

ANÁLISIS DE FACIES DE LA FORMACIÓN TORDILLO A TRAVÉS DE IMÁGENES MICRO RESISTIVAS FMI*, BLOQUE ANTICLINAL CAMPAMENTO, CUENCA NEUQUINA

Sergio López¹, Gabriel Bojarski², Laura Net³ y Gustavo Fortunato⁴

¹ Pioneer Natural Resources Argentina S.A (lopezs@pioneernc.com)

² Schlumberger Argentina (gbojarski@slb.com)

³ Pioneer Natural Resources Argentina S.A. (netl@pioneernc.com)

⁴ Pioneer Natural Resources Argentina S.A. (fortunatog@pioneernc.com)

*Marca de Schlumberger

Palabras clave: facies, eólico, perfil FMI, Formación Tordillo, Cuenca Neuquina

Abstract. FACIES ANALYSIS OF THE TORDILLO FORMATION USING MICRO RESISTIVE IMAGES FMI, ANTICLINAL CAMPAMENTO BLOCK, NEUQUÉN BASIN. A facies analysis of the Tordillo Formation using information from the FMI (Formation Micro Imager) tool in well ERC.x-2 (Anticlinal Campamento block) was combined with conventional log data and 3D seismic to build a geological model in order to improve the characterization of this reservoir in the area. Well ERC.x-2 is located to the southwest of the main depocenter of this unit, in a marginal area close to the Dorsal de Huincul paleohigh. Three main sections have been recognized in the Tordillo Formation based on FMI characteristics. A basal section deposited by non-confined fluvial streams (5%) is followed by a middle section of eolian deposits showing relatively good petrophysical conditions (50%), and an upper eolian section with poorer reservoir characteristics (45%). Different subenvironments, such as dune fields, wet interdune and dry interdune areas have been interpreted in the eolian deposits; furthermore, dunes have been sorted into transversal or barchan/barchanoid ridge types based on set thickness and fanplot analysis of dips. The geological model comprises an early stage of fluvial sediments supplied by a source area located to the south of the Anticlinal Campamento block, and a later stage of sediments redistributed by winds blowing from the west-southwest. Paleodune migration data obtained from the ERC.x-2 well is in agreement with data published by previous authors for the Tordillo Formation depocenter area. Best petrophysical characteristics are restricted to the northwestern portion of the Anticlinal Campamento block, and correspond to transversal dune deposits interpreted in the middle section of the unit.

INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

La Formación Tordillo es uno de los reservorios de hidrocarburos tradicionales dentro de la Cuenca Neuquina. Esta unidad cuenta con significativos volúmenes de reservas en gran número de yacimientos (Mendiberri y Carbone 2002). En tal carácter, numerosos trabajos regionales se han referido al estudio de la estratigrafía y los ambientes de sedimentación de esta unidad. De amplia distribución areal dentro de la cuenca, la Formación Tordillo se halla integrada por un complejo arreglo de sedimentos de origen continental, el cual incluye facies de abanicos aluviales y/o fluviales en áreas marginales de la cuenca, y facies eólicas hacia la parte central de la misma (Muñoz *et al.* 1984; Peroni *et al.* 1984; Arregui 1993; Maretto *et al.* 2002).

Es debido justamente a la alta complejidad vertical y lateral en el arreglo de sus facies sedimentarias, y a los diversos eventos diagenéticos posteriores, que las areniscas de esta unidad exhiben notables variaciones (no totalmente comprendidas hasta el presente) en sus propiedades petrofísicas. Sobre la base de estas diferencias en su calidad como reservorio, la Formación Tordillo es frecuentemente referida en subsuelo con el nombre de Formación Sierras Blancas (reservorio *sensu stricto*) y Formación Catriel (sello intraformacional en su tope); el reservorio a su vez ha sido subdividido en el Miembro Rojo (con predominio de facies fluviales) y Miembro Verde (predominio de facies eólicas) (Maretto *et al.* 2002).

Esta variabilidad de espesores y facies presentes en la Formación Tordillo a escala regional también ha sido detectada en el subsuelo del bloque Anticlinal Campamento. Con el objeto de evaluar el grado de influencia (directa o indirecta) de los factores depositacionales sobre las propiedades petrofísicas de las areniscas

productivas, se decidió registrar una imagen resistiva (FMI) en el pozo ERC.x-2 localizado en el extremo noroeste del bloque (Fig. 1), con el fin de mejorar la caracterización del reservorio y ajustar las correlaciones efectuadas con perfiles convencionales. El análisis de la información obtenida en dicho estudio constituye el objetivo de este trabajo y contribuye a armar un modelo regional para la unidad en vistas a la perforación de futuros pozos en la zona.

LA FORMACIÓN TORDILLO EN ANTICLINAL CAMPAMENTO

La Formación Tordillo se encuentra presente en casi la totalidad del bloque Anticlinal Campamento, apoyándose en contacto discordante sobre las arcilitas y calizas arcillosas de la Formación Barda Negra, y siendo a su vez cubierta por las pelitas y margas de la Formación Vaca Muerta (Digregorio y Uliana 1980) (Fig. 2). En dicho bloque, la Formación Tordillo presenta un límite de no deposición hacia el Sur y hacia el Este, donde se localiza el paleoalto de la Dorsal de Huincul; los máximos espesores para esta unidad en el área considerada (alrededor de 100 metros) se localizan por lo tanto hacia el Norte y hacia el Oeste del mismo (Figs. 1, 3).

En el pozo ERC.x-2 (Estación Ramón Castro) la Formación Tordillo alcanza 92.5 m de espesor (Fig. 2). Teniendo en cuenta el contexto paleogeográfico, el pozo se halla ubicado en una zona marginal perteneciente al flanco sur del depocentro para esa unidad (Arregui 1993), e influenciada por la presencia del paleoalto de la Dorsal de Huincul.

En función de los perfiles convencionales y FMI registrados en el pozo analizado, ha sido posible identificar tres intervalos diferentes, los cuales podrían corresponderse con intervalos equivalentes descriptos para la Formación Tordillo en sectores centrales de la cuenca (Maretto *et al.* 2002). Estos intervalos son: a) un miembro fluvial basal, con propiedades petrofísicas pobres (porosidad 5-8%, promedio 7%), b) un miembro eólico intermedio, el cual presenta las mejores propiedades petrofísicas (porosidad 3-16%, promedio 10%), y c) un miembro eólico superior, con malas propiedades petrofísicas (porosidad 0-11%, promedio 6%) (Fig. 2). Los dos primeros intervalos podrían interpretarse como equivalentes de los Miembros Rojo y Verde, respectivamente, de la Formación Sierras Blancas descriptos en el área del yacimiento Loma La Lata por Maretto *et al.* (2002), mientras que el intervalo superior posiblemente sea equivalente a la Formación Catriel descripta en el mismo trabajo.

ANÁLISIS DE FACIES UTILIZANDO FMI

De acuerdo a los rasgos identificados en el perfil FMI (textura, espesor de bancos, estructuras sedimentarias) y al ambiente de sedimentación interpretado a partir de dicha información, la Formación Tordillo ha sido dividida en el pozo ERC.x-2 en dos secciones principales: un intervalo basal de origen fluvial, y un intervalo superior de origen eólico. A su vez, la sección eólica superior fue subdividida, de acuerdo a sus cualidades petrofísicas, en dos sub-intervalos, resultando así la división tripartita que se menciona en el apartado anterior (Fig. 2). La porción interpretada como depositada en un ambiente fluvial (5%) es minoritaria respecto al espesor total de origen eólico (95%), mientras que los intervalos eólicos intermedio productivo y superior cerrado se encuentran representados en proporciones similares (50% y 45%, respectivamente). A continuación se describen el análisis de facies y los subambientes interpretados dentro de cada sección.

