

# RESERVORIOS CARBONÁTICOS NATURALMENTE FRACTURADOS EN EL YACIMIENTO CAIMANCITO (FORMACIÓN YACORAITE), CUENCA CRETÁCICA DEL NOROESTE ARGENTINO

Santiago GROSSO<sup>1</sup>, Ramiro LÓPEZ<sup>2</sup>, Gustavo VERGANI<sup>3</sup> y Sol O'LEARY<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Pluspetrol Perú Corporation S.A., San Isidro, Lima 27, Perú. sgrosso@pluspetrol.net.

<sup>2</sup>YPF S.A. Puerto Madero, Buenos Aires.

<sup>3</sup>Pluspetrol S.A. Buenos Aires.

<sup>4</sup>Fronterra Geosciences. Houston, Texas, USA.

## RESUMEN

La Formación Yacoraite está constituida por rocas carbonáticas de color gris blanquecino-amarillento y en menor proporción también por margas y areniscas color gris medio, limolitas color verde claro a rojo violado y arcilitas negras. Las intercalaciones pelíticas negras constituyen la roca madre de hidrocarburos y los carbonatos conforman el reservorio. Se encuentra depositada en la cuenca Cretácico/Terciaria del noroeste argentino dentro del Subgrupo Balbuena que involucra también a la infrayacente Formación Lecho, depositadas durante un episodio de subsidencia termal. Previamente existió un período de rifting donde se depositó el Subgrupo Pirgua. Ambos subgrupos conforman la base del Grupo Salta (Neocomiano-Eoceno). El Yacimiento Caimancito se ubica al este de la serranía de Calilegua, provincia de Jujuy y su principal reservorio lo constituyen dolomías y calizas naturalmente fracturadas de la Formación Yacoraite, con porosidad de 5,7 % y permeabilidad primaria de 0,1 mD a 8,1 mD con valores que ascienden hasta 250 mD. Las fracturas observadas en subsuelo, en imágenes y dip-meter de pozo, son de alto ángulo dispuestas en tres sistemas principales: dos con rumbos E-O y NO-SE interpretadas como abiertas (Tipo I) y otro N-S (Tipo II) cerradas. La intersección de ambos sistemas de fractura, fragmentan bloques rectangulares de variados tamaños. La mayor cantidad de fracturas se produce en los carbonatos. La intensidad de fracturación aumenta a medida que disminuye el espesor de los estratos calcáreos. La orientación de las fallas inversas es de rumbo N-S paralelo a las serranías andinas y el de las fallas directas es de rumbo E-O.

**Palabras clave:** *Reservorios fracturados, carbonatos, hidrocarburos, Formación Yacoraite.*

## ABSTRACT

*Natural fractured carbonate reservoirs in Caimancito field (Yacoraite Formation), cretaceous basin of northwestern Argentina*

The Yacoraite Formation lithology is mainly composed by carbonate rocks of gray whitish-yellowish colors and also by marls, siltstones, sandstones and claystones of middle gray, pale green or reddish-purple color. The interbedded black claystones are the hydrocarbon source rock and the carbonates are the reservoir. It is deposited in the Cretaceous/Tertiary basin of the northwestern Argentina inside the Balbuena Subgroup which involves also the underlying Lecho Formation originated during an episode of thermal subsidence. A previously rifting period occurred and was deposited the Pirgua Subgroup. Both subgroups are the base of Salta Group (Neocomian-Eocene). The Caimancito oil field is located east of Calilegua hills, in sub-Andean foothill, at the Jujuy province, Argentina. The main reservoir is composed by fractured dolomites and limestones of the Yacoraite Formation with an average porosity of 5.7 % and permeability from 0.1 mD to 8.1 mD and some values up to 250 mD.

The fractures observed in borehole images and dip-meter are high dipping angle with three different main trends: E-W and NW-SE (Type I) interpreted as open and N-S (Type II) as closed. The sets fracture intersections produce rectangular blocks varying in size according to the lithology and stratigraphy. The fractures tend to be located in carbonates rather than in silicoclastics. The fracture intensity increases as the bed thinning. The trends of the reverse faults are N-S parallel to the Andean hills and the normal faults are E-W trend.

**Keywords:** *Fractured reservoir, carbonates, hydrocarbons, Yacoraite Formation.*

## INTRODUCCIÓN

El Yacimiento Caimancito se ubica en la Provincia de Jujuy, al este de la serranía de Calilegua, dentro de la provincia geológica de Sierras Subandinas, en la cuenca cretácica del noroeste argentino, distante 1350 km al noroeste de la ciudad de Buenos Aires. La zona de estudio se ubica en la región occidental de la subcuenca de Lomas de Olmedo, dentro de la provincia geológica de Sierras Subandinas donde existe deformación por la tectónica andina. El yacimiento estudiado, está constituido por una trampa estructural de tipo braquianticlinal con rumbo norte-sur que presenta expresión en superficie (Fig. 1a). Existe un fallamiento de tipo inverso de azimut norte-sur que afecta los flancos del anticlinal y otro fallamiento de tipo normal con dirección este-oeste (Figs. 2 y 3).

La Formación Yacoraite se encuentra a 4000 m de profundidad y está compuesta por carbonatos naturalmente fracturados que constituyen el principal reservorio, el cual fue estudiado mediante descripciones de coronas, perfiles de pozos, imágenes de pozo abierto, información geofísica de sísmica 2D y los afloramientos más cercanos en la sierra de Calilegua. El objetivo del trabajo es el de caracterizar el reservorio y estimar las reservas de petróleo remanentes.

## MARCO GEOLÓGICO

### Estratigrafía

La Formación Yacoraite, inicialmente denominada "Horizonte Calcáreo-Dolomítico" (Bonarelli 1913), fue definida en la localidad tipo, en la quebrada del río Yacoraite al sur del poblado de Uquía, provincia de Jujuy (Groeber 1952, Turner 1959). Se depositó en la cuenca cretácico/terciaria del noroeste argentino y, estratigráficamente es parte del Subgrupo Balbuena (Fig. 1b), se relaciona genéticamente con un episodio de subsidencia termal luego de un período de rifting inicial. Suprayaciendo a la Formación Yacoraite se ubica la Formación Olmedo, la cual, siguiendo el criterio estratigráfico de Boll *et al.* (1987) y Disalvo (2002) se la adjudica a la base del Subgrupo Santa Bárbara considerándosela como el inicio de una secuencia, representando un sistema de

nivel bajo (*Low Stand System Tract*) asociado con la presencia de sal existente en zonas del interior de la cuenca en esta unidad.

Regionalmente el espesor promedio de la Formación Yacoraite es de unos 150 m, aunque presenta variaciones con respecto a su posición relativa del borde de cuenca (Moreno 1970). En afloramientos el espesor total varía desde 150 m en la Puna (Turner y Méndez 1979) hasta 350 m en Sierras Subandinas (Mingramm *et al.* 1979).

En el Yacimiento Caimancito el espesor total de la Formación Yacoraite es de 242 m, subdivididos en dos miembros principales: el inferior denominado Miembro Puesto Guardián con 153 m y el superior o Miembro Las Avispas de 89 m de potencia (Boll *et al.* 1987). En la base del Miembro Las Avispas se presenta una "sección limoarcillosa" de unos 14 m de espesor que separa a ambos miembros carbonáticos (Fig. 4). El contenido de carbonato aumenta hacia arriba, siendo mayor la abundancia en el Miembro Las Avispas, el cual representa el principal reservorio del yacimiento (Disalvo *et al.* 2002).

En el afloramiento del cerro Amarillo, ubicado en la sierra de Calilegua a unos 25 km al oeste del Yacimiento Caimancito, presenta 172 m, integrados litológicamente por depósitos calcáreos de color blanquecino a amarillento bien estratificados correspondientes a calizas (*grainstones*) de grano grueso, mediano y fino, calizas cristalinas, dolomías, estromatolitos, mudstones, fango calcáreo, areniscas gris blanquecinas, lutitas y pelitas verdes y negras (Ghiglione y Nappauer 2009). La geometría externa de los cuerpos sedimentarios es tabular con base y techo planos con espesores que varían entre 20 cm y 70 cm. En el caso de los bancos de estromatolitos alcanzan hasta 1,3 m de potencia. En sus afloramientos los bancos calcáreos son más resistentes a la erosión que las pelitas, forman relieve positivo respecto de las intercalaciones pelíticas, realizando su continuidad. La "sección limoarcillosa" se presenta como una intercalación de pelita verdosa de mayor espesor que el resto de las intercalaciones (Fig. 1c).

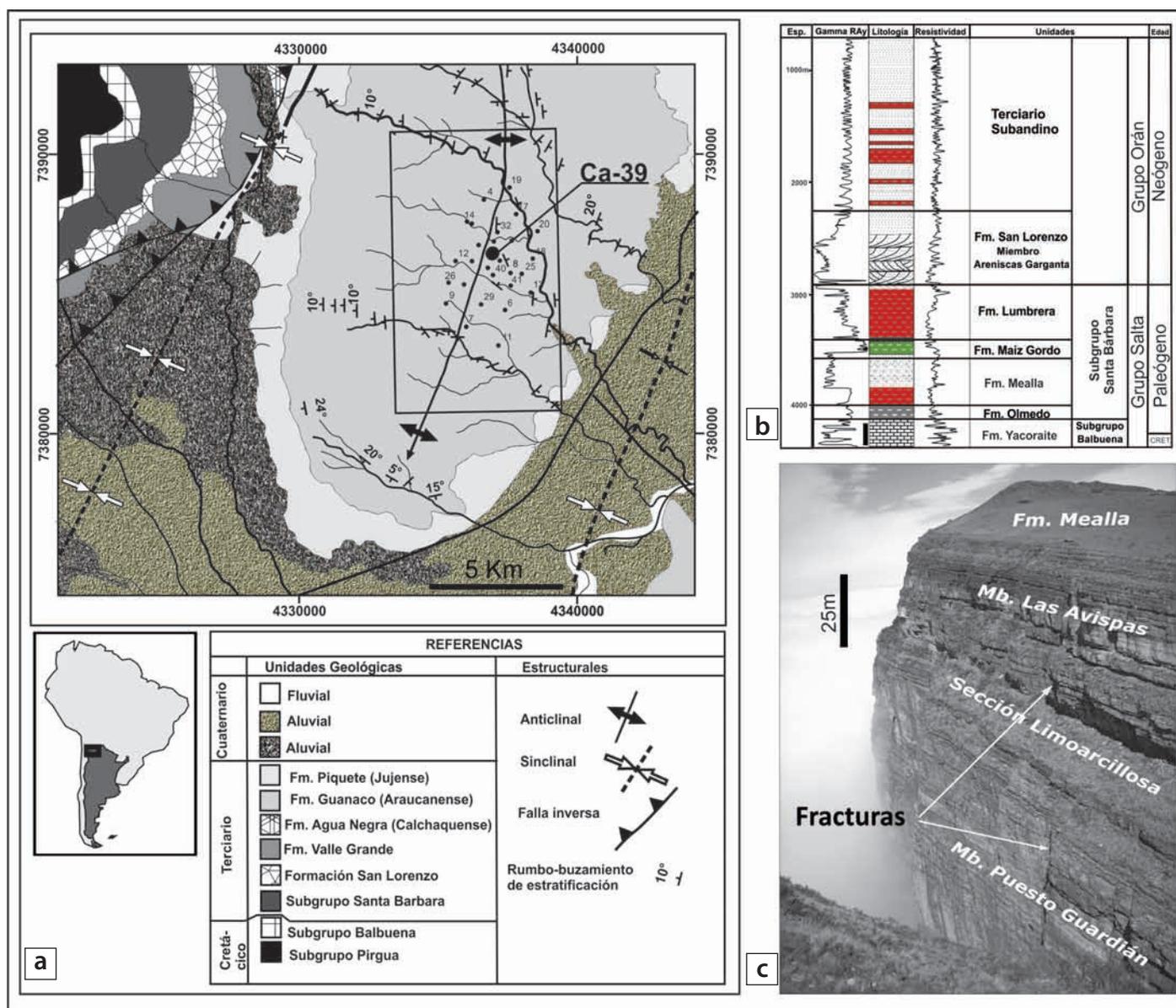
Hacia otros lugares de la cuenca, como en el "flanco sur" de la subcuenca de Lomas de Olmedo, en el suroeste de la provincia de Salta, el intervalo estratigráfico ubica-

do en la base del Miembro Las Avispas, se encuentra representado por areniscas de origen continental (eólico con laminación entrecruzada) y marino somero denominadas "Arena 6A" y "Arena 6B", que suman unos 15 m de potencia. Su distribución es irregular e interpretada como producto de un período de "nivel del mar bajo relativo" (*lowstand*) del sistema sedimentario que generó una discordancia en la base de la misma que erosiona diferencialmente más en una zona que en otra a modo de valles incisos en el borde de cuenca.

La discordancia de la base de las Arenas 6A + 6B es la que separa las Secuencias 3 de la 4 o el Miembro Puesto Guardián del Miembro Las Avispas (Disalvo *et al.* 2005) y es equivalente a la que se ubica entre las secuencias 3 y 4 del perfil de la figura 4, o sea en la base de la "sección limoarcillosa" cuyos depósitos interpretados de "nivel bajo" representarían un ambiente sedimentario mareal en donde en la zona costera predominan depósitos pelíticos de planicie fangosa que al progradar temporalmente dentro de la cuenca, se intercalan entre los depósitos carbonáticos de nivel alto del Miembro Puesto Guardián y Las Avispas.

