

## Tectónica del Flanco Norte de la Cuenca Golfo San Jorge, Argentina: el Yacimiento El Tordillo desde la Sísmica 3D

Chelotti, L., Czeplowodzki, R., Fortunato, G., Cersósimo, S. y Trincherro, E.

### Abstract

Tectonic of the Northern San Jorge Basin Flank, Argentina: El Tordillo Field as seen from 3D Seismic. A study concerning the tectonic history of the El Tordillo Field (placed in southern Chubut Province and in a central position within the Northern San Jorge Basin Flank) is presented here. Its complete 3D Seismic coverage and the presence of hundreds of wells -including one down to Pozo D-129 Fm., source rock in the basin- permitted us to build a structural interpretation which is representative of the general tectonic history in the area.

This study was developed on a workstation, using geologic and seismic integrated data, depth-seismic time controls, coherence cube, etc. The main fault systems and seismic horizons -major sequence boundaries- have been interpreted, including principal syndepositional movements.

We conclude that El Tordillo Field has an essentially extensional trending ESE structure with minor strike slip components in the transfer zones. The main rift fault transfer zones, and also its antithetic and sinthetic faults, coincide with old pre-Jurassic fracture lines which acted as borders for a north trending high today dipping to the south: the central field nose.

The fragility of Mina El Carmen Fm., due to its high tuffaceous composition, favored the development of more complex fracturation and relay patterns than those corresponding to more ductile formations, such as Pozo D-129, C. Rivadavia or El Trébol. The flowing wells zone, located in the eastern border of the central nose (where ACN changes its trend and structural history) is an extreme example of such a particular behavior.

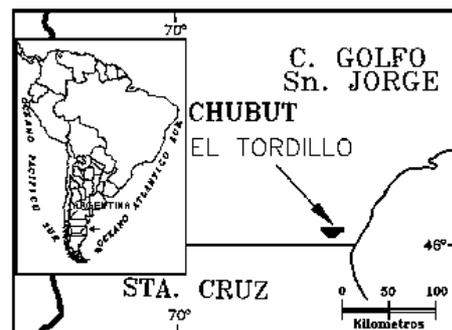
The huge rifting extensional activity (Jurassic) decreased progressively during the initial basin sag stage (D-129), grew moderately up in Albian times (mainly lower and medium Mina El Carmen Fm.) and decreased again, except for some pulses like the Coniacian-Santonian one (upper C. Rivadavia). The lower and medium Tertiary tectonic episodes match with marine transgressions, and the last one matches also with a volcanic intrussive activity which probably rejuvenated old pre-Jurassic N or NNE trending alignments.

### Introducción

La evolución de la cuenca que condiciona la geomorfología del golfo epónimo ha sido abordada por numerosos autores, como Lesta et al. (1980), Barcat et al. (1989) y Fitzgerald et al. (1990). Una síntesis tectónica actualizada fue presentada por Chelotti (1997).

El Yacimiento El Tordillo, en el sur de Chubut, se emplaza en el sector central del Flanco Norte de la cuenca (Fig.1). Su completa cobertura con Sísmica 3D y la presencia de cientos de pozos de control -incluso uno hasta la Fm. Pozo D-129, roca madre de la zona- ha permitido la elaboración de un modelo estructural detallado que resulta representativo de la historia tectónica del área.

El estudio se ha desarrollado sobre estación de trabajo, con información geofísica y geológica integrada, controles profundidad-tiempo sísmico, cubos de coherencia, etc, desde el punto de vista de la sísmica. Se interpretaron los sistemas de fallamiento y principales horizontes sísmicos -límites secuenciales mayores-, así como los movimientos sindeposicionales.



