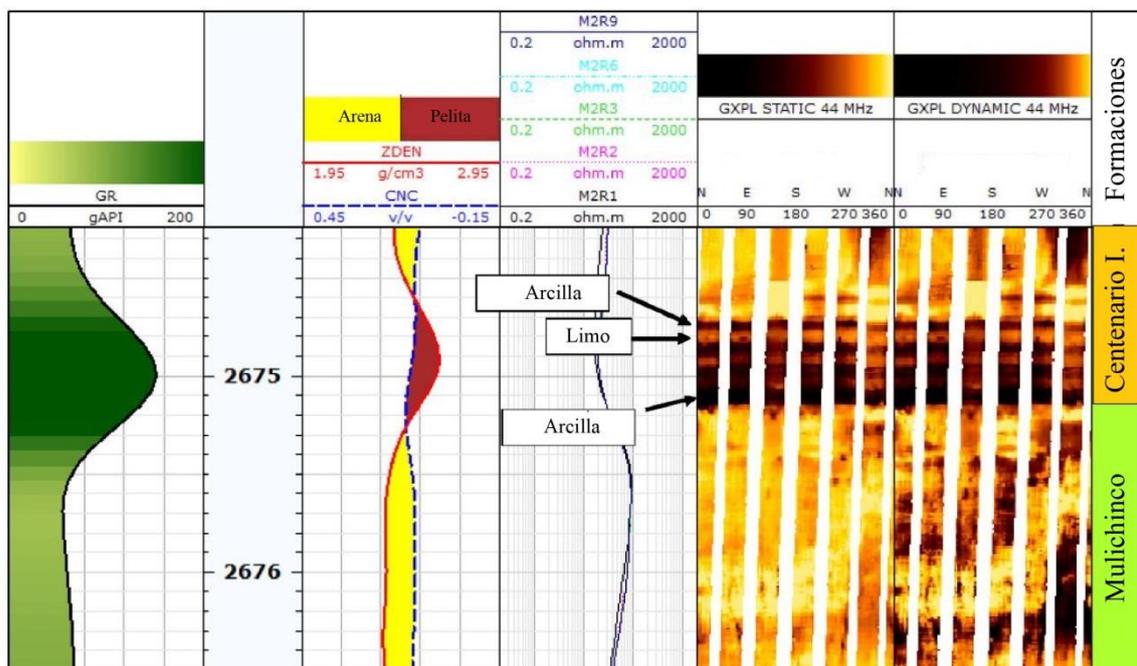


Figura 8.1 - Cuello arcilloso que delimita el pase de unidades entre las formaciones Mulichinco y Centenario Inferior. Con el perfil de imagen se puede ver que corresponde a una intercalación de arcillas con limo.

El cuerpo intrusivo en el Miembro rojo superior podría actuar como sello regional de los fluidos alojados por debajo. A su vez, existen pequeños sellos locales dentro de la formación que la subdivide en 19 capas mencionadas en la sección “Estratigrafía”.

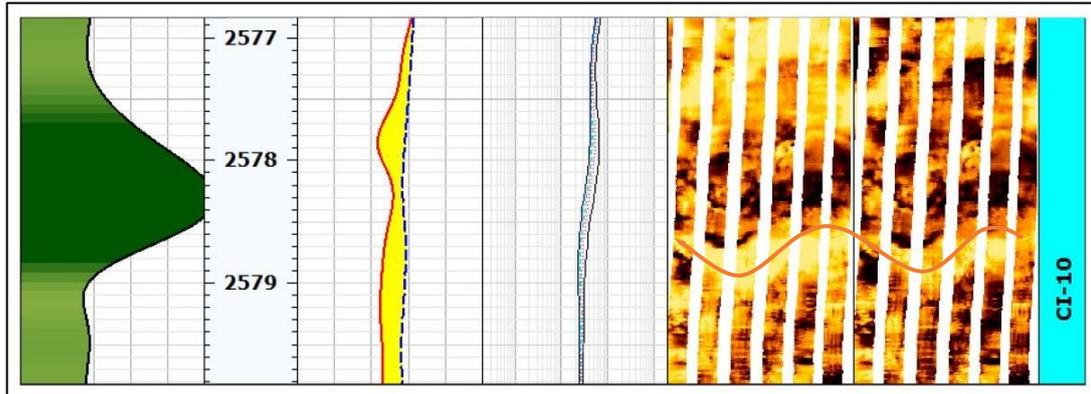


Figura 8.2 - Perfil de imagen sobre la Formación Centenario Inferior mostrando un cuerpo ígneo (con línea roja) el cual actúa como sello local.

## 8.2. Intrusivos

El uso de perfiles eléctricos, de imágenes y control geológico permitió la delimitación de cuerpos intrusivos ígneos a lo largo de todos los pozos. Se identificaron diques, filones capas y un lacolito de dichos pozos, los que albergan mayor cantidad de cuerpos ígneos corresponden a los pozos VAM-100(d), RiAIN.a-10(d) y VAM-54(d) (Figura 8.3). Éstos, son los más cercanos a la localización de volcanes monogénicos presentes en la superficie y a distintos lineamientos. Podría ocurrir que el aumento de intrusivos dentro de estos pozos se deba a su cercanía con fracturas que alimentaron a estos volcanes en el momento de su génesis.

En base al análisis de *cutting* se puede observar que la mayoría de los cuerpos intrusivos se encuentran dentro de areniscas. Esto no es concordante con estudios previos acerca de que las rocas ígneas se intruyen en secciones pelíticas, aprovechando planos preexistentes de debilidad (estratificación y planos de falla) que favorecen la intrusión (Longo 2017) pero podría deberse a que los cuerpos ígneos canibalizaron las rocas pelíticas durante la intrusión o aprovecharon fracturas abiertas preexistentes para adentrarse en la roca de caja psamítica. Estas rocas intrusivas parecen no tener preferencia de intrusión en base a las formaciones. La mayor cantidad de intrusivos se alojan en las formaciones Rayoso y Centenario Inferior.

El espesor de estas rocas intrusivas es muy variable, desde diques de 40 cm de espesor a otros de 30 m. Con la excepción del cuerpo intruido en la Formación Mulichinco el cual triplica estos valores.

En cuanto a los diques, en los pozos en los que se pudieron determinar orientaciones, poseen rumbo NE-SO y E-O con una dirección de inclinación hacia el S y SO que varía entre 60° a 70°. Estas orientaciones son coincidentes con lineamientos y fallas presentes en la superficie del volcán y con fracturas y micro fallas existentes en el subsuelo, por lo que podría asumirse que los cuerpos ígneos aprovecharon planos de debilidades previos. Se encontraron pocos filones capa en los pozos, los cuales posee un poco espesor (en el rango de los centímetros).

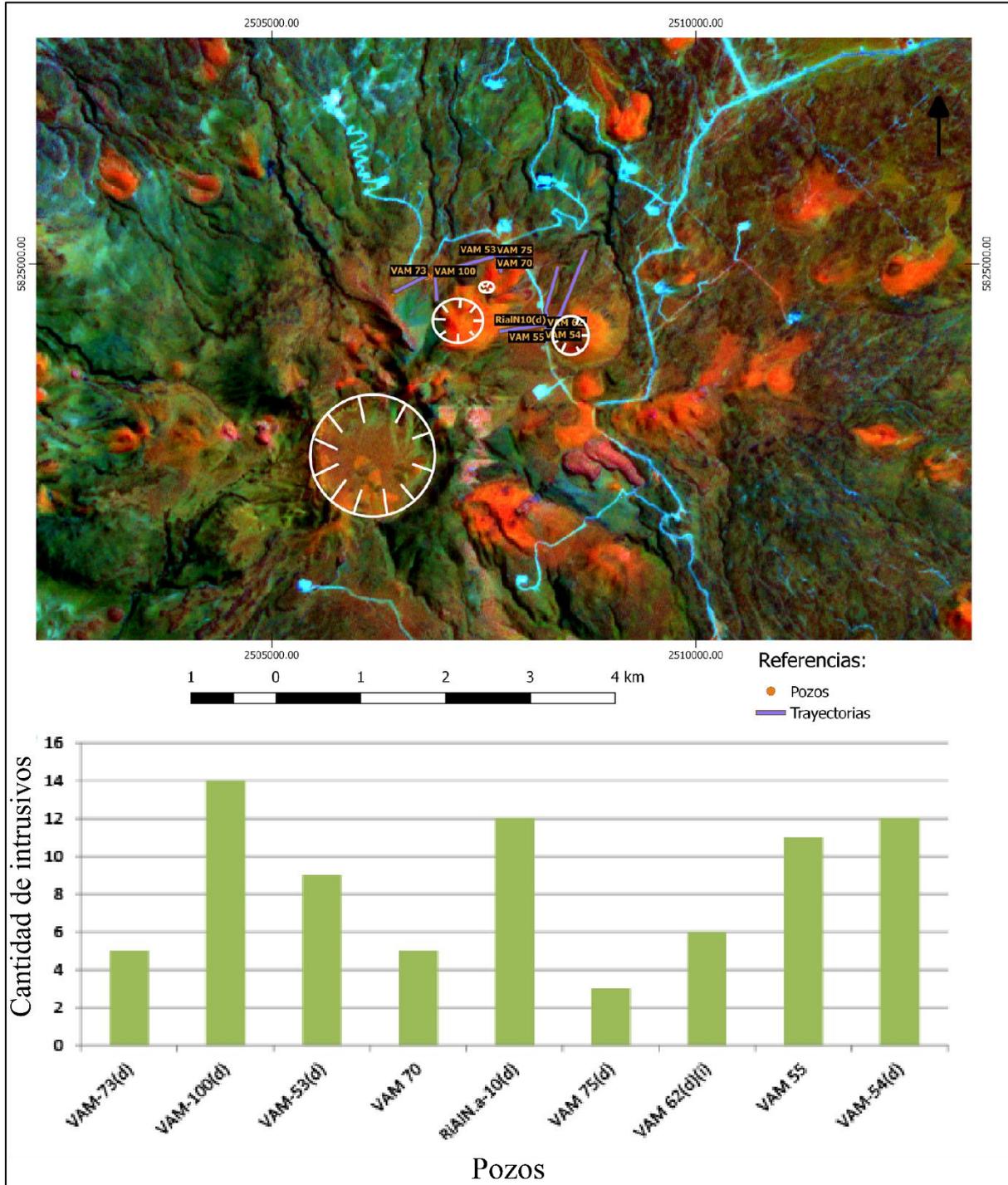


Figura 8.3 – Arriba imagen ASTER RGB 631 mostrando los pozos con sus trayectorias (en violeta). En blanco el cono principal y conos parásitos. Abajo, gráfico mostrando cantidad de intrusivos por pozo. Puede verse una predominancia de estos cuerpos en los pozos más cercanos a los conos parásitos.