En la subcuenta de Metán-Alemania los tres miembros de Formación Yacoraite son denominados Amblayo, Güemes y Alemania ubicándose el límite K/T en algún lugar dentro de la sección clásica del Miembro Güemes, para la cual se han documentado valores altos de Cr, Ni y Co en la zona media a inferior de la sección areno-limosa (Marquillas *et al.* 2003). El Miembro Güemes sería equivalente a la "sección limoarcillosa" de la subcuenta de Lomas de Olmedo.

En el Subgrupo Balbuena o Supersecuencia Balbuena se diferenciaron cuatro secuencias clásicas-carbonáticas, que abarcan un intervalo temporal de unos 11Ma y denominadas: SB I, SB II, SB III y SB IV (Boll 1991, Hernández *et al.* 2008). Dentro de cada secuencia la sección basal clásica representa el nivel de base bajo y la sección superior carbonática representa el nivel de base alto. El nivel bajo de la primera secuencia corresponde a la Formación Lecho y su nivel alto es representado por el Miembro Puesto Guardián "basal" (Fig. 4). La segunda y tercer secuencias representan el resto



**Figura 1:** a) Mapa geológico de superficie del Yacimiento Caimancito con el pozo Caimancito-39 donde se realizó la imagen de formación; b) Perfil de un pozo tipo del Yacimiento Caimancito, estratigrafía y litología de las unidades principales; c) Fotografía de la Formación Yacoraité en la sierra de Calilegua, cerro Hermoso, presentando sus tres miembros y el fracturamiento vertical.

del Miembro Puesto Guardián, comenzando la segunda con areniscas+volcanitas y la tercera con areniscas, continuando ambas con calcáreos. La cuarta secuencia comienza con su nivel bajo en la “sección limoarcillosa” y termina con el nivel alto en el Miembro Las Avispas. Cada secuencia se ha subdividido en parasecuencias determinándose un total de 24 para toda la Formación Yacoraité y su transición a la Formación Lecho (Boll 1991), correspondiendo 6 de ellas a la Secuencia I, 8 a la Secuencia II, 2 a

la Secuencia III y 7 a la Secuencia IV (Hernández *et al.* 2008). Estas parasecuencias abarcan algunos metros de espesor y posiblemente un lapso de decenas a centenas de miles de años (Disalvo 2002). Las sedimentitas de la Formación Yacoraité se apoyan sobre diferentes sustratos según la distancia relativa al borde de cuenca en que se encuentren, observándose un diazonismo relativo respecto de las formaciones infrayacentes. En la mayor parte de la cuenca suprayace a la Formación Lecho de

ambiente continental eólico pero en otras, más de borde, como en las cabeceras de Río Tala (Russo 1952) o en la serranía de Calilegua y Yacimiento Caimancito, se apoya sobre pelitas rojas de la Formación Pirgúa.

## METODOLOGÍA

Para el estudio estratigráfico y de reservorio se contó con datos de pozos, descripciones de *cutting* y coronas originales de YPF. Además se redescubieron en el año 2009 frag-

mentos de la corona del pozo Caimancito-xp-4 analizándose la composición mineralógica en cortes delgados con tinción de rojo-s alizarina para diferenciar la calcita de

la dolomita y una muestra mediante rayos X. Se impregnaron con resina *Epoxy* azul para la descripción del espacio poral. La clasificación granulométrica se realizó con

Dunham (1962) y la porosidad por Choquette y Pray (1970).

Para el análisis estructural se utilizaron datos de sísmica 2D pudiéndose observar el tipo de fallamiento inverso en los flancos y el fallamiento directo que afecta a la cresta del anticlinal, validándose estos datos con los rumbos observados en los perfiles de buzamiento (*dipmeter*) y en las repeticiones o supresiones de espesor de los pozos.

Se realizaron mediciones de rumbo y buzamiento de las diaclasas en el campo en los afloramientos de la Formación Yacoraite en el anticlinal de la sierra de Calilegua en cerro Amarillo y en el río Jordán observándose similitud con la orientación de las fracturas en subsuelo del Yacimiento Caimancito.

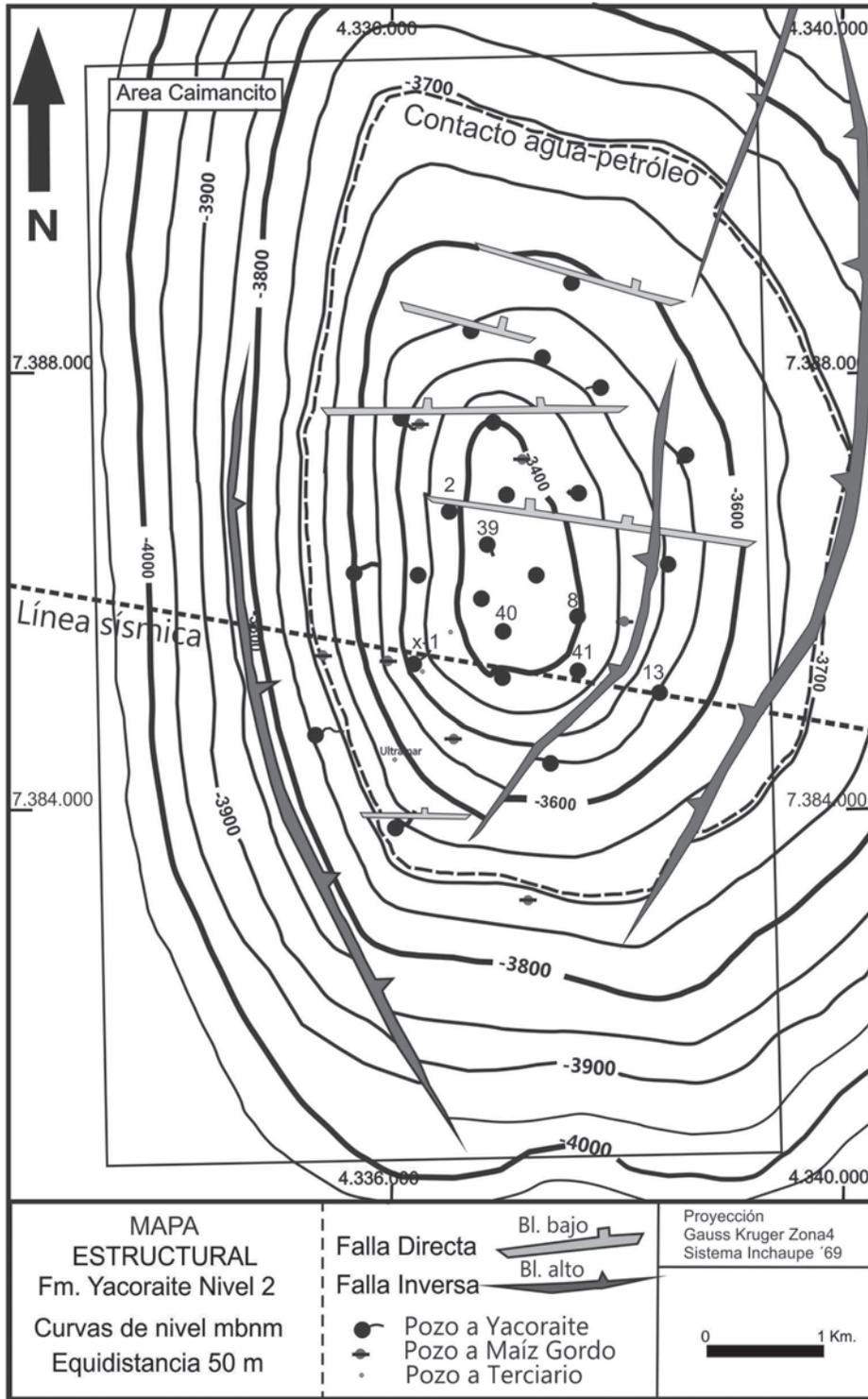
Con los datos de perfiles eléctricos de pozos se localizaron fallas mediante repetición o supresión de intervalos estratigráficos de las unidades sedimentarias correlacionadas en subsuelo. Con el perfil de imagen fue posible establecer el rumbo de las fracturas principales e identificar la dirección del máximo esfuerzo horizontal, a partir del análisis de la deformación del pozo (*breakout*). El perfil de *dipmeter* se utilizó para determinar el buzamiento de la estratificación y algunos eventos de alto ángulo se interpretaron como fracturas.

En los pozos con testigos coronas se observó que el reservorio carbonático presenta alto buzamiento de las fracturas.

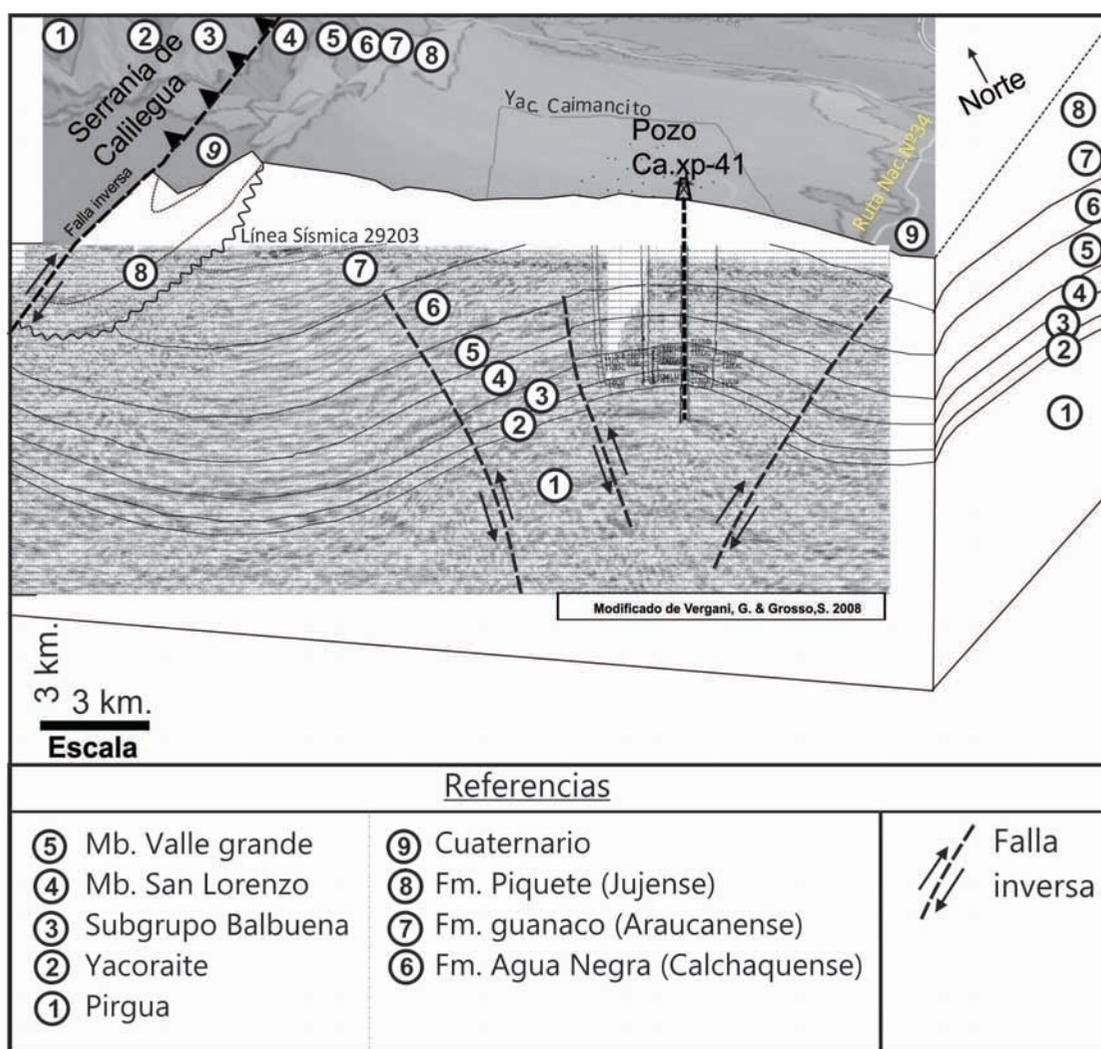
El perfil del calibre o diámetro del pozo se utiliza para inferir fracturas considerando que las variaciones en la pared del pozo son derrumbes asociados a las mismas. También el perfil sónico en función de la baja velocidad de la onda acústica estima zonas con fracturamiento.

### Ambiente depositacional

Las estructuras sedimentarias observadas en los carbonatos correspondientes a *grainstones* oolíticos son tractivas y subácneas, reconociéndose estratificación entrecruzada planar (producto de megaóndulas de cresta recta), estratificación entrecruzada sigmoidal y en artesa (producto de megaóndulas de crestas sinuosas) y ondulitas de oleaje al tope de los bancos. En la zona del dique Cabra Corral se observaron "micro-herringbone" (entrecruzada bidireccional)



**Figura 2:** Mapa estructural del Yacimiento Caimancito al tope de la Formación Yacoraite Miembro Las Avispas, Nivel 2. Obsérvese la coincidencia del contacto agua-petróleo con las fallas inversas en flancos oriental y occidental.