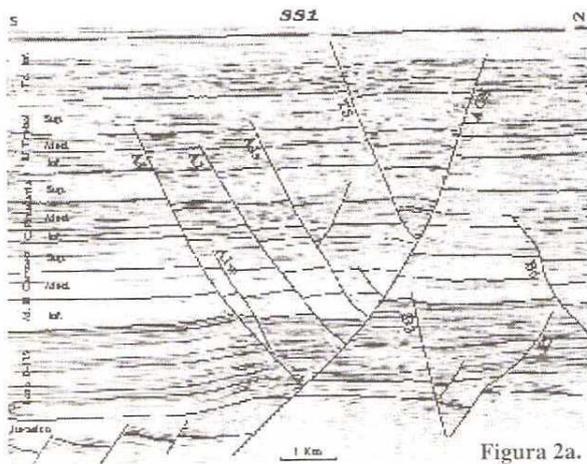


Figura 2a.

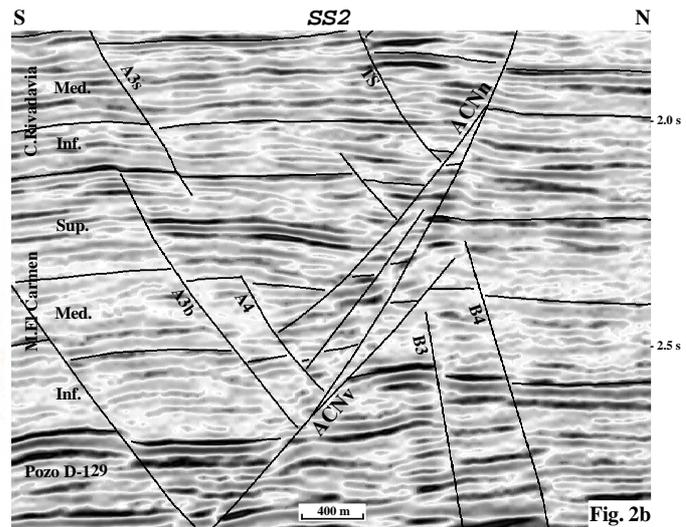


Fig. 2b

### Observaciones Sísmicas

Suprayacen a un basamento pre-Jurásico (casi carente de expresión en términos de información sísmica), los depósitos jurásicos correspondientes al Complejo Volcanoclástico, equivalente al Grupo Lonco Trapial, Bahía Laura y otros (Gust et al., 1985; Uliana et al., 1989), los que fueron sedimentados con el control tectónico de una fase de rift o ruptura de orientación general WNW-ESE. Los espesores calculados son de entre unos 300 y 900 m. La falla maestra del hemigraben central (denominada ACN, por Area Central Norte) se arrumba casi E-W y buza al sur (Fig. 2a), y transfiere el rechazo a otras fallas maestras desplazadas al norte en el sector occidental (ACNW) y al sur en el sector oriental (ACNE). Es destacable el máximo estructural del yacimiento en la zona central e, inmediatamente al oeste, una pequeña fosa localizada sobre el principal lineamiento basamental submeridiano, en la zona donde ACN comienza a perder rechazo y ACNW comienza a ganarlo hacia el oeste, situándose una tercera falla menor entre las citadas y sintética con ellas (Fig. 3a). La continuidad del lineamiento hacia el norte ha sido comprobada en subsuelo en el área de Escalante-El Trébol y hacia el sur en La Tapera-Puesto Quiroga, configurando en todos los casos el borde occidental de un espolón submeridiano. En el colgante de ACN el lineamiento se expresa con un bajo y más al sur un alto, limitados por fallas de rumbo E-W y N-S. La zona oriental de ACN, denominada ACNp, es distinta, dado que se trata aquí de una falla de escaso rechazo vertical, parcialmente arrumbada al ENE, orientación que también guardan otras fallas más al norte, pertenecientes al sistema de El Trébol -cuya falla maestra asoma en el extremo noreste de El Tordillo, como parte de otro escalón de la cuenca-. Paralela, al sur, aparece la falla de ACNE, dentro del mismo dominio tectónico, generando la presencia de un depocentro desplazado hacia el sur del depocentro de ACN. De modo que dentro de El Tordillo tenemos dos zonas de transferencia principales, una desarrollada entre ACN y ACNW, con solapamiento de fallas (caso "H" sensu Rosendahl, 1987) y la otra, entre ACN y ACNE, con una brecha en la que se sitúa ACNp, como prolongación oriental de ACN. Al sur, fuera del Yacimiento, sigue un escalón de cuenca más bajo, el de La Tapera-Puesto Quiroga.