El intrusivo de mayor espesor corresponde al ubicado en la Formación Mulichinco. En él, se puede observar que en su techo y base poseen dos picos en el perfil de rayos gamma y por dentro los valores decrecen de techo a base (Figura 7.9). En cuanto al perfil de densidad, la curva disminuye en los bordes

y aumenta en el centro. Según la tabla 7.3 se puede interpretar que en los bordes del cuerpo intrusivo la respuesta de los perfiles parece concordar con una sienita nefelínica o sienita, mientras que en el centro su composición sería más traquítica. El análisis de *cutting* (Ribas *et al.* 2018) también indica la presencia de una roca sienítica que parecería no encontrarse alterada, logrando una respuesta de los perfiles similar en composición. El resto de los cuerpos intrusivos con espesor suficiente para poder estudiar el comportamiento de las curvas parecen oscilar también en estas composiciones traquíticas, traquiandesíticas y sieníticas. Estas interpretaciones son concordantes con los análisis presentados por Ribas *et al.* (2018) y Longo (2017) que muestran que los diques son basaltos, traquitas y traquiandesitas.

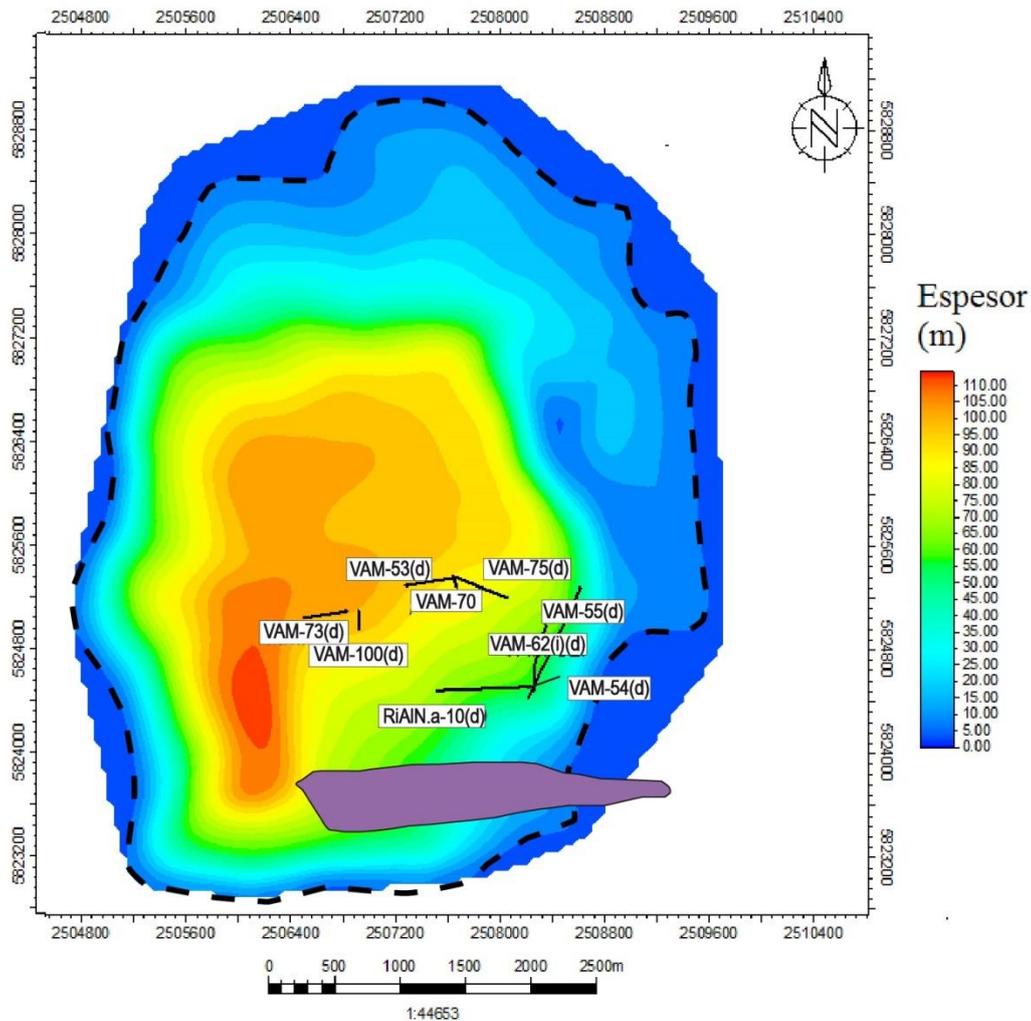


Figura 8.4 – Mapa de espesor del lacolito intruido en la Formación Mulichinco. La línea negra discontinua marca los límites del cuerpo a partir de un espesor de 5 m. En violeta se muestra el dique vertical denominado CoBy.x-1. Tomado de Ribas *et al.* (2018).

En base a la correlación regional de pozos se puede determinar el lacolito posee su base plana y el techo parece abovedarse. Los pozos que atraviesan los menores espesores del de este cuerpo ígneo se sitúan en el este de la zona de trabajo y alcanza una potencia de 50 m mientras que hacia el oeste y noroeste este espesor se eleva a casi los 100 m. El máximo espesor se encuentra al suroeste, cercano al cráter principal del volcán, como se lo puede observar en la imagen 8.4. A su vez, en los pozos donde el lacolito tiene más espesor, las rocas clásticas de la Formación Mulichinco se ven afectadas por una disminución de su espesor.

Al límite sur del terreno de interés se conoce un dique traquítico con rumbo E-O y con una inclinación prácticamente vertical, el cual fue perforado por el pozo Coby.x-1 y que también se observa como un lineamiento en la figura 7.1. Aunque los ejemplos de diques como alimentadores sean escasos, existen algunos ejemplos en la bibliografía y este método suele ser muy utilizado en modelos numéricos y de laboratorio (Eide *et al.* 2016, Galland *et al.* 2018) por lo que se podría considerar a este cuerpo como el posible conducto alimentador, ya que un poco más al sur del mismo el lacolito desaparece (Ribas *et al.* 2018) (figura 8.5). De todos modos, se requerirían estudios geoquímicos para sostener esta presunción y vincular ambos cuerpos.

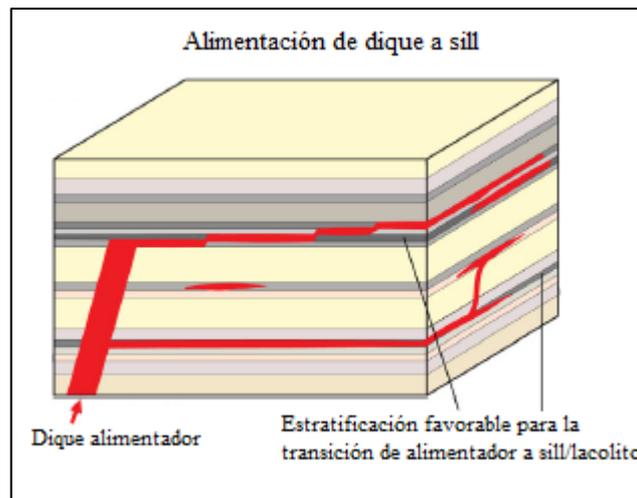


Figura 8.5 – Ejemplo tomado y modificado de Galland *et al.* (2018) de un esquemático que representa la alimentación de un *sill* por medio de un dique. Este modelo podría ser similar a la situación discutida en el texto.

Según trabajos de varios autores (Galland *et al.* 2018, Senger *et al.* 2017, Spacapan *et al.* 2016, Spacapan *et al.* 2018) cuando los cuerpos ígneos son emplazados en cuencas sedimentarias productivas, éstos pueden tener fuertes efectos en la exploración y producción de hidrocarburos. Hay muchas evidencias de intrusivos que promueven la maduración termal de rocas ricas en materia orgánica con potencial para ser roca generadora, como sucede al sur de Mendoza en la Formación Vaca Muerta (Spacapan *et al.* 2018) e incluso en otras áreas del volcán Auca Mahuida (Rosello *et al.* 2002). Además, también se ha comprobado que, a pesar de que las rocas intrusivas sean poco permeables, la fracturación por enfriamiento puede potenciar su condición como rocas reservorios (Spacapan *et al.* 2016, Senger *et al.* 2017). En el caso del lacolito en la Formación Mulichinco y de los diques que atraviesan toda la columna sedimentaria estudiada, no se encuentran en rocas pelíticas con contenido de materia orgánica, sino en areniscas que son los reservorios de este sistema petrolero. Ensayos de terminación de pozos a la profundidad del lacolito al norte del lugar de estudio han dado resultados negativos para obtención de gas o petróleo, por lo que, si estos intrusivos no se alojan en rocas ricas en materia orgánica, parecen no actuar como reservorios.

Se ha podido observar, mediante los perfiles de petrofísica que en las areniscas circundantes al lacolito, la permeabilidad no posee variaciones respecto a rocas más lejanas, por lo que la intrusión no habría afectado esta característica de las rocas. Por otra parte, sí se observa una alta saturación de agua que puede deberse al hidrotermalismo. Lo mismo ocurre con la permeabilidad en sedimentitas cercanas al resto de los cuerpos ígneos. Esto sugiere que los fluidos termales pudieron haber afectado negativamente los reservorios desplazando los recursos económicos. Otra interacción que parece haberse llevado a cabo

es que los intrusivos generaron compartimentalización de las rocas reservorios de este sistema petrolero, funcionando de sellos (Figura 8.2).