**Figura 3:** Bloque diagrama de la estructura del Yacimiento Caimancito y los pozos perforados a lo largo de una línea sísmica de rumbo este-oeste entre ellos el pozo profundo YPEJj.Ca.xp-41, con la columna estratigráfica atravesada hasta el Grupo Pirgua.

de pequeña escala indicando ambiente con influencia de mareas. Brechas intraclásticas en *mudstones* compuestas por “*rip-up clasts*” son frecuentes. También se presentan grietas de desecación de 4 cm a 25 cm de diámetro con diseño poligonal en planta. La bioturbación es frecuente conformando en general tubos verticales (Figs. 5a y 6b). Se observan estromatolitos “*bindstones*” tipo *Pucalithus* (Mingramm *et al.* 1979) conformando bancos continuos de geometría externa tabular y de aspecto macizo, con estructura interna compuesta por láminas de 1cm de espesor que confieren una geometría interna monticular de 50 cm a 2 m de diámetro (Figs. 7 y 8).

El ambiente de sedimentación corresponde a un sistema lacustre de aguas salobres

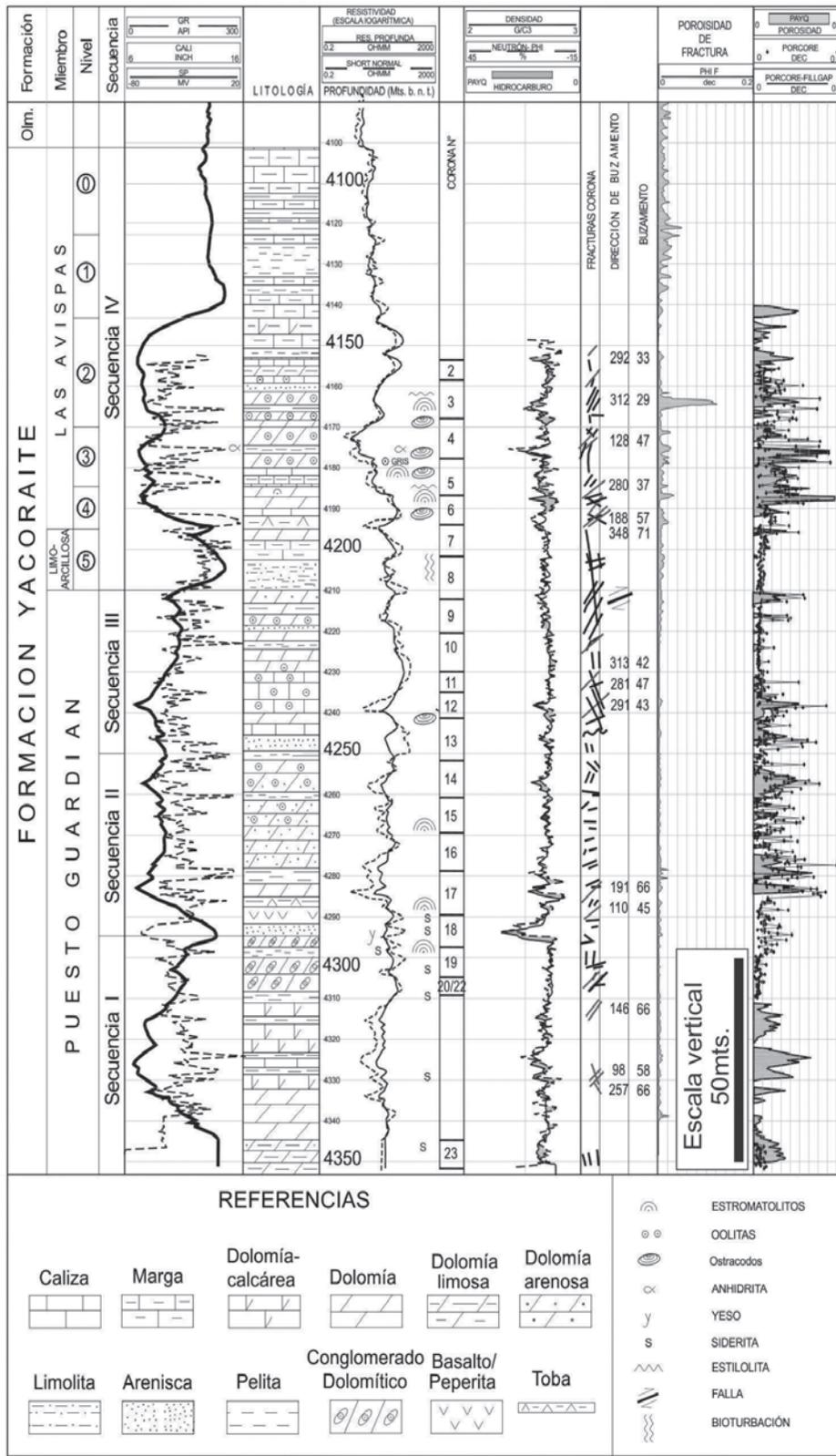
posiblemente con influencia marina lejana evidenciada por la baja intensidad de la marea indicada por estructuras sedimentarias del tipo *micro-herringbone* las cuales se asocian a un ambiente de escasa profundidad. Se observaron también facies de “*shoreface*” (zona de plataforma cercana a la costa variando a playa) con influencia de tormenta. Si bien el ambiente interpretado es semejante a ejemplos documentados de carbonatos lacustres presentes en todo el registro geológico (Tiercelin 1991), en el caso de Formación Yacoraite existió además una leve influencia marina evidenciado por estructuras sedimentarias e icnofósiles.

#### Fósiles y edad

Los restos fósiles existentes corresponden

a gasterópodos (*Melania sp.*), espinas, escamas y dientes de peces (*Gasteroculpea branisai* y *Pycnodontiformes* de edad campaniana-maastrichtiana), ostreas y huesos de reptiles. Los ostrácodos y foraminíferos encontrados son de edad senoniana (Mingramm *et al.* 1979) y se considera que abarcan un intervalo desde el Maastrichtiano al Daniano con un rango entre los 73 y 62 millones de años incluyendo el límite K/T (aprox. 66,5MA) (Hernández *et al.* 2008). Se han reportado restos de vegetales mal conservados y huellas de dinosaurios en el Miembro Puesto Guardián (Alonso y Marquillas 1986).

Las tazas fósiles en la localidad de Maimará a unos 78 km al oeste de Caimancito, mayormente corresponden a *Skolithos*, *Thalas-*



**Figura 4:** Perfil tipo de la Formación Yacoraité en el pozo YPFJj.Ca.xp-4 ubicado al norte del Yacimiento Caimancito, con el Miembro Puesto Guardián, de composición dolomítica-arenosa, el Miembro superior Las Avispas de composición carbonática predominante y la “sección limoarcillosa” intermedia. Se observan fracturas en toda la Formación Yacoraité.

*sinoides*, *Arenicolites* y *Diplocraterion*, indicando características de plataforma somera y elevada energía con influencia de marea (Cónsole Gonella y Aceñolaza 2009).

Si bien la posición estratigráfica del límite K/T es incierta, se interpreta que podría estar ubicado en la base de la “sección limoarcillosa” representando un episodio de “nivel bajo” (*lowstand*).

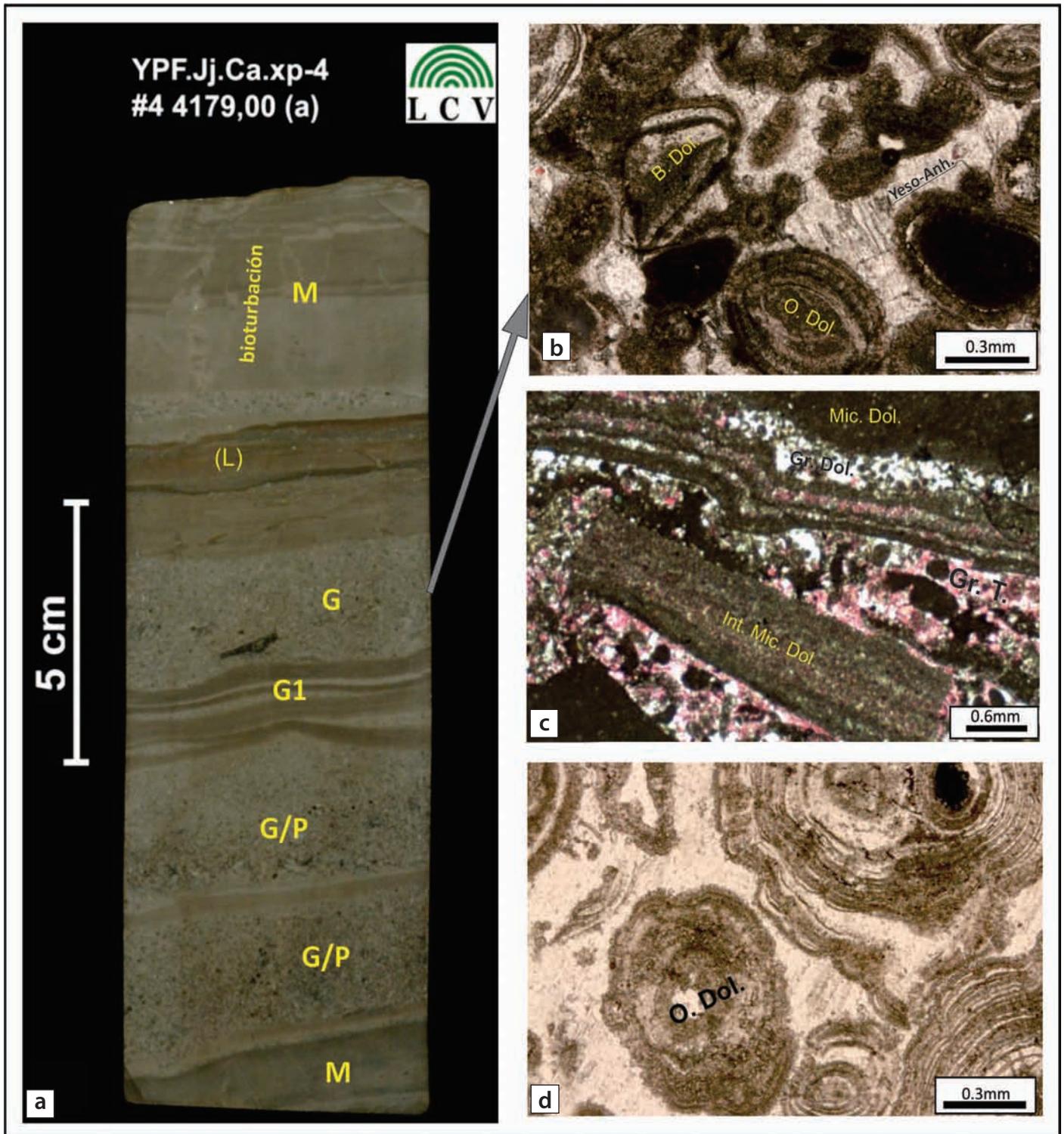
**Descripción del reservorio**

La Formación Yacoraité en el Yacimiento Caimancito presenta reservorios carbonáticos con un espesor de 97 m permeables respecto de los 242 m de espesor total estratigráfico. Los intervalos permeables están constituidos por intercalaciones de poco espesor integradas litológicamente por dolomías y calizas que presentan un sistema poral de doble porosidad debido a su fracturamiento natural. La porosidad total promedio es 5,7 % de la cual a la matriz le corresponden 5,3 % y a las fracturas 0,4 %. El rango de la porosidad de la matriz es de 1 hasta 17% y el rango para las fracturas es de 0,4 a 3,0 %. Porosidades bajas del 1% a 5% pertenecen a microporos intragranulares. Las muestras que presentan buena porosidad presentan microporos intergranulares con valores del orden de 11% con permeabilidades de unos 4 milidarcys. La permeabilidad de la matriz del reservorio está en un rango de 0,1 a 8,1 mD con valores que ascienden hasta 250 mD. Las fracturas y microfisuras contribuyen al aumento general de la permeabilidad del reservorio independiente de la matriz que es poco permeable.

