



MODELO GEOLÓGICO, PETROFÍSICA Y SIMULACIÓN DEL YACIMIENTO DE GAS Y PETRÓLEO CALAFATE, ISLA DE TIERRA DEL FUEGO, REGIÓN DE MAGALLANES, CHILE.

Ivan Marcelo Arriagada Saldias

Profesional Guía: Sr. Carlos Herrero Pisani
Profesor Guía: Msc. Abraham Gonzalez Martinez
Comisión: Dr. Luis Arturo Quinzio
Msc. Liubow Gonzalez Martinez

Resumen

El agotamiento de los yacimientos de petróleo y gas generado a partir de la explotación a lo largo del tiempo lleva a estudiar en detalle los reservorios desde el punto de vista de la estructura, sellos, facies, continuidad estratigráfica, ambientes de depositación de la roca reservorio, calidad petrofísica del reservorio y dinámica de los fluidos, situaciones que en su conjunto definen y controlan el contenido y la productividad de los yacimientos.

El yacimiento de gas y petróleo Calafate consta de 86 pozos perforados entre los años 1953 y 1986, encontrándose en una etapa de madurez productiva. Con el fin de evaluar adecuadamente le evolución productiva del yacimiento y predecir el comportamiento futuro y/o optimizar la posible continuación del desarrollo del yacimiento, se construye un modelo estático a partir de información proveniente de sísmica 3D, perfiles de pozo y testigos, el que es evaluado a través de una simulación dinámica de la historia de producción individual de cada pozo y en conjunto de todo el yacimiento.

Palabras Claves. Facies, roca reservorio, pozos, yacimientos, dinámica de fluidos, sísmica 3D.

1 Introducción

Los objetivos perseguidos en este trabajo consisten en definir las herramientas geológicas

que permitan caracterizar con la mayor precisión posible, la estratigrafía, geometría y calidad de reservorio a la Formación Springhill, unidad almacenadora y productora de hidrocarburos.

Objetivos Específicos: Definición de un modelo estratigráfico, estructural y de ambientes de depositación de las unidades sedimentarias del yacimiento.

Cuantificación del tamaño de la trampa y sus posibilidades de extensión. Determinación y distribución detallada de las características petrofísicas del reservorio. Reproducción mediante herramientas computacionales de la historia productiva del yacimiento.

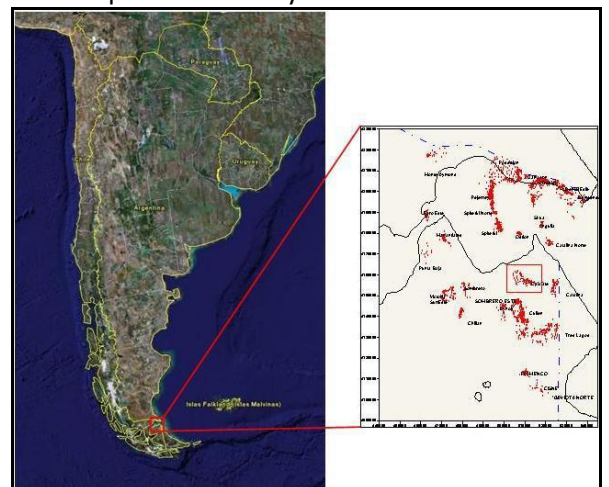


Figura 1. Mapa de Ubicación de la zona de estudio.

Agradecimientos: A Carlos Herrero P., director de proyectos y Gerente de Exploraciones de la Empresa Nacional del Petróleo, geólogo de vasta experiencia en el campo de la geología de los

hidrocarburos, quien en calidad de Profesional Guía efectuó la revisión crítica y aportes al manuscrito.

A los Sres. Mauricio Ahumada V. y Alan Mourges, Geofísico e Ingeniero de Reservorios respectivamente, quienes en conjunto con el autor desarrollaron en su totalidad la interpretación, modelamiento y simulación del yacimiento Calafate y permitieron la utilización de material de su autoría.

2 Marco Geológico o Definición del Problema

La estratigrafía del sector central y oriental de la cuenca posee una nomenclatura de carácter informal en la mayoría de las unidades diferenciadas en ella. El esquema estratigráfico definido a continuación (figura 2), está basado en la descripción de la estratigrafía de plataforma hecha por González (1965), y en la empleada en los trabajos de Hauser (1964) y de Natland y otros (1974).

Basamento Metamórfico (Unidad Informal)

Se denomina con este nombre a una serie de rocas metamórficas que se extienden en subsuperficie bajo la mayor parte de la Cuenca Magallanes, litológicamente diferentes a aquellas definidas en la estratigrafía de la Provincia Deformada y que aparecen directamente bajo las secuencias del Cretácico o bajo la Serie Tobífera (Jurásico). Están compuestas principalmente por gneiss granodioríticos que muestran una intensa alteración por meteorización superficial previa a su enterramiento (Natland y otros, 1974).

Dataciones radiométricas Sr87/Sr86 efectuadas en gneiss granodioríticos de subsuperficie indican una edad de 267±3 Ma (Halpern, 1967), mientras que dataciones K/Ar han entregado edades de 231±5 Ma, 246±6 Ma y 261±6 Ma (Hervé, 1990), las que son interpretadas como la edad de recristalización de los gneisses.

Serie Tobífera (Thomas, 1949)

Este complejo ha recibido diversos nombres por diferentes autores (ej. Quartzporphyryformation, Quensel 1911; Serie Porfírica, Feruglio, 1949; Quartz Porphyries, Kranck, 1932; Complejo volcanosedimentario del Seno Almirantazgo, Johnson, 1990). Se adopta la denominación Serie

Tobífera, definida por Thomas (1949) como unidad litológica de superficie, por ser el más ampliamente conocido y utilizado.

La Serie Tobífera comprende a una serie de rocas volcánicas ácidas y sedimentarias que cubren discordantemente al Basamento Metamórfico en gran parte de la Cuenca de Magallanes.

En la subsuperficie del norte de la isla Tierra del Fuego, la unidad ha sido reconocida como un heterogéneo conjunto de unidades piroclásticas, volcanitas ácidas y sedimentarias marinas y continentales de más 1.000 m de espesor, dispuestas discordantemente sobre el "Basamento Metamórfico".

Tradicionalmente se ha interpretado a la unidad, como los productos de una intensa actividad volcánica ácida subaérea a submarina depositada en cuencas extensionales, cuyo principal producto corresponde a flujos piroclásticos, con una menor participación de lavas (Johnson, 1990). Las intercalaciones sedimentarias presentan depósitos continentales fluviales y/o lacustres, marinos profundos (Hanson y Wilson, 1991) y someros, dentro de cuencas tectónicas restringidas invadidas por el mar (Urzua, com. escrita, en Rojas, 1990).

Prieto (1993), mediante un estudio geológico y geoquímico en el área del Seno Última Esperanza, concluye que este volcanismo ácido se produjo a partir de un magmatismo de intraplaca de corteza continental atenuada, generado probablemente por fusión de rocas corticales, durante una etapa de Rift. El carácter calcoalcalino del volcanismo, sería heredado a partir de la fusión de rocas ígneas calcoalcalinas y/o de rocas sedimentarias provenientes de la erosión de las primeras. En las intercalaciones sedimentarias del techo de la Serie Tobífera, en Tierra del Fuego Katz (1959), reportó el hallazgo de *Belemnopsis patagoniensis*, *Berriasella aff.*, *Berriasella beherendseni*, *Duvallia sp.* e *Inoceramus*, conjunto que posee una edad Titoniano Superior-Berriasiano. En la misma localidad Johnson (1990), recolectó un ejemplar de *Noecomitidae sp.*, fósil que posee un rango de edad Titoniano-Valanginiense.

Dataciones K/Ar realizadas en muestras de subsuperficie de la parte central de Tierra del Fuego indican edades de 158±5 Ma y 173±9 Ma (Hervé, 1990).

Según estos datos, y considerando que es muy probable que el volcanismo haya tenido una actividad episódica y diacrónica en la región, la Serie Tobífera tendría una edad Jurásico Medio-Valanginiano.

Formación Springhill (Thomas, 1949)

La denominación Formación Springhill fue aplicada por primera vez (Thomas, 1949) para el subsuelo de Tierra del Fuego, sin embargo, el carácter de unidad independiente de estas areniscas fue reconocido por primera vez en la región del Lago San Martín, Santa Cruz (Halle, 1913). Corresponde a una unidad litoestratigráfica que descansa sobre el relieve erosionado de la Serie Tobífera (Feruglio, 1938; Riccardi, 1971) o sobre el Basamento Metamórfico, sobreyacida por lutitas cretácicas. Su distribución abarca al parecer comprende desde la isla De Los Estados (Flores y otros, 1973) y Seno Almirantazgo (Natland y otros, 1974) por el sur, hasta las localidades argentinas de los Lagos Fontana y La Plata por el norte (Quartino, 1952).

Se compone por un grupo de secuencias retrotransgresivas, representada por areniscas cuarcíferas con intercalaciones de lutitas con restos carbonosos, cuya potencia, controlada por el paleorelieve de la Serie Tobífera (Natland y otros, 1974; Kirkpatrick, 1990 entre otros), alcanza desde cero a cerca de 130 m, con un promedio cercano a 30 m.

Biddle y otros (1986) y Kirkpatrick (1990), interpretan a la unidad en conjunto con las lutitas de la Formación Estratos con Favrella steinmanni (Cecioni, 1955), como una sucesión de areniscas fluviales retrogradacionales, areniscas costeras, dispuestas sobre un erosionado y accidentado paleorelieve Jurásico. La fuente del material silicoclástico de la formación han sido las ignimbritas y tobas de la Serie Tobífera y esquistos granitizados del Basamento Metamórfico (González, 1965). Esta transgresión, se desarrolla durante el inicio de una subsidencia tectónica continua, que afecta a toda la región durante el Cretácico Inferior y Superior y que provoca la ingresión marina y la depositación de varios cientos de metros de sedimentos clásticos continentales y marinos (Biddle y otros, 1986; Harnambour y Soffia, 1988b).

Acerca de la edad de la Formación Springhill y la transgresión marina ha existido un amplio debate (Feruglio, 1949; Leanza, 1963; 1968; Fuenzalida,

1964; Martínez y Ernst, 1965; Natland y otros, 1974; Riccardi 1976 entre otros) y las mayores divergencias ocurren entre las edades asignadas entre los micropaleontólogos que asignan edades Bajociano-Batoniano (Martínez y Ernst, 1965), Oxfordiano-Kimmeridgiano (Sigal y otros, 1970; Natland y otros, 1974) y macropaleontólogos que postulan una edad Titoniano-Berriasiano (Hernández y Azcarate., 1971; Riccardi, 1976) o Titoniano superior-Valanginiano (Cecioni, 1951).

Por contener una litología, fauna y relaciones estratigráficas similares, esta Formación ha sido correlacionada con las areniscas cuarzosas de la Formación Sutherland, cuya edad es asignada como Titoniano Superior-Valanginiano (Cecioni, 1955).

Formación Estratos con Favrella steinmanni (Cecioni, 1955)

Definida originalmente por Cecioni (1955). Corresponde a una unidad litoestratigráfica de subsuperficie, cuya base engrana lateralmente con el techo de la Formación Springhill y cuando falta esta última, su límite inferior corresponde a la Serie Tobífera, su techo lo define el "márker" eléctrico regional C11 de la nomenclatura de pozos, que permite correlacionarlo en toda la plataforma.

Corresponde a una secuencia transgresiva, compuesta de limolitas gris parduzcas con intercalaciones de calizas muy ricas en ammonites (especialmente el género Favrella) y foraminíferos, cuyo espesor varía entre 10 y 300 m.

En base a una abundante y diversa macrofauna se le asigna una edad Hauteriviano-Barremiano (Cecioni, 1955).

Las asociaciones microfaunales encontradas en la unidad y el engrane lateral que presenta con las areniscas transgresivas de la Formación Springhill, permite interpretar que la secuencia se depositó bajo condiciones marinas de plataforma (Rodgers en Mobil, 1979; Biddle y otros, 1986).

Lutitas con Ftanitas (Unidad Informal)

Corresponde a una unidad litoestratigráfica de subsuperficie, ubicada estratigráficamente sobre la Formación Estratos con Favrella steinmanni y que yace bajo la Formación Margas o Creta Dura. Su base y techo pueden ser definidos por marker

eléctricos (C11 y C5 respectivamente), que permiten su correlación en toda la plataforma.