La sección basal de la Formación Tordillo está compuesta por areniscas y areniscas conglomerádicas amalgamadas que pueden presentar estratificación cruzada planar, laminación de bajo ángulo, o ser masivas (Fig. 4). Es posible identificar en este intervalo paquetes de areniscas conglomerádicas con base erosiva (Fig. 5). Se puede interpretar a los sedimentos que integran de esta sección como depositados en un ambiente fluvial no confinado, de alto régimen de flujo. A pesar de la relativa dispersión encontrada en el análisis de azimuth de la estratificación cruzada dentro de esta sección, la dirección preferencial es hacia el norte (Fig. 6), indicando que el área de proveniencia de los sedimentos estaría localizada al sur de Anticlinal Campamento.

El resto de la columna sedimentaria de la Formación Tordillo correspondería a sedimentos de origen eólico, dentro del cual ha sido posible identificar subambientes de dunas, de interduna húmeda y de interduna seca. Los intervalos de interduna definen superficies limitantes de primer orden o “superficies de estabilización” dentro de la secuencia eólica (Fryberger 1990a).

Los intervalos de dunas se encuentran definidos por la presencia de areniscas con estratificación cruzada planar de mediana y gran escala. Cada *set* de dunas erosiona el subyacente, conformando discontinuidades o “superficies de apilamiento” de segundo orden (Fryberger 1990a). El espesor de los *sets* varía entre 0.5 y 4 m (llegando excepcionalmente hasta 7 m de espesor), y se observa generalmente que las caras frontales son asintóticas a la base (Fig. 7). La presencia de *sets* de hasta 7 metros de espesor con una misma orientación de la estratificación reflejaría condiciones de dirección de viento estables al momento de depositación de los sedimentos. La estabilidad y consistencia en la orientación de la inclinación de las capas frontales (*dips*) permitirían interpretar estas dunas como dunas de tipo transversal (Fig. 8); por otra parte, otros intervalos que poseen una mayor dispersión en la orientación de sus caras frontales se pueden atribuir a depósitos de dunas tipo barjan o *ridges* barjanoides (Fryberger 1990b). El espesor de los *sets* interpretados como dunas tipo barjan (no mayor a 1 m) es inferior al de las dunas de tipo transversal (Fig. 9). Esta variación en la morfología de las dunas (de transversales a barjanoides) podría atribuirse a cambios temporarios del volumen de sedimento disponible, o de la tasa de transporte vs. depositación de arena debido a factores tectónicos y/o climáticos (*e.g.*, Meadows y Bleach 1993). Un análisis de la orientación general de azimut de capas de dunas para todo el intervalo eólico (dunas transversales + dunas barjanoides) brinda una resultante hacia el Este-Noreste (Fig. 10), lo cual indicaría una procedencia dominante de los paleovientos desde el Oeste-Suroeste.

Los intervalos de dunas se encuentran separados por niveles de interduna (Fig. 11); en el presente perfil se han interpretado interdunas tanto de tipo húmedas como secas. En los intervalos de interduna húmeda es posible observar estratificación cruzada planar interpretada como migración de ondulitas subácueas y cierta laminación atribuida de depósitos de decantación de un material resistivo (sedimentos volcánicos?) (Fig. 12). En otros sectores de interduna húmeda también se observan “parches” resistivos en areniscas aparentemente cementadas durante etapas de diagénesis temprana.

La interduna seca estaría principalmente representada por intervalos de mantos de arena (*sand sheets*), los cuales se encuentran compuestos por espesores de hasta 4 metros de areniscas y pelitas con laminación horizontal bien definida (Fig.13); en estos intervalos no se observan clastos mayores a tamaño arena. Estos mantos de arenas han sido atribuidos a áreas de áreas de interduna seca por no haber evidencia alguna de presencia de agua (no se observa laminación por migración de ondulitas subácueas, depósitos de decantación, grietas de desecación, ni evidencias de bioturbación).

La orientación de las capas (*dips*) correspondientes a los intervalos de interdunas resultan generalmente perpendiculares a la orientación de las capas en los intervalos de dunas adyacentes (Fig. 12). Por otro lado, la frecuente cementación temprana de los sedimentos en las áreas de interduna, así como su mayor contenido de material más fino empobrecen las características petrofísicas de estas rocas, constituyendo potenciales barreras de permeabilidad vertical dentro de la formación (Krystinik 1990).

Es de destacar por último la presencia de 1.5 metros de areniscas con estratificación convoluta y evidencias de escape de fluidos en el tope de la Formación Tordillo, inmediatamente por debajo del contacto con la Formación Vaca Muerta (Fig. 14). El origen de estas estructuras de deformación sinsedimentaria podría estar relacionado a procesos de licuefacción y remoción de los sedimentos eólicos ligados a una rápida inundación marina (Eschner y Kocurek 1986), en este caso representada por la Formación Vaca Muerta.

MODELO GEOLÓGICO

Todos los elementos paleoambientales analizados en la sección precedente pueden integrarse en un modelo geológico para la Formación Tordillo en el bloque Anticlinal Campamento, el cual corresponde a un ámbito marginal de depositación para dicha unidad localizado al noroeste de la Dorsal de Huincul.

La Figura 15 sintetiza los subambientes continentales interpretados a partir del perfil FMI y sus relaciones laterales. En este esquema se representan los procesos fluviales, cuyo aporte de sedimentos provendría desde un paleoalto localizado al sur del bloque Anticlinal Campamento, y la posterior redistribución de estos sedimentos por parte de procesos eólicos debido a vientos predominantes del Oeste-Suroeste. Bajo dicho régimen de vientos se habría desarrollado el campo de dunas de la Formación Tordillo, el cual incluye dunas de tipo transversal, *ridges* barjanoides y/o barjanes, como así también subambientes de interduna húmeda y seca. La dirección predominante de los paleovientos asociados al campo de dunas de Tordillo desde el Oeste-Suroeste en el pozo ERC.x-2 es coherente con los datos presentados por Peroni *et al.* (1984) en localidades correspondientes al área centro oriental del depocentro de la unidad.

Como ya ha sido mencionado, las mejores características petrofísicas de la Formación Tordillo se encuentran en el miembro eólico medio. De acuerdo al modelo arriba planteado, este intervalo corresponde a las dunas transversales y barjanoides de buen desarrollo donde, en posiciones estructurales favorables, se localiza el reservorio de gas (10% de porosidad promedio en la zona productiva). Por el contrario, pobres condiciones petrofísicas se hallan asociadas a las areniscas correspondientes a dunas eólicas de menor magnitud, areniscas con estructuras de deformación en el tope de la unidad, y a las áreas de interduna; todos estos intervalos podrían actuar como sellos intraformacionales dificultando la migración vertical y lateral de los hidrocarburos.

De acuerdo a correlaciones regionales efectuadas con perfiles de pozo y sísmica 3D, el pozo ERC.x-2 se encontraría ubicado en una locación ventajosa para el estudio del referido intervalo eólico intermedio con mejores propiedades petrofísicas (asimilable al Miembro Verde de la Formación Sierras Blancas), ya que dicho intervalo estaría bien desarrollado hacia el Noroeste del bloque Anticlinal Campamento, acuñándose luego hacia el Sur y hacia el Este del mismo (Figs. 1, 3). El límite de este intervalo productivo (debido a un *pinchout* depositacional, a una discordancia erosiva intraformacional, o a un límite diagenético?) atravesaría el yacimiento Anticlinal Campamento en el centro del bloque en una dirección aproximada OSO-ENE (Fig. 1). La presencia de este límite podría explicar la muy pobre o nula productividad de las arenas de la Formación Tordillo en los pozos del área principal del yacimiento Anticlinal Campamento. Por otra parte, el intervalo superior de Tordillo (equivalente de la Formación Catriel) cubriría casi toda la extensión del bloque sin presentar cambios significativos en su espesor ni en sus propiedades petrofísicas, las que siempre resultan ser muy pobres (porosidades menores a 5%).