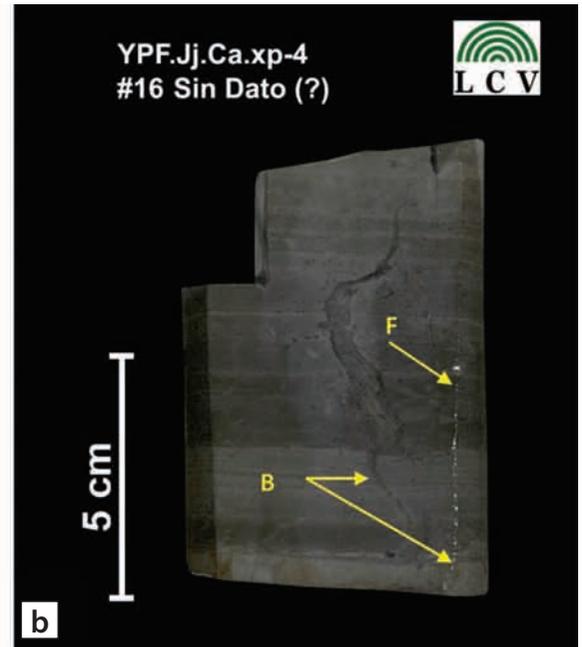
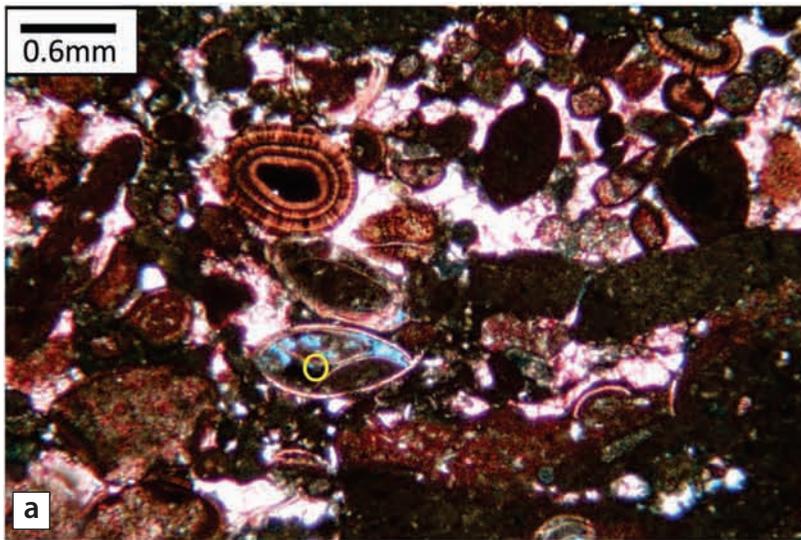
La porosidad primaria en los carbonatos es de tipo intergranular y la porosidad secundaria es de tipo móldica debido a disolución o fracturas encontrándose en litologías de *packstones* y *grainstones* oolíticos mayoritariamente dolomitizados (*dolopackstones* y *dolograinstones*), estromatolitos (*bindstones*) dolomitizados y brechas intraclásticas dolomitizadas. Las granulometrías más finas como *dolomudstones*, pelitas o tobas no presentan porosidad ni características de reservorio.

**Mineralogía del reservorio**

En la corona del pozo Caimancito-xp-4, los carbonatos de las Formación Yacoraité



**Figura 5:** a) Litologías de Formación Yacoraite, Miembro Las Avispas correspondientes al testigo corona del pozo Caimancito-xp-4 (4179,00 m b.b.p.), *Grainstone/Packstone* (G/P) oolítico, bioclástico dolomitizado, cemento anhidrítico y esparítico. Porosidad: 6.4%, permeabilidad al gas 0,0196mD. Limolitas (L) y *mudstone* (M) bioturbado; b) Microfotografía de corte delgado del trozo de corona anterior (4179,00 mbpp) donde se observa bioclasto de ostrácodo dolomitizado (B. Dol.), oolitas dolomitizadas (O. Dol.) reemplazadas por pseudomorfismo con cemento anhidrítico; c) *Mudstone* limoso dolomitizado, las zonas oscuras corresponden a *mudstone* dolomítico sin teñirse de rojo alizarina al igual que las partes más blancas corresponden a cristales de dolomita. Existen algunos granos de peloides, ooides e intercristales de dolomita recristalizada de mayor tamaño. El 85% de la muestra es dolomita, 7% calcita, 8% silicoclastos, cuarzo y limo concentrados en láminas y lentes; d) Detalle de *grainstone* oolítico-bioclástico de grano medio a grueso con oncolitos, espatolitos y *grapestones*, con 70% de dolomita la cual ha reemplazado en finos cristales a las mismas oolitas (a modo de pseudomorfismo), 30% de yeso cementa totalmente la muestra presenta porosidad de 9,5% y permeabilidad de 0,016mD.



**Figura 6:** a) Miembro Puesto Guardián (4256,66m b.b.p.). *Packstone/grainstone*, peloidal, oolítico, bioclástico con abundantes ostrácodos (O). El 47% de la muestra es calcita, el 45% es dolomita y el 8% es anhídrita como parte del cemento junto con calcita. Su porosidad es baja; b) *Mudstone/wackstone/packstone* dolomitizados, color gris oscuro medio. *Mudstone* de composición dolomítica suprayacido por *wackstone/packstone* pelotoidal, laminación paralela, dolomitizado. Se observan bioturbaciones, tubos verticales (B), fisuras verticales rellenas con micrita (F), sin porosidad visual. La difracción de Rayos-X dio valores de 83% de dolomita, 5% cuarzo, 3% feldespatos, 2% arcillas y 5 % otros componentes. La arcilla es principalmente illita.

están constituidos principalmente por dolomita, le siguen en orden de importancia la calcita y finalmente el cuarzo correspondiente a la porción acompañante de arena. Existen otros componentes como feldespatos, anhídrita, illita, piritita y zeolitas. Presentan alta densidad real de roca relacionada a la presencia de dolomita, anhídrita, piritita y calcita.

De un total de 623 muestras analizadas mediante difracción de rayos-X el predominio de dolomita ocurre en el 70% de las muestras, en el caso de la calcita y el cuarzo el predominio es del 20% y 10% respectivamente (Cuadro 1). En la “sección limoarcillosa” el mayoritario es el cuarzo.

Un ejemplo de la disposición vertical de la litológica se puede observar en la descripción del perfil litológico de detalle (Fig. 4). El origen de las dolomías es interpretado como diagenético, de tipo secundario, ocurrido en un momento temprano posterior a la depositación remplazando a la calcita o aragonita.

En la figura 5a, se presenta un fragmento de corona del Miembro Las Avispas (4179,00 m b.b.p.), donde se observan capas con laminación subparalela de *grainstones* oolíticos (G) de grano medio a grueso (30 mm

de espesor) y finas capas de *grainstones* bioclásticos (G1) de 2 mm de espesor con ostrácodos de 1mm de diámetro, enteros y dolomitizados. Las capas de *mudstone* (M) limoso calcidolomítico son de 17 mm de espesor y se presentan biotubadas. Se distinguen finas capas de limolita calcárea (L). La base del intervalo *grainstone-mudstone* tiene contacto neto y techo ondulado.

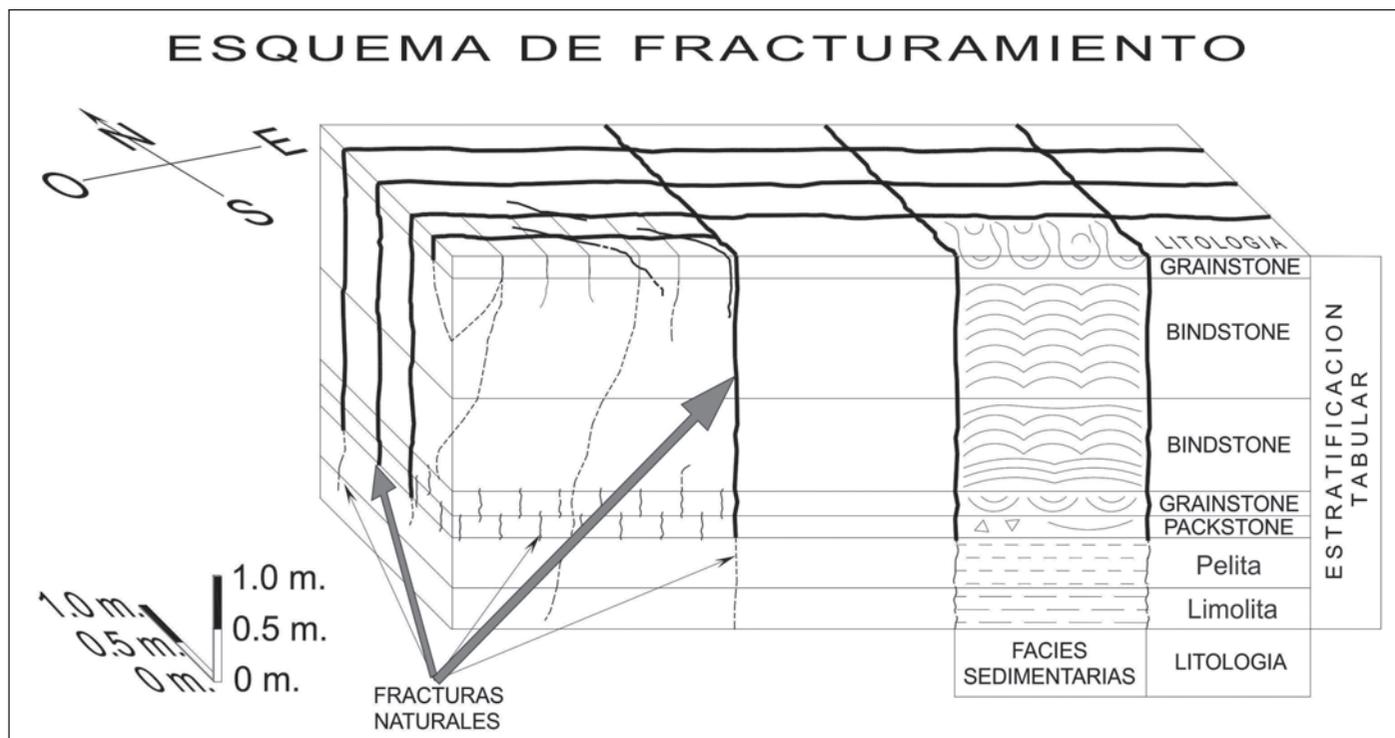
Las capas de *grainstones* de grano medio a grueso (G) presentan oolitas micritizadas y algunos núcleos piritizados, oncolitos, peloides y *grapestones*, cemento de esparita y anhídrita con impurezas de material intersticial (materia orgánica?/sulfuros?) que otorgan coloración oscura. Se observa una

tendencia granodecreciente de base a techo de cada capa. Los bancos de *packstones* (P) mezclados con *grainstones* (G/P) se presentan completamente dolomitizados y con cemento anhídrico (Fig. 5b). La densidad de grano aparente es 2,68gt/cm<sup>3</sup> y la densidad real es 2,87gt/cm<sup>3</sup>. La porosidad es 6,4% y la permeabilidad es 0,0196mD, el 70% de la muestra es dolomita y el 30% es anhídrita.

La figura 5c, muestra un *mudstone* limoso dolomitizado (4166,50 m b.b.p.). El color macroscópico es gris oscuro a medio. Está finamente laminado con limolita calcárea y *grainstones* con peloides e intraclastos. La laminación es paralela y presenta estiloli-

**CUADRO 1:** Muestras analizadas por YPF mediante rayos-X de la corona del pozo Ca-xp-4, en los miembros de la Formación Yacoraite, indicando el número donde prevalece el componente mineral más abundante. Se observa que en la mayoría de las muestras (70%) prevalece la dolomita.

Intervalo	Análisis por difracción de rayos x			
	Muestras	Mineralogía		
		Dolomita	Calcita	Cuarzo
Miembro Las Avispas	181	122	24	21
“sección limoarcillosa”	75	7	1	67
Miembro Puesto Guardián	367	268	78	17
Total: Formación Yacoraite	623	397	103	105



**Figura 7:** Bloque diagrama ejemplificando el IF de la Formación Yacoraita definido como el cociente entre el espesor del estrato y la separación de las fracturas. El valor del IF es de 0,6 a 0,8 m/m en litología calcárea con bancos de pequeño espesor como *grainstones*; de 0,43 m/m en bancos de mayor espesor como *bindstones* y cercana a 0 (cero) en litología no calcárea de *mudstones* y *siltstones*.

tas. En corte delgado no se observa porosidad, la composición mineralógica es 8% silicoclástica, 7% de calcita y 85% de dolomita. No se observa tinción o la misma es muy leve, lo cual indica que la muestra está dolomitizada. La parte oscura superior de la microfotografía corresponde a una micrita (fango) totalmente dolomitizada (Mic. Dol.). La laminación blanca superior corresponde a un *grainstone* (Gr. Dol.) y las láminas inmediatamente inferiores que se presentan teñidas corresponden todas a cemento de calcita o granos carbonáticos cuya composición es de calcita (Gr. T.). Los escasos componentes silicoclásticos no se tiñen. En la parte inferior de la fotografía se observa un fragmento rectangular interpretado como un intraclasto de *dolomustone* (Int. Mic. Dol.).

La figura 5d, muestra un *grainstone* oolítico dolomitizado del Miembro Las Avispas (4182.00 m b.b.p.) que presenta color gris medio, grano medio a grueso cementado por anhidrita y algo de esparita. Oolitas de 0,80 a 2,0 mm de diámetro, normales

y compuestas, intraclastos carbonáticos y espatolitos. La composición general presenta 66% de granos carbonáticos, 30% de cemento anhidrítico y 4% de porosidad. Los valores petrofísicos son de 9,5% de porosidad y 0,0159 mD de permeabilidad, densidad aparente: 2,60 gr/cm<sup>3</sup> y la densidad real es 2,87gr/cm<sup>3</sup>. La composición mineralógica es de 70% de dolomita y 30% de anhidrita/yeso. La porosidad es baja de tipo intragranular 95% y móldica 5%. La secuencia de procesos y productos diagenéticos es: micritización, dolomitización, disolución, y cementación. La foto 5d, corresponde a la sección teñida de la muestra con rojo alizarina pero las oolitas y pellets al ser de dolomita no se tiñen. Algunas oolitas han mantenido su forma por un proceso de remplazo isomórfico de la calcita a dolomita, otras han cambiado su estructura concéntrica original al ser remplazadas por cristales más grandes (O. Dol.). No se observaron cristales tamaño limo o arena de dolomita.