Se compone de arcillolitas grises con una abundante fauna de radiolarios silicificados (Lutitas con pintas), cuyo espesor varía entre 70 a 170 m (González, 1965).

En base a una abundante microfauna, su edad es atribuida al Barremiano-Aptiano (González, 1965). De acuerdo a las asociaciones macrofaunales identificadas, se interpreta que la unidad se depositó bajo ambientes marinos de plataforma media a externa (50-200m) (Rodgers, en Mobil, 1979).

Formación Margas o Creta Dura (Mordoiovich, 1948)

Definida originalmente por Mordoiovich (1948), corresponde a una unidad litoestratigráfica de subsuperficie que sobreyace a la unidad Lutitas con Ftanitas y que yace bajo la unidad conocida como Lutitas Gris Verdosas. La base de la secuencia puede ser correlacionada en toda la Provincia de Plataforma por medio del marker eléctrico C5, mientras que su techo se encuentra cercano al marker eléctrico C1.

Está compuesta por margas y lutitas calcáreas, gris claro a verdosas, cuyo espesor varía entre 60 y 130 m.

En base a una rica macrofauna la secuencia ha sido referida al período Aptiano-Albiano (Cecioni, 1955).

De acuerdo con su litología y asociaciones faunales, se interpreta que esta unidad se depositó en condiciones marinas, bajo ambientes de plataforma somera (Rodgers en Mobil, 1979).

Lutitas Gris Verdosas (Unidad Informal)

Recibe este nombre un grupo de estratos cuya base se apoya sobre la Formación Margas y yace bajo la Formación Lutitas Arenosas. La unidad puede ser correlacionada regionalmente mediante el marker eléctrico C1 ubicado cerca de su base, mientras que su techo coincide con el marker eléctrico I3, reconocible en algunos pozos de la plataforma.

La unidad se compone de arcillolitas gris verdosas con intercalaciones calcáreas, ricas en bivalvos y foraminíferos, cuyo espesor varía entre 270 y 400 m.

En base a su contenido macro y microfaunal se le asigna una edad Albiano-Santoniano (González, 1965).

De acuerdo con las asociaciones microfinales, se interpreta que la unidad se depositó bajo ambientes marinos de plataforma externa (Rodgers, en Mobil, 1979), documentando una alzada regional del nivel base de depositación a fines del Albiano.

Lutitas Arenosas (Unidad Informal)

Unidad litoestratigráfica de subsuperficie comprendida entre las unidades Lutitas Gris Verdosas y Zona Glauconítica. La unidad puede ser correlacionada en toda la Provincia mediante el marker eléctrico G7 cercano a su techo.

La unidad está compuesta por arcillolitas glauconíticas con abundante contenido de foraminíferos, su espesor varía entre 50 a 180 m. En base a microfauna, se le asigna una edad Campaniano-Maastrichtiano (González 1965; Natland y otros, 1974; Rodgers, en Mobil 1979). La unidad correlacionable con las formaciones Fuentes y Rocallosa de la Provincia Deformada.

Las condiciones depositacionales deducidas a partir de las asociaciones microfinales, indican ambientes marinos de plataforma media a externa (Rodgers in Mobil, 1979).

Zona Glauconítica (Unidad Informal)

Unidad litoestratigráfica de subsuperficie que descansa en discordancia angular y de erosión sobre la unidad Lutitas Arenosas e infrayace a las rocas del Grupo Bahía Inutil. La unidad puede ser correlacionada en la Provincia de Plataforma mediante un fuerte "marker" eléctrico cercano a su base (conocido como G7), que marca un aumento granulométrico en columna del pozo. La base de esta unidad también es reconocible a través de la sísmica de reflexión, caracterizándose por un fuerte reflector regional y por una discordancia angular de sus secuencias basales por sobre las unidades cretácicas.

Está compuesta por areniscas finas, limolitas y arcillas, muy glauconíticas y con una abundante colección foraminíferos. Su espesor varía entre 100 m en el sector más oriental de la cuenca, a unos 330 m en la porción central.

La abundante microfauna que posee la secuencia, permite atribuirle al Paleoceno-Eoceno Inferior (González 1965), Maastrichtiano-Eoceno Inferior (Hauser, 1964; Rose, 1977) y Maastrichtiano Superior-Eoceno Medio (Cañon y Ernst, 1975), siendo correlacionada paleontológicamente con las formaciones Chorrillo Chico, Agua Fresca y Tres Brazos, definidas en la Provincia Deformada.

De acuerdo con el análisis paleogeográfico de sus unidades (Natland y otros, 1974), a la interpretación de sus asociaciones microfaunales (Rodgers in mobil 1979), al estudio de su petrografía (Hauser, 1964) y a su carácter sismoestratigráfico (Biddle y otros, 1986), es posible inferir que estos depósitos, corresponden a una secuencia retrotransgresiva compuesta de areniscas y limolitas costeras, depositada sobre una plataforma cretácica previamente expuesta.

Grupo Bahía Inútil (Unidad Informal)

Unidad informal que se dispone sobre la unidad conocida como Zona Glauconítica e infrayace a la unidad Areniscas Arcillosas. Es correlacionable en parte de la Provincia mediante el marker eléctrico A1b cercano a su techo.

Se compone de 50 a 200 m de areniscas, arcillolitas, y limolitas, portadoras de una abundante macro y microfauna. Su abundante registro micropaleontológico permite asignarle una edad Eoceno Superior-Oligoceno (González, 1965). Cañon y Ernst (1975) correlacionan cronoestratigráficamente la unidad con la Formación Leña Dura y la porción inferior de la Formación Loreto.

De acuerdo a las asociaciones microfaunales, las condiciones de depositación de esta unidad corresponden a ambientes marinos de plataforma somera (Marchant, 1992).

Areniscas Arcillosas (Unidad Informal)

Unidad litoestratigráfica de subsuperficie dispuesta sobre el Grupo Bahía Inutil y bajo la Formación Brush Lake. Su correlación en la Provincia se realiza mediante el marker eléctrico A1, que define su techo.

Está constituida por 100 a 400 m de areniscas arcillosas con intercalaciones calcáreas fosilíferas. Una abundante microfauna de foraminíferos permite atribuirle una edad Oligoceno Superior-Mioceno Inferior (González, 1965). De acuerdo con el esquema de correlaciones regionales de

Cañon y Ernst (1975), esta unidad es correlacionable cronoestratigráficamente con la porción media de la Formación Loreto en la Península Brunswick.

La interpretación de su asociación microfaunal indica condiciones de depositación marinas bajo ambientes de plataforma somera (Rose, 1977; Marchant, 1992).

Formación Brush Lake (Barwick, 1955)

Su localidad tipo se encuentra en la porción central de Tierra del Fuego. La unidad se apoya sobre el techo de la Formación Areniscas Arcillosas y su techo lo conforma la base conglomerádica de la Formación Filaret. Se compone de lutitas con intercalaciones de delgadas capas de areniscas y calizas muy fosilíferas hacia el techo, con un espesor variable entre 80 y 680 m.

En base a una diversa colección microfaunal, Natland y otros (1974) asignan una edad Mioceno Medio a Superior a la secuencia. Esta unidad se correlaciona cronoestratigráficamente con la secuencia superior de la Formación Loreto en Península Brunswick (Cañon y Ernst, 1975).

Natland y otros (1974), Rose (1977) y Rodgers (en mobil, 1979), basándose en asociaciones macro y microfaunales, interpretan que la depositación de esta Formación ocurre sobre una plataforma marina somera inclinada hacia el este. Su arreglo estratal y granulométrico creciente, señala que esta unidad se depositó durante una breve incursión transgresiva del atlántico.

Formación Filaret (Cortés y Céspedes, 1955)

Su localidad tipo se encuentra en la porción central de la Isla Tierra del Fuego, donde descansa discordantemente sobre la Formación Brush Lake y su techo no es visible. En subsuperficie infrayace a la Formación Palomares. Se compone de areniscas, areniscas conglomerádicas y arcillolitas, con intercalaciones de mantos de carbón y niveles coquinoideos, su espesor varía entre 260 y 400 m.

Una abundante colección macro y micropaleontológica permite asignar a la unidad una edad Mioceno Medio a Superior (Cortés, 1963), Mioceno Superior (González, 1965).

De acuerdo a sus características litológicas y fauna, esta unidad se habría depositado bajo condiciones continentales litorales y de plataforma marina somera (González, 1965; Natland y otros, 1974; Rodgers, en Mobil, 1979).

Formación Palomares (Kiedel y Hemmer, 1931)

Esta unidad, se apoya sobre la Formación Filaret e infrayace en discordancia a depósitos glaciares del Pleistoceno en gran parte de la cuenca, su espesor es variable entre 260 y 400 m.

De acuerdo a restos de mamíferos y moluscos se le asigna una edad Mioceno Superior-Plioceno Inferior (González, 1965, Natland y otros, 1974).

A diferencia de la localidad tipo, donde la unidad es depositada completamente bajo condiciones subaéreas, en el extremo oriental de la cuenca, existen delgados horizontes fosilíferos marinos, que evidencian cortos episodios de sedimentación marina somera, seguidos de prolongados períodos de sedimentación fluvial y lacustre.

Elgueta & Arriagada, 2001; Mc Millen, 1999; Montecinos, 1999; Moraga, 1984; Taylor y otros, 2005; Trace Exploration, 1999; Vidal, 1996)

Análisis de la información geológica disponible, es decir observación y descripción de testigos y cuttings de perforación, con el objeto de definir las características físicas de la roca reservorio, sus variaciones litológicas, facies, texturas, estructuras sedimentarias, etc., así como también de la roca sello (Serra, 1985).

Compilación, inventario, análisis, edición y evaluación de perfiles de pozo, con el objeto de obtener de manera continua las variables que condicionan la construcción de un modelo de simulación. Estas variables corresponden a espesor, porosidad, permeabilidad, saturación de fluidos y relaciones de espesor de reservorio neto a espesor total; las que son obtenidas a partir de los perfiles de pozo Potencial Espontáneo, Rayos Gamma, Sónico, Resistividad, Densidad y Neutrón (Archie, 1942; Baldwin et al, 1980; Bhuyan & Passey, 1994; Clavier et al, 1977; Coates & Dumanoir, 1974; Gaynard & Poupon, 1968; Griffiths, 1952; Schlumberger, 1972; Schlumberger, 1974; Serra, 1986

Definición de las unidades geológicas que configuran la arquitectura interna del reservorio (Mc Millen, 1999) y caracterización geológica y petrofísica de cada una de ellas mediante el poblamiento de propiedades a partir de eventuales correlaciones entre las variables petrofísicas y atributos extraídos de la sísmica 3D. En esta distribución, tanto para la obtención de correlaciones como para el poblamiento de propiedades, se utiliza los conceptos de la geoestadística.

Una vez obtenidas, tanto la configuración estructural como la arquitectura interna del reservorio, se procede a la construcción de la grilla de simulación, la que corresponde a la reproducción tridimensional del reservorio, efectuando sobre ésta, mediante el uso de herramientas computacionales específicas, el proceso de ajuste histórico de la producción del yacimiento y, posteriormente, la predicción futura bajo diferentes escenarios (Ahumada y otros, 2005).

El flujo de trabajo en la etapa de simulación numérica comprendió una primera etapa de recopilación y actualización de datos históricos de

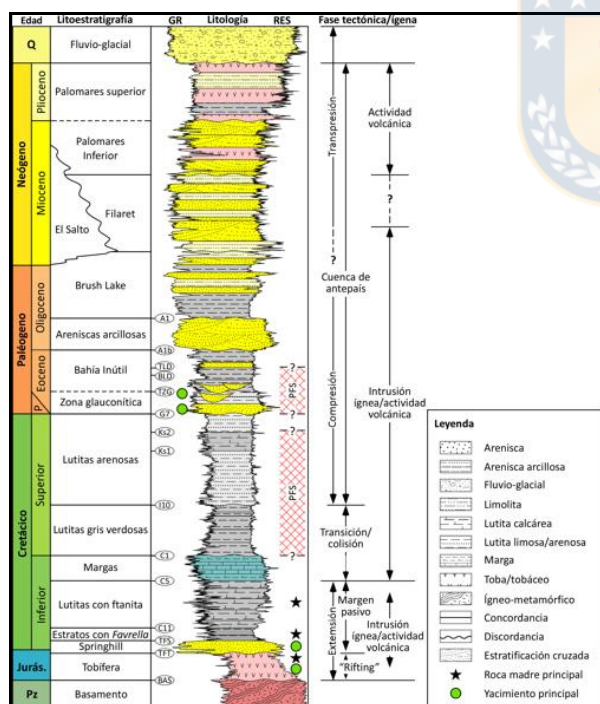


Figura 2. Columna Estratigráfica generalizada Provincia de Plataforma, Cuenca Magallanes.