CONCLUSIONES

El análisis de facies efectuado con un perfil FMI en el pozo ERC.x-2, sumado a la correlación regional de pozos y sísmica 3D en el bloque Anticlinal Campamento ha permitido construir un modelo geológico para la Formación Tordillo en un área marginal al depocentro de la unidad localizada al noroeste del paleoalto de la Dorsal de Huincul. Este modelo ha sido utilizado para interpretar las variaciones observadas en las características petrofísicas de las areniscas de la mencionada unidad.

Tres secciones fueron reconocidas dentro de la Formación Tordillo en el área estudiada. La sección inferior ha sido interpretada como depósitos fluviales no confinados asociados a condiciones de alto régimen de flujo. El resto de la unidad ha sido interpretada como un campo de dunas eólicas, dentro del cual se han diferenciado subintervalos de dunas de tipo transversal y de dunas tipo barjan o *ridges* barjanoides a partir de ciertas características clave de la estratificación como espesor de los sets y grado de dispersión en la orientación de las capas. Dentro del ambiente eólico, los intervalos de dunas estarían limitados por áreas de interduna, que constituyen superficies de discontinuidad de primer orden, mientras que las superficies de apilamiento que separan los sets de dunas constituyen superficies de segundo orden. Las superficies de primer orden comprenden interdunas húmedas o secas, según se hayan identificado o no evidencias de existencia de agua (p.ej., ondulitas subácueas). Areniscas con rasgos de deformación sinsedimentaria en el tope de la unidad han sido relacionadas a procesos de licuefacción y escape de fluidos durante la rápida transgresión marina representada por la Formación Vaca Muerta.

El modelo geológico construido a partir del análisis precedente comprende una etapa inicial de aporte de sedimentos desde un paleoalto ubicado al sur del bloque Anticlinal Campamento por parte de sistemas fluviales escasamente canalizados, y la posterior redistribución de los mismos por parte de vientos predominantes del Oeste-Suroeste, dando origen al campo de dunas eólicas. La interpretación efectuada en este trabajo acerca de la dirección predominante de los paleovientos desde el Oeste-Suroeste permite extender la validez regional de trabajos previos efectuados en el sector centro oriental del depocentro, hacia un área marginal como la aquí estudiada, ubicada en el flanco noroeste de la Dorsal de Huincul.

Desde el punto de vista de la caracterización del reservorio, ha sido posible dividir a la Formación Tordillo en tres sub-unidades cuyas características petrofísicas pueden relacionarse a los rasgos depositacionales arriba descriptos, pudiendo estos mismos mecanismos depositacionales haber condicionado en alguna medida la diagénesis. Tanto la unidad fluvial basal como la unidad eólica superior presentan propiedades petrofísicas pobres, mientras que el intervalo eólico intermedio correspondiente a los depósitos de dunas transversales presenta mejores condiciones petrofísicas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a las autoridades de Pioneer Natural Resources Argentina S.A. y de Schlumberger Argentina por permitir la publicación del presente trabajo. También agradecen a Martín Cevallos, Alfonsina Tripaldi, David Strickler, Gervasio Barzola y los árbitros del Congreso por sus comentarios que ayudaron a mejorar el manuscrito, y a Pablo Michaux por su colaboración con las figuras.

BIBLIOGRAFÍA

- Arregui C. 1993. Análisis estratigráfico paleoambiental de la Formación Tordillo en el subsuelo de la Cuenca Neuquina. XII Congreso Geológico Argentino y II Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Actas I: 165-170.
- Digregorio, J.H. y Uliana, M.A., 1980. Cuenca Neuquina: Segundo Simposio de Geología regional Argentina, Volumen II, 985-1032.
- Eschner, T.B. y Kocurek, G., 1986. Marine Destruction of Eolian Sand Seas: Origin of Mass Flows. *Journal of Sedimentary Petrology* 56, 401-411.
- Fryberger, S.G., 1990a. Bounding Surfaces in Eolian Sediments. Chapter 7. En: Fryberger, S.G., Krystinik, L.F., and Schenk, C.J. (Eds.), *Modern and Ancient Eolian Deposits: Petroleum Exploration and Production*. Rocky Mountain Section Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Denver, Colorado.
- Fryberger, S.G., 1990b. Eolian Stratification. Chapter 4. En: Fryberger, S.G., Krystinik, L.F., and Schenk, C.J. (Eds.), *Modern and Ancient Eolian Deposits: Petroleum Exploration and Production*. Rocky Mountain Section Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Denver, Colorado.
- Krystinik, L.F., 1990. Development Geology in Eolian Reservoirs. Chapter 13. En: Fryberger, S.G., Krystinik, L.F., and Schenk, C.J. (Eds.), *Modern and Ancient Eolian Deposits: Petroleum Exploration and Production*. Rocky Mountain Section Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Denver, Colorado.
- Maretto, H., Carbone, O., Gazzera, C. y Schiuma, M., 2002. Los reservorios de la Formación Tordillo. En: Schiuma, M., Hinterwimmer, G. y Vergani, G. (Eds), *Rocas Reservorio de las Cuencas Productivas de la Argentina*, Instituto Argentino del Petróleo y del Gas, Buenos Aires, 335-358.
- Meadows, N.S., y Beach, A., 1993. Structural and climatic controls on facies distribution in a mixed fluvial and aeolian reservoir: the Triassic Sherwood Sandstone in the Irish Sea. En: North, C.P. y Prosser, D.J. (Eds.), *Characterization of Fluvial and Aeolian Reservoirs*, Geological Society Special Publication 73, 247-264.
- Mendiberri, H., y Carbone, O., 2002. Cuenca Neuquina: marco geológico y reseña histórica de la actividad petrolera. En: Schiuma, M., Hinterwimmer, G. y Vergani, G. (Eds), *Rocas Reservorio de las Cuencas Productivas de la Argentina*, Instituto Argentino del Petróleo y del Gas, Buenos Aires, 201-228.
- Muñoz, M., Giusiano, M. y Conti Persino, A. 1984. El origen eólico de la Formación Tordillo (Miembro Verde), en el yacimiento Loma La Lata, provincia del Neuquén. IX Congreso Geológico Argentino, Actas V: 315-323.
- Peroni, G., Di Mario, J. y Arregui, C. 1984. Estudio estadístico de perfiles de buzamiento aplicado al análisis de paleoambientes – Formación Tordillo (Cuenca Neuquina), provincia del Neuquén. IX Congreso Geológico Argentino, Actas V: 243-257.