*Packstone/wackstone* (4256,66 m b.b.p.):

correspondientes al Miembro Puesto Guardián. Macroscópicamente presenta alternancia de *packstone/wackstone* limoso con laminación difusa compuestos por *pellets*, ostrácodos enteros y rotos, intraclastos y oolitas concéntricas parcialmente dolomitizados. En corte delgado se observa textura granosostén y textura grumosa (Fig. 6a). De la composición general de la roca el 65% son granos carbonáticos que corresponden a *pellets*, ostrácodos, ooides (O) e intraclastos parcial o totalmente dolomitizados, 16% es matriz micrítica dolomitizada y 18% es cemento de calcita y anhidrita. Se observan pellets micritizados que no se tiñen con alizarina y oolitas concéntricas que se tiñen en capas concéntricas junto con parte del cemento calcítico. La mineralogía es 45% dolomita, 47% calcita y 8% anhidrita. La porosidad es de tipo móldica (O) muy baja del 1%. En este caso la dolomitización ha sido secundaria de tipo pseudomórfica remplazando los componentes originales de calcita o aragonita compuesta por pequeños cristales. La calcita se presen-

ta como un mosaico esparítico que tapiza los poros.

Una muestra de corona del pozo Ca-xp-4, de la carrera 16, del Miembro Puesto Guardián se analizó con rayos X, y presentó la siguiente composición: 83% dolomita, 5% cuarzo, 3% feldespato, 2% plagioclasa, 2% arcilla y 5% de minerales accesorios. La fracción arcilla presentó valores de 90% de illita y 10% illita-esmectita. La muestra corresponde macroscópicamente a una roca de granulometría variable desde fina a media: fango intercalado con laminaciones alternantes de *mudstone/wackstone/packstone/grainstones* peletoidales dolomitizados de colores grises oscuro, medio y claro con bioturbaciones de tubos verticales, sin presentar porosidad visual (Fig. 6b).

La solubilidad al ácido clorhídrico (calimetría) de las dolomías y calizas es mayor al 90% disminuyendo hasta 6% en el caso de las areniscas.

En la sección limoarcillosa se presentan fangolitas, fangolitas dolomitizadas, fangolitas tobáceas, tobas, vaques tobáceas mudstones dolomitizados y limolitas. Este tipo de rocas fangosostén tanto clásticas como carbonáticas, no poseen porosidad y las que poseen son escasas, presentando valores que oscilan de 0,5 a 2,0% correspondiendo a microporos intragranulares.

La mejor calidad de reservorio se ubica hacia su tope en el Miembro Las Avispas coincidiendo con la parte más carbonática, mostrando una relación espesor útil/espesor total (E.U./E.T.) de 0,45 mientras que en la parte inferior del Miembro Puesto Guardián la relación E.U./E.T. es de 0,21.

El Miembro Las Avispas es la sección con más datos de coronas y mejor conocida de la Formación Yacoraite en el yacimiento. De los 23 pozos perforados en la Formación Yacoraite, 20 alcanzan a la sección superior del Miembro Las Avispas y solo 3 continúan llegando hasta el Miembro Puesto Guardián. La razón por la cual la mayoría de los pozos termina en la parte superior del Miembro Las Avispas es porque es la zona más somera, presenta mejores características petrofísicas y utilizan a la "sección limoarcillosa" como barrera impermeable al agua que asciende desde la zona inferior del Miembro Puesto Guardián.

En la base de la Formación Yacoraite se

presentan niveles volcánicos en superficie (Marquillas y Salfity 1994) encontrándose similitud con la zona de estudio en subsuelo. En la zona inferior cercana a la base del Miembro Puesto Guardián del afloramiento del cerro Amarillo se presentan 3 niveles de tobas. En el Yacimiento Caimancito existen intercalaciones cerca de su base de vulcanitas (basaltos) y brechas volcánicas. Como reservorio no presentan porosidad efectiva o sus valores son muy bajos de 0 a 2%.

En el Yacimiento Palmar Largo, ubicado al este de la subcuenca de Lomas de Olmedo provincia de Formosa, se presentan vulcanitas (basaltos y andesitas) ubicadas directamente en la base de la Formación Yacoraite, las cuales presentan cambio lateral de facies gradual pasando desde vulcanitas en el cono efusivo a brechas y areniscas volcaniclasticas y en la zona distal, a carbonatos de la Formación Yacoraite. Las brechas y areniscas volcaniclasticas constituyen el principal reservorio del yacimiento, denominado Formación Palmar Largo.

#### *Características del Yacimiento Caimancito y desarrollo productivo*

El Yacimiento Caimancito se descubrió en febrero de 1969 con el pozo exploratorio YPF.Jj.Ca.x-1, realizado por la compañía estatal YPF, que luego de más de 7 meses de perforación resultó productivo para la Formación Yacoraite a una profundidad de 4010 m de la superficie con una producción de petróleo diaria de 500 metros cúbicos y una acumulada de 1.225.000 metros cúbicos.

El área mineralizada del yacimiento Caimancito originalmente presenta una superficie de unos 29 km<sup>2</sup>, con una columna de petróleo en la Formación Yacoraite de 300 m de espesor desde su cresta hasta el contacto agua-petróleo (Fig. 2). La altura del cierre de la trampa anticlinal es de unos 1000 m pero existen fallas en los flancos coincidentes con el contacto agua-petróleo por donde se interpreta que se fugó el hidrocarburo hacia las Formaciones Maíz Gordo y Lumbraera suprayacentes. La mineralización en las Formaciones mencionadas se ubica únicamente en el flanco occidental, mientras que en el flanco oriental se presentan acuíferas; posiblemente se deba a

que la fuga del petróleo desde la Formación Yacoraite ocurrió más en el flanco occidental del anticlinal el cual se presenta con mayor buzamiento y seguramente mayor fracturación de estos reservorios.

Luego del descubrimiento se continuó con la perforación de 36 pozos de los cuales 23 fueron dirigidos a la Formación Yacoraite, 10 a las formaciones Maíz Gordo y Lumbraera, y 3 inyectores en el Terciario de la Formación Agua Negra. En el año 1990 se realizó el último esfuerzo exploratorio con el pozo YPF.Jj.Ca.xp-41 que alcanzó una profundidad de 5643 metros de la superficie y permaneció en Formación Pirgua sin encontrar un objetivo profundo repetido tectónicamente de la Formación Yacoraite interpretado por sísmica 2D (Fig. 3).

En la Formación Yacoraite están los yacimientos productores de petróleo más profundos del país como los campos de Yacarecito y La Bolsa, así como los más profundos productores de gas de Sudamérica, el yacimiento Valle Morado de 6150 m (Disalvo *et al.* 2002).

El petróleo original *in situ* de la Formación Yacoraite es de 24.385.800 m<sup>3</sup> con una saturación de agua original por perfiles promedio de 50%. La temperatura del reservorio es 295 °F a 4580 m de profundidad, la salinidad del agua de formación es 110 gr/lit. de sales totales, el petróleo posee 42° API, con un Bo de 2,23 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>. El yacimiento alcanzó a producir 6000 m<sup>3</sup>/día, teniendo actualmente 12 pozos activos que producen sin declinar 60 m<sup>3</sup>/día con un porcentaje de agua del 65 %. El yacimiento no presenta casquete gasífero porque el mantenimiento de presión natural hace que no alcance el petróleo su punto de burbuja. El volumen de petróleo producido históricamente de la Formación Yacoraite es de 9.887.000 m<sup>3</sup>, y si incluimos las formaciones Maíz Gordo y Lumbraera llega a un total de 10.800.000 m<sup>3</sup>. Este campo es el más importante de petróleo en la cuenca cretácica acumulando la mitad del petróleo de la misma. Tiene la mayor acumulada por pozo del país con el récord del pozo YPF.Jj.Ca-8 de 1.912.000 m<sup>3</sup>. La presión del reservorio es de 480 kg/cm<sup>2</sup> que tiende a disminuir con la producción y se recupera cuando se deja de producir.

En el año 2009 la empresa Pluspetrol S.A.

reintervino el pozo YPF.Jj.Ca-39, cerrado por problemas mecánicos, re-perforando la sección del fondo desde la Formación Mealla hasta Yacoraite. Se encontró el contacto agua-petróleo en la cresta del anticlinal con una saturación de agua por perfiles de 70%, produciendo luego con un porcentaje de agua del 97%. Se interpreta que la producción actual proviene desde el petróleo residual de la matriz del reservorio que es barrido por el agua que asciende con presión original desde el acuífero realizando un empuje natural de agua, el cual, se estima que es lateral por medio de fracturas de los flancos, con recarga activa desde la sierra de Calilegua ubicada unos 25 kilómetros al oeste. El porcentaje de agua de producción de petróleo actual se reduce mecánicamente disminuyendo el orificio de apertura en boca de pozo, para evitar que las fracturas, que poseen alta permeabilidad, canalicen agua y bajen su porcentaje facilitando la producción de petróleo proveniente de la matriz.

### Estructura y descripción del sistema de fracturas naturales

El sistema de fracturas de la Formación Yacoraite es el resultado de la tectónica andina, cuya componente principal de compresión es la dirección aproximada E-O. El baquianclinal del Yacimiento Caimancito se interpreta que fue producto de una inversión tectónica del *rifft* cretácico. El rumbo del eje del anticlinal en superficie es aproximadamente N-S, mostrando leve vergencia al este (Fig. 1a), sin embargo la expresión de la estructura en subsuelo presenta vergencia al oeste (Fig. 2) (Vergani y Grosso 2008). Es posible que este cambio de la vergencia entre la zona profunda y somera sea debido distintos estilos estructurales y rumbos de fallas preexistentes entre la zona profunda y la somera o a cambios en la dirección de compresión andina en diferentes pulsos tectónicos. En la zona profunda la falla del *rifft* presenta inclinación al este y luego se reactivó de modo inverso con vergencia hacia al oeste mediante una tectónica de “piel gruesa” dando un rumbo aproximado N-S a la cresta del anticlinal en niveles de Formación Yacoraite. Luego en superficie la vergencia que prevaleció fue hacia el este con el movimiento principal andino involucrando al Terciario subandino con tectónica de “piel fina” dando un rumbo dife-

rente al eje del anticlinal NNE-SSO, el cual es perpendicular a la dirección del máximo esfuerzo actual según lo obtenido de imágenes de pozo en subsuelo.

Las fallas inversas se observan en subsuelo en sísmica 2D con rumbo N-S afectando ambos flancos del anticlinal con rechazos verticales de 50 a 220 m en niveles de la Formación Yacoraite. Dos fallas inversas afectan el flanco occidental y una el flanco oriental de la estructura (Fig. 3).

El estilo tectónico distensivo con fallas normales de rumbo E-O y bloque bajo al Norte se observa en la cresta del anticlinal en Formación Yacoraite (Fig. 2).

En subsuelo los pozos YPF.Jj.Ca-19, Ca-14, Ca-7, Ca-xp-4 y Ca-x-2 presentan espesor reducido en el Miembro Las Avispas debido al efecto de supresión de espesor por el fallamiento directo. Asimismo el pozo Ca-40 presenta repetición de parte de su espesor debido a una pequeña falla inversa. Las fracturas observadas en subsuelo se analizaron en detalle en los pozos Ca-xp-4, Ca-15 y Ca-39 ubicados en la cresta del anticlinal. Las fracturas se detectaron mediante herramientas de pozo abierto (imagen sísmica, televisor de pozo y *dipmeter*) observándose 3 rumbos principales: E-O, NO-SE y N-S, las cuales han sido clasificados como fracturas de Tipo I a las dos primeras por disponerse perpendicular al eje del anticlinal y de Tipo II a la última por estar paralelas al eje del mismo (Stearns y Firedman 1972). Otras fracturas que se presentan en menor cantidad presentan rumbo ONO-ESE y se observaron en el pozo Ca-39.