3 Metodología

Lectura y análisis de los trabajos previos efectuados en el yacimiento tanto de investigación geológica como de análisis técnicos productivos relacionados con el tema de la simulación de reservorios (Auberger et al, 1985;

producción y operaciones, seguido del estudio y análisis del comportamiento productivo del campo (movimiento de fluidos de reservorio). Posterior a la generación del modelo estático, se ejecuta el modelo dinámico y se realiza el proceso de ajuste histórico, para finalizar con el pronóstico de producción y cuantificación de reservas.

En el yacimiento se definieron 6 regiones de equilibrio:

Región 1: corresponde al bloque caído en el extremo oriental del yacimiento. Esta zona está completamente saturada en agua y limita con una gran falla N-S por el poniente y con el límite del área de estudio por el oriente.

Región 2: aquí se encuentra el anillo de petróleo, entre el acuífero subyacente y el casquete de gas de los altos del bloque. Está limitado por grandes fallas N-S hacia ambos costados.

Región 3: en ella se sitúa el pozo Calafate 4, el cual reportó producción de petróleo. Se ubica entre la gran falla N-S que divide al yacimiento en dos unidades estructurales y una falla N-S localizada al poniente del pozo.

Región 4: corresponde a la zona petrolera que circunda al pozo Calafate 7. En todas las direcciones limita con fallas de la estructura.

Región 5: se localiza en el extremo norte de la unidad estructural poniente.

Región 6: corresponde al sector sur poniente del yacimiento, el cual se encuentra saturado en gas (casquete).

4 Resultados

El análisis estructural de los mapas isobáticos y los perfiles sísmicos indican que la situación estructural está definida por un sistema de fallas cuya ocurrencia va desde el Cretácico Inferior hasta el Terciario, lo importante de esto es que la actividad más intensa del tectonismo ocurre en el Terciario, lo que permite suponer que la distribución actual de los bloques sucedió con posterioridad a la migración primaria de hidrocarburos.

Quizás lo más característico de este sector es el sistema de fallas que afecta al flanco oriental, el que genera una serie de bloques escalonados que bajan hacia el oriente.

De acuerdo con la distribución del contacto

petróleo-agua y a los antecedentes estructurales, el límite o cierre del yacimiento es un sistema combinado en el que se reconocen cierres estratigráficos y estructurales, tanto isobáticos como por falla.

Hacia el sur y suroeste el entrapamiento es de tipo estratigráfico, identificándose como un importante cambio de facies, en que las areniscas del miembro superior del yacimiento gradan lateralmente a facies finas, lutitas y limolitas, impermeables al flujo de hidrocarburos.

Hacia el norte y oeste, el entrapamiento es de tipo isobático, ubicándose en la cota 1.730 metros bajo el nivel medio del mar (mb.n.m.m), estando en parte también acotado por falla.

Hacia el oeste el yacimiento muestra un sistema de fallas de orientación NNW-SSE, con un importante salto del bloque oriental. Este provoca el cierre del yacimiento contra el plano de falla.

La evaluación petrofísica indica que el contacto petróleo-agua original se encuentra diferenciado a ambos lados de la falla principal que corta el yacimiento. Mientras que en el flanco oeste el contacto petróleo-agua se localiza en los 1.730 mb.n.m.m, en el flanco oriental se reconoce este contacto a los 1.756 mb.n.m.m. Esta variación se debería a la presencia de una importante falla asociada al sistema estructural del yacimiento.

La presencia de abundante fallamiento no necesariamente genera una compartimentalización del reservorio, por cuanto muchas de ellas no tienen suficiente extensión lateral o el rechazo no separa totalmente el reservorio quedando parcialmente conectado, o bien las fallas no son totalmente impermeables al flujo. Esto es corroborado por el análisis de evolución de presiones del yacimiento. Al observar gráficas de presiones tomando pozos a ambos flancos de algunas fallas se concluye que el comportamiento evolutivo de las presiones es prácticamente idéntico a ambos lados, en todos los casos.

5 Discusión

Ajuste de la presión: Pese a la dispersión de los datos de presión medidos históricamente, es posible identificar una tendencia bastante

definida, lo que es un indicador de la buena comunicación entre las regiones (figura 3). Este comportamiento es bien emulado por la respuesta del modelo, y el calce es bastante satisfactorio.

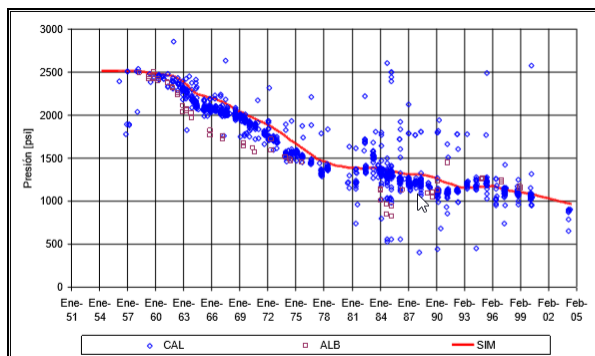


Figura 3. Ajuste histórico de presiones.

Ajuste de las producciones: En las gráficas se observa que, en los inicios de la vida productiva del campo, y hasta mediados del año 1962, el ajuste de la producción de gas es perfecto y la producción de petróleo entregada por el modelo es nula (figura 4). Esto se debe a que fue el bloque occidental, saturado en gas, el primero que se puso en producción, de tal manera que los registros de producción histórica de petróleo corresponden a gas-condensado, el que no puede ser reproducido por el modelo de simulación. Desde el año 1962 comienza la producción en el bloque petrolero de la unidad estructural oriental, pero la producción de gas, y por ende de condensado, continúa y se acrecienta, de tal manera que, en la curva de ajuste histórico, siempre se debe observar la producción de petróleo simulada por debajo de la producción histórica. En las curvas de producción acumulada de petróleo (figura 5), se puede constatar que la diferencia final entre ambos valores es de unos 850 Mm³, de los cuales se debe quitar la producción histórica reportada de condensado, la que asciende a los 470 Mm³, de tal manera que el modelo entrega un déficit en la producción de petróleo de unos 380 Mm³.

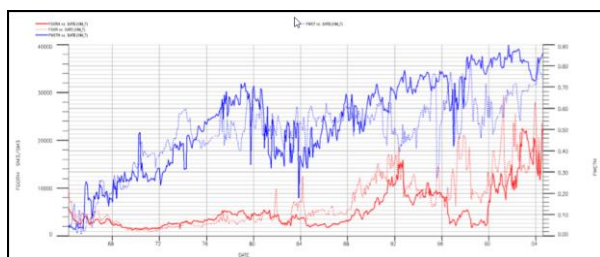


Figura 4. Ajuste histórico GOR y Wcut.

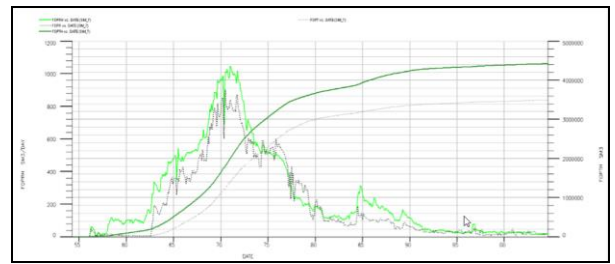


Figura 5. Ajuste histórico producción de petróleo.

Respecto de la producción de gas, desde el año 1968 hasta el año 1974, aproximadamente, los caudales de producción simulados son bastante inferiores a los caudales históricos entre esas fechas (figura 6), período en el cual la producción de agua simulada es mayor a la histórica, aun cuando tal diferencia no es observada, en magnitud comparable, en las curvas de las relaciones Wcut y Gor, en este mismo período.

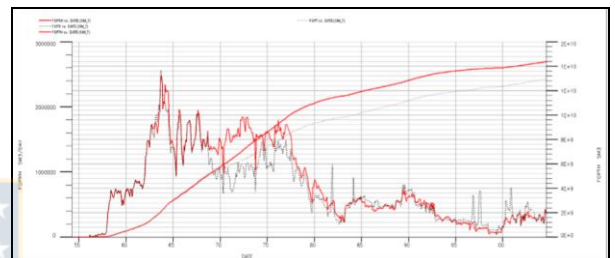


Figura 6. Ajuste histórico producción de gas.

Desde el año 1980 en adelante, cuando la producción de petróleo deja de ser importante, el ajuste de las producciones de gas vuelve a ser bastante preciso, aunque el modelo es incapaz de reproducir las producciones de agua. Respecto de la producción de petróleo en este período, se observa que ésta experimenta un repunte a partir del año 1984, debido a los trabajos de workover, reparaciones, repunzados, y al efecto del barrido por reinyección de gas en el bloque petrolero. Sin embargo, esta tendencia al alza también se constata en las otras fases, de tal manera que es posible definir que las curvas de las relaciones entre ellas, Wcut y GOR, mantienen su tendencia general creciente (figura 4).

El problema del modelo para emular las producciones históricas; el déficit de gas y exceso de agua entre los años 1968 y 1974, y el déficit de petróleo y, particularmente, de agua a partir del año 1985, encuentran su explicación en las dificultades para controlar el movimiento de fluidos de reservorio en el sector oriental del yacimiento, desde el pozo Calafate 56 hacia el sur, donde se verifica una zona de muy fuerte pendiente y alta densidad de pozos. En esta zona,

la actual grilla de simulación posibilita que entre tres celdas vecinas se produzca una brusca transición entre las tres fases, agua, petróleo y agua, de tal forma que, sumando el factor de tener una alta densidad de pozos productivos, resulte bastante improbable reproducir el comportamiento dinámico del reservorio. En esta región, el anillo de petróleo es bastante delgado, por lo que con pequeños ajustes se obtienen resultados productivos bastante disímiles, ya sea que el modelo de simulación resulte en exceso de gas y déficit de agua, o la situación inversa, vale decir exceso de agua y déficit de gas.

6 Conclusiones

La unidad continental se puede dividir en dos subunidades estratigráficas principales, una basal consistente en lutitas gris parduzca con fragmentos carbonosos alternadas irregularmente por cuerpos de areniscas de cuarzo subangulares con matriz caolinítica que en algunos casos alcanza los 6 m de potencia con buena calidad petrofísica. La distribución lateral de los cuerpos arenosos está controlada por el diseño de paleocanales distributarios en las paleodepresiones. Estos cuerpos presentan abundantes estructuras de depósitos de cursos fluviales como lentes arenosos, lentes de arcilla, truncamientos bruscos, gradaciones recurrentes, fragmentos carbonosos retrabajados y laminaciones de arcillolitas carbonosas, y una subunidad superior consiste en una lutita gris oscuro parduzco en la base con fragmentos vegetales carbonosos pequeños, haciéndose muy fisible hacia el techo donde presenta ocasionales lentes y finas laminaciones de areniscas. Esta unidad tiene un desarrollo lateral persistente en el yacimiento ocurriendo un leve engrosamiento de espesor hacia las áreas deprimidas. Presenta un contacto gradual hacia la unidad superior, claramente marina, y la presencia de láminas arenosas sugieren un origen más ligado al marino que al continental.

La unidad superior, o marino, principal reservorio económico del yacimiento tiene una amplia distribución en el yacimiento con una disposición de espesores acomodada al relieve antiguo. La unidad consiste en areniscas de cuarzo las que muestran una evolución vertical pudiendo separarse en dos unidades, una unidad basal consistente en una gradación inversa de limolitas de cuarzo gris verdosa muy glauconítica, fina, con

matriz arcillosa abundante, cemento calcáreo también abundante, con laminaciones arcillosas, finas, onduladas, discontinuas y abundantes estructuras de bioturbación haciéndose más escasas hacia el techo, el contacto entre esta y la lutita infrayacente es muy gradual, el techo consiste en un cuerpo arenoso fuertemente cementado con carbonato de calcio cuyo espesor es muy variable y la subunidad superior consiste en una arenisca de cuarzo, con gradación inversa ligera de grano fino en la base a grano medio a grueso en el techo, presenta matriz arcillosa y leve cemento calcáreo disminuyendo hacia arriba, sin embargo su desarrollo vertical no es constante, presentando algunos niveles delgados con abundante cementación. La glauconita es constante en todo el espesor mientras que hacia la base se observan ocasionales granos diminutos de carbón, pelecípodos son frecuentes pudiendo identificarse fragmentos de *Camptonectes* hacia la base y del género *Ostrea* hacia el techo. La distribución lateral de estas unidades es continua en los flancos estructurales del yacimiento, sin embargo, hacia el sur existiría desarrollo de unidades litoestratigráficamente correlacionables sólo con la subunidad basal.