El VSP *Walkaway* arrojó evidencia de cuerpos de alta reflectancia a profundidades mayores de las alcanzadas por los pozos, posiblemente en las formaciones Quintuco o Vaca Muerta. Estos reflectores parecen coincidir con otros cuerpos ígneos concordantes con la estratificación, similares al alojado en la Formación Mulichinco. Se sabe por otros trabajos realizados en la zona (Longo 2017, Rosello *et al.* 2002, Sigismondi 2012) que existen más cuerpos ígneos alojados en formaciones infrayacentes. Según Longo (2017) existe dos *sills* alojados en Formación Quintuco y Formación Vaca Muerta. Estos se encuentran a mayor profundidad que el lacolito de la Formación Mulichinco, pero arealmente se emplazan muy cercanos al mismo. La posible diferencia por la que un cuerpo esté abovedado y los otros no, puede corresponderse a la profundidad de la intrusión. A más profundidad mayor debe ser el volumen de magma emplazado para generar los esfuerzos que se producen cuando el magma, al no poder escurrirse hacia capas superiores, se acumula y desarrolla una presión interna superior al peso de la columna de roca suprayacente (Llambías 2008). A su vez, como se observó en las figuras 7.4 y 7.5 parece haber una correlación entre soluciones de deconvolución de Euler y los *sills*/lacolitos del subsuelo. En base a estas imágenes obtenidas por Longo (2017) podrían conocerse los múltiples cuerpos de gran tamaño intruidos en el subsuelo. Un trabajo de Sigismondi (2012) realizado al sur del volcán Auca Mahuida muestra una interpretación de la geometría del subsuelo a partir de datos sísmicos (Figura 8.6). En esta imagen se observan múltiples cuerpos laminares y dómicos unidos por una red de diques alimentadores que se extiende desde el Grupo Neuquén hasta una cámara magmática ubicada a 12 Km de profundidad. Los *sills* encontrados por el VSP y respaldados por la bibliografía, sumados al lacolito intruido en Formación Mulichinco podrían ser una extensión al noreste de este enjambre de cuerpos ígneos.

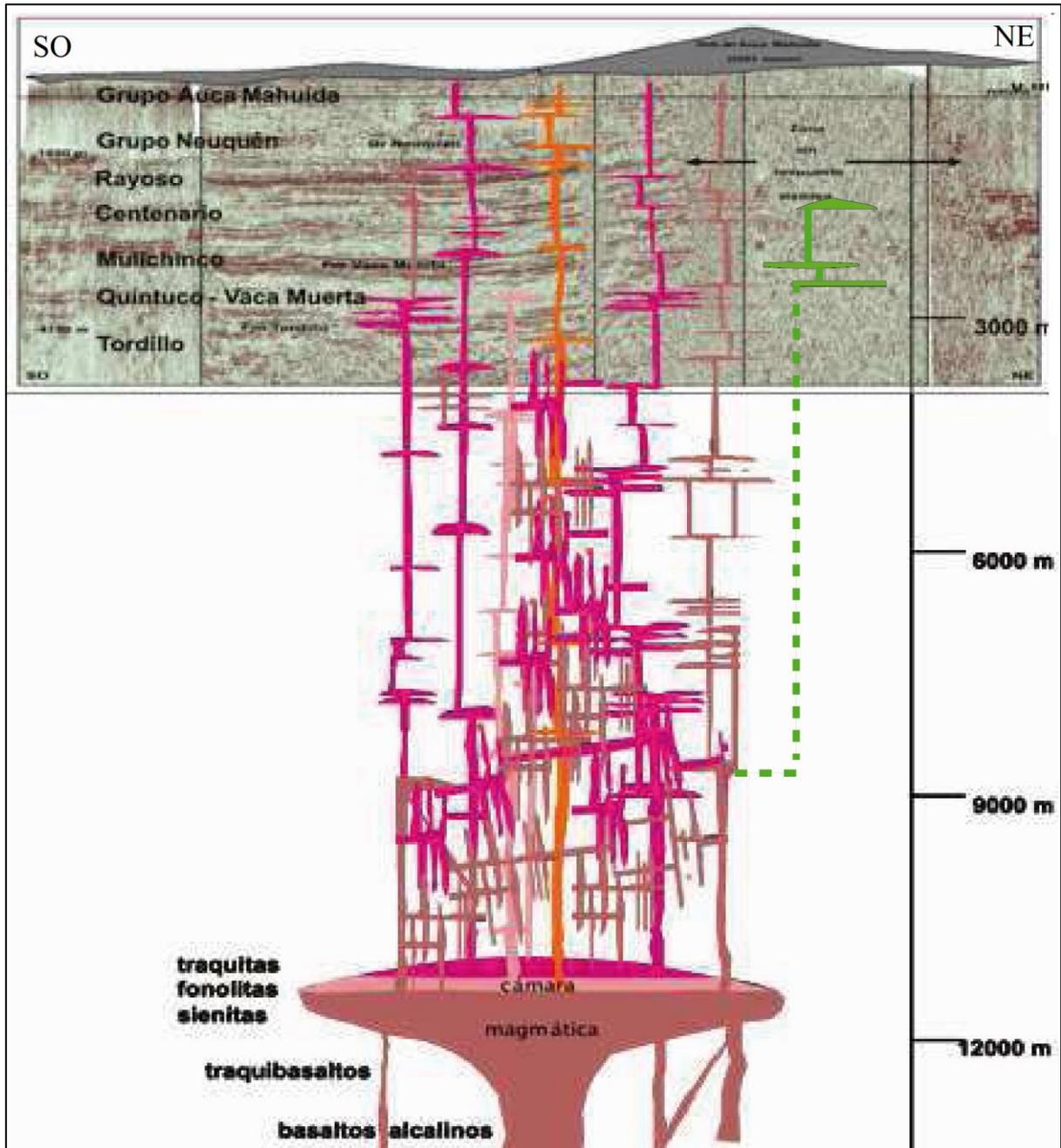


Figura 8.6 – Geometría del subsuelo del volcán Auca Mahuida interpretado a partir de datos sísmicos. Bajo el volcán, en la zona sin dato sísmico, se representaron los cuerpos intrusivos concordantes con la estratigrafía, analizados en este trabajo y sus posibles diques alimentadores (en verde). Figura tomada y modificada de Sigismondi (2012).

### 8.3. Estructura

La existencia de una zona sin dato sísmico 2D o 3D ha dificultado la interpretación de la estructuración sobre la zona más elevada del volcán. Para realizar un análisis que brinde nuevos datos para el entendimiento de la zona, se utilizaron diferentes recursos.

Como se señaló en el capítulo dos, Cristallini *et al.* (2014) mediante el estudio de fallas y fracturas de diferentes pozos ubicados sobre el volcán y líneas sísmicas circundantes comprobaron que existen controles previos producidos por los siguientes elementos: una cubeta precuyana con orientación NNO-SSE o una estructura oblicua en echelón con la misma orientación NNO-SSE sobre fallas de hemigrábenes previos, hemigrábenes precuyanos (NO-SE), reactivaciones de zonas de transferencia precuyanas (NE-SO), tectónica andina compresiva (N-S) y esfuerzos en dirección E-O explicables como una componente de rumbo descompuesta sobre el control primordial del borde de la cubeta precuyana.

La sísmica regional llega hasta la latitud  $37^{\circ}42'S$  al norte y  $37^{\circ}45'S$  al sur, dejando un margen sin datos de 5 km de ancho. Al oeste los datos llegan hasta la longitud  $68^{\circ}84'O$  dejando más de 12 km de ancho sin información. Aun así, son zonas muy cercanas al área de estudio y puede obtenerse información de diferentes maneras. La sísmica interpretada por Roth (2017) en la figura 7.11 muestra fallas que se corresponden con estructuras de carácter regional o local descritas por otros autores (Cristallini *et al.* 2014, Longo. 2017 y Ventura *et al.* 2013). Estas son fallas E-O, N-S, NNO-SSE y en menor medida NE-SO y NO-SE.

Haber trabajado todos los datos en un sistema de información geográfico, permitió la delimitación de nuevos lineamientos correlacionables con los datos sísmicos circundantes. Se marcaron sobre la localidad estudiada lineamientos con orientaciones coincidentes con los anteriores: E-O, NO-SE y NE-SO. Así mismo, también se pudo observar que la falla NO-SE que atraviesa todo el largo del volcán en el trabajo de Ventura *et al.* (2013) es correlacionable con el mapa geológico de Pallares *et al.* (2016) proponiendo que esta estructura podría haber sido utilizada para la extrusión de las coladas basálticas y su disposición sobre el terreno.

Por medio de los perfiles de imágenes en el pozo VAM-100(d) ubicado al oeste dentro del área de estudio (Figura 8.7) se observaron 64 fracturas a lo largo de toda la perforación, 47 cerradas y 17 abiertas. Se denomina fracturas cerradas a aquellas que se encuentran rellenas de material fino como pelitas o con mineralizaciones, en cambio en las fracturas abiertas no se observa un relleno. Las orientaciones principales de estas fracturas son NE-SO con inclinación  $70^{\circ}$ , en promedio, hacia el SE. Subordinadamente se encontraron orientaciones NO-SE y N-S. La mayoría cuentan con inclinaciones de alto ángulo que superan los  $60^{\circ}$ , con pocas excepciones que inclinan  $40^{\circ}$ . En cuanto a las microfallas se encontraron 10 en este pozo, con rumbos de NE-SO. En el pozo RiAIN.a-10, ubicado en el centro-este, se encontraron un total de 69 fracturas a lo largo de toda la perforación, de las cuales 34 son abiertas y 35 cerradas. La tendencia principal del rumbo que predomina en este pozo es ENE-OSO. En mucha menor medida, y con mayor frecuencia en las fracturas cerradas, el rumbo es NO-SE (Figura 8.8). La mayoría de las fracturas cerradas poseen alto ángulo de inclinación, cercanos a  $90^{\circ}$  pero este ángulo disminuye para las fracturas abiertas ( $50^{\circ}$  en promedio). En cuanto a las microfallas, también se encontraron 10 con orientaciones ENE-OSO y una falla de igual rumbo con inclinación de  $70^{\circ}$  hacia el SSE. El ángulo de inclinación de las microfallas tiene un rango de desde  $40^{\circ}$  a  $90^{\circ}$  hacia el SSE.