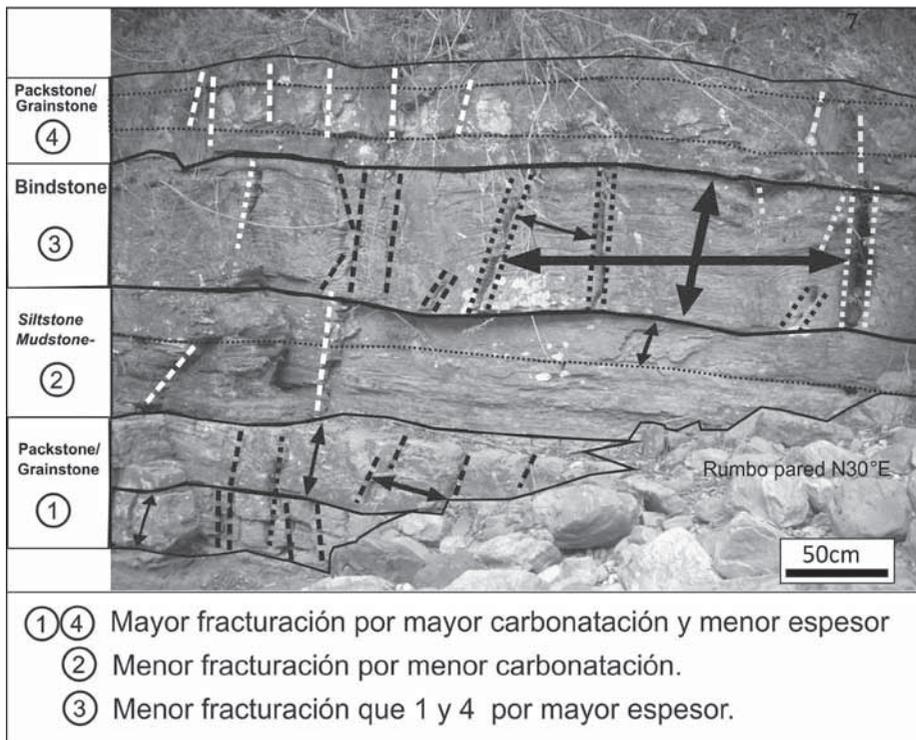
Las fracturas presentan un amplio rango de tamaños asociados al tamaño de las fallas; megafacturas: de más de 10km de longitud, correspondientes a las fallas inversas de rumbo N-S que elevan la estructura de la Sierra de Calilegua y Sierras Subandinas; macrofracturas: de decenas a centenas de metros que atraviesan todo el espesor de Formación Yacoraite correspondientes a fallas inversas y directas, de rumbos N-S y E-O, dentro del Yacimiento Caimancito; mesofacturas: de 1 mm a 1m de longitud, que solo cortan pequeñas capas de 1 a 25 cm de espesor observadas en afloramientos, coronas e imágenes de pozo y microfacturas: son las más pequeñas de 0,22 a 13 mm de longitud observadas en cortes delgados.

### Control del fracturamiento natural

Tanto los afloramientos como las imágenes y perfiles de pozo nos indican que la intensidad de fracturas de la Formación Yacoraite depende de la litología y la estratigrafía (Disalvo *et al.* 2002). Se observa que el mayor porcentaje de carbonato en los sedimentos y el menor espesor de los estratos incrementan el grado de la fracturación (Figs. 7 y 8). De esta manera el Miembro Las Avispas que de por sí presenta mejor calidad de reservorio por ser más carbonático, a su vez presenta mayor cantidad de fracturas y un incremento secundario de porosidad.

La geometría de las fracturas observadas en varios perfiles de buzamiento (*dipmeter*), en televisor de pozo (imagen acústica de la década del '70) del pozo YPF.Jj.Ca-xp-4 y una imagen sísmica del año 2009 del pozo YPF.Jj.Ca-39, indican que tienden a ser más subverticales y más intensas en los intervalos calcáreos de la base y tope del Miembro Puesto Guardián y en el Miembro Las Avispas.

En el sondeo YPF.Jj.Ca-39, el intervalo registrado con la imagen fue el de las Formaciones Olmedo+Yacoraite superior (Miembro Las Avispas y “sección limoarcillosa”) en el cual la densidad de fracturas obtenidas presenta dos intervalos principales de mayor fracturamiento (3855-3910 m b.b.p. y 3985-4020 m b.b.p.) con 4 a 6 fracturas por metro. Las fracturas abiertas se encuentran en Formación Yacoraite y las cerradas en la zona superior correspondiente a Formación Olmedo (Fig. 9, col. 8 y 9), ambos sets mantienen un rumbo y buzamiento similar aproximadamente E-O. El rumbo y dirección de buzamiento de la estratificación es de unos 10° al Norte (Fig. 9, col.7). Las fracturas de alto contraste en imagen se interpretan como fracturas abiertas, el 96% se encuentra hacia la base de Formación Yacoraite (Miembro Las Avispas) en donde se presentan bancos calcáreos de menor espesor (Niveles 3 y 4) (Fig. 9, col. 4, 7 y 8). Se trata de fracturas de alto a muy alto ángulo que conforman 2 familias principales de rumbo: E-O (de mayor número) y ONO-ESE (de menor cantidad), interpretándose como de Tipo I. Las fracturas NNE-SSW son muy escasas y se interpretan como de Tipo II (Fig. 10).



**Figura 8.** Afloramiento de Formación Yacoraite, Miembro Puesto Guardián, en el río Jordán, Valle Grande, sector occidental de sierra de Calilegua (23° 39' 06,8" LS – 64° 56' 14,7" LO). Control de la fracturación en función de la litología. Existe mayor fracturamiento en los packstone/grainstone que en los mudstones-siltstones. Los bindstones presentan menor cantidad de fracturas que los grainstones y presentan mayor espesor.

Las fracturas cerradas en Formación Yacoraite son escasas y presentan un rumbo similar a las abiertas aunque predominan las de rumbo ONO-ESE (Fig. 9, cols. 7 y 9). En Formación Yacoraite, Miembro Las Avispas, las fracturas aumentan desde el tope hacia la base. Las calizas (*grainstones*) y dolomías presentan alta resistividad, bajo *gamma-ray* y alta fracturación mientras que las calizas arcillosas y arenosas presentan baja resistividad alto *gamma-ray* y menor fracturación (Fig. 9, cols. 2, 4, 5, 7 y 8). Evidencias de deformación del pozo (*breakouts*) fueron identificadas en dos pozos con imágenes de formación: Ca-xp-4 y Ca-39 con una orientación N028°-N208° (rumbo NNE-SSO) por lo que la dirección del máximo esfuerzo horizontal actual se interpreta de rumbo ONO-ESE (Fig. 9, col. 6). Se producen *breakouts* por el efecto del esfuerzo máximo horizontal que deforma el diámetro circular del hueco, resultando en un ovalamiento del mismo generándose una rotura en los extremos del óvalo. Es notable la coincidencia entre las princi-

pales orientaciones de las fracturas abiertas y la orientación del máximo esfuerzo horizontal in situ (aproximadamente ONO-ESE) lo cual podría favorecer a un realce de las fracturas por tensión para que se mantengan abiertas (Fig. 10).

En el pozo YPFJj.Ca.xp-4 se observó que los valores de porosidad de fractura obtenidos a partir del perfil sónico muestran el mayor valor en la zona superior del Miembro Las Avispas con valores de 1 a 3% con zonas que alcanzan a los 10%, coincidiendo con la alta variación del calibre, mientras que en el Miembro Puesto Guardián los valores de porosidad son de 0,1 a 1 % (Fig. 4). Los valores de permeabilidad obtenidos del perfil sónico de onda completa mediante la detección de la atenuación de onda Stoneley que se genera en la pared del pozo, indica valores inferidos de permeabilidad de 20 mD para la zona de Formación Yacoraite, Niveles 0, 1 y 2 (zona de fracturas cerradas) y de 50 mD para las zonas de Formación Yacoraite, Niveles 3 y 4 (zona con fracturas abiertas).

En los afloramientos se observa que la intersección de las fracturas Tipo I y II (de rumbos E-O y N-S) presentan un diseño rectangular en planta, mostrando el largo mayor de los polígonos rectangulares en sentido del mayor esfuerzo, es decir de rumbo E-O. Por otro lado se observa que el tamaño de los polígonos de fracturas presenta menor espaciado cuanto menor espesor posee el estrato involucrado (Figs. 7, 8, 11 y 12). Estos bloques presentan geometría de "prismas cuadrangulares rectos" que son utilizados por los lugareños para la construcción de muros o "pircas" para separar parcelas en el campo.

En el tope de la Formación Yacoraite el fracturamiento es más intenso, dando geometría en planta de un pavimento de adoquines rectangulares, debido al tamaño de los bloques de 20 a 30 cm de ancho por 40 a 50 cm de largo, con un espesor de estrato de 30 cm. El mayor ancho de las fracturas sugiere que pueden ser equivalentes a las fracturas abiertas observadas en subsuelo, las cuales presentan aproximadamente el mismo rumbo E-O (Figs. 11 y 12).

La separación entre las fracturas más importantes es de unos 3 m, poseen buzamiento casi vertical, atravesando varios estratos hasta alcanzar decenas de metros de espesor. Las fracturas de menor jerarquía presentan menor espaciado.

Para caracterizar el esquema y densidad de fracturamiento se definió el Índice de Fracturamiento "IF" el cual está dado por el cociente entre el espesor del estrato y el espaciado de las fracturas, expresado en unidades adimensionales de longitud/longitud (cm/cm). Se obtuvieron valores de 0,43 (o sea 132 cm de espesor estratal y 303 cm de espaciado de fracturas) en el caso de los estromatolitos (*bindstones*) que son bancos potentes y de baja porosidad. Valores de IF entre 0,6 a 0,8 (espesor de 28 cm/separación de 32 cm) en el caso de los bancos de menor espesor de *grainstones*. Valores de IF aumentando a 1,0 en los más fracturados como las calizas (*grainstone*, *packstone* y brechas intraclásticas) y valores de IF que tienden a 0 en las arcillas y limolitas independientemente del espesor del estrato ya que no presentan fracturas debido a su mayor ductilidad. La figura 7 muestra un bloque diagrama ejemplifi-

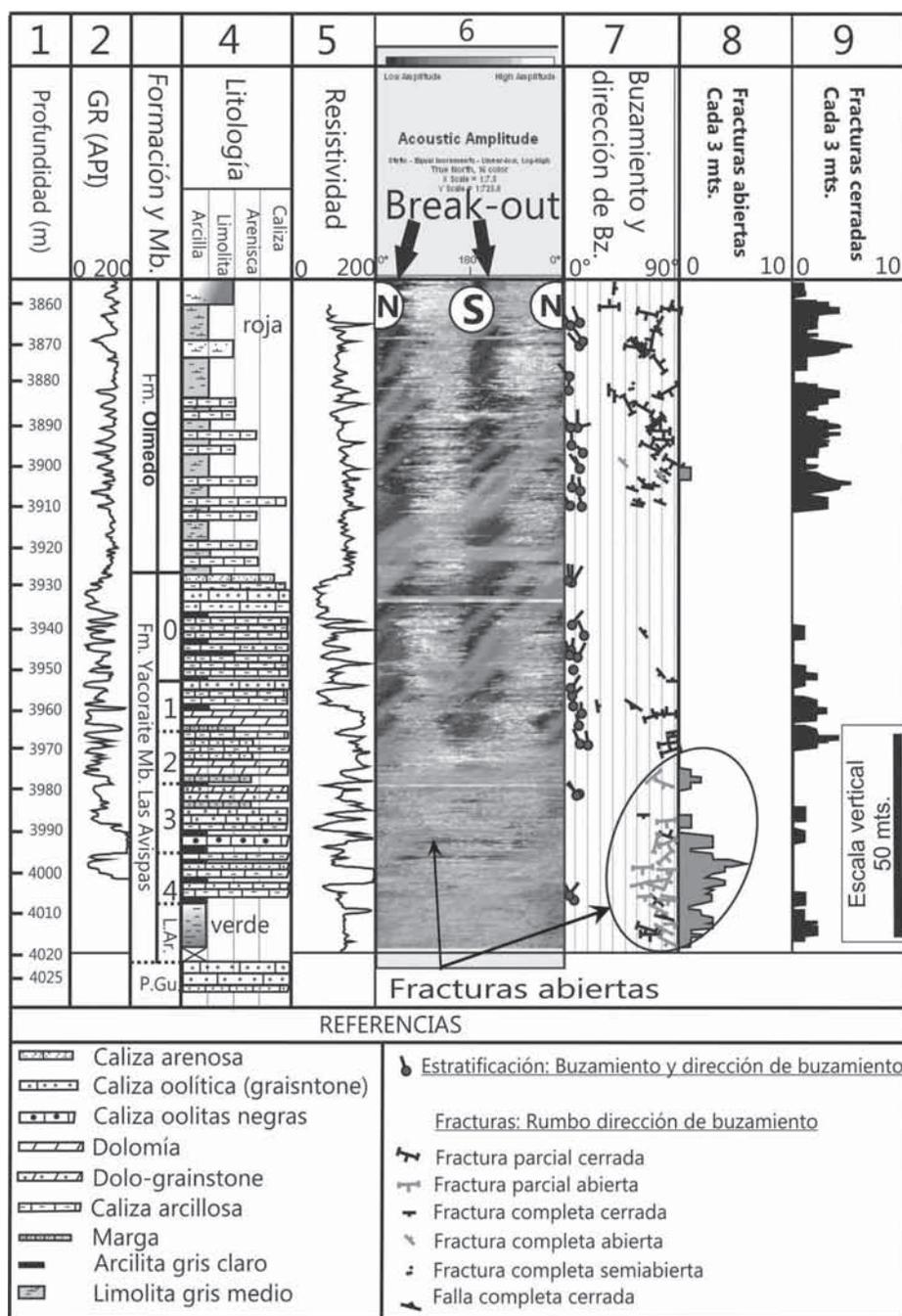


Figura 9: Imagen de amplitud acústica (sónica) a pozo abierto en el pozo Caimancito-39 en el track 6 mostrando breakouts (deformación del diámetro del pozo) de rumbo aproximado N-S, interpretándose un máximo esfuerzo horizontal aproximado E-O. Se observan en la base de la Formación Yacoraite fracturas abiertas.

cando el IF de la Formación Yacoraite en función de la litología, facies sedimentarias y el espesor del estrato. En el extremo izquierdo anterior del bloque se grafica un detalle del fracturamiento. Los bancos de caliza (grainstone/packstone) con estructura sedimentaria en artesa y de pequeño espesor, como el del tope del diagrama, resultan