La reconstrucción ambiental del yacimiento se esquematiza con la ocurrencia de afloramientos pertenecientes a la Serie Tobífera en los sectores altos sometidos a meteorización y erosión sobre la cual se trazan cursos fluviales con un área de influencia de sus depósitos, así como depósitos de llanuras aluviales. Posteriormente ocurre influencia marina comprendida entre las líneas de alta y baja marea distinguiéndose dos áreas de depósitos paralelas entre sí y a la línea de costa, islas de barrera en una zona más externa y lagoons hacia el continente. Posteriormente se constituyen depósitos de plataforma marina.

El modelo estático constituye una buena aproximación a la simulación en la medida que los datos disponibles sean confiables y tengan una distribución representativa tanto en la horizontal como en la vertical y además se dispongan de suficientes variables a ser evaluadas tales como porosidad, espesor de las unidades, volumen de arcillas, permeabilidad horizontal y vertical, saturación de fluidos, relación net to gross, etc. En el caso del yacimiento Calafate se dispuso de una serie considerable de pozos en la mayoría de ellos con testigos y perfiles de pozo suficientes para una

buena caracterización de reservorio y con una larga historia de producción de modo de poder lograr un ajuste histórico representativo.

La respuesta del modelo de simulación, avalado especialmente por el ajuste histórico en presión, permite sustraer cerca del 50% del gas inyectado total al reservorio, de tal forma que el gas inyectado "perdido" alcanza los 6.816 MMm³. Este valor, y la posibilidad de que gran parte de este gas haya migrado por la falla N-S que limita la estructura por el Este, justifican planificar estudios adicionales de análisis del área para investigar posibles zonas en las que se pudiera haber acumulado este gas.

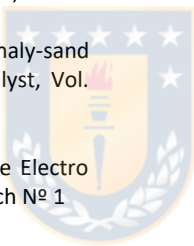
El balance de materia global indica que las reservas de gas remanentes susceptibles de ser producidas hasta el año 2025, alcanzan los 2.383 MMm³.

7. Referencias

- Ahumada, M.; Arriagada, I. & Mourges, A. 2005. Modelo de Reservorio y Simulación, Yacimiento Calafate, Informe Final. ENAP, Informe Interno.
- Archie, G.E. 1942. The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics: Petroleum Transactions, AIME, Vol. 146: 54-62.
- Archie, G.E., 1952, Classification of reservoir rocks and petrophysical considerations: AAPG Bulletin, Vol. 36 (2): 278-298.
- Auberger, Y.; Parnaud, F. & Monrose, H.; 1985. Etude de Pre-Faisabilité en vue d'une Recupération Secondaire sur le Gisement de Calafate, Magallanes, Chile. ENAP, Informe Interno.
- Baldwin, J.L.; Quirein, J.A. & Serra, O. 1980. Theory and Practical Application of Natural Gamma Ray Spectroscopy. Trans, SPWLA Annual Logging Symposium
- Barwick, J., 1955, The surface stratigraphy of portions of Magallanes Province, Chile: Informe Técnico ENAP (inédito) Santiago.
- Bhuyan, K. & Passey, Q.R., 1994, Clay estimation from GR and neutron - density porosity logs: Trans. SPWLA 35th Annual Logging Symposium, Paper DDD, 15 pp.
- Biddle, K.T.; Uliana, M.A.; Mitchum, R.M.; Fitzgerald, M.G. & Wright, 1986, The stratigraphic and Structural Evolution of the Central and Eastern Magallanes Basin, Southern South America: Special Publication 8, Association of Sedimentologists, p. 41-61
- Cañón, A., Ernst, M., 1975, Cuadro de correlaciones estratigráficas de la Provincia de Magallanes. Informe Técnico ENAP (inédito) Santiago.
- Cecioni, G. 1951. Eda de la Arenisca Springhill. Informe Técnico ENAP (inédito) Santiago.
- Cecioni, G., 1955, Edad y facies del grupo Springhill en Tierra del Fuego. Anales Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile, 12, 243-256 pp..
- Clavier, C.; Coates, G. & Dumanoir, J., 1977, The theoretical and experimental bases for the "dual water" model for the interpretation of shaly sands: SPE Paper No. 6859.
- Coates, G.R. & Dumanoir, J.L.; 1974. A new approach to improved log-derived permeability: Log Analyst, Vol. 15 (1): 17-31.
- Cortés, 1963. Sección Geológica del Terciario entre San José y Vania. Informe Técnico ENAP (inédito) Santiago.
- Cortés y Céspedes, 1955). Levantamiento Geológico del área Filaret-Rio Chico (Tierra del Fuego). Informe Técnico ENAP (inédito) Santiago.
- Elgueta, S. & Arriagada, I.; 2001. Parámetros Petrofísicos de los Reservorios de Baja Permeabilidad en Formación Springhill y Estratos con Favrella con Énfasis En los Yacimientos de Cullen y Calafate. ENAP, Informe Interno.
- Feruglio, E., 1938, El Cretáceo del Lago San Martín y de las regiones adyacentes: Physis, v. 12, p. 293-342, Buenos Aires.
- Feruglio, E., 1949, Descripción Geológica de la Patagonia: Dirección General YPF, p. 1-344, Buenos Aires.
- Flores y otros, 1973. Estratigrafía Cretácica del subsuelo de Tierra del Fuego: Revista de la Asociación Geológica Argentina, v. 28, p. 407-437.
- Fuenzalida, 1964. El geosinclinal andino y el geosinclinal de Magallanes. Symposium sobre el geosinclinal andino, 1962, Santiago de Chile No 2, Sociedad Geológica de Chile. 27 pp.
- Gaymard, R. & Poupon, A. 1968. Response of Neutron and Formation Density Logs in Hydrocarbon-Bearing Formations. The Log Analyst, Sep.-Oct, pp 3-12.
- González, E., 1965, La Cuenca Petrolífera de Magallanes: Revista Minerales, Instituto de Ingenieros de Minas, v. 91, p. 1-15, Santiago.
- Griffiths, J.C., 1952, Grain-size distribution and reservoir rock characteristics: AAPG Bulletin, Vol. 36 (2): 205 -229.
- Halle, 1913. Some Mesozoic plant-bearing deposits in the Patagonia and Tierra del Fuego and their Floras. Kungl. Svenska Vetenskaps Akademiens Handlingar, 51 (3): 3-58, Estocolmo.

- Halpern, 1967. Geologic Significance of Isotopic Age Measurements of Rocks from Tierra del Fuego. Informe Técnico ENAP (inédito) Santiago.
- Hanson, R. E. & Wilson, T. J., 1991, Submarine Rhyolitic Volcanism in a Jurassic Proto – Marginal Basin; Southern Andes, Chile and Argentina. In Harmon, R. S. & C. W. Rapela (eds.): Andean Magmatism and Its Tectonic Setting. Geological Society of America, Special Paper: 265.
- Harambour, S. & Soffia, J. M, 1988, Evaluación Geológica y Petrolera del Extremo Norte de Ultima Esperanza, Empresa Nacional del Petróleo (informe interno) 180 p., Santiago
- Hauser (1964) La Zona Glauconítica en Plataforma Springhill Magallanes. Universidad de Chile, Departamento de Geología, Memoria de Título, 266 pp., Santiago
- Hernandez, P. y Azcarate. V., 1971. Estudio paleobotánico preliminar sobre restos de una tafoflora de la Península Byers (Cerro Negro), Isla Livingstone; Islas Shetland del Sur, Antártica. Instituto Nacional Antártico, Chile, 2(1), 15-50 pp.
- Hervé, 1990 Edades Radiométricas Realizadas en Testigos Pozo Gaviota PK-1. Informe Técnico ENAP (inédito) Santiago.
- Johnson, 1990. Antecedentes Estratigráficos de la Ribera Sur del Seno Almirantazgo. Empresa Nacional del Petróleo (informe interno) 180 p., Santiago
- Katz (1959) Reconocimiento Geológico al Sur del Seno Almirantazgo. Empresa Nacional del Petróleo (informe interno) 180 p., Santiago
- Keidel, I., Hemmer, A., 1931, Informe preliminar sobre las investigaciones efectuadas en la región petrolífera de Magallanes en los meses de verano de 1928-1929 (12-XII-1929): Boletín Minero, Sociedad Nacional de Minería, año 47, v. 48(388), p. 706-717, Santiago.
- Kirkpatrick, 1990. Influence of Tectonic and Sea-Level Change ON Sedimentation of the Jurassic Springhill and Tobifera formation, Central tierra del Fuego, Chile, an integrated study. 273 pp. Tesis de doctorado, Colorado School of Mines.
- Kranck, E. H., 1932, Geological Investigations in Tierra del Fuego: Acta Geographica 4, Helsinki, v., p. 1-321.
- Leanza, A. 1963; Patagoniceras gen. nom. (Binneyitidae) y otros ammonites del Cretácico Superior de Chile meridional, con notas acerca de su posición estratigráfica, Córdoba, Argentina. Separata Boletín Academia Nacional de Ciencias, 43, 203-225 pp.
- Leanza, A. 1968. Anotaciones sobre los fósiles Jurásico-Cretácicos de Patagonia Austral (Colección Feruglio) conservados en la Universidad de Bologna. Acta Geológica Lilloana, 9, 121-187 pp.
- Marchant, 1992. Edad y Paleoecología de las Formaciones Terciarias en el área de Dorado Sur -Kimirí Aike Sur, Magallanes, Chile Mediante el Estudio de Foraminíferos (Protozoa - Foraminiferida); Tesis. Tesis Para Optar al Grado de Magister en Ciencias con Mención en Zoología. Universidad de Concepción. 269 pp
- Martinez y Ernst, 1965 Informe Preliminar sobre Edad de las Formaciones Cretáceas de la Cuenca Magallánica. Informe Técnico ENAP (inédito), Santiago.
- Mc Millen, K.; 1999. Sequence Stratigraphic Model for the Oriental Basin. ENAP, Informe Interno.
- Mobil, 1979, Hydrocarbon Potential of the Magallanes Basin, Chile: Informe Técnico ENAP (inédito), Santiago.
- Montecinos, L.; 1999. Informe de Procesamiento Sísmico 3D y Control de Calidad. Proyecto Calafate. ENAP, Informe Interno.
- Moraga, J., 1984. Estudio Geológico Formación Springhill en el Yacimiento Calafate. ENAP, Informe Interno.
- Mordojovich, C, 1948, Descripción de Testigos Informe Técnico ENAP (inédito), Santiago.
- Natland, M. L.; González, E.; Cañon, A. & Ernst, M., 1974. A System of Stages for Correlation of Magallanes Basin sediments: Geological Society of America, Memoir 139, p. 1-126.
- Prieto (1993), Geología del Sector Compreendido entre Seno Última Esperanza y Seno Obstrucción, Región de Magallanes, Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo. Univ de Chile. 147 pp.
- Quartino, 1952. Rasgos geológicos y litológicos de la cuenca de loslagos La Plata y Fontana. Tesis doctoral, Universidad de Buenos Aires: 116 pp., (inédito), Buenos Aires.
- Quensel, P. D. 1911. Geologisch-petrographische Studien in der patagonischen Cordillera. Bulletin Geological Insitut Upsala, 11, 1-113.
- Riccardi, A. C., 1971, Estratigrafía en el oriente de la Bahía de la Lancha, Lago San Martín, Santa Cruz, Argentina. Revista del Museo de La Plata (nueva serie), Sección Geología, v. 7, p. 245-318, La Plata.
- Riccardi 1976. Berriasian Invertebrate Fauna from the Springhill Formation of Southern Patagonia. Informe Técnico ENAP (inédito), Santiago.
- Rojas, L. 1990, Sección Estructural del Bloque Codillera Nariz, sector suroccidental de la Isla de Tierra del Fuego, XII Región: Universidad de Chile, Departamento de Geología, Taller de Título II, 163 pp., Santiago
- Rose, J. F., 1977, The Upper Cretaceous and Tertiary marine cytherean ostracods of the Magallanes Basin, southern Chile: Phd Thesis, University of Hull, U. K.
- Schlumberger Well Surveying Corporation, 1972, Principles of log interpretation: Houston, Tex., Schlumberger Well Surveying Corp., 112 p.