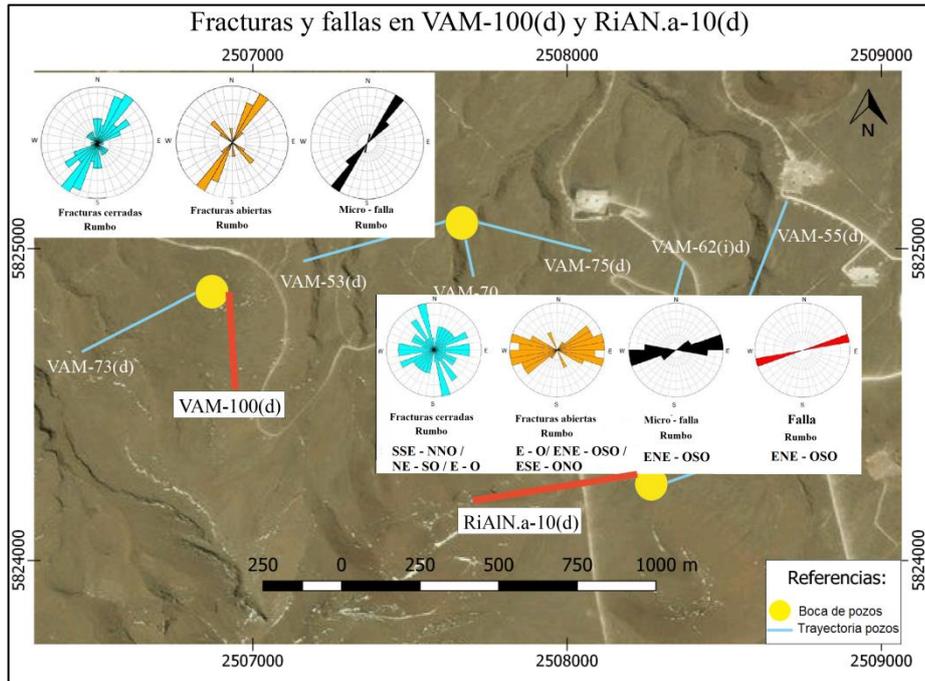


Figura 8.7 – Diagrama de rosas. En color cian se muestran las fracturas cerradas, en naranja las fracturas abiertas, en negro las microfallas y en rojo la falla. Las rosetas ubicadas en la parte superior corresponden al pozo VAM-100(d) mientras que las inferiores corresponden al pozo RialN-10(d). Ambas trayectorias de los pozos se encuentran marcadas en rojo sobre el mapa.

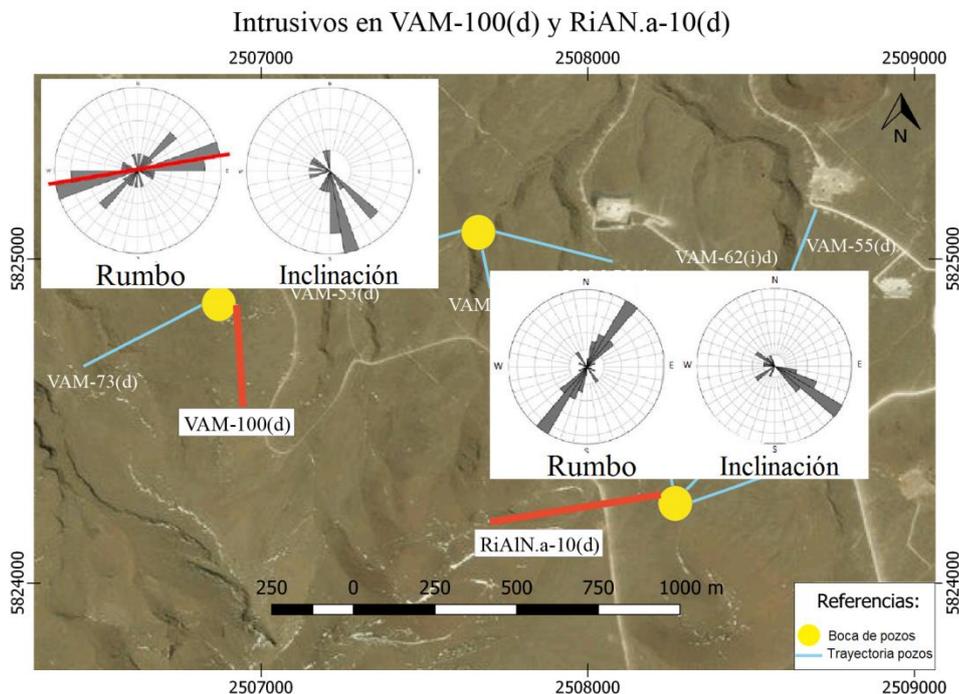


Figura 8.8 – Diagrama de rosas donde se muestran rumbo e inclinación de los cuerpos ígneos. Las rosetas ubicadas en la parte superior corresponden al pozo VAM-100(d) mientras que las inferiores corresponden al pozo RialN-10(d). Ambas trayectorias de los pozos se encuentran marcadas en rojo sobre el mapa.

#### 8.4. Fluidos del sistema petrolero

El estudio de la estructura del terreno y los fluidos encontrados en los ensayos de pozos permitió la delimitación de cuatro bloques hidráulicamente independientes (Figura 7.29) que desvinculan a la Formación Mulichinco en todas sus capas, tal como se observa en las figuras 7.25 y 7.26. Mediante los cálculos de OOIP y OGIP se pudieron determinar los volúmenes de hidrocarburos presentes dentro de cada capa y de cada bloque. El bloque NE se encuentra saturado en agua para todo el espesor de interés. En los bloques NNO y E, el miembro amarillo contiene la mayor reserva probada de 415.959 m<sup>3</sup> (Figura 7.31). En el bloque RiAIN, el mismo miembro (Figura 7.32) se encuentra más elevado en la estructura y, por ese motivo, cuenta con gas (68 Mm<sup>3</sup>). El miembro Rojo Superior sólo contiene petróleo en el bloque NNO (Figura 7.33) y este tiene muy poco volumen (38.410 m<sup>3</sup>). El Miembro Azul, de la misma forma que el anterior, sólo se encuentra mineralizado en el bloque NNO (Figura 7.34), en este caso con gas. El mismo fluido se encuentra en el Miembro Verde para los tres bloques de interés (Figura 7.35). En total el bloque NNO cuenta con una reserva probada de 365.000 m<sup>3</sup> de petróleo y 28,77 Mm<sup>3</sup> de gas, el bloque RiAIN cuenta con 115,32 Mm<sup>3</sup> de gas y el bloque E cuenta con 416 m<sup>3</sup> de petróleo y 18,54 Mm<sup>3</sup> de gas.

La mayoría de los pozos no se encuentran ensayados en los dos miembros inferiores y en donde se encuentran, se les ha puesto un tapón debido a que no se busca producir desde esas capas. Los pozos puestos en producción extraen petróleo, fluido que se encuentra en los estratos superiores. El pozo RiAIN.a-10 posee volúmenes de gas considerables que podrían ser una buena fuente de extracción el día que sea conveniente, encontrándose actualmente como reserva. Aunque las calidades del gas del yacimiento Volcán Auca Mahuida no sean optimas (*com. pers* Ribas 2019) la empresa podría utilizarlo para sus propias instalaciones y así, evitar la compra del mismo

La porosidad efectiva se observa muy similar en los cuatro miembros de la Formación Mulichinco. Posee un mínimo de porosidad de 10 – 11% en el centro de los mapas y un crecimiento hacia los laterales este y oeste. Las máximas porosidades se encuentran en el miembro Amarillo, con un máximo de 15% pero el miembro afectado por la roca ígnea mantiene porosidades de similar magnitud. Estas heterogeneidades semejantes en todos los mapas parecen corresponder a variaciones faciales propias de la formación. La intervención del intrusivo parece no haber sido responsable de una alteración de las propiedades petrofísicas de la roca. Este escenario es comparable a la descripción de Smallwood y Harding (2004) de un *sill* que se encuentra en la cuenca de *Faroe-Shetland* en el Atlántico Norte y, al parecer, no afecta las areniscas donde se intruye. El proceso que parece ocurrir en estas sedimentitas tiene que ver con la liberación de fluidos que podrían haber desplazado los hidrocarburos de areniscas que aparentarían ser buenos reservorios.

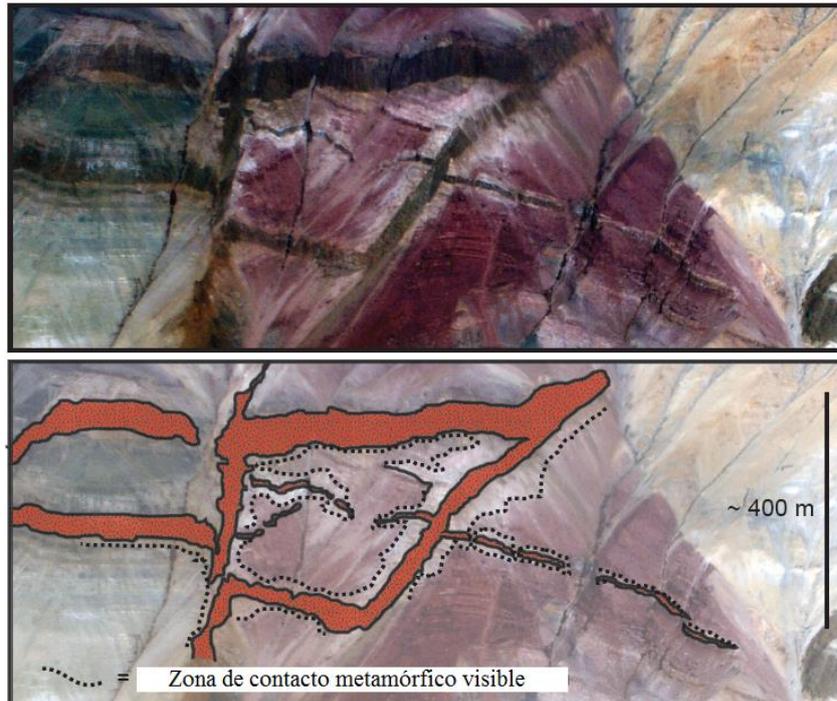


Figura 8.9 – Ejemplo análogo de compartimentalización tipo *Box-Work* por diques y *sills* en un estrato sedimentario en el este de Groenlandia.

En base a los perfiles de imágenes, los diques parecen haber aprovechado los planos de debilidad previos ya que su geometría se condice con las fallas propuestas por Cristallini *et al.* (2014) para la evolución estructural de la comarca. Esto se condice con Magee *et al.* (2013) que propone que muchas zonas de fallas son aprovechadas para la propagación del magma. Esta compartimentalización de las rocas reservorios se denomina *Box-Work* (Figura 8.9) (Holford *et al.* 2013). Como las fallas suelen generar trampas estructurales, esto tiene implicaciones directas tanto en la destrucción de tales trampas como en el posible desarrollo de zonas permeables. A su vez, las intrusiones pueden establecer nuevos caminos de migración si están fracturadas y son permeables o pueden actuar como barreras, como se observa en sellos generados por intrusivos dentro de los pozos con perfiles de imágenes. La figura 8.10 resume los diferentes efectos posibles que crean las intrusiones en un sistema petrolero como el estudiado.

