

EVOLUCIÓN DEL CAMPO DE ESFUERZOS HORIZONTAL DESDE EL EOCENO A LA ACTUALIDAD EN LA CUENCA NEUQUINA

Cecilia G. GUZMÁN^{1,2}, Ernesto O. CRISTALLINI^{1,2}, Víctor H. GARCÍA^{1,3,4}, Daniel L. YAGUPSKY^{1,2} y Florencia BECHIS^{1,5}

¹ Laboratorio de Modelado Geológico del Instituto de Estudios Andinos don Pablo Groeber, Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires.

E-mail: ceciliagguzman@hotmail.com

² IDEAN - Instituto de Estudios Andinos (CONICET-UBA), Buenos Aires.

³ Instituto de Investigación en Paleobiología y Geología, Sede Alto Valle, UNRN, General Roca, Río Negro

⁴ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas.

⁵ IIDyPCA (CONICET, Universidad Nacional de Río Negro), San Carlos de Bariloche, Río Negro.

RESUMEN

Para estudiar la continuidad y la evolución en el tiempo de la dirección de los esfuerzos horizontales en el ámbito de la cuenca Neuquina, se integraron resultados previamente obtenidos a partir del análisis de *breakout* de pozos con información de diques de asfaltita presentes en la región y diques volcánicos medidos en las sierras de Cara Cura y Reyes. Los diques de bitumen de la cuenca Neuquina se formaron durante el Paleoceno - Eoceno en un contexto en el que el esfuerzo máximo era horizontal y con orientación NE. Dentro de los diques volcánicos analizados se reconocieron dos poblaciones principales, población I (NE) y población II (NNE) y una secundaria, la población III (NO). La edad de estos diques no está aun bien establecida, pero se los relaciona a un evento magmático del Oligoceno tardío - Mioceno. Tanto entre los diques de bitumen como entre los volcánicos se logró diferenciar una población del tipo I (ENE- NE), dejando en evidencia la dirección del esfuerzo máximo al tiempo de su formación. Más allá de las incertidumbres sobre la edad de los diques volcánicos y de bitumen, se interpreta que durante gran parte del Terciario la orientación del esfuerzo horizontal máximo fue NE. Sin embargo, los datos de *breakout* muestran que en la actualidad es algo distinto con una dirección media ENE. Este cambio en la dirección de los esfuerzos es coherente con el cambio en el vector de subducción producido entre el Eoceno y la actualidad.

Palabras clave: *Esfuerzos, diques, breakout, retroarco, Andes Centrales.*

ABSTRACT

Horizontal Stress Field Evolution from Eocene to Present in Neuquen Basin.

Continuity and evolution in time of the horizontal stress direction in the Neuquen Basin area, derived from the analysis of recent borehole data and orientation of volcanic dykes measured in outcrop in the Cara Cura and Reyes Ranges is presented. The bitumen dykes along the Neuquén Basin were formed during Paleocene - Eocene in a context where the maximum stress was horizontal and had a NE. Within the analyzed volcanic dykes two major groups have been recognized, group I (NE orientation) and group II (NNE orientation) and a secondary group III (NW orientation). The age of these dykes is still not well established, but they were related to a Late Oligocene - Miocene magmatic event. Both for the volcanic and bitumen dykes a type I group (ENE-NE orientation) has been recognized, evidencing the maximum stress direction at the time they were formed. Beyond the uncertainties in the volcanic and bitumen dykes age, it is interpreted that during great part of Tertiary, the orientation of the horizontal maximum stress was NE. However, the breakout data shows that the actual horizontal maximum stress is a little different with a ENE mean direction. This change in the direction of stress is consistent with the change in the subduction vector produced between the Eocene and today.