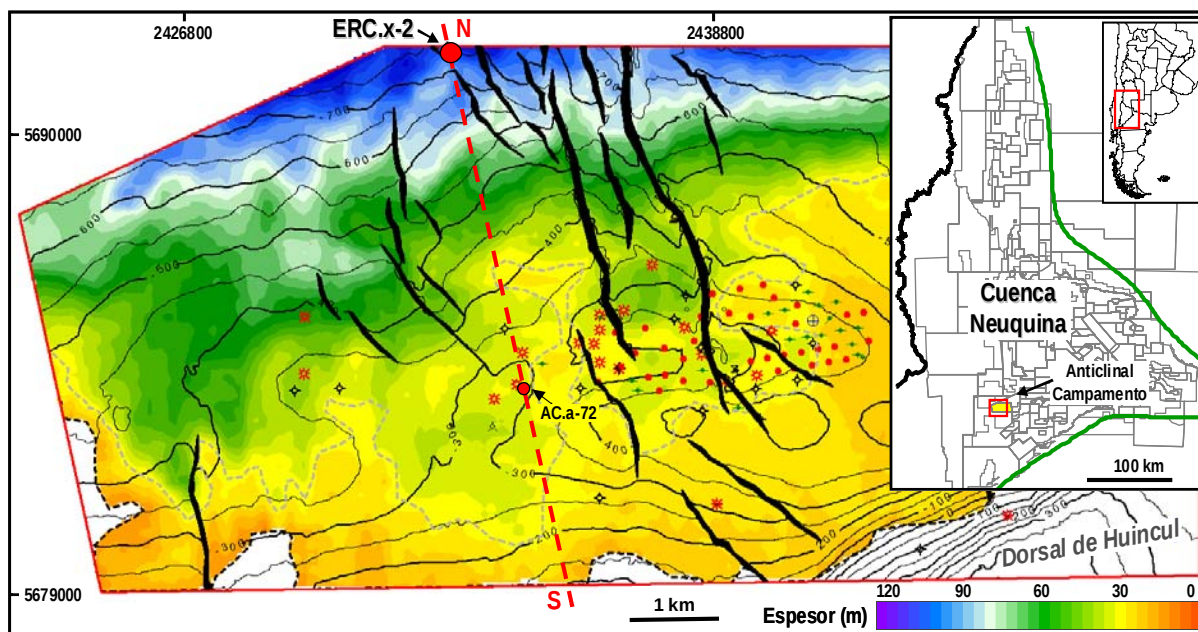


Figura 1. Mapa isopáquico de la Formación Tordillo en el centro-oeste del bloque Anticlinal Campamento, mostrando la ubicación del pozo ERC.x-2, el *pinchout* de toda la unidad (línea de trazos negros) y el *pinchout* del intervalo medio (línea de trazos grises). Los contornos estructurales indican profundidad al tope de la unidad (en metros bajo el nivel del mar). La traza N-S corresponde a la sección sísmica ilustrada en la Figura 3.

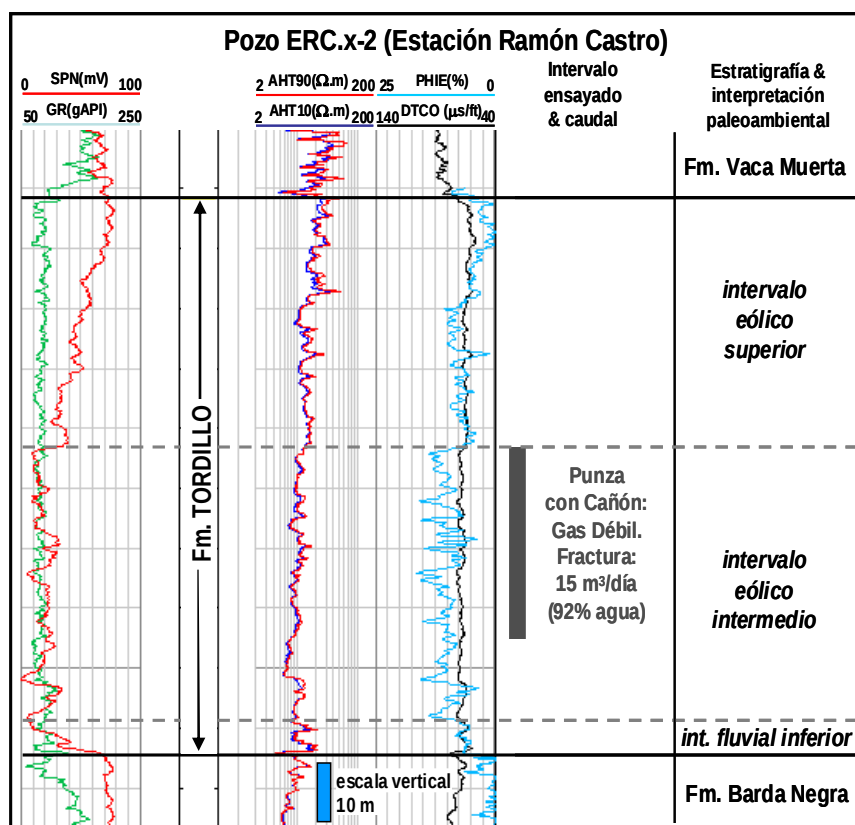


Figura 2. Perfil de la Formación Tordillo en el pozo ERC.x-2 mostrando los tres intervalos (fluvial inferior, eólico intermedio, y eólico superior) descritos en el texto. La barra vertical indica el intervalo ensayado.

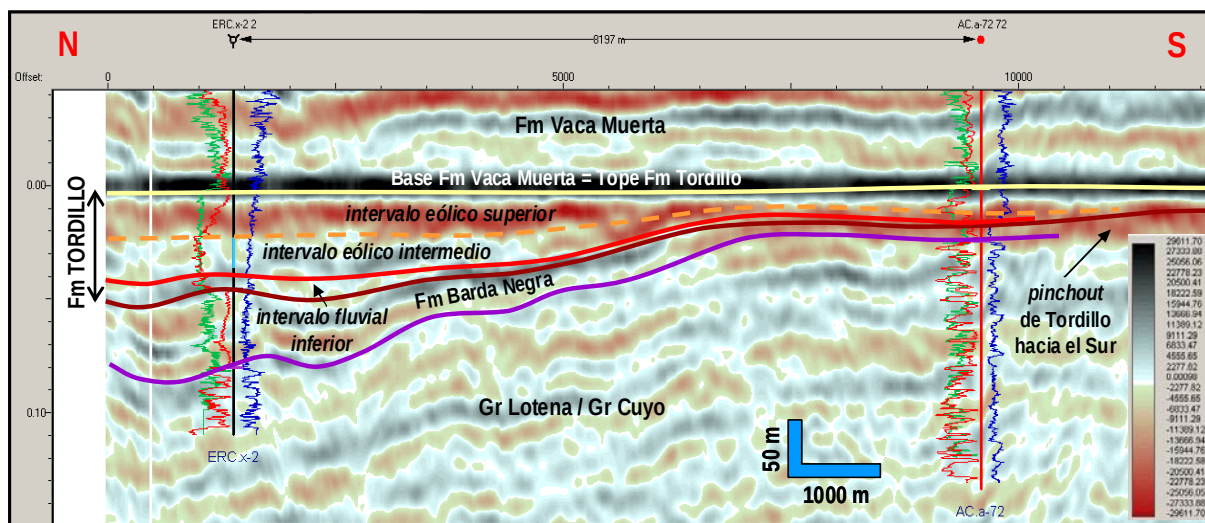


Figura 3. Corte regional Norte-Sur (ver Figura 1) horizontalizado a la base de la Formación Vaca Muerta, ilustrando la geometría general de la Formación Tordillo en Anticinal Campamento, la distribución de las unidades internas descritas en este trabajo, y el *pinchout* del intervalo eólico productivo hacia el Sur.