Los depósitos de la Fm. Pozo D-129, del Berriasiano superior-Aptiano, correspondientes a la fase inicial de sag o desplome de la cuenca, comprenden una serie de potentes secuencias que espesan localmente sobre las fallas maestras, o sus antitéticas, que continuaron con una actividad decreciente (Fig. 4a). Estas secuencias van espesando regionalmente hacia el sur. La tasa de sedimentación es del orden de 140 m/m.a. Si en el área existe alguna secuencia neocomiana (de rift tardío) entre el Complejo Volcánico y la Fm. Pozo D-129, es algo que no puede ser inferido desde la sísmica, careciéndose en el Yacimiento de sondeos a tal profundidad. Sin embargo no han sido observados más al este, en el pozo profundo Puesto Quiroga X-1.

Los depósitos fluvio-lacustres de la Fm. Mina El Carmen representan un espeso conjunto de secuencias de edad albiana y presentan una altísima participación piroclástica. Los espesores también aumentan sobre los labios bajos de las fallas preexistentes, observándose los mayores incrementos para la sección inferior, los que resultan incluso en mayores que en el D-129 medio y superior. La tasa de sedimentación promedio es de unos 115 m/m.a. Asimismo debe apuntarse que las trayectorias de las fallas frecuentemente sufren modificaciones hacia la porción media y superior de Mina El Carmen: cambios de ángulo o relevos verticales y horizontales (Fig. 2a, 2b y 4b). Los rechazos son crecientes hacia arriba en los sectores en que una falla releva verticalmente a otra, por lo que arranca con rechazo cero, éste aumenta hacia niveles algo más someros y luego recupera el comportamiento normal decreciente, fenómeno que es mucho más frecuente en Mina El Carmen que en otras formaciones de la cuenca.