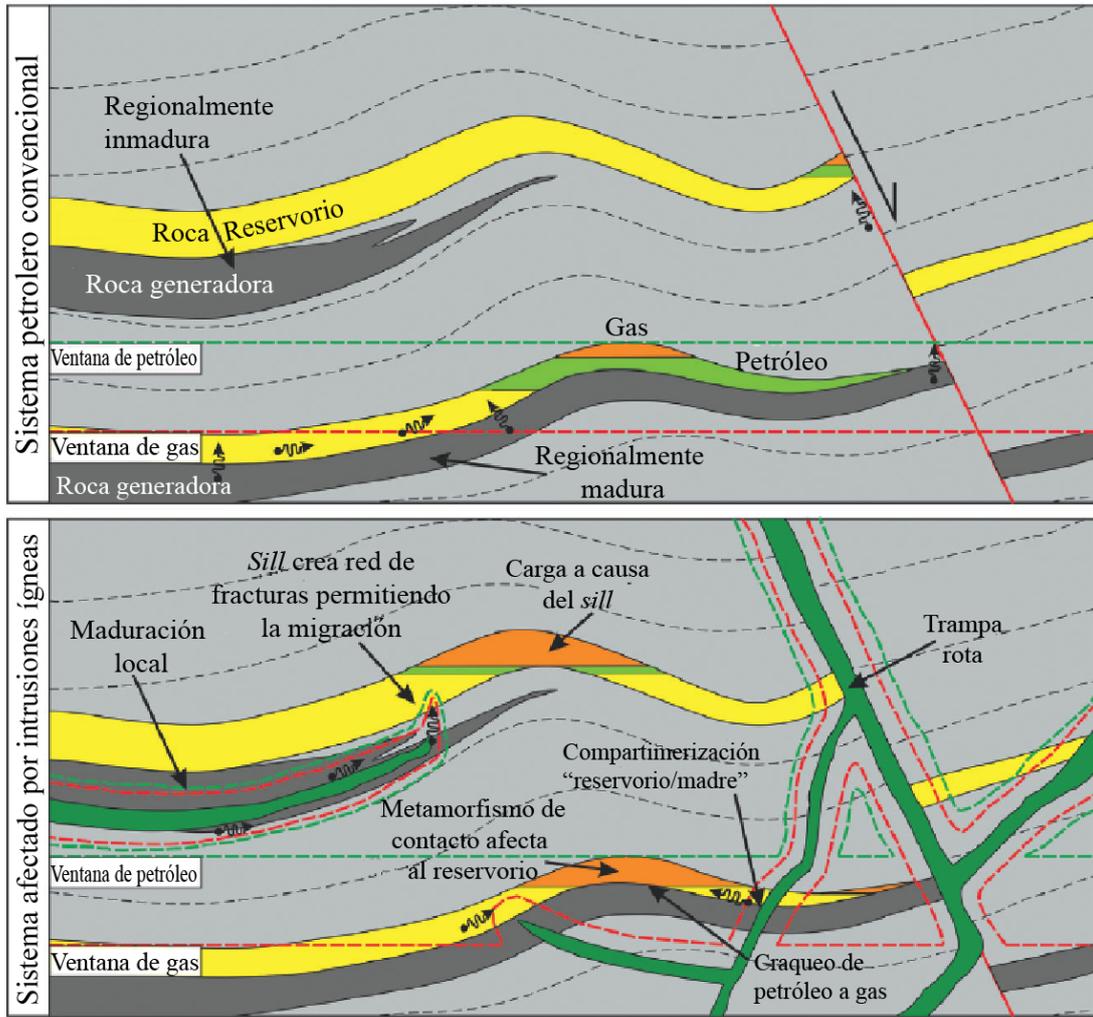


Figura 8.10 – Arriba, funcionamiento de un sistema petrolero convencional donde se muestran las ventanas de generación de petróleo y gas, los diferentes elementos y procesos. Abajo, el mismo sistema en el cual una intrusión aprovechó una falla previa, pero a su vez generó nuevos planos de propagación. Se puede observar las nuevas ventanas de generación en la roca generadora alcanzada por los cuerpos ígneos, las nuevas rutas migratorias, sellos y trampas. Tomado de Senger *et al.* (2017).

## 9. DISCUSIÓN Y PROPUESTAS

El hecho de trabajar sobre una zona sin registro sísmico restringe la información y dificulta una interpretación precisa. Por lo tanto, los pozos aportan información valiosa sobre la secuencia estratigráfica, sus características y geometría para conocer un poco más el impacto que sufrió el sistema petrolero a causa de las intrusiones y donde se modificaron destruyeron o generaron vías de migración, sellos y trampas.

La presencia comprobada de cuerpos intrusivos tipo *sills* dentro de formaciones ricas en materia orgánica infrayacentes, supone la posibilidad de que los procesos metamórficos de contacto en estas rocas generadoras aceleren o mejoren la maduración de hidrocarburos. Aarnes *et al.* (2010) determinó que el espesor de la aureola de contacto generada en estas rocas corresponde entre un 30% y un 250%

del espesor del *sill* e incluso en rocas relativamente pobres en TOC (0,1% Wt) pueden generar cantidades significativas de gas. Se conoce que en el bloque sur del yacimiento Risco Alto – Las Manadas (Aguada San Roque, operado por la compañía Total Austral) existe producción de hidrocarburos de filones capas intruidos en la Formación Vaca Muerta (Ribas, *com. pers.* 2019). Por lo tanto, la evolución de los pozos a objetivos no convencionales podría ser un nuevo destino para el futuro del yacimiento.

La ausencia de ensayos en el cuerpo intrusivo sobre esta zona se traduce en una falta de conocimiento acerca de su función como reservorio. Chevallier *et al.* (2001) propone que las intersecciones entre diques y *sills* (podría ser la intersección entre el dique Coby.x-1 y el lacolito) están asociadas a un mayor fracturamiento y presentan zonas más permeables.

Debido a que el bloque RiAlN es el de mayor tamaño de los bloques productivos y sólo cuenta con un pozo, se propone la inclusión de uno o dos pozos de avanzada para el momento en que comience la extracción de gas. Así mismo, ensayos de pozos que no generaron extracción podrían ser estimulados mecánicamente para lograr retirar el hidrocarburo de estas capas.

Datos de producción muestran la presencia de petróleo en la Formación Centenario Inferior. Ya que en la actualidad el objetivo es la búsqueda de petróleo y a más profundidad en los reservorios convencionales comienza a aparecer gran cantidad de gas, se propone generar ensayos sobre los mismos pozos, pero en las formaciones Centenario Superior y Rayoso. Si bien estas unidades poseen espesores más discontinuos y también enfrentan el desafío de contener diques, pueden tener un buen potencial.

## 10. CONCLUSIONES

A partir del análisis de la información obtenida en los pozos estudiados pudo establecerse que, dentro de la columna estratigráfica del área, los reservorios de interés para el sistema petrolero son las formaciones Mulichinco, Centenario Inferior, Centenario Superior y Rayoso.

Los intrusivos identificados mediante el estudio de pozos, poseen las mismas orientaciones que las estructuras identificadas en perfiles de imágenes de pozo, imágenes satelitales y relevamientos sísmicos de zonas aledañas, coincidiendo a su vez con las estructuras descriptas en los trabajos previos llevados a cabo en la región.

Producto del estudio de la estructura, se concluye que el área de interés se divide en cuatro bloques delimitados por barreras impermeables que desconectan los fluidos en los reservorios. Los intrusivos pudieron haber aprovechado las discontinuidades estructurales preexistentes como una vía favorable para su emplazamiento y propagación, resultando en una compartimentalización de las rocas reservorio de tipo *Box-Work*.

De acuerdo a los análisis estadísticos realizados, puede concluirse que los cuerpos ígneos laminares y los diques intercalados en las rocas sedimentarias se alojan con más frecuencia en el Grupo Neuquén y en la Formación Centenario Inferior. Los diques son de composición traquiandesítica y sienítica y poseen una alta inclinación.

En general, el metamorfismo de contacto suele deteriorar las condiciones petrofísicas en los reservorios circundantes; situación que no se observa en las rocas sedimentarias estudiadas afectadas por el lacolito, ya que no se encuentra disminución en su permeabilidad. En su lugar, a partir de la presencia de agua

en estos niveles, puede inferirse que la intrusión del cuerpo ígneo ha producido una remigración de los fluidos.

Finalmente, el fluido predominante, en la Formación Mulichinco, corresponde a gas. Esto podría deberse al ingreso de la roca generadora a la ventana de gas a causa de la actividad magmática.

## **AGRADECIMIENTOS**

A YPF S.A. por proveerme la información necesaria, el espacio y el software para realizar este trabajo.

A la Universidad Nacional de Río Negro y a la universidad pública en general, por brindar la posibilidad de que me forme profesionalmente.

A mis directores de trabajo final, Soledad y Darío, por su dedicación, paciencia y formación académica.

A Sergio Voglino, por el incentivo y la paciencia.

A mi mamá y mi abuela, por el apoyo y amor incondicional.