Keywords: *Stress, dikes, breakout, retroarc, Central Andes.*

INTRODUCCIÓN

Cada porción de la corteza terrestre se encuentra sometida a un estado de es-

fuerzos particular. Los orígenes de estos esfuerzos son variados, siendo los más importantes los gravitacionales y los tectónicos en general. Esto significa que pa-

ra un determinado punto en la corteza, la disposición de los esfuerzos principales va a variar en el tiempo de acuerdo a la configuración tectónica y la disposición

de la topografía a su alrededor. Conocer la geometría del campo de esfuerzos para una región y su evolución en el tiempo es importante tanto en términos científicos, como económicos (Fuchs y Müller 2001, Bell y Babcock 1986, Ask 2004), ya que ayuda desde la evaluación de riesgos sísmicos, a la exploración y explotación de reservorios fracturados de minerales e hidrocarburos.

En este trabajo se incursiona en la evolución durante los últimos 40 Ma del campo de esfuerzos actuante en el antepaís andino de la región neuquina y sur mendocina. Este sector posee gran actividad económica vinculada a la industria de hidrocarburos y los resultados aquí expuestos pueden ser de interés para la optimización del drenado de los yacimientos ubicados en la región.

El estudio de la evolución del campo de esfuerzos, se puede dividir en dos problemáticas. La primera es la de entender las direcciones de los esfuerzos en la actualidad; en este sentido, es la más sencilla, ya que éstos se pueden interpretar de datos de pozos (*breakouts*) e incluso medir en el terreno (*stress-meters*). En este caso, se utilizaron los datos de *breakout* de Guzmán *et al.* (2007) y Guzmán (2007), basados en la interpretación de más de una centena de pozos distribuidos por la región de estudio. La segunda problemática es la de interpretar cómo fueron las direcciones de los esfuerzos en el pasado; ésta es, sin duda, la más compleja, ya que se basa en la interpretación de estructuras, que en algunos casos no cuentan con toda la información deseable.

La información que se utilizará en lo que concierne al campo de esfuerzos actual se encuentra normalizada por el proyecto *World Stress Map* (Zoback *et al.* 1989), una base de datos mundial que reúne datos direccionales de esfuerzos horizontales máximos y/o mínimos actuantes en la corteza terrestre. La información allí recopilada proviene de diferentes fuentes y de distintas técnicas de medición (Zoback 1992, Heidbach *et al.* 2008, Guzmán 2007, Guzmán *et al.* 2007 y Guzmán y Cristallini 2009). Guzmán (2007) realiza una in-

vestigación e interpretación detalladas del campo de esfuerzos horizontal a lo largo del retroarco de Neuquén y Mendoza, a partir del cálculo de *breakout* de pozos mediante el análisis de los calibres de los perfiles de buzamiento. En los trabajos mencionados (Guzmán 2007, Guzmán *et al.* 2007 y Guzmán y Cristallini 2009) los autores procesaron alrededor de 140 pozos distribuidos a lo largo de la cuenca Neuquina. De los 140 pozos de la cuenca Neuquina, en 115 se pudo reconocer la presencia de *breakout* y calcular su dirección. Los datos fueron clasificados siguiendo los criterios propuestos por el *World Stress Map Project* (Guzmán 2007 y Guzmán *et al.* 2007). A lo largo del retroarco Andino de la cuenca Neuquina la orientación de los esfuerzos principales está principalmente controlada por la acción de la fuerza de subducción (Az. 80°) y las fuerzas topográficas (E-O). Los resultados obtenidos de la dirección del esfuerzo horizontal máximo por Guzmán (2007) y Guzmán *et al.* (2007) tienen una dirección media de azimut 88,7° con un intervalo de confianza del 95% de 13,3° y son acordes con los valores esperados.

Para interpretar cómo fueron las direcciones de los esfuerzos en el pasado se puede utilizar la información que brindan las fracturas de tensión. Dichas fracturas de mediana y gran escala (metros a kilómetros de longitud), suelen rellenarse con algún material, inicialmente fluido, dando origen a vetas y diques y son muy buenas indicadores del campo de esfuerzos, ya que se desarrollan perpendiculares al esfuerzo principal mínimo σ_3 .