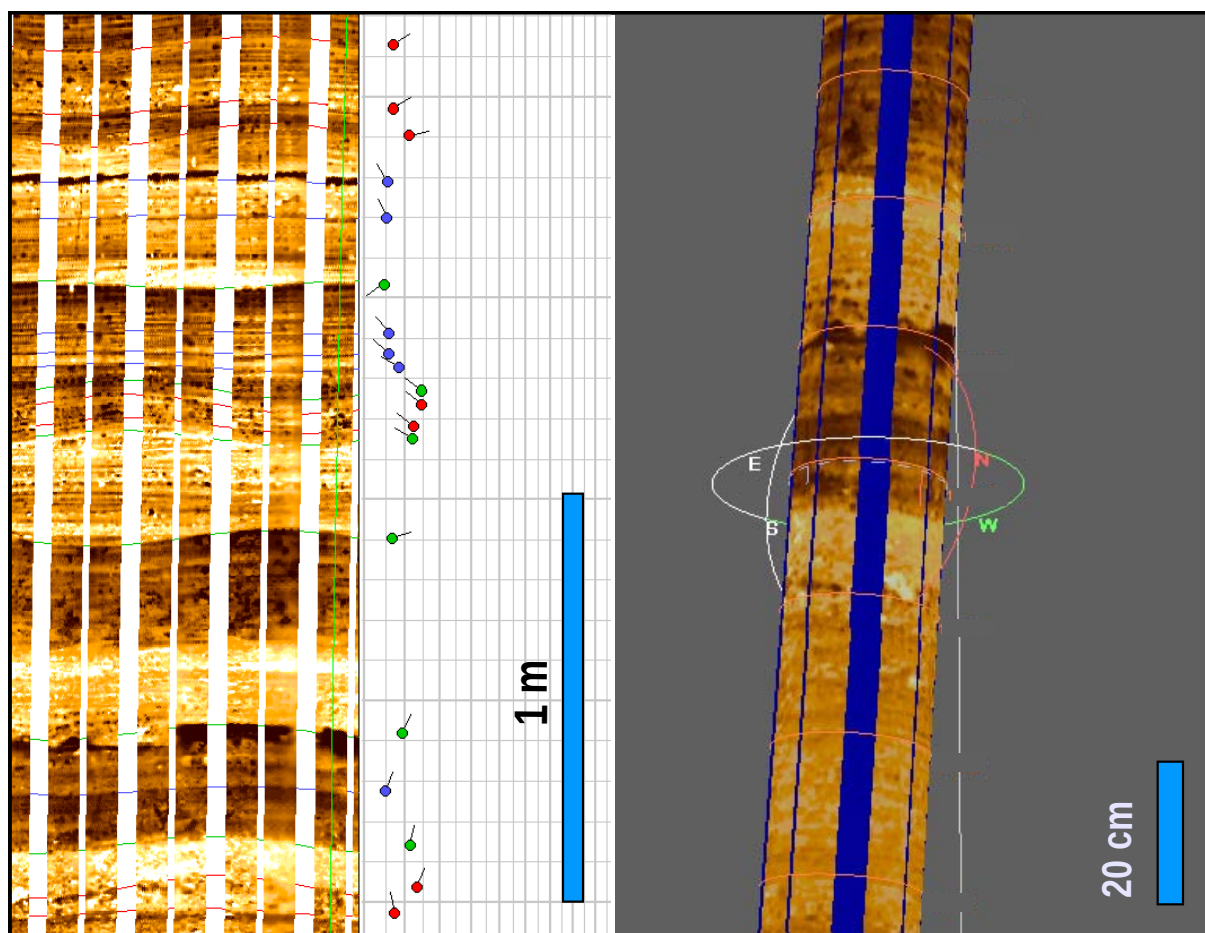


Figura 4. Areniscas y areniscas conglomerádicas fluviales amalgamadas, con laminación planar y estratificación cruzada planar. En la subdivisión de la derecha (visualización 3D) se observan clastos mayores.

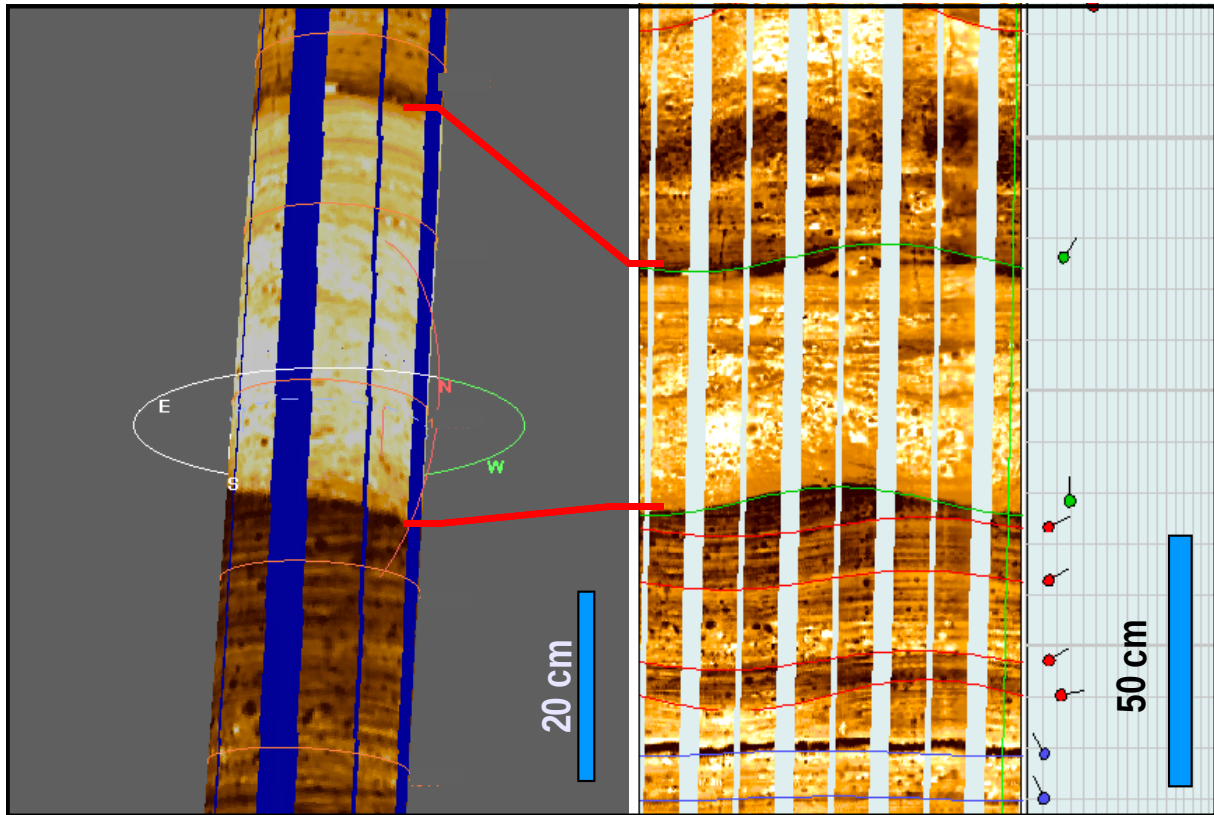


Figura 5. Areniscas conglomerádicas con base erosiva.

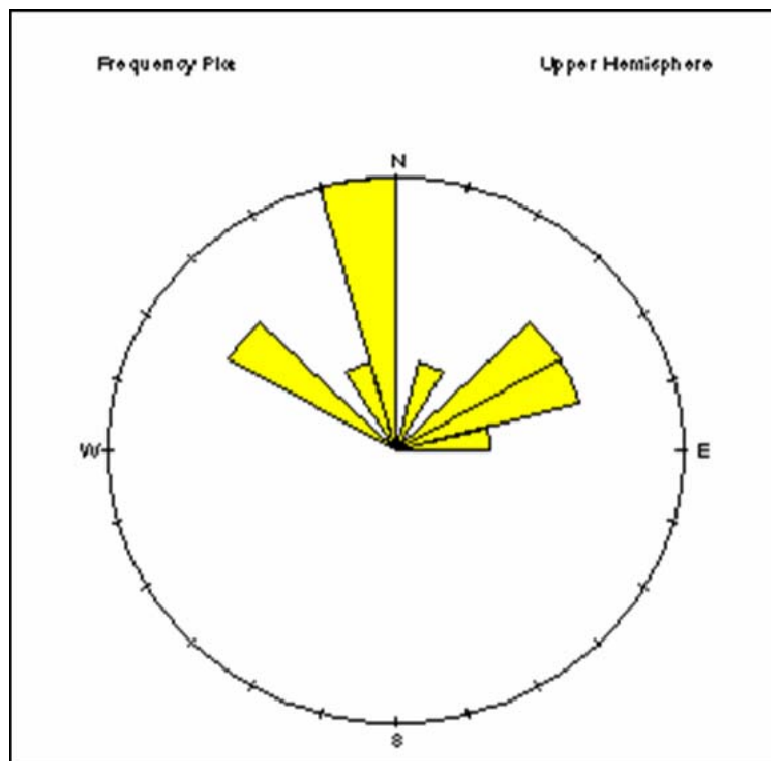


Figura 6. Estereodiagrama del azimuth de la estratificación cruzada en el intervalo fluvial.