## 11. BIBLIOGRAFÍA

- Aarnes, I., Svensen, H., Connolly, J.A.D. and Podladchikov, Y.Y. 2010. How contact metamorphism can trigger global climate changes: Modeling gas generation around igneous sills in sedimentary basins. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74, 7179–7195.
- Aguirre Urreta, M.B. y Rawson, P.F. 1997. The ammonite sequence in the Agrio Formation (Lower Cretaceous), Neuquén Basin, Argentina. *Geological Magazine* 134: 449-458.
- Aguirre Urreta, M.B. Tunik, M., Naipauer, M., Pazos, P., Ottone, E., Fanning, M. y Ramos, V.A. 2010. Malargüe Group (Maastrichtian – Danian) deposits in the Neuquén Andes, Argentina: implications for the onset of the first Atlantic transgression related to Western Gondwana break-up. *Gondwana Research* doi: 10.1016/j.gr.2010.06.008
- Aguirre Urreta, B., Vennari, V., Lescano, M., Naipauer, M., Concheyro, A. y Ramos, V. 2014. Bioestratigrafía y Geocronología de alta resolución de la Formación Vaca Muerta, Cuenca Neuquina. IX Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos. Mendoza. Argentina
- Arregui, C., Carbone, O. y Leanza, H.A. 2011(a). Contexto tectosedimentario. En Leanza, H.A., Arregui, C., Carbone, O., Danieli, J.C. y Vallés J.M. (Eds.) *Geología y Recursos Naturales de la Provincia del Neuquén*, 29-36, Neuquén.
- Arregui, C., Carbone, O. y Martínez, R. 2011(b). El Grupo Cuyo (Jurásico temprano – medio) en la Cuenca Neuquina. En Leanza, H.A., Arregui, C., Carbone, O., Danieli, J.C. y Vallés J.M. (Eds.) *Geología y Recursos Naturales de la Provincia del Neuquén*, 77-90, Neuquén.
- Astini, R.A. 1996. Las fases diastóricas del Palaeozoico medio en la Precordillera del oeste argentino. 13° Congreso Geológico Argentino y 3° Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Buenos Aires, Actas 5, 509–526.
- Beatove, M., Ribas, S. y Villar Benvenuto, M. 2016. Desarrollo-Activo VAM. Análisis de afloramientos, coronas y registros de imágenes de pozo de la Formación Rayoso. Informe interno. 27 pp.
- Bermúdez, A.M y Delpino. 2002. Estudio de las secuencias extrusivas en el volcán Auca Mahuida. Informe interno preliminar. 32 pp.
- Bermúdez, A. y Delpino, D., 1998, Estudio de testigos corona de rocas ígneas intrusivas reservorios de hidrocarburos y de las secuencias del Volcán Auca Mahuida. Repsol YPF. Reporte sin publicar.
- Bermúdez, A., Delpino, D., Zencich, S. y Bolatti, N. 2000. Evolución volcanológica y petrológica del sector sur del campo volcánico Auca Mahuida, provincia del Neuquén, Argentina. *Actas IX Cong. Geol. Chileno* 2:1–6, Puerto Varas.
- Brown, J., Davis, B., Gawankar, K., Kumar, A., Li, B., Miller, C., Laronga, R. y Schlicht, P. 2015. Generación de imágenes de pozo. Schlumberger. *Oilfield review*, 27(2): 1-20.

- Burd, A.I., Booker, J.R., Mackie, R., Favetto, A y Pomposiello, C. 2014. Three-dimensional electrical conductivity in the mantle beneath the Payún Matrú Volcanic Field in the Andean backarc of Argentina near 36.5°S: evidence for decapitation of a mantle plume by resurgent upper mantle shear during slab steepening. *Geophys. J. Int. GJI Geodynamics and tectonics*. 198, 812–827.
- Casadío, S. y Montagna, A. O. 2015. Estratigrafía de la Cuenca Neuquina. En: Ponce, J. J., Montagna, A. O. y Carmona, N. (Eds.): *Geología de la Cuenca Neuquina y sus sistemas petroleros*. Fundación YPF: 8-21. Neuquén.
- Cazau, L.B. & Uliana, M.A. 1973. El Cretácico superior continental de la Cuenca Neuquina. 5° Congreso Geológico Argentino, Actas 3: 131-163. Buenos Aires
- Chevallier, L., Goedhart, M. and Woodford, A.C. 2001. The influences of dolerite sill and ring complexes on the occurrence of groundwater in Karoo fractured aquifers: a morpho-tectonic approach. *Water Resource Commission Reports, WRC Report No. 937/1/01*, 165.
- Cingolani, C.A., Zanettini, J. y Leanza, H.A. 2011. El basamento ígneo y metamórfico. En Leanza, H.A., Arregui, C., Carbone, O., Danieli, J.C. y Vallés J.M. (Eds.) *Geología y Recursos Naturales de la Provincia del Neuquén*, 37-47, Neuquén.
- Cristallini, E.O., Martínez, J.M., Sánchez, E., Periale Gómez, S. y Loncarich, A. 2005. “Evaluación estructural del bloque Bandurria (Provincia del Neuquén, Argentina)”. YPF, 73 p., Bs As.
- Cristallini, E.O, Tomezzoli, R., Méndez, M.A., Santiago, E., Villar Benvenuto, M. y Ghiglione, F. 2014. Caracterización estructural y evolución tectónica de la región de los cerros Auca Mahuida y Bayo (Provincia del Neuquén). YPF. Informe interno.
- Cruz, C.E., Boll, A., Gómez Omil, R., Martínez, E.A., Arregui, C., Gulisano, C., Laffitte, G.A. y Villar, E.J. 2002. Hábitat de hidrocarburos y sistemas de carga Los Molles y Vaca Muerta en el sector central de la Cuenca Neuquina. Argentina. IAPG. V Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos. Mar del Plata.
- Dellapé, D.A., Pando, G.A., Uliana, M.A. y Musacchio, E.A. 1978. Foraminíferos y ostrácodos del Jurásico en las inmediaciones del arroyo Picún Leufú y la ruta 40 (Provincia del Neuquén, Argentina) con algunas consideraciones sobre la estratigrafía de la Formación Lotena. 7° Congreso Geológico Argentino, Actas 2: 489-507. Buenos Aires.
- Delpino, D.H. y Bermúdez, A.M. 2009. Petroleum systems including unconventional reservoirs in intrusive igneous rocks (sills and laccoliths). *Lead. Edge* 28, 804–81.
- Digregorio, J. H. 1972. Neuquén. En: Leanza, A.F. (Ed.): *Geología Regional Argentina*. Academia Nacional de Ciencias. República Argentina. pp. 439-506. Córdoba.
- Dingus, L., Garrido, A.C., Scott, G.R., Chiappe, L.M., Clarke, J. y Schmitt, J.G. 2009. The litho-, bio-, and magnetostratigraphy of titanosaurian nesting sites in the Anacleto Formation at Auca Mahuevo (Campanian, Neuquén Province, Argentina). En: Barry Albright III, L. (Ed.): *Papers on Geology, Vertebrate Paleontology, and Biostratigraphy in Honor of Michael O. Woodburne*. Museum of Northern Arizona Bulletin 65: 237-258.

- Estrada E., Méndez, F., Saavedra, B., Gozalvez, G & Naidés, C. 2008. Evaluación de reservorios carbonáticos de la Formación Quintuco, Cuenca Neuquina. Aplicaciones y Características de herramientas geoquímicas. Baker Hughes/Atlas-PETROBRAS.
- Eide, C.H., Schofield, N., Jerram, D.A., Howell, J.A., 2016. Basin-scale architecture of deeply emplaced sill complexes: Jameson Land. East Greenland. *J. Geol. Soc. London*, 174, 23–40. Doi: 10.1144/jgs2016-018.
- Folguera, A., Spagnuolo M., Rojas Vera<sup>1</sup>, E., Litvak<sup>1</sup>, V., Orts, D y Ramos, V.A. 2011. Magmatismo Neógeno y Cuaternario. En Leanza, H.A., Arregui, C., Carbone, O., Danieli, J.C. y Vallés J.M. (Eds.) *Geología y Recursos Naturales de la Provincia del Neuquén*, 91-98, Neuquén.
- Franchini, M.B., López Escobar, L., Schalamuk, I.B.A y Meinert, L.D. 2003. Paleocene, calc-alkaline subvolcanic rocks from Nevazón Hill area (NW Chos Malal Fold Belt), Neuquén, Argentina, and comparison with granitoids of the Neuquén-Mendoza volcanic province. *Journal of South America Earth Sciences* 16(5): 399-422.
- Galland, O., Bertelsen, H.S., Eide, C.H., Guldstrand, F., Haug, Ø.T., Leanza, H.A., Mair, K., Palma, O., Planke, S., Rabbell, O, Rogers, B., Schmiedel, T., Souche, A. y Spacapan, J.B. 2018. Storage and Transport of Magma in the Layered Crust—Formation of Sills and Related Flat-Lying Intrusions. En: Burchardt, S (Ed). *Volcanic and Igneous Plumbing Systems*, 113-138, Sweden.
- García Morabito, E. 2010. Tectónica y estructura del retroarco andino, entre los 38°15' y los 40° S. Tesis Doctoral, Universidad de Buenos Aires, (inérita), 283 p. Buenos Aires.
- García Morabito, E. y Ramos, V. A. 2011 La Precordillera Neuquina Sur en el contexto de los Andes Nordpatagónicos. En Leanza, H.A., Arregui, C., Carbone, O., Danieli, J.C. y Vallés J.M. (Eds.) *Geología y Recursos Naturales de la Provincia del Neuquén*, 355-366, Neuquén.
- García Sansegundo, J., Farias, P., Gallastegui, G., Giacosa, R.E. y Heredia, N. 2009. Structure and metamorphism of the Gondwanan basement in the Bariloche region (North Patagonian Argentine Andes). *International Journal of Earth Sciences* 98:1599-1608.
- Garrido, A.C. 2011. El Grupo Neuquén (Cretácico Tardío) de la Cuenca Neuquina. En Leanza, H.A., Arregui, C., Carbone, O., Danieli, J.C. y Vallés J.M. (Eds.) *Geología y Recursos Naturales de la Provincia del Neuquén*, 231-244, Neuquén.
- Gianni, G.M., García, H., Lupari, M. Pesce, A y Folguera, A. Plume overriding triggers shallow subduction and orogeny in the southern Central Andes. *Gondwana Research*. doi: 10.1016/j.gr.2017.06.011
- Goodall, T.M., North, C.P. y Glennie, K. W., 2000. Surface and subsurface sedimentary structures produced by salt crusts. *Sedimentology*, v. 47, p. 99-118
- Groeber, P. 1946. Observaciones geológicas a lo largo del meridiano 70°. 1. Hoja Chos Malal. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 1(3): 177-208.
- Gulisano, C.A. 1981. El ciclo cuyano en el norte de Neuquén y sur de Mendoza. 8° Congreso Geológico Argentino 3: 573-592. San Luis.