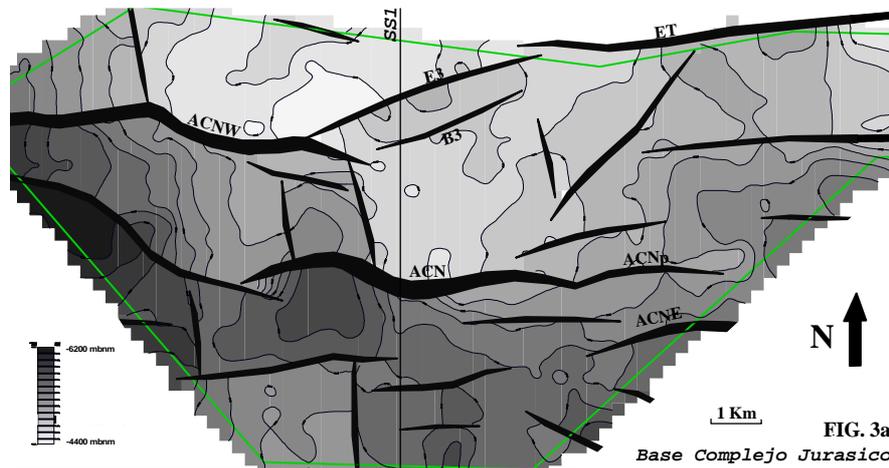


FIG. 3a  
Base Complejo Jurásico

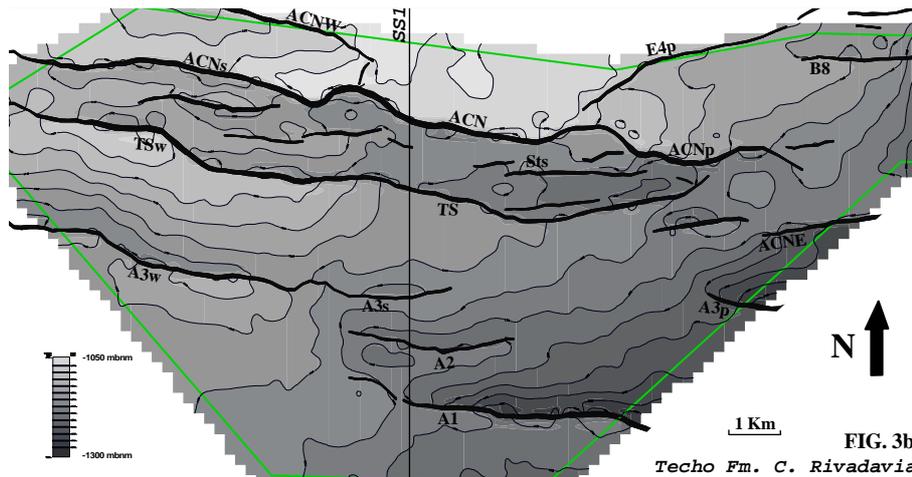


FIG. 3b  
Techo Fm. C. Rivadavia

Las formaciones C. Rivadavia (Cenomaniano-Coniaciano) y El Trébol (Santoniano-Maastrichtiano inferior), ambas fluviales, también registran espesamientos en los bloques bajos de fallas para las secuencias con mayor cantidad de arenas (niveles inferior, medio alto y superior de C. Rivadavia, y medio de El Trébol). Se han calculado tasas de sedimentación de 100 m/m.a. para C. Rivadavia y 40 m/m.a. para El Trébol. Las fallas principales se ven cortando a estas formaciones con rechazos decrecientes hacia arriba (Fig. 2a).

La discordancia Cretácico-Terciario y su inmediata secuencia marina litoral (Fm. Salamanca) también aparecen cortadas por las fallas mayores, las que por zonas se propagan hasta los niveles basales del Patagoniense (segundo episodio de ingresión atlántica en la cuenca). Entre ambas, una secuencia muestra engrosamiento en los bloques bajos (secuencia cuspidal de la Fm. Río Chico?). La tasa de sedimentación está en unos 10-15 m/m.a., con máximos de 20 en las secuencias marino-litorales.

Un cuerpo ígneo semiconcordante detectado por sismica en el extremo suroeste del yacimiento intruye niveles del Terciario inferior y se emplaza donde el plano de la falla maestra de La Tapera intersecta el principal lineamiento submeridiano, el que, al igual que las fallas maestras, tiene expresión en la geomorfología actual: valles cavados en la meseta que son muy elocuentes desde las imágenes satelitales. Los mejores reservorios se presentan en las formaciones C. Rivadavia y El Trébol (vide Hechem, 1994), cuyas producciones empeoran hacia el sur del Yacimiento. También suele haber buenas producciones en Mina El Carmen superior y, para la zona sur, existen algunas buenas producciones de Mina El Carmen medio.

Frente a las zonas de transferencia de rechazos de las fallas maestras se sitúan las correspondientes de sus antitéticas y sintéticas del colgante, aunque no son estos los sectores exclusivos en los que dichos relevos pueden producirse (Fig. 4a, 4b y 4c). En algunos casos ocurre que una falla perteneciente al juego de una determinada maestra no tiene su correlato en el juego de la siguiente. En otros casos fallas de distinta edad y significado tectónico coalescen hacia niveles someros, en los que la estructura de todo el Yacimiento tiende a simplificarse en unas pocas fallas de gran longitud (por fusión de distintos segmentos profundos). Un caso notorio es el de ACN que, para las formaciones C. Rivadavia y superiores, se continúa hacia el oeste utilizando la traza de una falla sintética de ACNW (ACNp).

Mención especial merece la estructura de la Zona de Pozos Surgentes (ZPS), que afecta a las secciones media y superior de la Fm. Mina El Carmen. En perfil puede verse que se trata de una zona comprendida entre la propagación de una vieja falla maestra (ACNv) que alcanza un punto ciego dentro de Mina El

Carmen medio y otra nueva falla (ACNn) que releva verticalmente a la primera, mientras que un tercer segmento conecta finalmente a los dos primeros y un cuarto se intuye entre el superior y medio. La mayor fracturación interna (más asociados fenómenos de disolución) se presenta entre los segmentos somero e intermedio, resultando un excepcional reservorio surgente de petróleo y gas en unos niveles que normalmente presentan bajas producciones. La gran alteración de la roca original -esencialmente tobas- cambió los valores de impedancia acústica y esos saltos de velocidad y densidad provocan una respuesta anómala en amplitudes. De modo que, además de verse una zona de fallamiento atípico, se ven amplitudes más contrastantes que las que esas mismas secuencias muestran en otros sectores del Yacimiento. El extremo este de la ZPS se sitúa en la zona de cambio de dominio estructural entre ACN y ACNp.