Con el objetivo de estudiar la continuidad y la evolución en el tiempo desde el Terciario a la actualidad de la dirección de los esfuerzos horizontales a lo largo de la cuenca Neuquina, se integraron los resultados previamente obtenidos a partir del *breakout* de pozos (Guzmán 2007, Guzmán *et al.* 2007) con información de diques de asfaltita (Borello 1956, Parnell y Carey 1995, Cobbold *et al.* 1999, Guzmán 2002) y diques volcánicos medidos en la zona de sierra de Cara Cura y sierra de Reyes (Guzmán 2007). Se realizaron

trabajos de campo en las cercanías del anticlinal Pampa Tril y sur de sierra de Reyes (Fig. 1) para recolectar información sobre los diques de asfaltita, y en la zona de la sierra de Cara Cura para inspeccionar, muestrear y medir diques volcánicos. Se analizó el campo de esfuerzos bajo el cual se formaron y su evolución en el tiempo.

Los resultados obtenidos ponen luz sobre la configuración del campo de esfuerzos a la que estuvo sometida la región del retroarco andino de Neuquén y Mendoza en los últimos 40 Ma.

MARCO GEOLÓGICO

La zona donde se llevó a cabo el trabajo de campo se encuentra en el retroarco de los Andes del sur de Mendoza y norte de Neuquén, entre los 36°30' y 37°15' de latitud sur y los 69°30' y 70° de longitud oeste (Fig. 1). En ella se distingue un tren submeridiano de estructuras anticlinales de basamento que incluye a la sierra de Cara Cura, la sierra de Reyes, los anticlinales de Pampa Tril y el de la Yesera (Viñes 1990). Se ubican dentro de lo que Viñes (1990) y Manceda y Figueroa (1995) denominan como el segmento central de la faja plegada y corrida andina. Este segmento está constituido por tres bloques principales de basamento de rumbo aproximado N-S (cordillera del Viento, La Yesera - Tromen y sierra de Cara Cura - Reyes) (Fig. 1).

Estas estructuras fueron interpretadas por algunos autores como el resultado de la inversión tectónica de antiguas fallas extensionales que delimitaban los grábenes del Triásico - Jurásico Temprano (Viñes 1990, Kozłowski 1991, Manceda y Figueroa 1993, Uliana *et al.* 1995). Su levantamiento se produjo durante la orogenia andina, a partir del Cretácico Tardío (Ramos 1978, Vergani *et al.* 1995, Manceda y Figueroa 1995, Zapata *et al.* 1999, Cobbold y Rosello 2003, Zapata y Folguera 2005). Dichas estructuras anticlinales son asimétricas con vergencia oriental y su levantamiento se dio a través de corrimientos ciegos no emergentes (Kozłowski *et al.*

1996). En el área de Huantraico (Fig. 1), ubicada hacia el sureste, existe una secuencia volcánica cenozoica, discordante sobre los depósitos del Grupo Malargüe del Cretácico Superior - Terciario inferior (Fig. 2). Ramos y Barbieri (1988), según dataciones radiométricas, obtuvieron una edad de 36 ± 2 Ma para los niveles basales, estableciendo el inicio del volcanismo a principios del Oligoceno. Esta secuencia se encuentra plegada, por lo que la etapa de deformación principal de este sector sería post-oligocena (Zamora Valcarce y Zapata 2005). Por otro lado, Kozłowski *et al.* (1996) afirman que la edad del levantamiento de los anticlinales está determinada por las volcanitas terciarias del sinclinal de Huantraico, correspondiente a la Formación Tristeza, que yacen horizontales en su núcleo. Por debajo de esta unidad se encuentran basaltos terciarios plegados de edad 17,8 y 20,1 Ma (Kozłowski *et al.* 1996).

En la zona se reconocen estructuras de primero y segundo orden; las de segundo orden son aquellas desarrolladas en la cobertura sedimentaria con una menor longitud de onda que las de primer orden y se dan a partir de la inserción de cuñas de basamento dentro de las sedimentitas jurásicas (Zapata *et al.* 1999). Las estructuras de primer orden corresponden a amplios anticlinales generados por fallas compresivas de vergencia oriental que involucran al basamento.