- Gulisano, C.A. y Gutiérrez Pleimling, A. 1995. Field guide: The Jurassic of the Neuquén Basin. a) Neuquén province. Asociación Geológica Argentina, Serie E, 2: 1-111. Buenos Aires.
- Gulisano, C.A., Gutiérrez Pleimling, A. y Digregorio, R.E. 1984. Análisis estratigráfico del intervalo Tithoniano - Valanginiano (Formaciones Vaca Muerta - Quintuco y Mulichinco) en el suroeste de la provincia del Neuquén. 9° Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 221-235. Buenos Aires.
- Holford, S., Schofield, N., Jackson, C., Magee, C., Green, P. y Duddy, I. 2013. Impacts of igneous intrusions on source and reservoir potential in prospective sedimentary basins along the western Australian continental margin. West Australian Basins Symposium. Pp. 13
- Howell, J.A., Schwarz, E., Spalletti, L.A. y Veiga, G.D. 2005. The Neuquén Basin: an overview. En: Veiga, G.D., Spalletti, L.A., Howell, J.A. y Schwarz, E. (Eds.): The Neuquén Basin: a Case Study in Sequence Stratigraphy and Basin Dynamics. Geological Society Special Publication 252: 1-14. Londres.
- Herrero Ducloux, A. 1946. Contribución al conocimiento geológico del Neuquén Extra-andino. Boletín de Informaciones Petroleras, 266: 245-280.
- Kay, S.M., Ramos, V.A., Mpodozis, C. y Sruoga, P. 1989. Late Paleozoic to Jurassic silicic magmatism at the Gondwanaland margin: analogy to the Middle Proterozoic in North America? *Geology* 17(4): 324-328.
- Kay, S.M., Gorring, M.L., Ramos V.A. 2004. Magmatic sources, setting and causes of Eocene to Recent Patagonian plateau magmatism (36°S–52°S latitude). *Revista de la Asociación Geológica Argentina*. 59:556–568.
- Kay, S.M., Burns, M. y Copeland, P. 2006. Upper Cretaceous to Holocene magmatism and evidence for transient Miocene shallowing of the Andean subduction zone under the northern Neuquén Basin. En: Kay, S.M. y Ramos, V.A. (Eds.): Evolution of an Andean Margin: A tectonic and magmatic view from the Andes to the Neuquén Basin (35-39°S). Geological Society of America, Special Paper 407: 19-60.
- Kay, S.M., Jones, H.A. y Kay, R.W. 2013. Origin of Tertiary to Recent EM- and subduction-like chemical and isotopic signatures in Auca Mahuida region (37–38S) and other Patagonian plateau lavas. *Contrib. Mineral Petrol.* 166:165–192
- Keidel, J. 1922. Sobre la distribución de los depósitos glaciares del Pérmico conocidos en Argentina y su significación para la estratigrafía de la Serie de Gondwana y la paleogeografía del hemisferio austral. *Boletín Academia Nacional de Ciencias* 25: 239-368, Córdoba.
- Leanza, H.A. 1973. Estudio sobre los cambios faciales de los estratos limítrofes Jurásico - Cretácicos entre Loncopué y Picún Leufú, provincia del Neuquén, República Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 28 (2): 97-132. Buenos Aires.

- Leanza, H.A. 1992. Estratigrafía del Paleozoico y Mesozoico anterior a los Movimientos Intermálmicos en la comarca del Cerro Chachil, provincia del Neuquén, Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 45 (3-4): 272-299.
- Leanza, H.A. 2003. Las Sedimentitas Huitrinianas y Rayosianas (Cretácico Inferior) en el ámbito central y meridional de la Cuenca Neuquina, Argentina. *Servicio geológico Minero Argentino, Serie Contribuciones Técnicas, Geología 2*: 1-31. Buenos Aires.
- Leanza, H.A. 2009. Las principales discordancias del Mesozoico de la Cuenca Neuquina según observaciones de superficie. *Revista del Museo Argentino de Ciencias Naturales, Nueva Serie* 11 (2): 145-184. Buenos Aires.
- Leanza, H.A., Sattler, F., Martínez, R.S. y Carbone, O. 2011. La Formación Vaca Muerta y equivalentes (Jurásico Tardío – Cretácico Temprano) en la Cuenca Neuquina. En Leanza, H.A., Arregui, C., Carbone, O., Danieli, J.C. y Vallés J.M. (Eds.) *Geología y Recursos Naturales de la Provincia del Neuquén*, 113-130, Neuquén.
- Leanza, H.A. y Wiedmann, J. 1989. Nuevos ammonites del Berriasiano/Valanginiano (Cretácico Inferior) del Neuquén, Argentina. En: Wiedmann, J. (Ed.): *Cretaceous of the western Tethys. Proceed. 3<sup>o</sup>. International Cretaceous System Symposium. Tübingen (1987)*: 793-810. E. Schweizerbart'sche Verlag. Stuttgart.
- Legarreta, L. y Uliana, M.A. 1999. El Jurásico y Cretácico de la Cordillera Principal y la cuenca Neuquina. Facies sedimentarias. En: Caminos, R. (Ed.): *Geología Argentina. Servicio Geológico Minero Argentino. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Anales* 29 (16): 399-416.
- Llambías, E. 2008. *Geología de los cuerpos ígneos. Asociación Geológica Argentina. Serie B – Didáctica y Complementaria N° 29*. 222 pp.
- Llambías, E., Bertotto, G.W., Risso, C y Hernando, I. 2010. El volcanismo cuaternario en el retroarco de Payenia: Una revisión. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 67(2): 278–300.
- Llambías, E., Leanza, H.A. y Carbone, O. 2007. Evolución tectonomagmática durante el Pérmico al Jurásico Temprano en la cordillera del Viento (37° 05' S – 37° 15' S): nuevas evidencias geológicas y geoquímicas del inicio de la Cuenca Neuquina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 62(2): 217-235.
- Llambías, E. y Sato, A.M. 2011. Evolución Ciclo Gondwánico: La provincia magmática Choiyoi en Neuquén. En Leanza, H.A., Arregui, C., Carbone, O., Danieli, J.C. y Vallés J.M. (Eds.) *Geología y Recursos Naturales de la Provincia del Neuquén*, 335-348, Neuquén.
- Longo, L.M. 2017. Caracterización de la estructura del complejo volcánico Auca Mahuida mediante datos aeromagnéticos y gravimétricos. *Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas Universidad Nacional de La Plata*. Pp 185.

- Longo, L. M., De Ritis, R., Ventura, G. & Chiappini, M., 2015, Analysis of the Aeromagnetic Anomalies of the Auca Mahuida Volcano, Patagonia, Argentina, *Pure and Applied Geophysics*, 172 (8), p. 2083-2332. Doi: 10.1007/s00024-015-1161-3.
- Lorenzo Pulido, C., Soto Peredo, J., Palma Guzmán, H., Diez León, H. y Pérez Esquivias, H. 2013. Registro perfilado sísmico vertical (VSP) en el pozo inyector AZ-03 del campo geotérmico de Los Azufres. *Geotermia*, Vol. 26, No.1, 3-13
- Magee, C., Jackson, C.A. y Schofield, N. 2013. The influence of normal fault geometry on igneous sill emplacement and morphology. *Geology*, 41(4), 407-410
- Magoon, L. y Dow, W. 1994. The petroleum system. En Magoon y Dow (Ed.). *The Petroleum System-From Source to Trap*. AAPG Memoir 60: 3-24.
- Malimachi, D., Ribas, S., Paris, M., Grisolia, J y Crespo, G. 2017. New Borehole Imaging for OBM Systems. Auca Mahuida Volcano and Las Manadas Fields, Neuquen, Argentina. Society of petroleum engineers. Pp 16.
- Méndez, V., Zanettini, J.C.M. y Zappettini, E.O. 1995. Geología y metalogénesis del Orógeno Andino Central, República Argentina. *Secretaría de Minería, Anales* 23: 1-190.
- Mosquera, A. y Ramos, V.A. 2006. Intraplate deformation in the Neuquén Basin. En: Kay, S.M. y 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: 97-124.
- Mpodozis, C. y Kay, S.M. 1990. Provincias magmáticas ácidas y evolución tectónica de Gondwana. Andes Chilenos, 28-31° S. *Revista Geológica de Chile* 17(2): 153-180.
- Mpodozis, C. y Ramos, V.A. 1989. The Andes of Chile and Argentina. En G.E. Ericksen, M.T. Cañas Pinochet y J.A. Reinemud (eds.) *Geology of the Andes and its relation to hydrocarbon and mineral resources*. Circumpacific Council for Energy and Mineral Resources, Earth Sciences Series 11: 59-90.
- Mpodozis, C. y Ramos, V.A. 2008. Tectónica jurásica en Argentina y Chile: extensión, subducción oblicua, *rifting*, deriva y colisiones. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 63 (4): 481 - 497
- Nicolini, L. 2017. Imagen micro-resistiva geoxplorer. Baker Hughes. Informe interno.
- Pallares, C., Quidelleur, X., Gillot, P.Y., Kluska, J.M., Tchilinguirian, P. y Sarda, P. 2016. The temporal evolution of back-arc magmas from the Auca Mahuida shield volcano (Payenia Volcanic Province, Argentina). *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 323: 19–37.
- Pankhurst, R.J., Rapela, C.W., Fanning, C.M. y Márquez, M. 2006. Gondwanide continental collision and the origin of Patagonia. *Earth Science Reviews* 76:235-257.

- Pesicek, J.D., Engdahl, E.R., Thurber, C.H., DeShon, H.R. y Lange, D. 2012. Mantle subducting slab structure in the region of the 2010 M8.8 Maule earthquake (30–40°S), Chile, *Geophys. J. Int.*, 191, 317–324.
- Ploszkiewicz, J.V., Orchuela, I.A., Vaillard, J.C. y Viñes, R.F. 1984. Compresión y desplazamiento lateral en la zona de Falla Huincul: estructuras asociadas, provincia del Neuquén. 9° Congreso Geológico Argentino, Actas 2: 163-169. Buenos Aires.
- Ramos, V.A. 1978. Estructura. En Yrigoyen M. R. (ed.) *Geología y Recursos Naturales del Neuquén*. 7° Congreso Geológico Argentino (Buenos Aires), Relatorio: 99-118.
- Ramos, V.A. 1981. Descripción geológica de la Hoja 33c, Los Chihuidos Norte. *Boletín Servicio Geológico Nacional*, Boletín 182: 1-103.
- Ramos, V.A. 1984. Patagonia: ¿Un continente Palaeozoico a la deriva? 9° Congreso Geológico Argentino (Bariloche), Actas 2, 311–325.
- Ramos V.A. 1999. Evolución tectónica de la Argentina. En: Caminos, R. (Ed.): *Geología Argentina*. Servicio Geológico Argentino, Anales 29: 715-784.
- Ramos, V.A. 2008. Patagonia: A Paleozoic continent a drift? *Journal of South American Earth Sciences* 26(3): 235-251.
- Ramos, V.A. 2010. The tectonic regime along the Andes: Present settings as a key for the Mesozoic regimes. *Geological Journal* 45: 2-25.
- Ramos V.A. y Folguera, A. 2005. Tectonic evolution of the Andes of Neuquén: Constraints derived from the magmatic arc and foreland deformation En: Veiga, G.D., Spalletti, L.A., Howell, J.A. y Schwarz, E. (Eds.): *The Neuquén Basin: A case study in sequence stratigraphy and basin dynamics*. The Geological Society, Special Publication 252: 15-35.
- Ramos, V.A., Jordan, T.E., Allmendinger, R.W., Mpodozis, C., Kay, S. M., Cortés, J.M. y Palma, M. 1986. Paleozoic Terranes of the Central Argentine-Chilean Andes. *Tectonics* 5. 855-880.
- Ramos, V.A. y Kay, S.M. 1991. Triassic rifting and associated basalts in the Cuyo basin, central Argentina. En: Harmon, R.S. y Rapela, C.W. (Eds.): *Andean Magmatism and its Tectonic Setting*, Geological Society of America, Special Paper 265: 79-91.
- Ramos, V.A. y Kay, S.M. 2006. Overview of the Tectonic Evolution of the Southern Central Andes of Mendoza and Neuquén (35°- 39°S Latitude). En: Kay, S.M. y 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: 1-18.
- Ramos, V.A., Mosquera, A., Folguera, A. y García Morabito, E. 2011. Evolución tectónica de los Andes y del engolfamiento neuquino adyacente. En Leanza, H.A., Arregui, C., Carbone, O., Danieli, J.C. y Vallés J.M. (Eds.) *Geología y Recursos Naturales de la Provincia del Neuquén*, 335-348, Neuquén