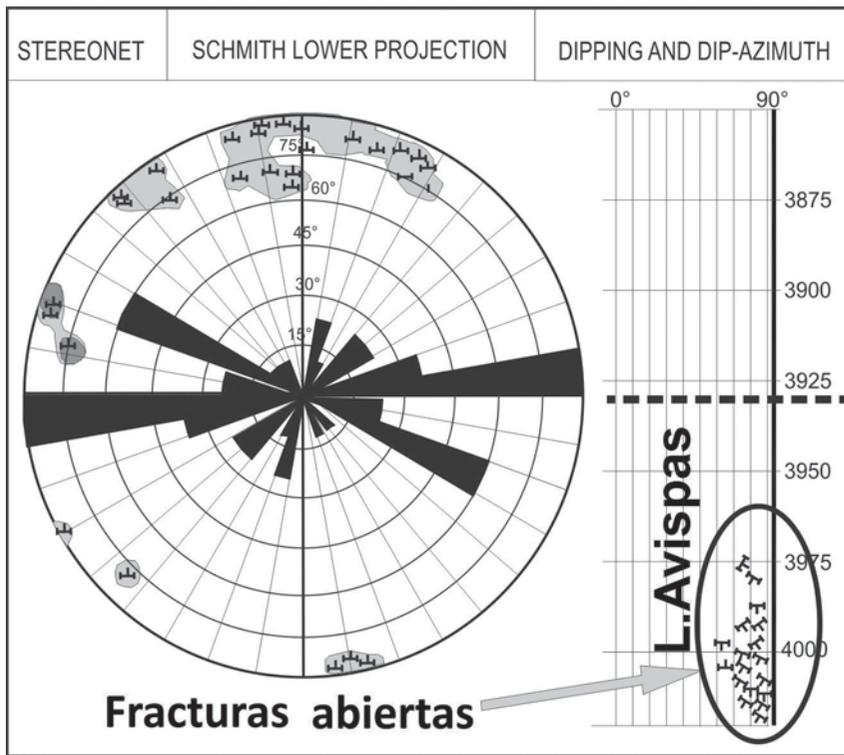
con un mayor contenido de fracturas en su relación espesor/espaciamento. La zona de la cumbre del cerro Amarillo, de 3546 m, presenta afloramientos correspondientes estratigráficamente al Miembro Puesto Guardián y en el faldeo occidental aflora el Miembro las Avispas y la “sección limoarcillosa” formando parte de un anti-

clinal de rumbo aproximado N-S similar al Yacimiento Caimancito. Se midieron orientaciones de fracturas en el flanco occidental del anticlinal en una estación ubicada en 23° 33' 24,8" LS – 64° 51' 26,8" LO, observándose un sistema de fracturas subvertical con espaciamentos de bloques de 35 cm x 2,0 m de lado en estratos de 1,3 m de espesor con acimut de N080° y N105° para las fracturas principales (más largas y anchas) y de N350° y N010° para las fracturas menores (más cortas y estrechas). Similar geometría se observa en el Río Jordán al oeste de la Sierra de Calilegua (23° 39' 07"LS y 64° 56' 15"LO) (Figs. 8 y 11) en donde el acimut de las fracturas principales (las más importantes en largo y ancho) es N091° y N117° y el de las menores (las más pequeñas en ancho y largo) es N030° y N058° (Fig. 11). Se interpreta que las fracturas principales podrían corresponder a fracturas abiertas (Tipo I) y las menores a las fracturas cerradas (Tipo II) que se observan en subsuelo ya que presentan un rumbo similar. Es posible que existan mayor cantidad de fracturas cerradas de este tipo en subsuelo pero por tener la imagen sónica una resolución de 0,2 a 0,4 pulgadas (5,08 a 10,16 mm) quedan invisibles debido a que la apertura de las mismas es de 0,03 a 0,3 mm.

El fracturamiento de tipo subvertical es el que predomina en la Formación Yacoraite controlando la verticalidad de los afloramientos como la barda oriental del cerro Hermoso, donde los carbonatos conforman una pared con un desnivel de unos 170 m el cual es similar al espesor total de la Formación Yacoraite (Fig. 1c).

En las coronas de pozos se han observado, al igual que en afloramientos, fracturas subverticales que cortan al eje vertical de la corona. Algunas fracturas se presentan abiertas y re-cementadas con más de un episodio de movimiento y re-cementación con calcita. Se observan estrías de fricción que afectan al relleno de las fisuras atestiguando una reactivación de movimiento de tipo horizontal y vertical (Figs. 13 y 14).

Si bien en coronas no se puede observar el espaciamento de las fracturas, se asume que debe ser similar al de los afloramientos. Sobre el diámetro de la corona no se observan más de una o dos fracturas las cuales



**Figura 10:** Interpretación de rumbo y buzamiento de fracturas abiertas en diagrama de Schmith del intervalo Formación Olmedo y Formación Yacoraite, Miembro Las Avispas del pozo Caimancito-39. La mayoría de las fracturas abiertas solo se observaron en carbonatos de la base del Miembro Las Avispas.

se presentan bien definidas dividiendo verticalmente el testigo.

Las fracturas observadas en coronas son principalmente de 3 tipos: abiertas, cementadas-reactivadas y cerradas. También se han observado estilolitas subhorizontales (Fig. 13).

El tamaño promedio de las fracturas en la Formación Yacoraite observadas en cortes delgados bajo el microscopio óptico es de 0,025 mm de ancho y 4,8 mm de largo. En el Miembro Puesto Guardián el rango de ancho de fracturas es de 0,002 a 0,05 mm y el rango del largo es de 0,3 a 13,0 mm; la geometría es paralela, recta y discontinua de ancho variable. En el Miembro Las Avispas el rango del ancho de fracturas es de 0,003 a 0,06 mm y el largo es de 0,22 a 12,6 mm de geometría paralela pero sinuosa.

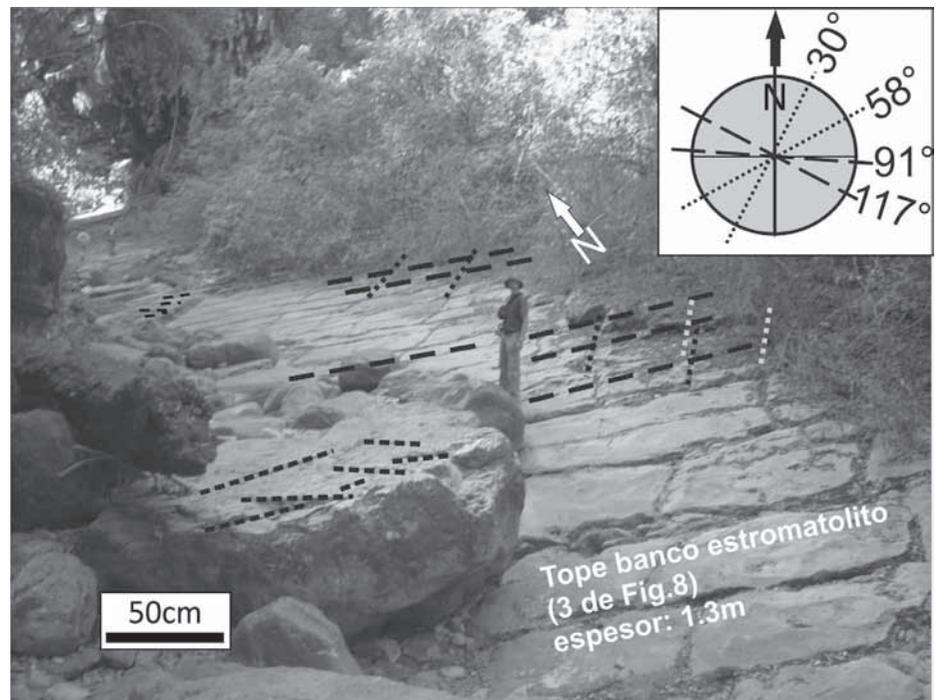
En la corona del pozo Ca-xp-4, se puede observar que el Miembro Las Avispas se fractura más intensamente, con fracturas más cortas y de mediana inclinación (de 45° a 70°). La “sección limoarcillosa” es la que menos fracturas presenta. La Secuencia III del tope del Miembro Puesto Guardián se fractura también intensamente pero con fracturas

más largas, atravesando varios metros de testigo, más continuas y de mayor buzamiento, del orden de 60° a 87° asociado a litologías calcáreas. Un marcado cambio se observa en la Secuencia II en donde predominan las areniscas, dolomías arenosas y calizas arenosas, las fracturas se observan en menor cantidad y horizontales. En los conglomerados de la Secuencia I que tienen matriz dolomítica y siderita en la composición, las fracturas son levemente más intensas que en las arenas, con ángulos horizontales en los conglomerados y alto buzamiento en las calizas (Fig. 4). Estos datos de buzamiento son corroborados por la imagen de televisor de pozo.

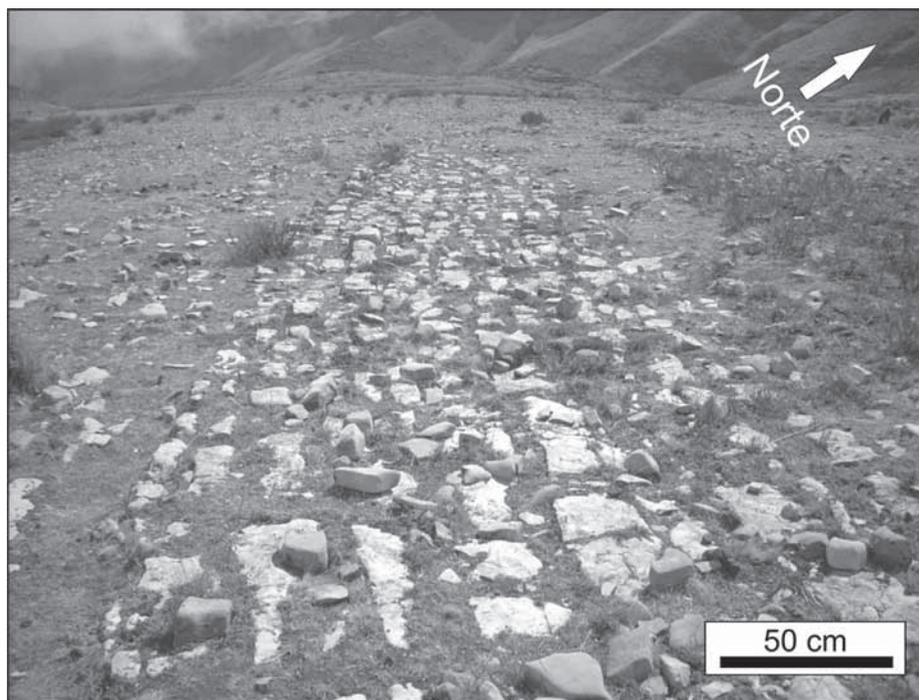
## CONCLUSIONES

-Los carbonatos de la Formación Yacoraite en el Yacimiento Caimancito y la Sierra de Calilegua se presentan naturalmente fracturados por los esfuerzos compresionales andinos observándose 3 tipos de fallas: inversas, directas y trascurrentes.

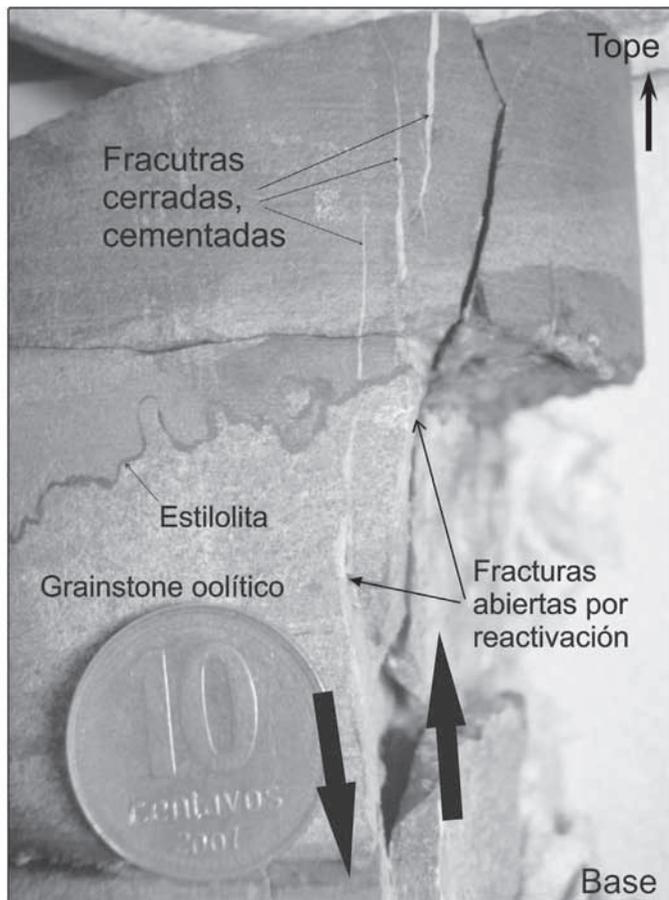
-Se observó una amplia variación de tamaños de fracturas relacionadas a fallas dentro del yacimiento. Macrofracturas: de escala



**Figura 11:** Afloramiento río Jordán, mostrando el tope del banco de estromatolitos “bindstones” de Formación Yacoraite. El tamaño de los bloques es de 50 cm por 200 cm y el espesor del estrato de 1,3 m. Obsérvese que el diseño rectangular en planta presenta el lado mayor en dirección E-O, coincidiendo con el mayor ancho aparente de las fracturas.