Los anticlinales de la Yesera y de Pampa Tril son, según Kozłowski *et al.* (1996), anticlinales de basamento o estructuras de primer orden, levantados por corrimientos de vergencia oriental, separados por el escalón estructural Curaco (Kozłowski *et al.* 1996). Estos elementos estructurales están cubiertos por coladas basálticas del volcán Tromen, ubicado al oeste de los anticlinales. En el caso del anticlinal de Pampa Tril, el desplazamiento producido por el corrimiento de basamento se traslada a los depósitos del Grupo Mendoza (Fig. 2) que se deforman en estructuras apretadas, como los pliegues que se encuentran cercanos a la zona de El Portón (Fig. 1), ubicados en la zona

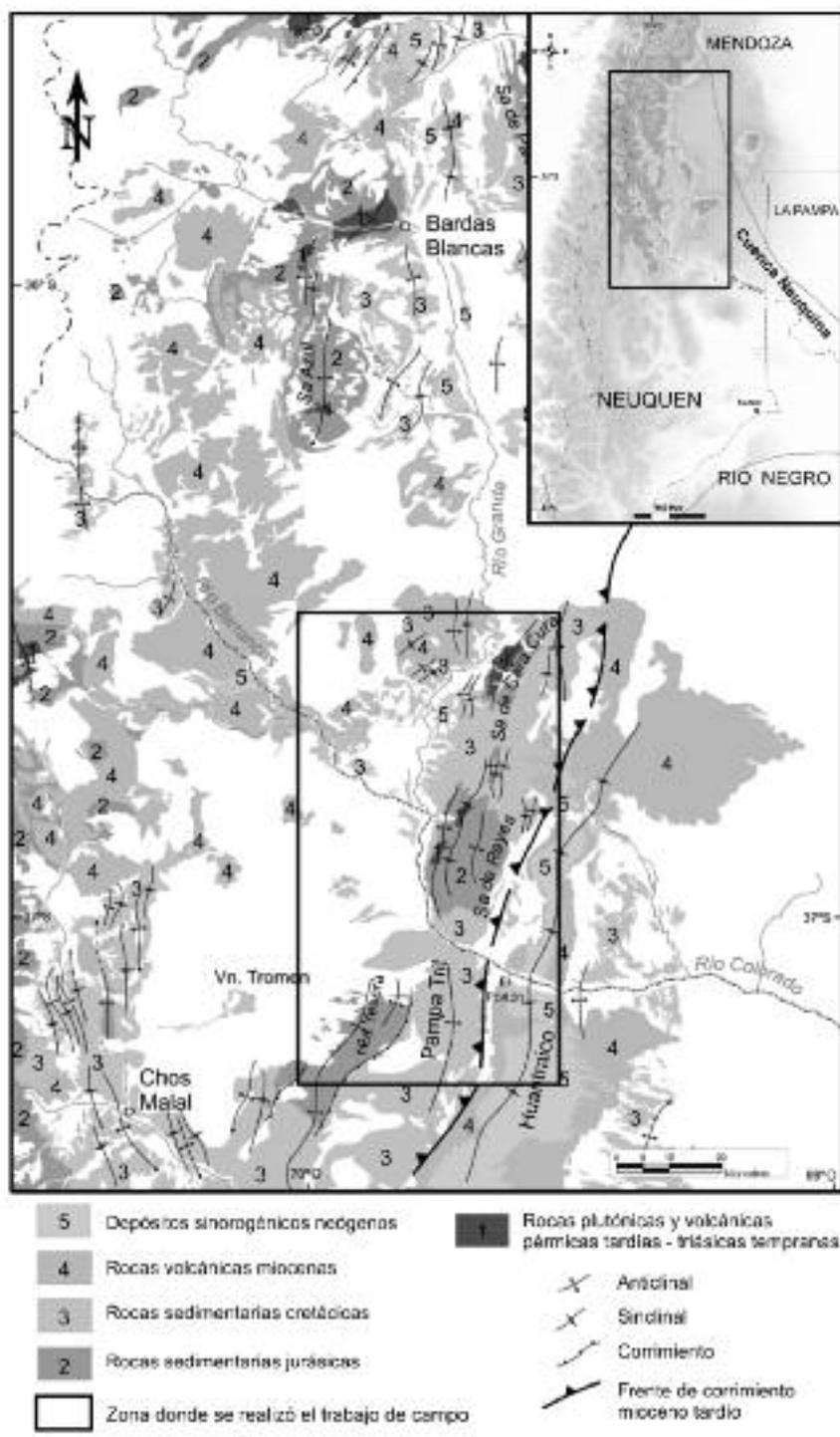


Figura 1: Mapa regional simplificado de la zona de estudio (modificado de Sagripanti *et al.* 2011).

triangular desarrollada en el limbo oeste del sinclinal de Huantraico (Viñes 1990). Por lo tanto, al este del anticlinal de Pampa Tril, el frente de corrimientos presenta estructuras de piel fina que están conectadas con una lámina de basamento

que genera una zona triangular frontal (Zamora Valcarce y Zapata 2005). Las sierras de Cara Cura y Reyes, corresponden a braquianticlinales asimétricos fuertemente apretados, de vergencia oeste orientados N-S. Poseen un cierre en