La interpretación de la porción más profunda del área sugiere una fábrica de rumbo dominante NNE-SSW (desde N-S hasta NE-SW), definida en el basamento pre-Jurásico para el tiempo de la sedimentación de los primeros depósitos de sinrift. Estos viejos lineamientos basamentales habrían controlado la ubicación de las rampas de relevo entre las sucesivas fallas maestras, rampas que muchas veces están falladas, afectando alguna sección vertical en sentido submeridiano y realizando así las antiguas trazas del basamento.

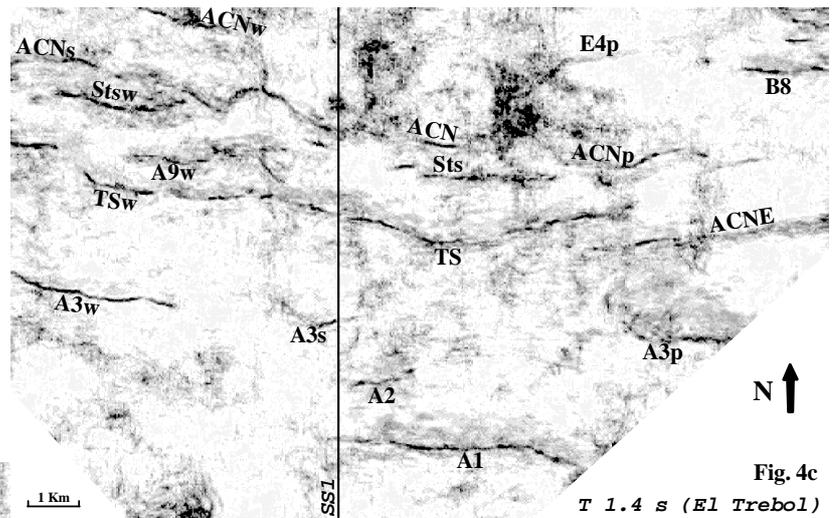


Fig. 4c  
T 1.4 s (El Trebol)

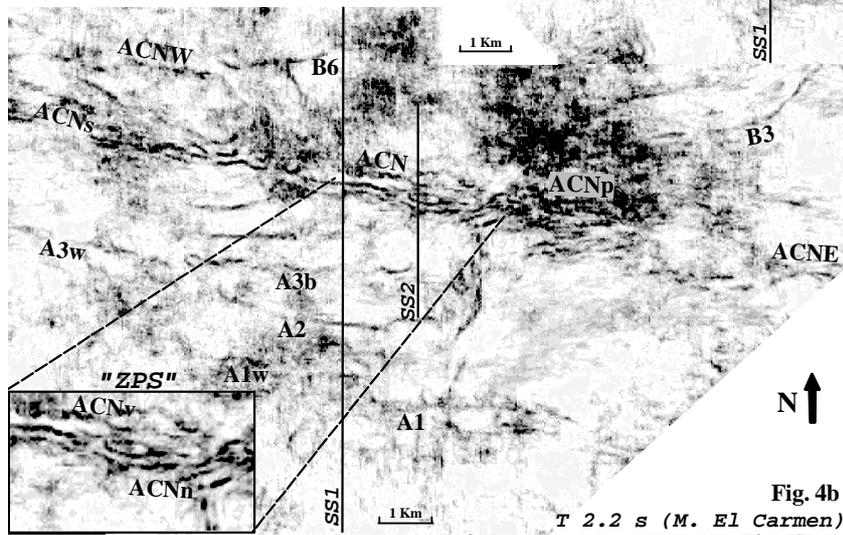


Fig. 4b  
T 2.2 s (M. El Carmen)