- Schlumberger Well Surveying Corporation, 1974, Applications of log interpretation: Houston, Tex., Schlumberger Well Surveying Corp., 116 p.
- Serra, O. 1985. Sedimentary Environments from Wireline Logs, Schlumberger Educational Services, U.S.A.
- Serra, O. 1986 Advanced Interpretation of Wireline Logs. Schlumberger Educational Services, U.S.A.
- Serra, O.; Baldwin, J.L. & Quirein, J.A.; 1980, Theory interpretation and practical applications of natural gamma ray spectroscopy: Society of Professional Well Log Analysts Annual Logging Symposium, 21st, Lafayette, La., 1980, Transactions, p. Q1-130.
- Sigal y otros, 1970. Estudio Cronoestratigráfico sobre la Formación Springhill y Estratos con Favrella, Pozos de Magallanes y Tierra del Fuego. (ENAP - CHILE) Informe Técnico ENAP (inédito), Santiago.
- Simandoux, P. 1963. Measures Dielectriques en Milieu Poreux, Application a Measure des Saturations en Eau, Etude du Comportement des Massifs Argileux. Revue de Institut Français du Petrole, 1B, Supplementary Issue, p. 193 - 215.
- Taylor, B.; Fuenzalida, A.; Otzen, G.; Elgueta, S.; Castro, P.; Arriagada, I.; Soto, L.; Cifuentes, J. & Ide,S.; 2005.
- Worthington, P.F., 1985, The evolution of shaly-sand concepts in reservoir evaluation: The Log Analyst, Vol. XXVI (1): 23-40.
- Wyllie, M.R.J., 1949. A Quantitative Analysis of the Electro Chemical Component of the SP Curve. J. Pet. Tech Nº 1
- Wyllie, M.R.J.; Gregory, A.R. & Gardner, G.H.F. 1958. An Experimental Investigation of Factors Affecting Elastic Wave Velocities in Porous Media. Geophys Nº 3.
- Wyllie, M.R.J. & Rose, W.D., 1950, Some theoretical considerations related to the quantitative evaluation of the physical characteristics of reservoir rock from electrical log data: J.Pet. Tech., p.189.
- Evaluación del Upside de Reservas y/o Recursos de Hidrocarburos del Sector Calafate. Análisis de Atributos Sísmica 3D, Validación de la Información, Integración y Recomendaciones. ENAP, Informe Interno.
- Thomas, C. R., 1949, Geology and Petroleum Exploration in Magallanes Province, Chile: American Association of Petroleum Geologists Bulletin, v. 33(9), p. 1553-1578
- Timur, A. 1968. An Investigation of Permeability, Porosity and Residual Water Saturation Relationships for Sandstones Reservoirs. Society of Professional Well Log Analysts Annual Logging Symposium, 9th, New Orleans, La., Transactions, p. J1- J18.
- Tixier, M.P. 1949. Evaluation of Permeability from Electric-Log Resistivity Gradients. Oil and Gas J.
- Trace Exploration Ltda. 1999 Reporte Final Proyecto Calafate 3D, Área Calafate – Golondrina. ENAP, Informe Interno.
- Vidal, M.; 1996. Estudio del Yacimiento Calafate. Detección de los Niveles Reservorios Invasados por Gas de Reinyección y su Factibilidad de Reoperación. Determinación de Áreas con Drenaje Deficiente y la Probabilidad de Mejorar la Recuperación de Petróleo. ENAP, Informe Interno.





Universidad
de Concepción



MODELO GEOLÓGICO, PETROFÍSICA Y SIMULACIÓN DEL YACIMIENTO DE GAS Y PETRÓLEO CALAFATE, ISLA DE TIERRA DEL FUEGO, REGIÓN DE MAGALLANES, CHILE.

Defensa para optar al Título de Geólogo

IVAN MARCELO ARRIAGADA SALDIAS

Profesor Guía: Carlos Herrero Pisani

Profesores Comisión: Msc. Abraham Gonzalez M.

Dr. Luis Quinzio S.

Msc Liubow Gonzalez M.

Concepción, diciembre 2019

Decreto U. DEC. N° 2017-085,
Geología

Estructura Defensa

1. Introducción
2. Marco Geológico/Definición del Problema
3. Metodología
4. Resultados
5. Discusión
6. Conclusiones



1. Introducción

- El agotamiento de los yacimientos de petróleo y gas producto de la explotación a lo largo del tiempo lleva a estudiar en detalle los reservorios desde el punto de vista de la estructura, sellos, facies, continuidad estratigráfica, ambientes de depositación de la roca reservorio, calidad petrofísica del reservorio y dinámica de los fluidos, situaciones que en su conjunto definen y controlan el contenido y la productividad de los yacimientos.
- Este trabajo constituye un segmento de la modelación y simulación del yacimiento de gas y petróleo Calafate, entregando la metodología de construcción de un modelo geológico estático de este yacimiento y los antecedentes resultantes de su simulación.
- Se agradece al señor Carlos Herrero P., director de proyectos y Gerente de Exploraciones de la Empresa Nacional del Petróleo, geólogo de vasta experiencia en el campo de los hidrocarburos, quien en calidad de Profesional Guía efectuó la revisión crítica y aportes al manuscrito.
- A los Sres. Mauricio Ahumada V. y Alan Mourges, Geofísico e Ingeniero de Reservorios, respectivamente, quienes en conjunto con el autor desarrollaron en su totalidad la interpretación, modelamiento y simulación del yacimiento Calafate y permitieron la utilización de material de su autoría.

1. Introducción

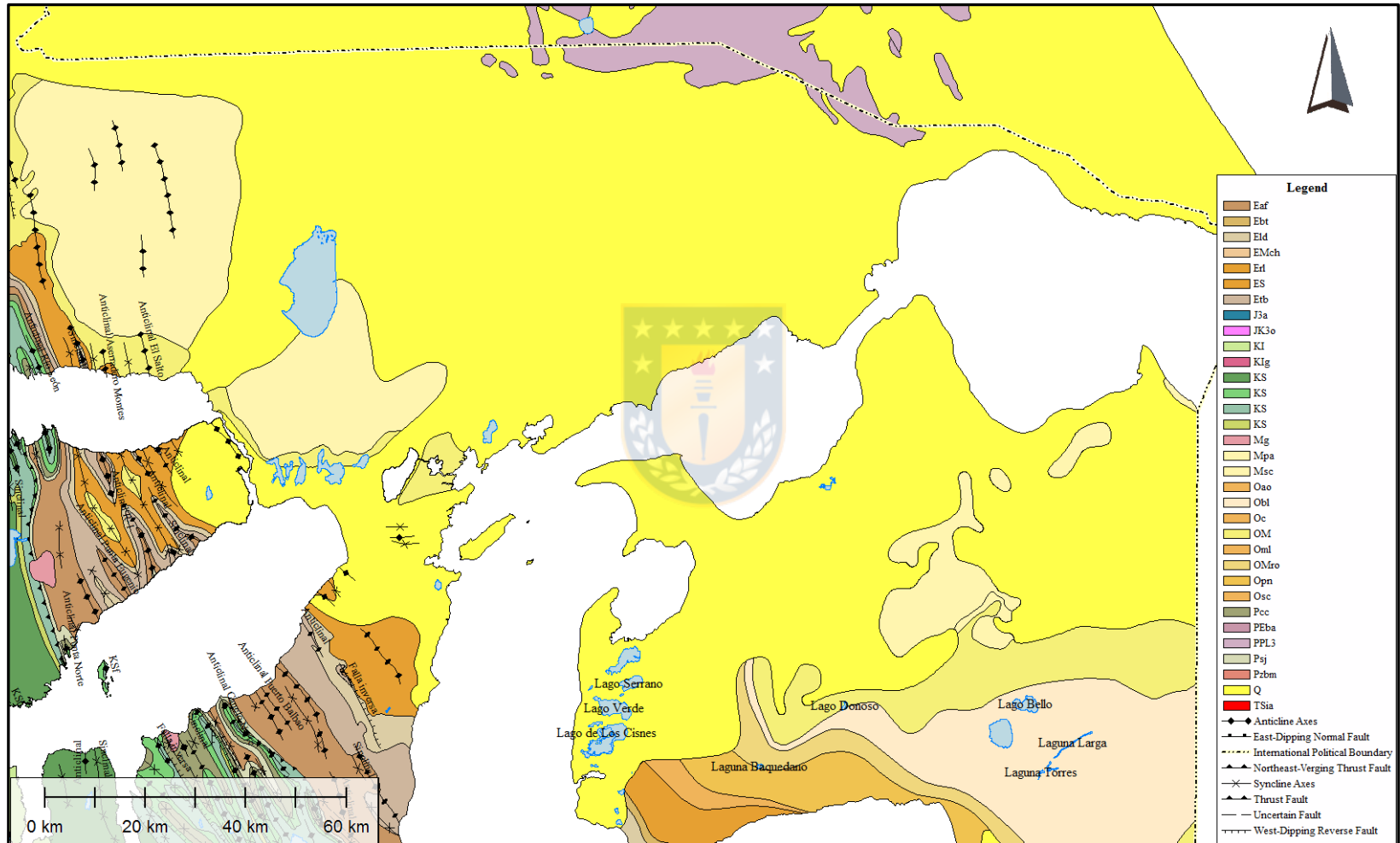
Objetivo General

- Definir las herramientas geológicas que permitan caracterizar, con la mayor precisión posible, la estratigrafía, geometría y calidad de reservorio de la Formación Springhill en el yacimiento Calafate, unidad almacenadora y productora de hidrocarburos.

Objetivos Específicos

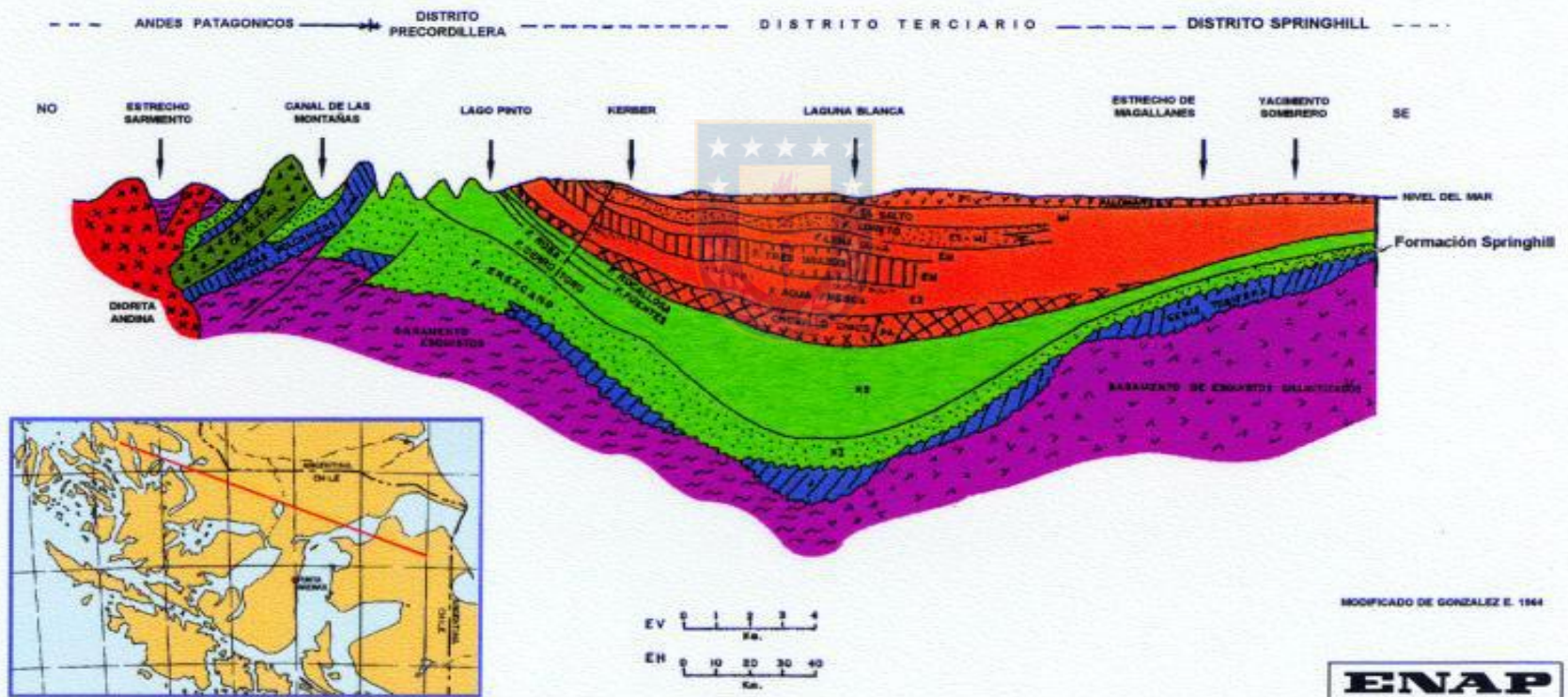
- Definición de un modelo estratigráfico, estructural y de ambientes de depositación de las unidades sedimentarias del yacimiento.
- Cuantificación del tamaño de la trampa y sus posibilidades de extensión.
- Determinación y distribución detallada de las características petrofísicas del reservorio.
- Reproducción mediante herramientas computacionales de la historia productiva del yacimiento