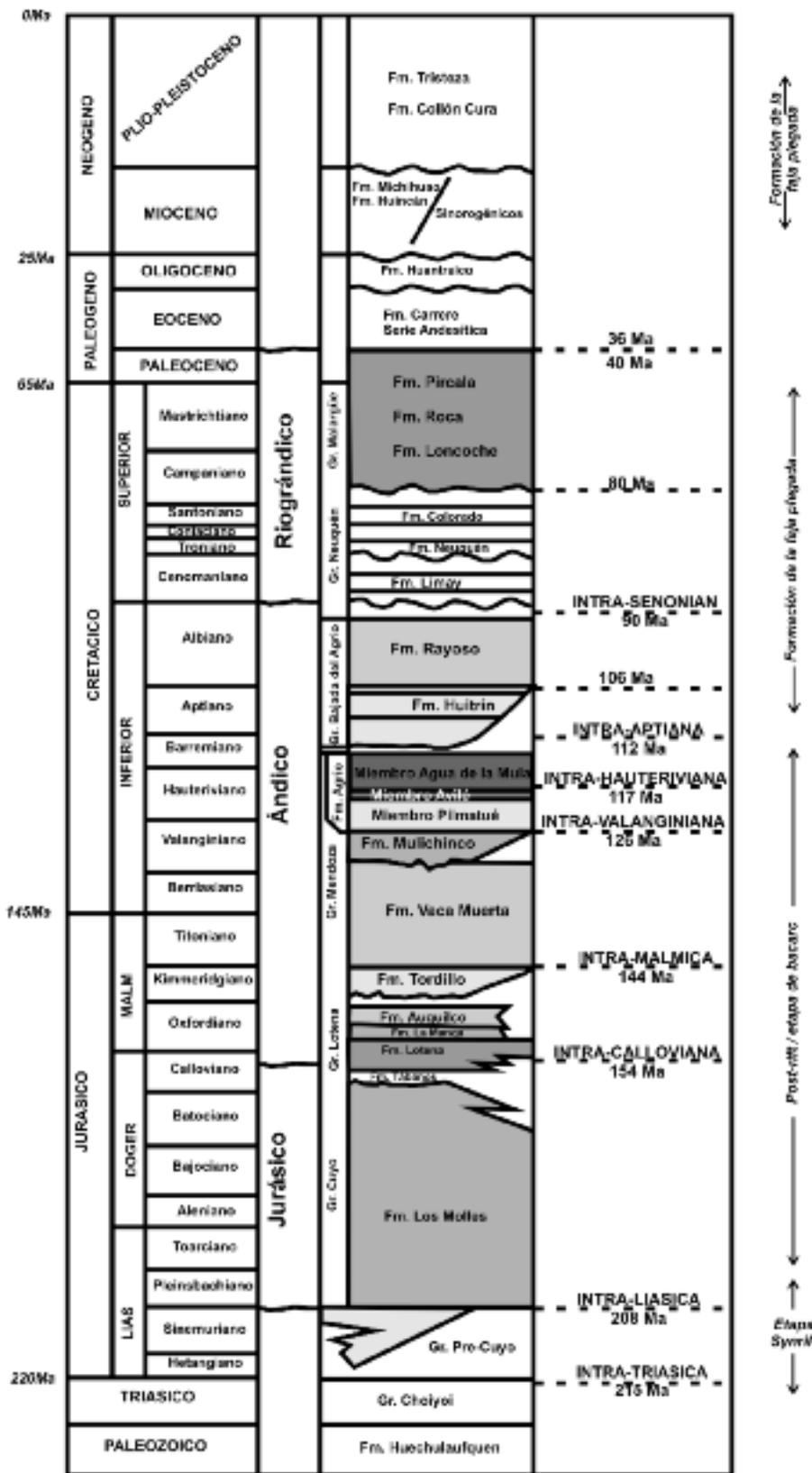


Figura 2: Columna estratigráfica de la cuenca Neuquina (modificado de Zamora Valcarce 2006).

los extremos norte y sur, presentan un flanco occidental empinado y un flanco oriental más tendido, y en sus núcleos aflora el Grupo Choyoi (Fig. 2) (Kozlowski *et al.* 1993). La sierra de Cara Cura tiene una longitud de 20 km, un ancho de 8 km y un desnivel topográfico de unos 1000 metros. La estructura principal, ubicada al oeste, se encuentra orientada en la dirección NNE y presenta su flanco frontal al oeste con capas en posición subvertical, mientras que el limbo dorsal se caracteriza por una suave pendiente hacia el este. Un anticlinal de menor tamaño se localiza al este, presenta un rumbo aproximado N-S y fue interpretado como un pliegue asimétrico por propagación de falla (Pángaro *et al.* 2004). En el núcleo de estos anticlinales afloran más de 800 metros de rocas volcánicas y volcanoclásticas continentales correspondientes relleno de sinrift de la cuenca Neuquina, incluido en el ciclo Precuyano (Gulisano 1981, Pángaro *et al.* 2004). Estos depósitos presentan importantes variaciones de facies, tanto en sentido lateral como vertical, y fueron interpretadas como el resultado de la actividad volcánica de domos y estratovolcanes bimodales con períodos de retrabajo sedimentario (Pángaro *et al.* 2004). La sierra de Reyes se sitúa en el extremo suroccidental de la provincia de Mendoza. Está limitada al norte por el cerro Mayal o Silla Negra que la separa de la sierra de Cara Cura. Hacia el oeste y sur está limitada por el río Colorado y hacia el este se desarrolla una zona deprimida denominada pampa del Carrizo (Narciso *et al.* 2001). Esta sierra abarca una extensión aproximada de 32 km de longitud por 14 km de ancho, con un desnivel topográfico de 1300 m y consta de dos anticlinales paralelos, de rumbo N-S (Pángaro *et al.* 2004). Sobre el flanco oriental se desarrolla una zona triangular que es la continuación norte de la descrita al este del anticlinal de Pampa Tril. El desarrollo y distribución de facies evaporíticas de la Formación Huitrín (Fig. 2) controló la formación de estas zonas triangulares (Kozlowski *et al.* 1993, Dicarlo 2005). Según algunos autores, ambos conjuntos