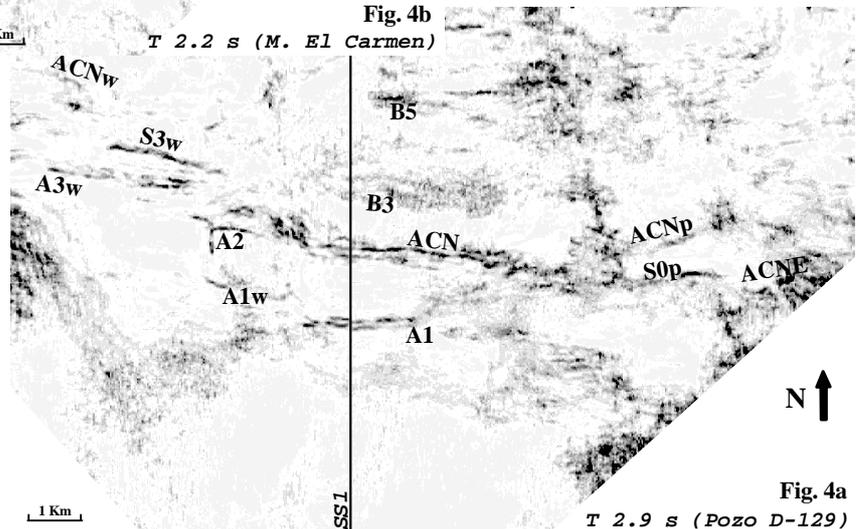


Fig. 4a  
T 2.9 s (Pozo D-129)

## Interpretación

Es significativa la presencia de la fosa localizada entre ACN y ACNW, cuya génesis se interpreta en función de los fenómenos transtensivos que tuvieron lugar sobre el viejo lineamiento submeridiano en la zona de solapamiento entre fallas. El dominio tectónico oriental de ACN se interpreta, en cambio, como una zona de no solapamiento entre ACN y ACNE, en la que la génesis de ACNp fue tardía (durante el desplome de la cuenca) y el rumbo al ENE fue función inicialmente del control tectónico dado por los máximos de ACN y El Trébol, más altos que el máximo de ACNE. De modo que la evolución de esta falla y todo su sistema debió necesariamente involucrar una componente de rechazo de rumbo, al ser su orientación oblicua a la dirección de la extensión principal (NNE-SSW).

La profundidad a la que se fueron sucediendo los distintos escalones tectónicos estuvo controlada desde los tiempos de la sedimentación de la Fm. Pozo D-129 (Berriasiano superior-Aptiano), más activa en su mitad inferior. Estos depósitos de la fase de desplome inicial definieron un depocentro de forma aproximadamente elíptica, alargado E-W, respecto del cual el área aquí tratada corresponde a una porción de su flanco norte. Así, un máximo submeridiano, adyacente y oriental del lineamiento antiguo mayor, habría devenido espolón como consecuencia del espesamiento regional de las sucesivas formaciones hacia el sur.

En el Albiano se reactivó la actividad tectónica extensional, lo que está demostrado por las diferencias de espesor en las secciones inferior de la Fm. Mina El Carmen, pero evidente también en algunas otras secuencias más altas. La composición esencialmente piroclástica de la misma pone en evidencia la actividad volcánica andina (Haller y Lapido, 1982) disparada por una fuerte aceleración en la expansión atlántica (Larson y Pitman, 1972). Nuevas y en ocasiones más complejas fallas de relevo se generaron desde la sección geológica medio superior de Mina El Carmen, lo que probablemente se debió al comportamiento más frágil de dicha formación -especialmente, para ese tiempo, su mitad inferior-, función de su composición litológica. Como consecuencia se establecieron nuevas rampas horizontales y verticales incrementando la complejidad de las zonas de transferencia.