2. Marco Geológico

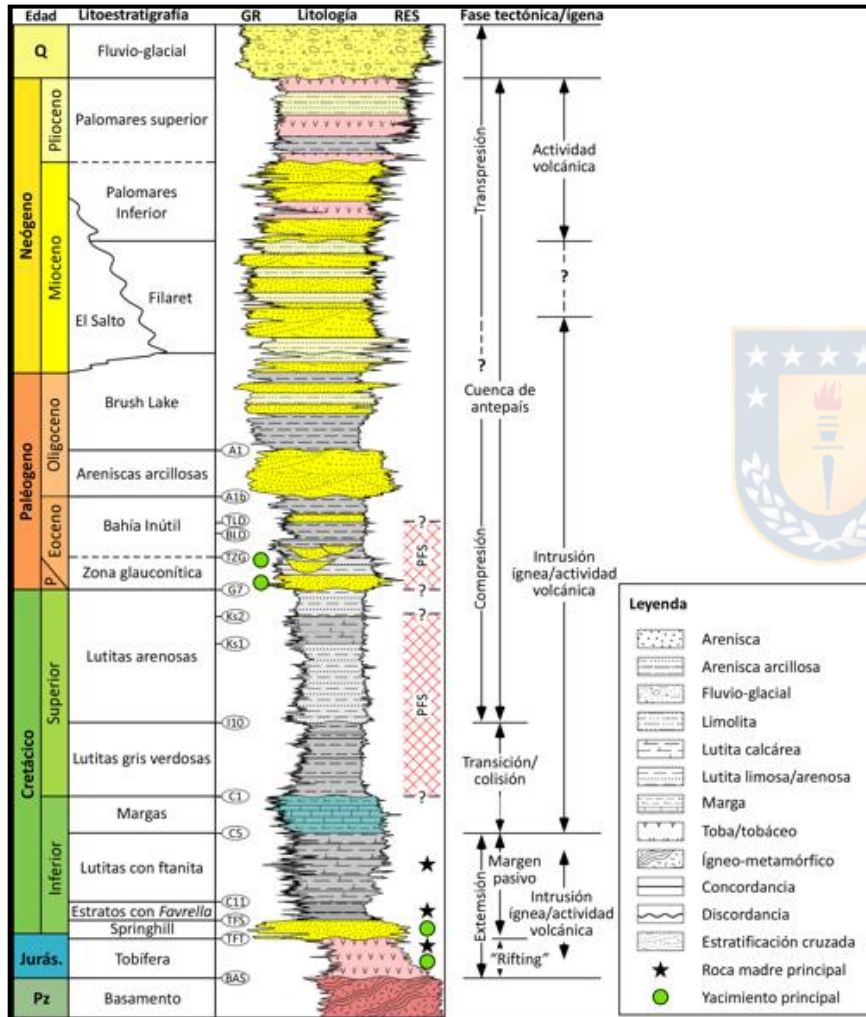


CUENCA DE MAGALLANES

SECCION ESTRECHO SARMIENTO - YACIMIENTO SOMBRERO



2. Marco Geológico



La estratigrafía del sector central y oriental de la cuenca posee nomenclatura de carácter informal en la mayoría de las unidades diferenciadas en ella.

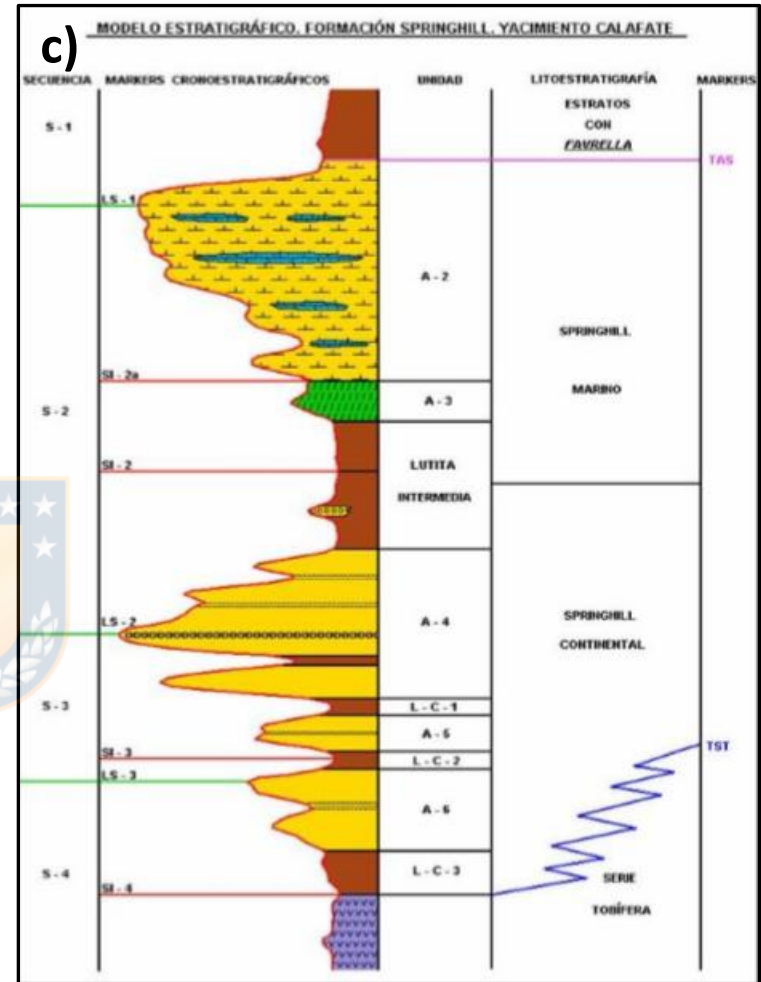
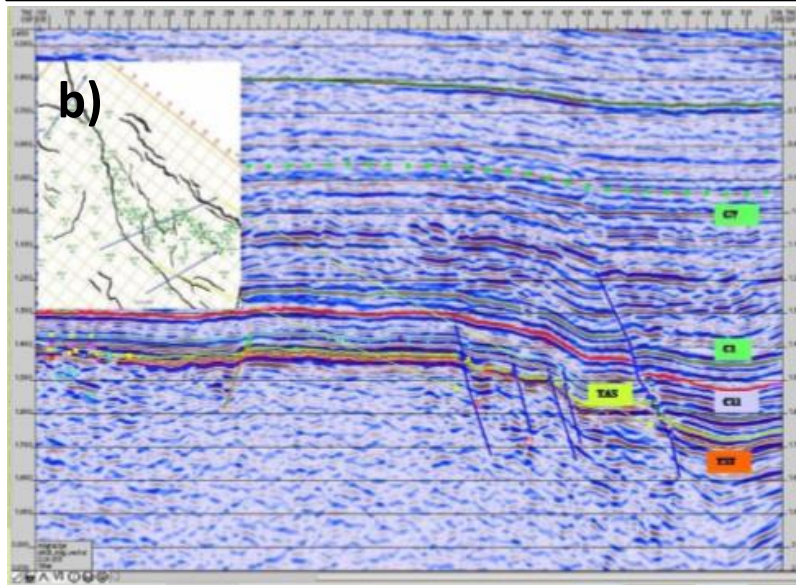
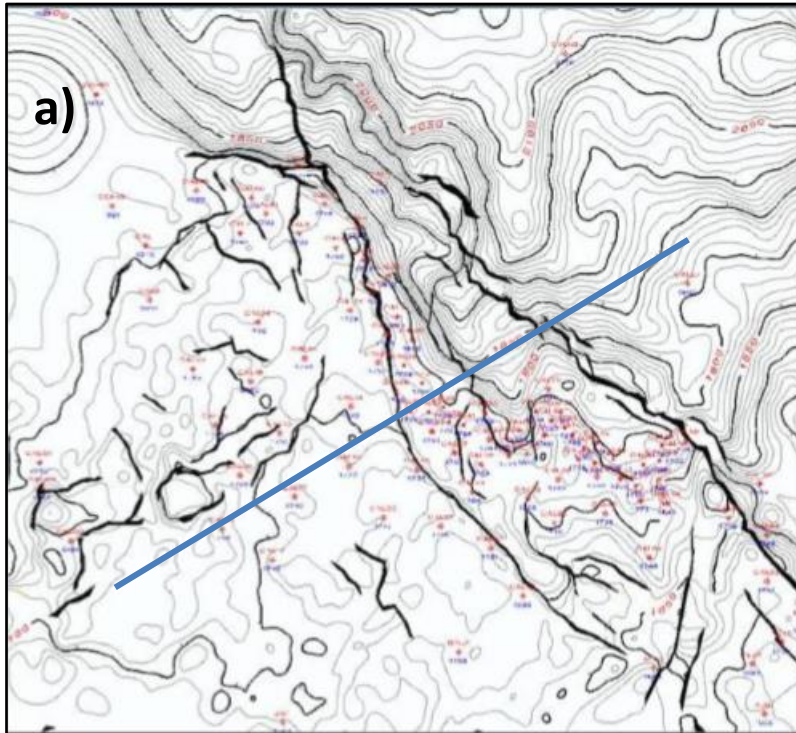
El esquema estratigráfico definido está basado en la descripción de la estratigrafía de plataforma hecha por González (1965), y en los trabajos de Hauser (1964) y de Natland y otros (1974).

3. Metodología

- Lectura y análisis de los trabajos efectuados en el yacimiento, tanto de investigación geológica como de análisis técnicos productivos, relacionados con la simulación de reservorios .
- Análisis de la información geológica disponible, es decir observación y descripción de testigos y cuttings de perforación
- Compilación, inventario, análisis, edición y evaluación de perfiles de pozo
- Definición de las unidades geológicas que configuran la arquitectura interna del reservorio y caracterización geológica y petrofísica de cada una de ellas.
- Construcción de la grilla de simulación mediante el uso de herramientas computacionales.
- En la etapa de simulación numérica:
 - Recopilación y actualización de datos históricos de producción y operaciones.
 - Estudio y análisis del comportamiento productivo del campo.
 - Ejecución el modelo dinámico y se realización del proceso de ajuste histórico, para finalizar con el pronóstico de producción y cuantificación de reservas.