**Figura 12:** Fracturamiento al tope del Miembro Las Avispas de la Formación Yacoraite al oeste del cerro Hermoso. El mayor espaciamiento de las fracturas es en el sentido del buzamiento (E-O).



**Figura 13:** Testigo corona del pozo Caimancito xp-4, de Formación Yacoraite, vista lateral de fracturas subverticales cerradas rellenas de calcita y algunas fracturas abiertas posteriormente por reactivación. El desplazamiento es con bloque bajo a la izquierda. La moneda como escala mide 18 mm de diámetro.

sísmica y de pozo correspondientes a fallas inversas que se presentan con rumbo N-S y fallas directas de rumbo E-O, mesofracturas: observadas en coronas y afloramientos y microfracturas: observadas en cortes delgados.

-Los carbonatos presentan mayor intensidad de fracturamiento que las areniscas y pelitas.

-A similar contenido de carbonato (ya sea calcita o dolomita) se fracturan más intensamente los estratos de menor espesor.

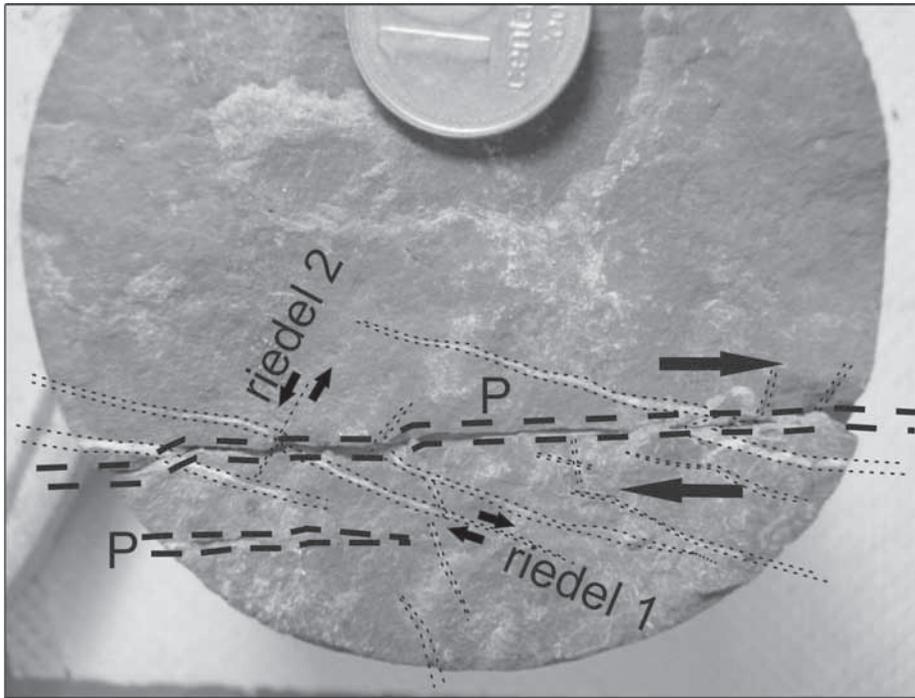
-Las fracturas aumentan desde el tope hacia la base en la Formación Yacoraite, Miembro Las Avispas, o en la base y tope del Miembro Puesto Guardián, relacionado con el aumento de carbonato en los sedimentos y la disminución de espesor de los estratos.

-El buzamiento de las fracturas observado tanto en afloramientos como en coronas e imágenes de formación de pozos es de tendencia subvertical con valores de 65° a 90°. También existen fracturas horizontales que pueden corresponder a planos de estratificación abiertos.

-El cociente entre espesor de estrato y el espaciamiento de la fractura se define como Índice de Fracturación (IF) es adimensional con unidades de longitud/longitud (centímetro/centímetro) y presenta valores de 0,43 (cm/cm) (espesor/espaciamiento) en los estromatolitos que son los estratos de mayor espesor (132 cm) y más compactos. Valores de IF de 0,6 a 0,8 (cm/cm) en bancos de *grainstones* oolíticos de menor espesor (25 cm), tendiendo a 1 o más en los de mayor intensidad de diaclasamiento. El "IF" tiende a 0 (cm/cm) en los niveles más limosos.

-En imágenes de pozo y dip-meter las fracturas se presentan en tres sistemas principales uno de rumbo aproximado E-O, otro NO-SE coincidentes con las fracturas abiertas (TIPO I) y otro sistema de rumbo N-S (TIPO II), posiblemente cerradas. Otro sistema subordinado presenta orientación ONO-ESE y se interpreta como abierto.

-El análisis de evidencias de deformación de pozo mediante imágenes de subsuelo permitió establecer que el esfuerzo horizontal máximo muestra rumbo ONO-ESE, perpendicular a los lineamientos andinos terciarios de tendencia NNE-SSO. El rum-



**Figura 14:** Testigo corona del pozo Caimancito-xp-4, Formación Yacoraite, (de figura 13) vista superior. Fracturas cerradas cementadas por calcita y abiertas reactivadas con desplazamiento de rumbo dextrógiro donde se observan los indicadores cinemáticos de fracturas de Riedel: r1, r2 y P. La moneda de escala mide 18 mm de diámetro.

bo de la estructura anticlinal de los reservorios cretácico-terciarios de Formación Yacoraite presenta tendencia ligeramente diferente NNO-SSE (aproximadamente N-S).

-Las fracturas observadas en testigos de coronas se presentan abiertas (cementadas y reactivadas) y cerradas (cementadas).

-La mayoría de las fracturas abiertas se presentan en litología de carbonatos de la Formación Yacoraite y las cerradas se concentran en arcillitas grises de la Formación Olmedo.

-En afloramientos las fracturas presentan un diseño rectangular en planta, producto de la intersección de sistemas de facturas tipo I y II (E-O y N-S) generando bloques rectangulares con geometría de “prismas cuadrangulares rectos” orientados en sentido E-O.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a PLUSPETROL S. A. y FRONTERRA GEOSCIENCES por la autorización para la publicación de este trabajo. Al personal del sector de Cartografía: María Silvia Castro, Fernando Martínez de Oficina Central en Buenos Aires, a

Fernando Gennell de Geociencias de Lima, Perú, por su ayuda en la edición de ilustraciones de la versión extendida del trabajo y a LCV por permitir la publicación de las fotografías. A los árbitros del trabajo y editores de la revista que colaboraron con la mejora de la versión final del manuscrito.

#### TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Alonso, R. N. y Marquillas, R. A. 1986. Nueva localidad con huellas de dinosaurios y primer hallazgo de huellas de aves en la Formación Yacoraite (Maastrichtiano) del Norte Argentino. 4º Congreso Argentino de Paleontología y Bioestratigrafía, Actas 2: 33-41, Mendoza.
- Boll, A. 1991. Identificación y correlación de secuencias somerizantes del Miembro Las Avispas (Formación Yacoraite), Noroeste Argentino. 10º Congreso Geológico Argentino, Actas 2: 153-156, Tucumán.
- Boll, A., Gómez Omil, R. y Hernández, R. 1989. Síntesis Estratigráfica del Grupo Salta. YPF, (inédito), 120p., Salta.
- Bonarelli, G. 1913. Las sierras Subandinas del Alto Aguaraigüe y los yacimientos petrolíferos

del distrito minero de Tartagal, Departamento de Orán, Provincia de Salta. Anales del Ministerio de Agricultura, Sección Geología, Mineralogía y Minería, 7: 1-50.

- Choquette, P. W. y Pray, L. C. 1970. Geological nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates. American Association of Petroleum Geologists. Bulletin, V. 54: 207-250.
- Cónsole Gonella, C.A. y Aceñolaza F.G. 2009. Icnología de la Formación Yacoraite (Maastrichtiano-Daneano) al sur de la localidad de Maimará, cordillera oriental de Jujuy, Argentina. Acta Geológica Lilloana, 2: 100-110.
- Disalvo, A. 2002. Cuenca del noroeste: marco geológico y reseña histórica de la actividad petrolera. En Schiuma, M., Hinterwimmer, G. y Vergani, G. (eds.) 5º Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Simposio Rocas Reservorios de las cuencas productivas de la Argentina 663-677, Mar del Plata.
- Disalvo A., Rodriguez Schelotto M. L., Gomez Omil R., Hoffman Ch., Benitez J. y Hurtado, S. 2002. Los reservorios de la Formación Yacoraite. En Schiuma, M., Hinterwimmer, G. y Vergani, G. (eds.) 5º Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Simposio Rocas Reservorios de las cuencas productivas de la Argentina 717-738, Mar del Plata.
- Dunham, R.J. 1962. Classification of carbonate rocks according to depositional texture. En Ham, W.E. (ed.) Classification of carbonate rocks. American Association of Petroleum Geologists Memoir, 108-121.
- Ghiglione, M.C. y Naipauer M. 2009. Informe de observaciones de campo realizadas en las Sierras Subandinas, presentación del perfil sedimentario y muestreo geoquímico de la Formación Yacoraite, en el cerro Amarillo, sierra de calilegua. Pluspetrol (Informe Inédito), 17p., Buenos Aires.
- Groeber, P. 1952. Mesozoico. Geografía de la República Argentina. En Groeber, P., Stipanovic, P.N. y Mingramm A.R.G. (eds.) Sociedad Argentina de Estudios Geográficos. GAEA 1: 349-541, Buenos Aires.
- Hernández, R.M., Gómez Omil, R. y Boll, A., 2008. Estratigrafía, tectónica y potencial petrolero del rift cretácico en la provincia de Jujuy. En Coria B. y Zappettini, E.O. (eds.) Geología y Recursos Naturales de la Provincia

- de Jujuy. 17° Congreso Geológico Argentino, Relatorio 2d: 207-232, San Salvador de Jujuy.
- Marquillas, R. A. y Salfity, J. A. 1994. Las relaciones estratigráficas regionales de la Formación Yacoraite (Cretácico Superior), Norte de la Argentina. 7° Congreso Geológico Chileno, Actas 1: 479-483, Concepción.
- Marquillas R., Del Papa, C., Sabino, I. y Heredia, J. 2003. Prospección del límite K/T en la cuenca del Noroeste, Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 58: 271-274.
- Marquillas R., Sabino, I., Nóberga Sial, A., del Papa, C., Ferreira, V. y Mattheos, S. 2007. Carbon and oxygen isotopes of Maastrichtian-Danian shallow marine carbonates. Yacoraite Formation, northwestern Argentina. *Journal of South American Earth Sciences* 23: 304-320.
- Mingramm, A., Russo, A., Pozzo, A. y Cazau, L. 1979. Sierras Subandinas. *Geología Regional Argentina*, Academia Nacional de Ciencias 1: 95-138, Córdoba.
- Moreno, J. A. 1970. *Estratigrafía y Paleogeografía del Cretácico Superior en la cuenca del Noroeste argentino, con especial mención de los Subgrupos Balbuena y Santa Bárbara*. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 24: 9-44, Buenos Aires.
- Moroni, A.M. 1982. Correlación palinológica en las Formaciones Olmedo y Yacoraite. *Cuenca del Noroeste Argentino*. 3° Congreso Geológico Chileno, Acta 340-349, Concepción.
- Palma, R.M. 2000. Lacustrine facies in the Upper Cretaceous Balbuena Subgroup, (Salta Group): Andina Basin, Argentina. En: Gierlowski-Kordesch, E.H. y Kelts, K.R. (eds.) *Lake basins through space and time*. American Association of Petroleum Geologists, *Studies in Geology* 46: 323-328.
- Stearns, D.W. y Friedman, M. 1972. "Reservoirs in fractured rock". *American Association of Petroleum Geologists, Memoir* 16: 82-106.
- Tiercelin, J.J. 1991. Natural resources in the lacustrine facies of the Cenozoic rift basins of East Africa. En Anadón P., Cabrera Ll. and Kelts K., (eds.) *Lacustrine Facies Analysis*. Special Publications International Association of Sedimentologists. Blackwell Scientific Publications 13: 3-37, London.
- Turner, J.C.M. 1959. *Estratigrafía del Cordón de Escaya y de la Sierra de Rinconada (Jujuy)*. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 12: 15-40, Buenos Aires.
- Turner, J. C. y Mendez, V. 1979. Puna. *Geología Regional Argentina*. Academia Nacional de Ciencias 1: 13-56, Córdoba.
- Turner, J. C. y Mon R. 1979. Cordillera Oriental. *Geología Regional Argentina*. Academia Nacional de Ciencias 1: 57-94, Córdoba.
- Vergani, G. y Grosso, S. 2008. Geología del petróleo en la Provincia de Jujuy. En Coria B. y Zappettini, E.O. (eds.) *Geología y Recursos Naturales de la Provincia de Jujuy*. 17° Congreso Geológico Argentino, Relatorio 5a: 542-550, San Salvador de Jujuy.

Recibido: 11 de febrero, 2012

Aceptado: 23 de abril, 2012