Durante el tiempo de la depositación de la Fm. Comodoro Rivadavia (Cenomaniano-Coniaciano) la actividad tectónica, aunque de inferior magnitud que la acaecida en el Albiano, tuvo pulsos de cierta envergadura que energizaron el ambiente de sedimentación originando secuencias arenosas que más tarde oficiaron de reservorio. Luego, durante la depositación de la Fm. El Trébol (Santoniano-Maastrichtiano inferior) la actividad extensional decreció, aunque puede verificarse un pulso mayor en el tiempo de la sección media (arenosa y con un potente sello pelítico de características regionales).

Es interesante observar que la complejidad estructural es menor dentro de las formaciones C. Rivadavia y especialmente El Trébol de lo que resulta dentro de Mina El Carmen, fenómeno que puede atribuirse a la mayor ductilidad de estas rocas (densidades y velocidades sísmicas o sónicas mucho menores), por lo que segmentos de falla diferentes en porciones más profundas tendieron a coalescer hacia los niveles más superficiales, generando patrones de fallas más sencillos.

La actividad extensional verificada en el Maastrichtiano-Daniano provocó la propagación de las fallas mayores preexistentes hacia niveles más someros, así como un incremento en la velocidad de subsidencia (Nocioni, 1993), lo que habilitó la primera transgresión atlántica en la cuenca (Legarreta et al., 1990) en un tiempo en el que no existió un ascenso significativo en el nivel del mar (vide Haq et al., 1987).

Lo mismo sucedió durante el Oligoceno-Mioceno Inferior, fenómeno extensional que dio lugar a la ingresión marina del Patagónico, lato sensu, así como a la previa intrusión de cuerpos basálticos (filones-capa y diques cónicos) en el extremo suroeste del área comprendida por el Yacimiento -dicha intrusión tuvo lugar por la vía dada por la falla maestra de La Tapera-. Debe apuntarse que este fenómeno tuvo un carácter regional que trascendió la cuenca del Golfo San Jorge, habiéndose postulado alguna perturbación astenosférica acaso vinculada con aquella que, contemporáneamente, dio origen a la meseta de Somuncurá (Kay et al., 1993; Ardolino y Franchi, 1993). También debe agregarse que los fluidos magmáticos tienden a ascender por áreas de intersección entre juegos de fallas de distinto rumbo, por lo que la intersección de las fallas de rift con los más antiguos lineamientos pre-jurásicos han sido los sitios preferidos: en nuestro caso la falla maestra de La Tapera intersectando al principal lineamiento submeridiano de El Tordillo, convertido en zona de transferencia. En esta línea de pensamiento, puede inferirse que los trazos que tan nítidamente delimitan la geomorfología de la Pampa del Castillo (rumbo general SW-NE) son el producto de la reactivación terciaria de aquella antigua fracturación "regmática".

En cuanto al desarrollo de la ZPS, ésta evolucionó en el área de transferencia de rechazo entre un viejo plano de falla que alcanzó un punto ciego en Mina El Carmen medio y uno nuevo, más arriba, generando una rampa vertical, y también en planta, dado que el plano de falla antiguo siguió teniendo continuidad hacia niveles más someros al oeste, y el plano nuevo fue una extensión de otro más profundo desarrollado al este. Este relevo se interpreta producido en el borde oriental de un viejo alto de basamento pre-jurásico

(norte-sur). Más tarde se fue quebrando la rampa a través de una serie de fallas sintéticas y antitéticas, algunas de las cuales se fusionaron conectando los segmentos inferior y superior del sistema de transferencia de ACN, conexión que también se da en sentido horizontal, generando una forma ahusada. La situación es compleja dada la interacción de fallas antitéticas mayores y de otras menores detectadas por datos de pozos (antitéticas y sintéticas entre las principales, particularmente una sintética intermedia apenas intuía desde la sísmica). Toda esa fracturación, y la disolución consecuente por circulación de fluidos, crearon un reservorio muy bueno en una sección de Mina El Carmen donde, si bien hay arenas, normalmente éstas son pobres en términos de producción. La edad de la fracturación que conectó las porciones superior e inferior de ACN no es conocida y probablemente haya sido un proceso gradual, aunque puede sospecharse como relevante el tiempo Coniaciano-Santoniano (correspondiente al último movimiento sindepositacional de C. Rivadavia y correlacionable con la fase tectosedimentaria Intrasenoniana).