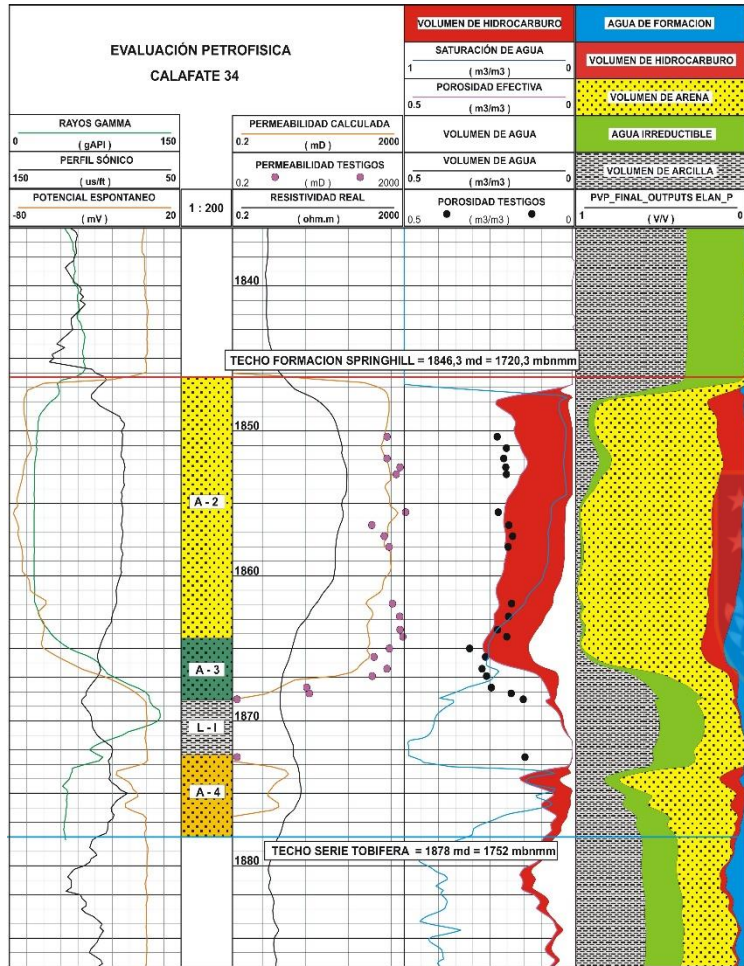
4. Resultados

- El análisis estructural de los mapas isobáticos y los perfiles sísmicos indican que la situación estructural está definida por un sistema de fallas cuya ocurrencia va desde el Cretácico Inferior hasta el Terciario.
- De acuerdo con la distribución del contacto petróleo-agua y a los antecedentes estructurales, el límite o cierre del yacimiento es un sistema combinado en el que se reconocen cierres estratigráficos y estructurales, tanto isobáticos como por fallas.
- La evaluación petrofísica indica que el contacto petróleo-agua original se encuentra diferenciado a ambos lados de la falla principal que corta el yacimiento. Mientras que en el flanco W el contacto petróleo-agua se localiza en los 1.730 m b.n.me.m, en el flanco oriental se reconoce este contacto a los 1.756 m b.n.me.m. Esta variación se debería a la presencia de una importante falla asociada al sistema estructural del yacimiento.

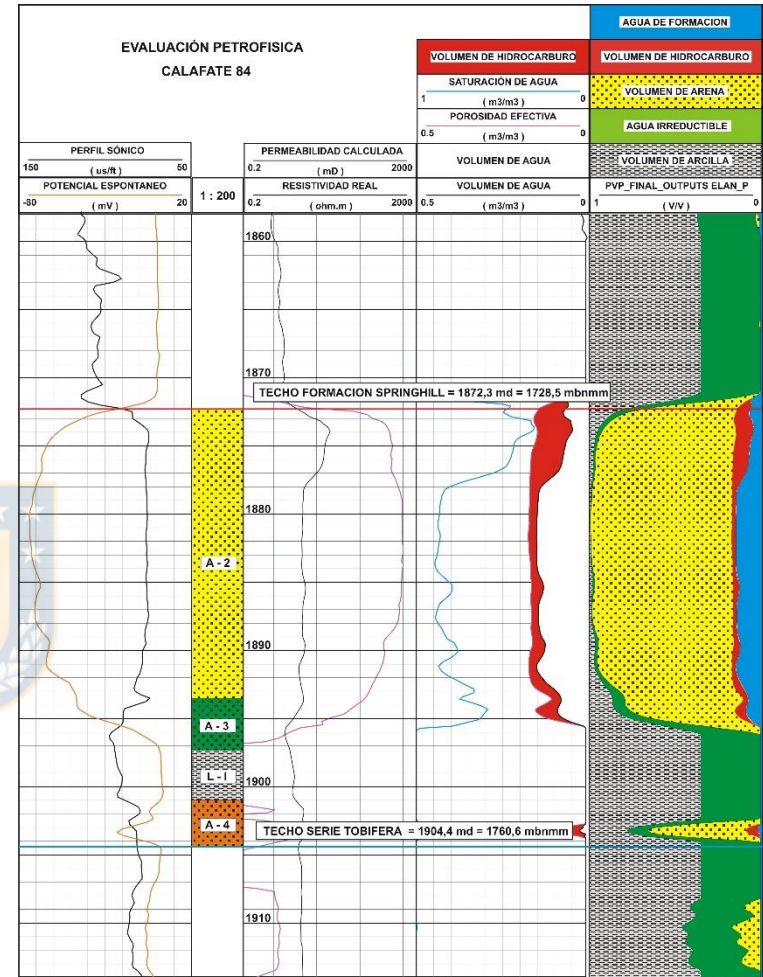


a) Mapa isobático estructural yacimiento Calafate. b) Sección sísmica Oeste-este. c) Columna Estratigráfica generalizada del yacimiento.

a)



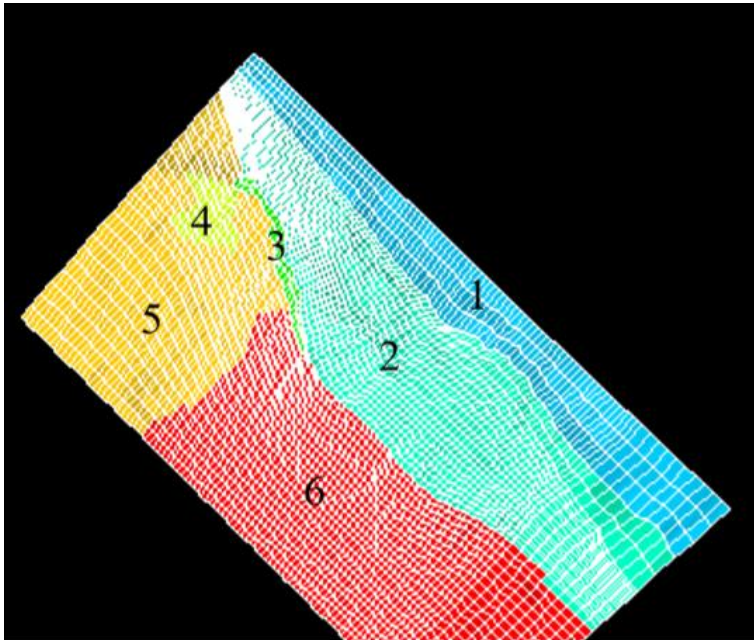
b)



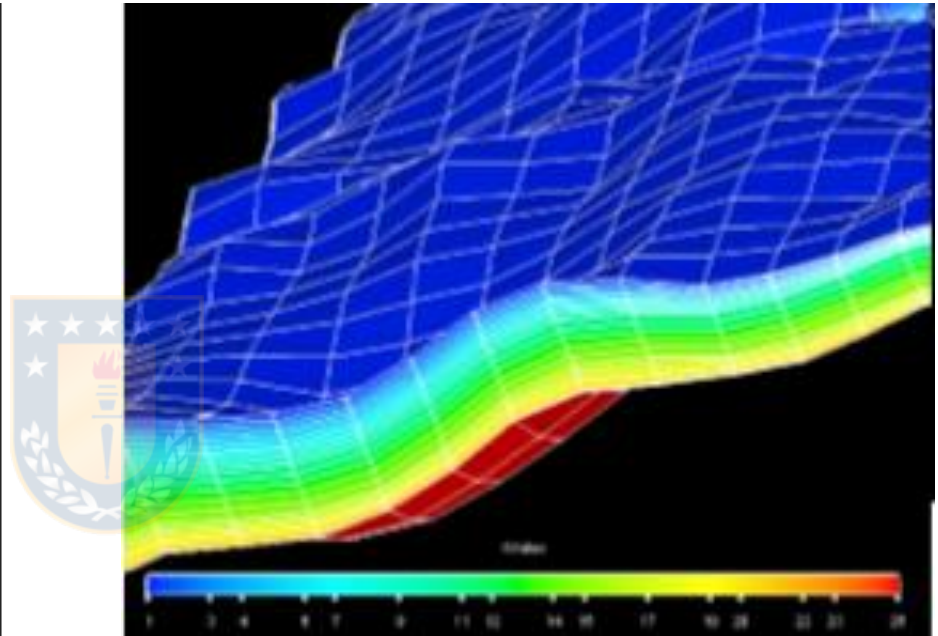
a) Evaluación Petrofísica Pozo Calafate 34.

b) Evaluación Petrofísica Pozo Calafate 84

4. Resultados. Modelo de Simulación

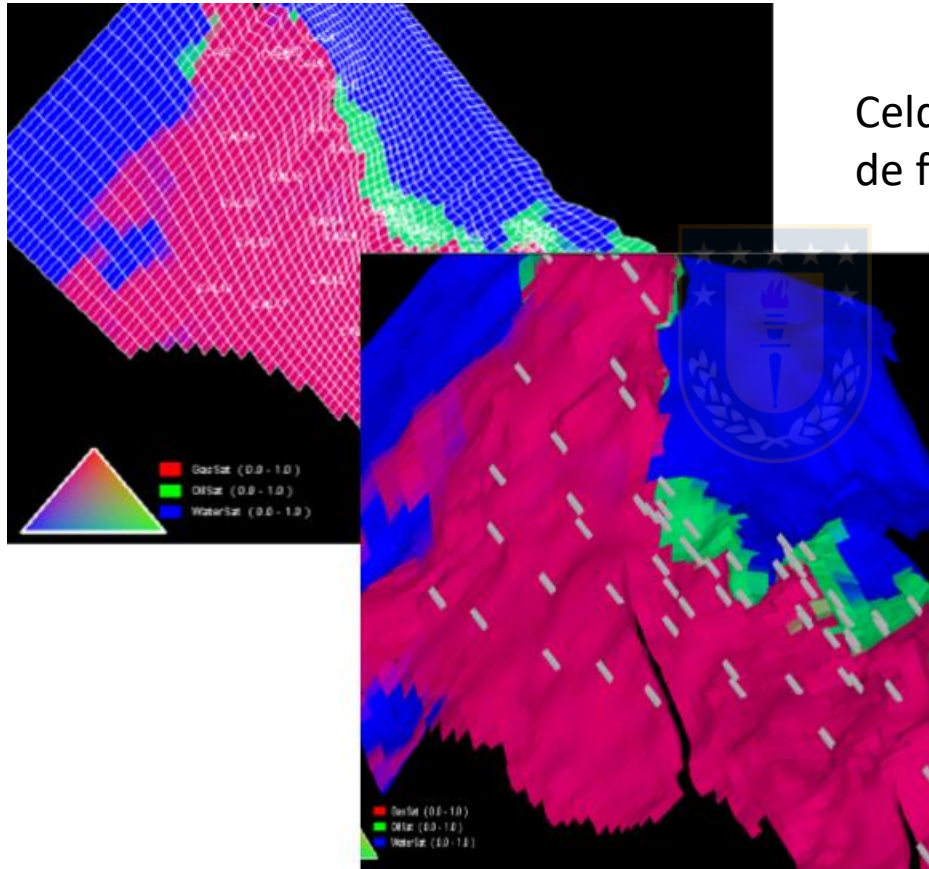


Grilla de simulación y regiones de equilibrio definidas para el yacimiento



Detalle de distribución vertical de celdas.

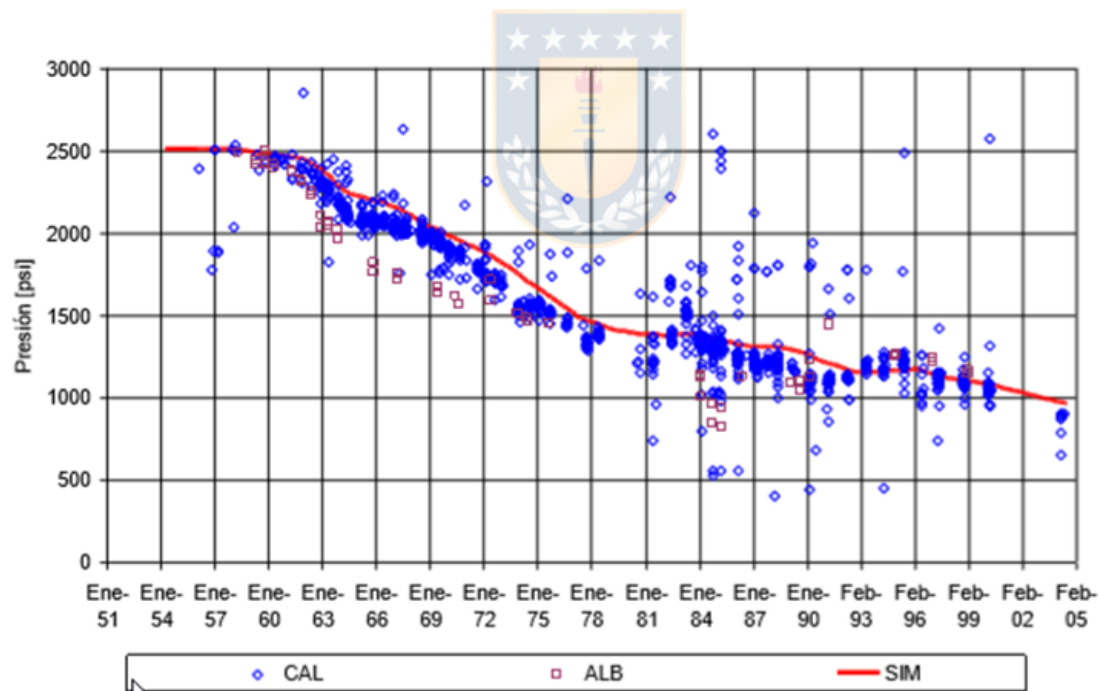
4. Resultados. Modelo de Simulación



Celdas activas y distribución inicial de fluidos del reservorio.