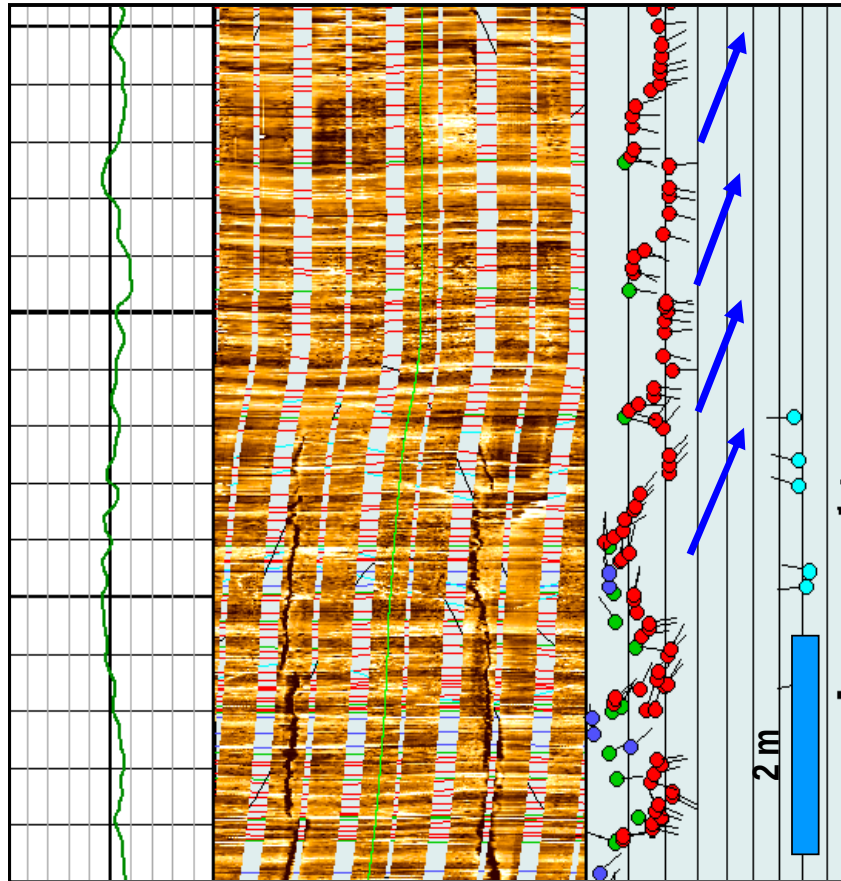


Figura 7. Set de dunas asintóticas a la base.

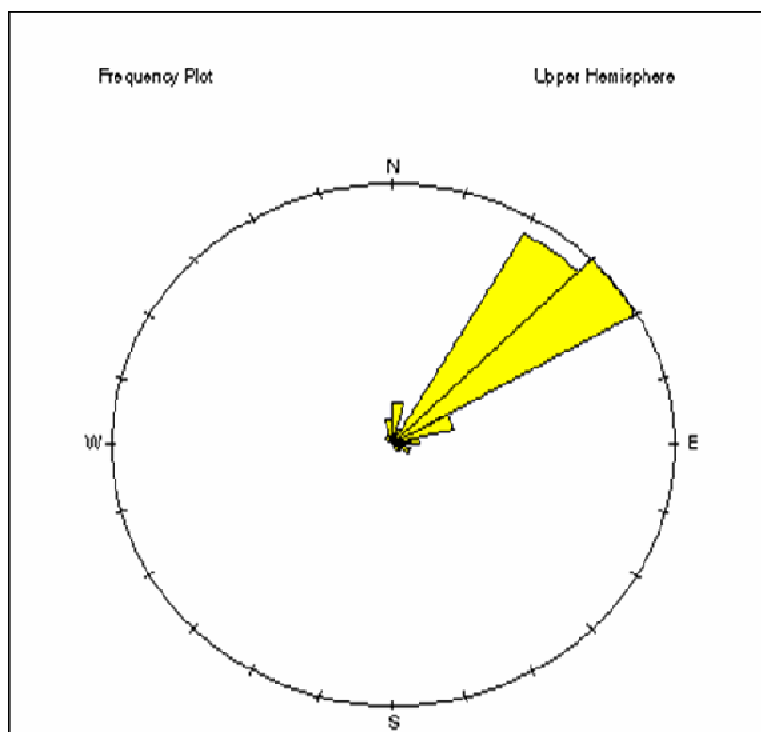


Figura 8. Estereodiagrama de set de dunas tipo transversal.

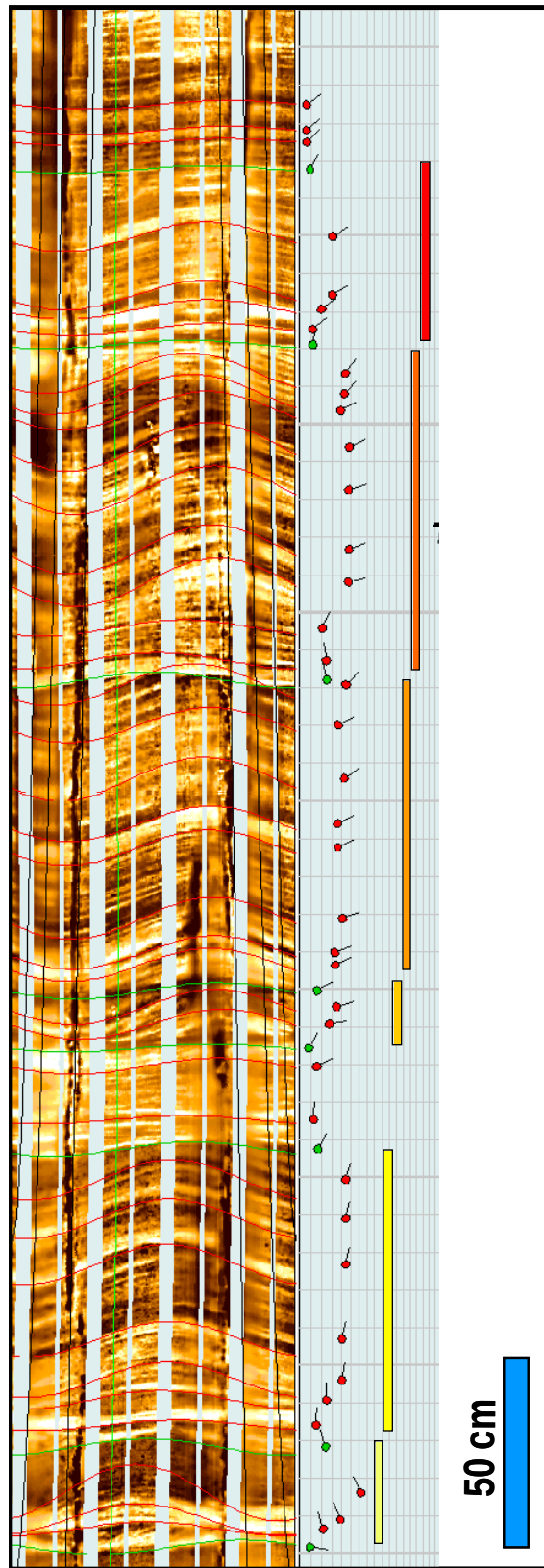


Figura 9. Sets de dunas tipo barjan o *ridges* barjanoides. Las barras de la derecha representan cada set individualmente.