- Ribas, S., Ghigliione, F., Roth, R., Carrizo, N., Villar, M. y Beatove, M. 2018. Informe modelo geológico Rayoso – Centenario Inferior – Mulichinco. Volcán Auca Mahuida/Las Manadas. Informe interno. Pp 121
- Riccardi A.C., Damborenea, S.E., Manceñido, M.O., Scasso, R. Lanés, S. e Iglesia Llanos. M.P. 1997. Primer registro de Triasico marino fosilifero de la Argentina. Revista de la Asociación Geologica Argentina, 52 (2): 228-234.
- Rodríguez, M.F. 2011. El Grupo Malargüe (Cretácico Tardío – Paleógeno temprano) en la Cuenca Neuquina. En Leanza, H.A., Arregui, C., Carbone, O., Danieli, J.C. y Vallés J.M. (Eds.) Geología y Recursos Naturales de la Provincia del Neuquén, 245-264, Neuquén.
- Rodriguez Monreal, F., Villar, H.J., Baudino, R., Delpino, D. y Zencich, S. 2009. Modeling an atypical petroleum system: A case study of hydrocarbon generation, migration and accumulation related to igneous intrusions in the Neuquen Basin, Argentina. Marine and Petroleum Geology 26: 590–605.
- Rossello EA, Cobbold PR, Diraison M, Arnaud N (2002) Auca Mahuida (Neuquén basin, Argentina): a quaternary shield volcano on a hydrocarbon-producing substrate. In: 5th international symposium Andean Geodynam Toulouse, pp 549–552.
- Roth, R. 2017 Adquisición ZVSP – *Walkaway*: Pozo RiAlN.a-10(d). Baker Hughes. Informe interno, 6 p.
- Scheuber, E., Bogdanic, T., Jensen, A. y Reutter, K.J. 1994. Tectonic development of the North Chilean Andes in relation to plate convergence and magmatism since the Jurassic. En Reutter, K.-J, Scheuber, E. y Wigger, P.J. (eds.) Tectonics of the Southern Central Andes, Structure and evolution of an active continental margin, 121-139, Springer-Verlag.
- Schwarz, E. 2007. Caracterización facial, paleoambiental y estratigráfico secuencial de la Formación Mulichinco en el yacimiento Volcán Auca Mahuida (Pcia. del Neuquén). Desarrollo Área Catriel. Unidad de Negocios Argentina Oeste. REPSOL-YPF (informe interno).
- Senger, K., Millett, J., Planke, S., Ogata, K., Eide, C.H., Festøy, M., Galland, O., Jerram, D.A. 2017. Effects of igneous intrusions on the petroleum system: a review. First Break 35, 47–56.
- Shchepetkina, A. 2018. Sedimentological and ichnological analyses of the Centenario Formation (Cretaceous), Neuquén Basin: facies, paleogeographic and sequence stratigraphic controls. Informe preparado para YPF. 179 pp.
- Sigismondi, M.E. 2012. Estudio de la deformación litosférica de la cuenca Neuquina: estructura termal, datos de gravedad y sísmica de reflexión. Tesis doctoral. Biblioteca Digital FCEN-UBA. 381 pp.
- Silvestro, J. y Zubiri, M. 2008. Convergencia oblicua: modelo estructural alternativo para la dorsal Neuquina (39°S) - Neuquén. Revista de la Asociación Geológica Argentina 63(1): 49-64.

- Spacapan, J.B., Galland, O., Leanza, H.A. y Planke, S. 2016. Igneous sill and finger emplacement mechanism in shaledominated formations: a field study at Cuesta del Chihuido, Neuquén Basin, Argentina. *Journal of the Geological Society*. University of California-San Diego
- Spacapan, J.B., Palma, O., Rocha, E., Leanza, L.A., D'odorico, A., Rojas Vera, E.A., Manceda, R., Galland, O., Medialdea, A. y Cattaneo, D. 2018. Maduración de las Formaciones Vaca Muerta y Agrio ocasionado por el emplazamiento de un complejo intrusivo magmático en el sector sur mendocino de la Cuenca Neuquina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 75 (2): 199-209.
- Steinmann, G. 1910. Gebirgsbildung und Massengesteine in der Kordillere Sudamerikas. *Geologische Rundschau* 1: 13-35.
- Stipanovic, P.N., Rodrigo, F., Baulies O.L y Martínez, C.G. 1968. Las formaciones presenonianas del denominado Macizo Nordpatagónico y regiones adyacentes. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 23 (2): 367-388. Buenos Aires.
- Tunik, M.A., Folguera, A., Naipauer, M., Pimentel, M. y Ramos, V.A. 2010. Early uplift and orogenic deformation in the Neuquén Basin: Constraints on the Andean uplift from U–Pb and Hf isotopic data of detrital zircons. *Tectonophysics*. *Tectonophysics* 489(1-4): 258-273.
- Uliana, M.A. y Dellapé, D.A. 1981. Estratigrafía y evolución paleoambiental de la sucesión eoterciaria del Engolfamiento Neuquino (Patagonia septentrional). 8° Congreso Geológico Argentino, Actas 3: 673-711.
- Urien, C. M. y Zambrano, J. J. 1994. Petroleum System in the Neuquen Basin, Argentina. The petroleum System from source to trap. *American Association Petroleum Geologist Memoir*. 60: 513-534
- Ventura, G., De Ritis, R., Longo, M y Chiappini, M. 2013. Terrain characterization and structural control of the Auca Mahuida volcanism (Neuquén Basin, Argentina). *International Journal of Geographical Information Science*. Vol. 27, No. 7, 1469–1480, <http://dx.doi.org/10.1080/13658816.2012.741241>
- Vergani, G.D., Arregui, C. y Carbone, O. 2011. Sistemas petroleros y tipos de entrampamientos en la Cuenca Neuquina. En Leanza, H.A., Arregui, C., Carbone, O., Danieli, J.C. y Vallés, J.M. (eds.) *Relatorio Geología y Recursos Naturales de la Provincia del Neuquén*: 645-656, Neuquén.
- Vergani, G.D., Tankard, A.J., Belotti, H.J. y Welsink, H.J. 1995. Tectonic Evolution and paleogeography of the Neuquén Basin, Argentina. En: Tankard, A.J., Suárez Soruco, R. y Welsink, H.J. (Eds.): *Petroleum Basins of South America*. *American Association of Petroleum Geologists Memoir* 62: 383-402.
- Vicente, J.C. 2005. Dynamic paleogeography of the Jurassic Andean Basin: pattern of transgression and localisation of main straits through the magmatic arc. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 60(1): 221-250.

- Vottero, A. J. y González, J.M. 2002. Los reservorios de la Formación Mulichinco. En: M. Schiuma, G. Hinterwimmer & G. Vergani (Eds.), Rocas Reservorio de las Cuencas productivas de la Argentina. V Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos: 383 –400. Mar del Plata.
- Weaver, C.E. 1931. Paleontology of the Jurassic and Cretaceous of West Central Argentina. University of Washington. Memoir 1: 1-469. Seattle.
- Windhausen, A. 1929. Geología Argentina. Primera parte. Geología General o Dinámica. Editorial Peuser, 435 p., Buenos Aires.
- Zamora Valcarce, G., Zapata, T., del Pino, D. y Ansa, A. 2006. Structural evolution and magmatic characteristics of the Agrio fold-and-thrust belt. En Kay, S.M. y Ramos, V.A. (eds.) Evolution of an Andean margin: A tectonic and magmatic view from the Andes to the Neuquén Basin (35°-39°S lat), Geological Society of America, Special Paper 407: 125-145.
- Zamora Valcarce, G., Zapata, T., Ramos, V.A., Rodríguez, F. y Bernardo, L.M. 2009. Evolución tectónica del Frente Andino en Neuquén. Revista de la Asociación Geológica Argentina. 65 (1): 192-203.
- Zapata, T.R., Córscico, S., Dzelalija, F., y Zamora Valcarce, G. 2002. La faja plegada y corrida del Agrio: Análisis estructural y su relación con los estratos terciarios de la cuenca neuquina, Argentina. 5° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos (Mar de Plata), Actas digitales.
- Zapata, T. y Folguera, A. 2005. Tectonic evolution of the Andean Fold and Thrust Belt of the southern Neuquén Basin, Argentina. En: Veiga, G.D., Spalletti, L.A., Howell, J.A. y Schwaerz, E. (Eds.): The Neuquén Basin: A case study in sequence stratigraphy and basin dynamics. The Geological Society, Special Publication 252: 37-56.
- Zavala, C. y Ponce, J.J. 2011. La Formación Rayoso (Cretácico Temprano) en la Cuenca Neuquina. En Leanza, H.A., Arregui, C., Carbone, O., Danieli, J.C. y Vallés J.M. (Eds.) Geología y Recursos Naturales de la Provincia del Neuquén, 205-222, Neuquén.
- Zonenshayn, L.P., Savostin, L.A. y Sedov, A.P. 1984. Global paleogeographic reconstructions for the last 160 million years. *Geotectonics* 18: 181-195.
- Zonneveld, J.P., Gingras, M.K. y Pemberton, S.G., 2001. Trace fossil assemblages in a Middle Triassic mixed siliciclastic-carbonate marginal marine depositional system, British Columbia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, v. 166, p. 249–276.