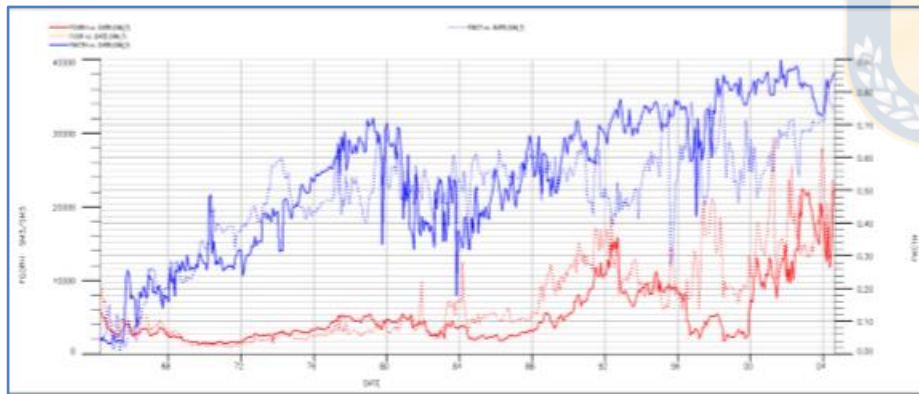
5. Discusión

- Ajuste de la presión: pese a la dispersión de los datos de presión medidos históricamente, es posible identificar una tendencia bastante definida, lo que es un indicador de la buena comunicación entre las regiones. Este comportamiento es bien emulado por la respuesta del modelo, y el calce es bastante satisfactorio.

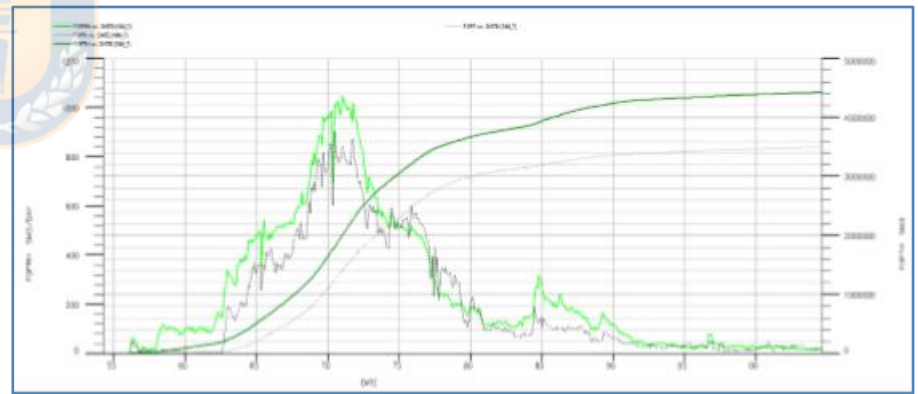


5. Discusión

Ajuste de las producciones: en las gráficas se observa que, en los inicios de la vida productiva del campo, y hasta mediados de 1962, el ajuste de la producción de gas es perfecto y la producción de petróleo entregada por el modelo es nula



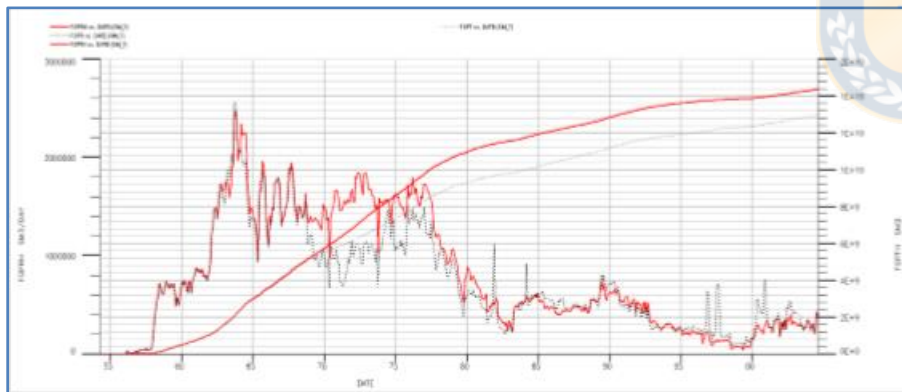
Ajuste histórico GOR y Wcut



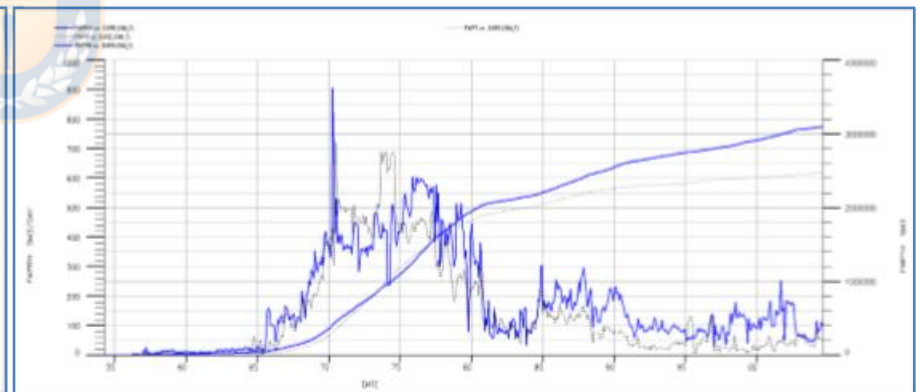
Ajuste histórico producción petróleo

5. Discusión

- Respecto de la producción de gas, desde 1968 hasta 1974, aproximadamente, los caudales de producción simulados son bastante inferiores a los históricos, período en el cual la producción de agua simulada es mayor a la histórica, aun cuando tal diferencia no es observada, en magnitud comparable, en las curvas de las relaciones W_{cut} y G_{or} , en este mismo período.



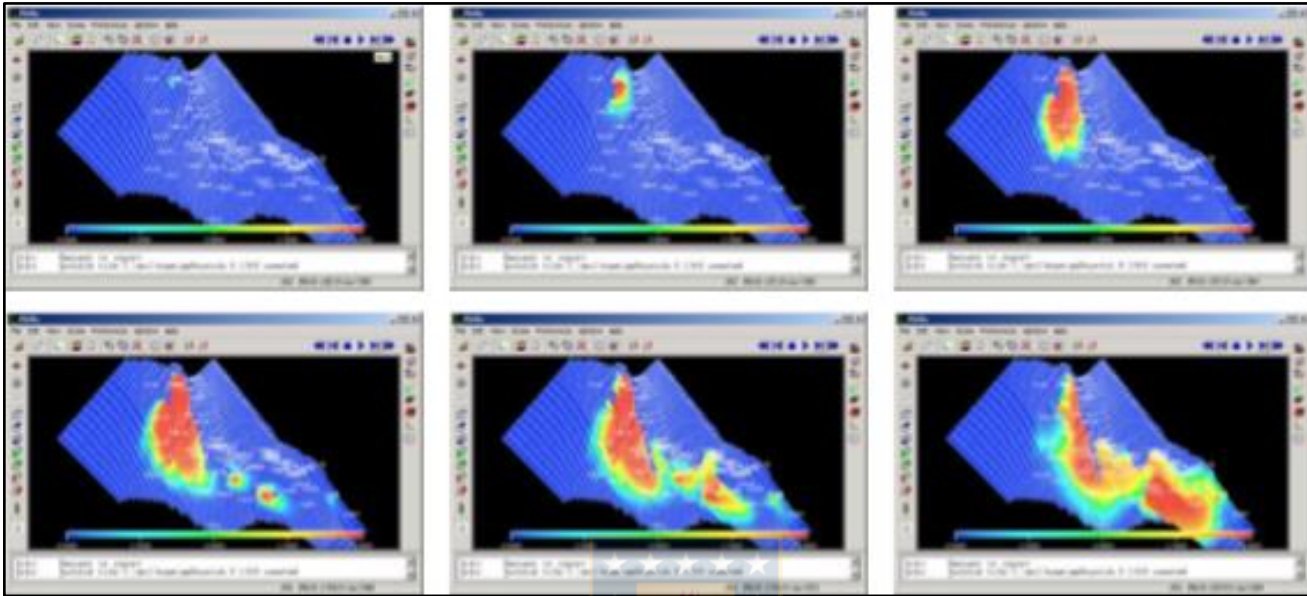
Ajuste histórico producción gas



Ajuste histórico producción agua

5. Discusión

- Desde 1980, cuando la producción de petróleo deja de ser importante, el ajuste de las producciones de gas vuelve a ser bastante preciso, aunque el modelo es incapaz de reproducir las producciones de agua. Respecto de la producción de petróleo, se observa que ésta experimenta un repunte a partir del año 1984, debido a los trabajos de workover, reparaciones, repunzados, y al efecto del barrido por reinyección de gas en el bloque petrolero. Sin embargo, esta tendencia al alza también se constata en las otras fases, de tal manera que es posible definir que las curvas de las relaciones entre ellas, W_{cut} y GOR, mantienen su tendencia general creciente.
- El problema del modelo para emular las producciones históricas; el déficit de gas y exceso de agua entre los años 1968 y 1974, y el déficit de petróleo y, particularmente, de agua a partir del año 1985, encuentran su explicación en las dificultades para controlar el movimiento de fluidos de reservorio en el sector oriental del yacimiento, desde el pozo Calafate 56 hacia el sur, donde se verifica una zona de muy fuerte pendiente y alta densidad de pozos.



Secuencia histórica de inyección de gas



6. Conclusiones

- La unidad superior, o marina, principal reservorio económico del yacimiento, tiene amplia distribución, con disposición de espesores acomodada al relieve antiguo.
- La subunidad superior consiste en arenisca de cuarzo, con gradación inversa ligera, de grano fino en la base a grano medio a grueso en el techo; matriz arcillosa y leve cemento calcáreo disminuyendo hacia arriba, sin embargo, su desarrollo vertical no es constante, presentando algunos niveles delgados con abundante cementación.
- La reconstrucción ambiental del yacimiento se esquematiza con la ocurrencia de afloramientos pertenecientes a la Serie Tobífera en los sectores altos sometidos a meteorización y erosión sobre la cual se trazan cursos fluviales con un área de influencia de sus depósitos, así como depósitos de llanuras aluviales. Posteriormente ocurre influencia marina comprendida entre las líneas de alta y baja marea distinguiéndose dos áreas de depósitos paralelas entre sí y a la línea de costa, islas de barrera en una zona más externa y lagoons hacia el continente

6. Conclusiones

- El modelo estático constituye una buena aproximación a la simulación en la medida que los datos disponibles sean confiables y tengan una distribución representativa tanto en la horizontal como en la vertical y además se dispongan de suficientes variables a ser evaluadas tales como porosidad, espesor de las unidades, volumen de arcillas, permeabilidad horizontal y vertical, saturación de fluidos, relación net to gross, etc
- La respuesta del modelo de simulación, avalado especialmente por el ajuste histórico en presión, permite sustraer cerca del 50% del gas inyectado total al reservorio, de tal forma que el gas inyectado “perdido” alcanza los 6.816 MMm³.
- Este valor, y la posibilidad de que gran parte de este gas haya migrado por la falla N-S que limita la estructura por el Este, justifican planificar estudios adicionales de análisis del área para investigar posibles zonas en las que se pudiera haber acumulado este gas.
- El balance de materia global indica que las reservas de gas remanentes susceptibles de ser producidas hasta el año 2025, alcanzan los 2.383 MMm³.