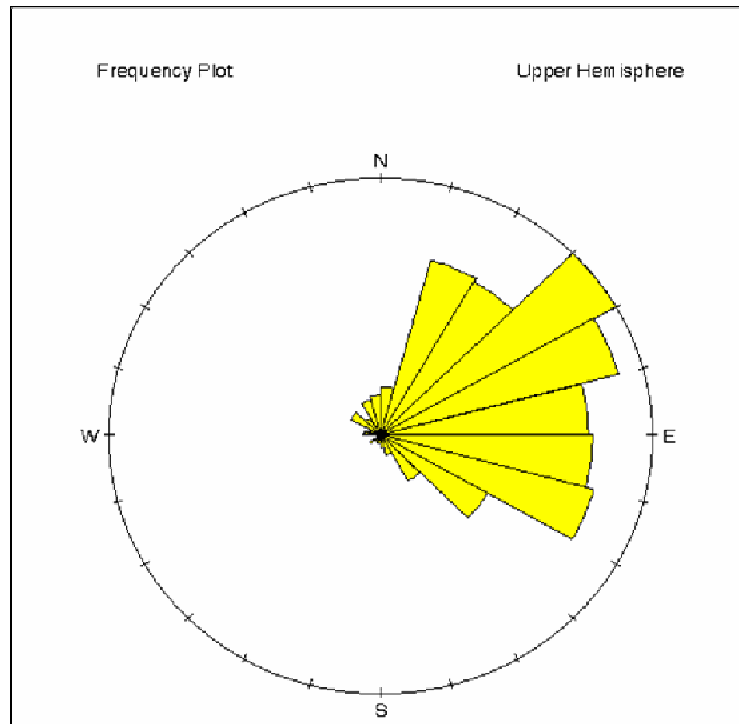


Figura 10. Estereodiagrama de los azimut de la estratificación cruzada de toda el intervalo eólico.

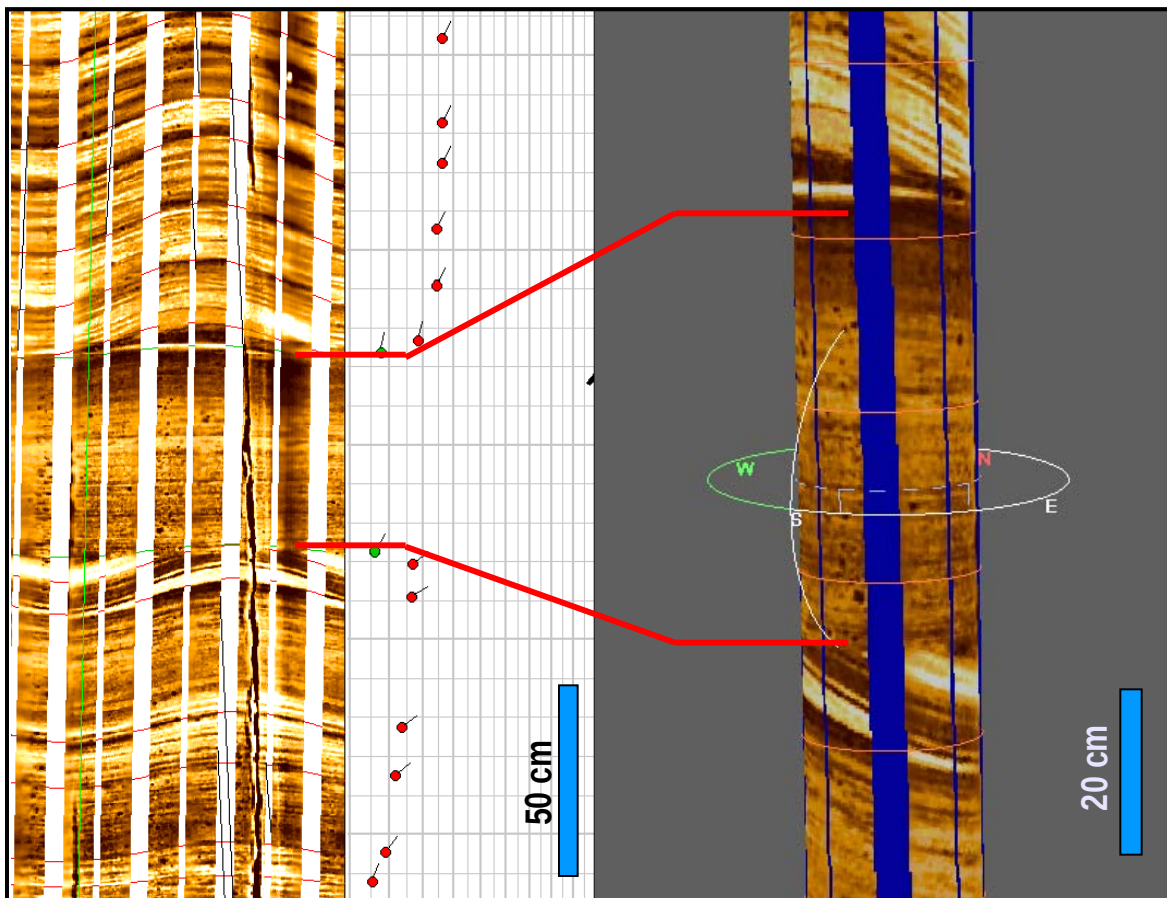


Figura 11. Áreas de interduna.

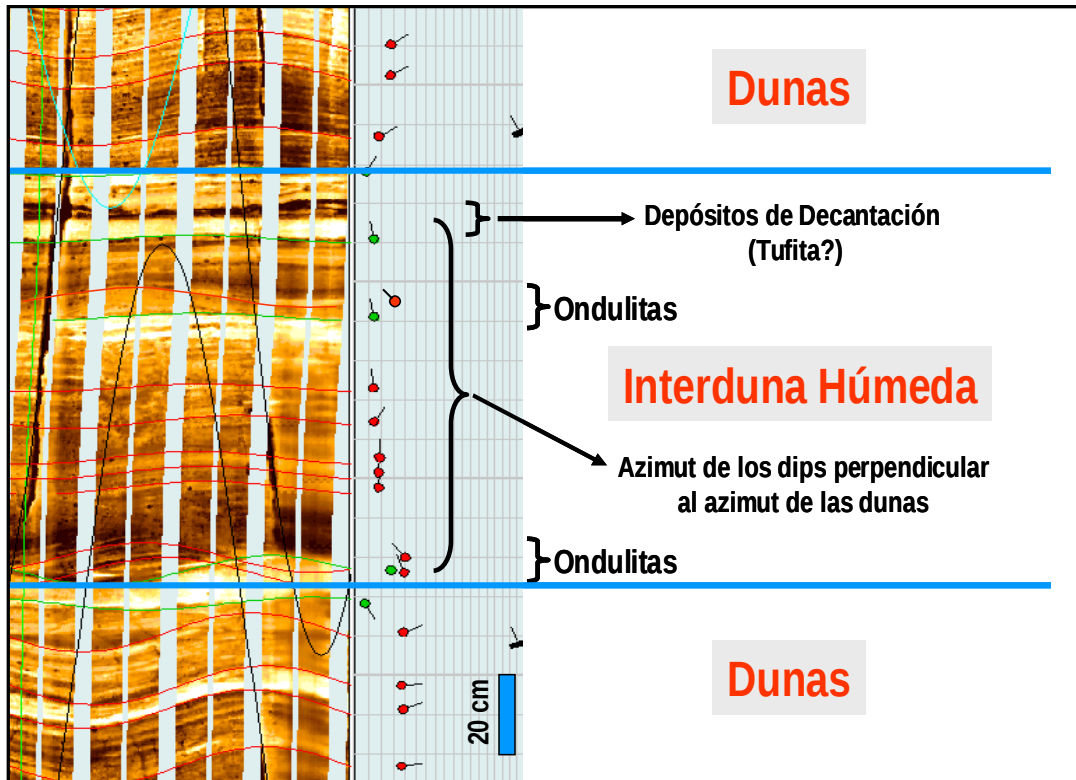


Figura 12. Detalle de un área de interduna húmeda.