Debe finalmente tenerse en claro que, tanto en este caso como en el de otras fallas, estamos arriesgando una explicación necesariamente simplificada, porque en realidad se trata de la interacción de numerosos planos menores, muchos de los cuales se fueron fusionando dando lugar a fallas mayores, mientras que en otros casos no se llegó a la perfecta coalescencia y se produjeron sutiles patrones de relevo que están en el límite de la resolución sísmica.

### **Conclusiones**

Toda la estructura de El Tordillo es de carácter esencialmente extensional, de rumbo general ESE y con componentes transtensionales en las zonas de transferencia y en el bloque de ACN oriental, donde las fallas se arrumban al ENE.

Las principales zonas de transferencia en las fallas de rift y sus antitéticas y sintéticas coinciden con viejos lineamientos pre-jurásicos, los que delimitaron un antiguo alto elongado N-S, hoy devenido en el espolón central del Yacimiento.

La fragilidad de una formación esencialmente piroclástica como es Mina El Carmen, ha producido patrones de fracturación y relevo más complejos que los de formaciones más dúctiles como D-129 o C. Rivadavia y El Trébol. La Zona de Pozos Surgentes es un ejemplo extremo de este comportamiento, situada en el borde este del máximo de ACN occidental, donde ésta se encuentra con el dominio tectónico de orientación ENE.

La fuerte actividad extensional del rift jurásico fue decreciendo durante el estadio de desplome de la cuenca (D-129), creció moderadamente durante el Albiano inferior (Mina El Carmen inferior), y luego volvió a decrecer, destacándose el pulso del Coniaciano-Santoniano (C. Rivadavia cuspidal). Los episodios tectónicos del Terciario basal y medio coinciden con sendas ingresiones marinas y, este último, con un actividad volcánica intrusiva que probablemente rejuveneció antiguos lineamientos pre-jurásicos de rumbo general NNE.

### **Agradecimientos:**

A todo el grupo técnico y profesional de Reservorios El Tordillo, especialmente a los geólogos -entre ellos Rodolfo Taboada, principal referente de la Zona de Pozos Surgentes-, por la permanente colaboración y trabajo en equipo. A los profesionales de Exploración por el intercambio de ideas. A la Gerencia de Reservorios y a los Socios de la UTE por la autorización y apoyo para esta publicación.

### **Bibliografía:**

- Chelotti, L., 1997: Evolución Tectónica de la Cuenca Golfo San Jorge en el Cretácico y Terciario: Algunas Observaciones desde la Interpretación Sísmica. Boletín de Informaciones Petroleras, N°49: 62-82.
- Fitzgerald, M., Mitchum, M., Uliana, M. y Biddle, K., 1990: Evolution of the San Jorge basin, Argentina. A.A.P.G. Bulletin, V. 74 (6): pp. 879-920. Tulsa.
- Gust, D., Biddle, K., Phelps, D. y Uliana, M., 1985: Associated middle to late Jurassic volcanism and extension in southern South America. Tectonophysics, V. 116: pp. 223-253.
- Hechem, J., 1994: Modelo predictivo de reservorios en un sistema fluvial efímero del Chubutiano de la cuenca Golfo San Jorge, Argentina. Revista A.A.S., V. 1 (1): p. 3-14. Buenos Aires.
- Lesta, P., Ferello, R. y Chebli G., 1980: Chubut Extraandino. En Geología Regional Argentina (Academia Nacional de Ciencias; J. Turner Eds.), V. II: pp. 1307-1387. Córdoba.
- Rosendahl, B., 1987: Architecture of continental rifts with special reference to East Africa. Annual Review of Earth and Planetary Science, V. 15: pp. 445-503.
- Uliana, M., Biddle, K. y Cerdan, J., 1989: Mesozoic extension and the formation of Argentine sedimentary basins. En Extensional Tectonics and Stratigraphy of the North Atlantic Margins, A.A.P.G. Memoir 46 (A. Tankard y H. Balkwill Eds.): pp. 599-614. Tulsa.