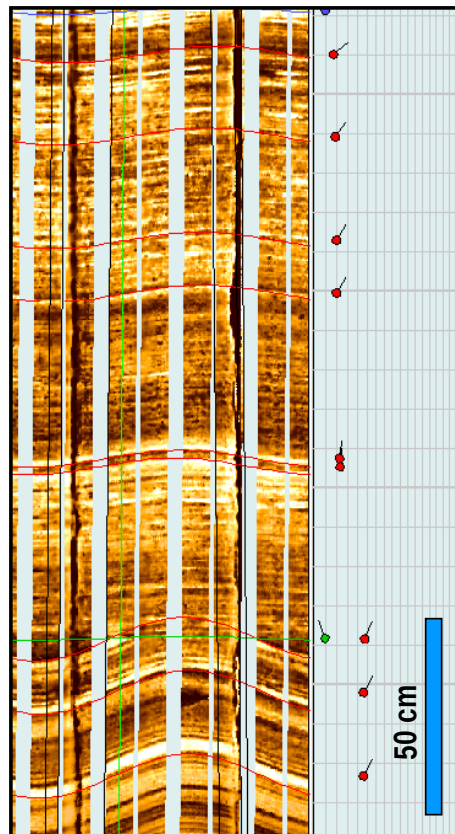


Figura 13. Detalle de un área de interduna seca.

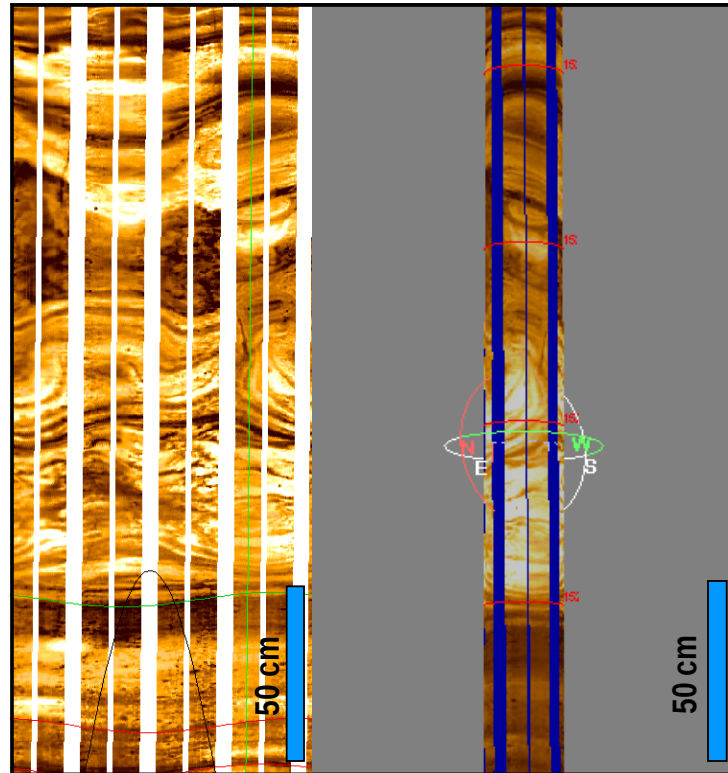


Figura 14. Areniscas con estratificación convoluta y evidencias de escape de fluidos.

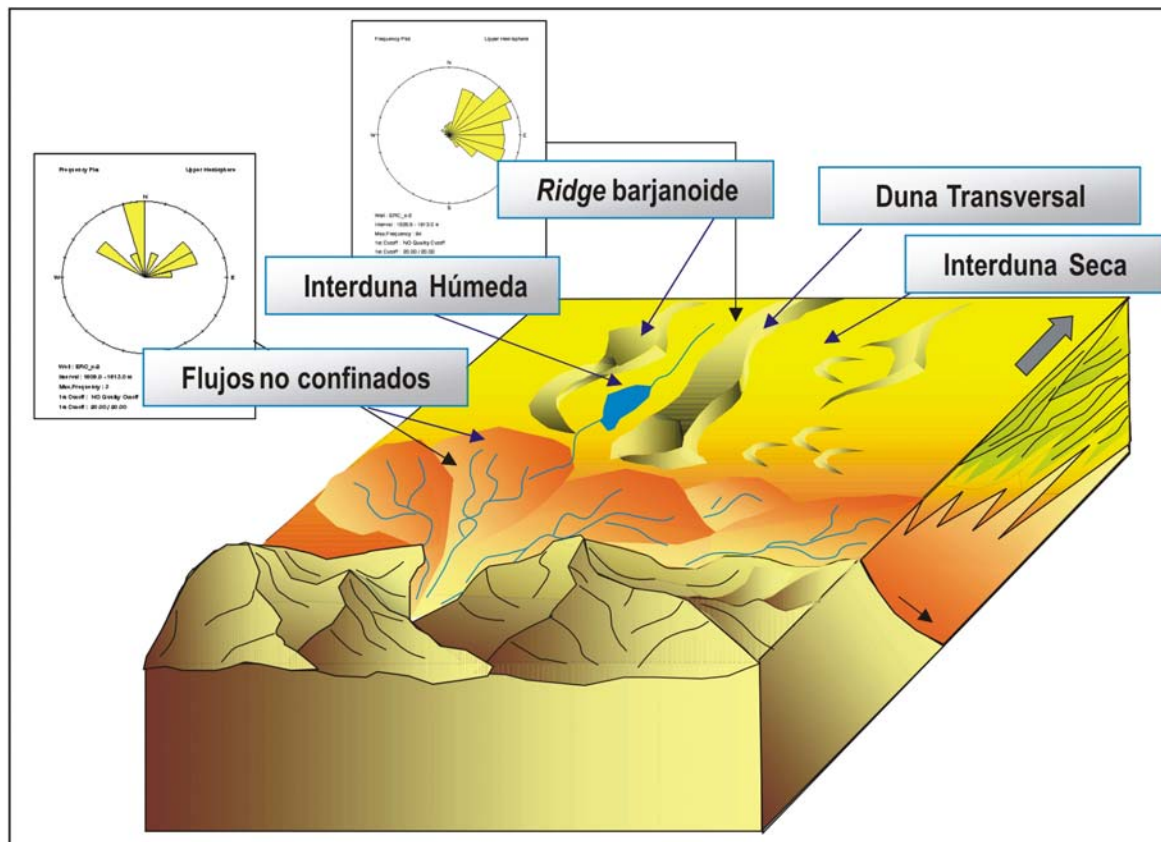


Figura 15. Modelo geológico esquemático para la Formación Tordillo en el área de Anticlinal Campamento.