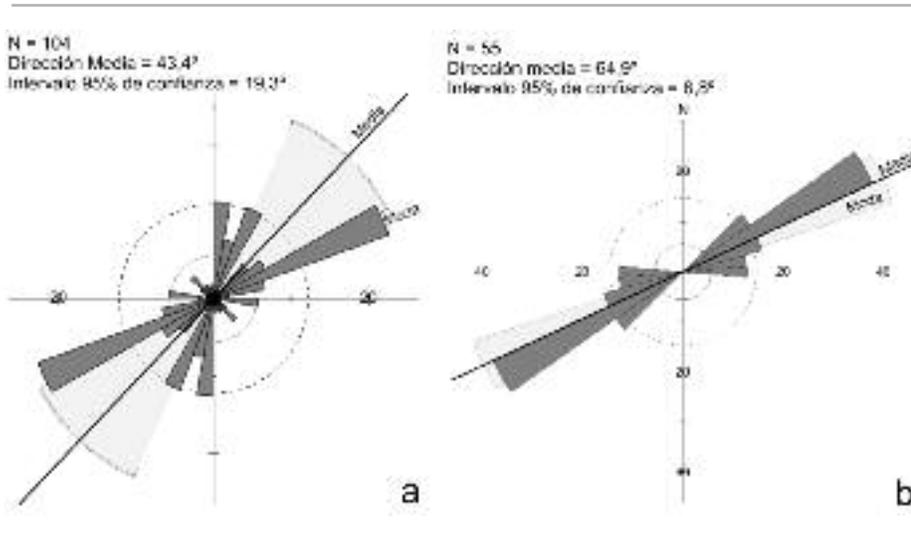


Figura 4: a) Diagrama de roseta correspondiente a los diques de bitumen de la cuenca Neuquina, la dirección media es Az. $43,4^\circ$ con un intervalo de confianza del 95% de $19,3^\circ$ y una moda de Az. 65° ; b) Diagrama de roseta de los diques de bitumen pertenecientes a la población I identificada como NE. La dirección media calculada es de $64,9^\circ$, con un intervalo de confianza del 95% de $6,8^\circ$.

150 localidades de la cuenca. Más tarde Cobbold *et al.* (1999) tomaron como base los estudios realizados anteriormente y los sintetizaron en un mapa donde muestran la ubicación de las diferentes vetas de asphaltita a lo largo de la cuenca Neuquina. En general, los diques tienen desde unos centímetros a varios metros de ancho y entre unos pocos metros hasta 1 km de largo. En el mapa de la figura 3 se grafican los diques compilados por Cobbold *et al.* (1999) junto con los hallados en las inmediaciones del anticlinal de Pampa Tril, anticlinal La Yesera y sector sur de sierra de Reyes (Guzmán 2002).

En el ámbito de la cuenca Neuquina y especialmente en la provincia de Neuquén, los diques de bitumen presentan una dirección oblicua a los principales ejes estructurales (Cobbold *et al.* 1999) (Fig. 3). En el área ubicada en la provincia de Mendoza, en las cercanías de la localidad de Malargüe, los diques poseen una orientación más variable, y tienden a localizarse en zonas más angostas con orientaciones NE (Cobbold *et al.* 1999). En la figura 4a se sintetiza en un gráfico de roseta la orientación de los diques de bitumen de la cuenca Neuquina con una dirección media de $43,4^\circ$, un intervalo de confianza del 95% de $19,3^\circ$ y una moda con una orientación cercana a los 65° . Se pueden

separar dos poblaciones, una NNE y otra ENE. La figura 4b muestra el diagrama de roseta de la población ENE que tiene una dirección media es de $64,9^\circ$ con un intervalo de confianza del 95% de $6,8^\circ$. Parnell y Carey (1995) en su descripción de la relación que existe entre los diques de bitumen y la estructura de la zona mencionan que las venas más simples están localizadas en fracturas que presentan un alto ángulo con la estratificación. Otras se emplazan en los planos de fallas o en fracturas relacionadas a brechas. Sugieren que muchas de las fracturas en las que se sitúan los diques fueron causadas por el emplazamiento de los mismos, cuya orientación está controlada por el campo de esfuerzos local. Según Cobbold *et al.* (1999), los diques de bitumen se formaron por fracturas de tensión perpendiculares al esfuerzo compresivo mínimo, producto de la tectónica regional y la sobrepresión de fluidos y sugieren que los diques de menor espesor y menos representados probablemente se formaron por fracturas de cizalla. Proponen que la edad de emplazamiento de los diques es paleocena - eocena, teniendo en cuenta la edad de la roca en la que están emplazadas y la edad a la que la roca madre alcanzó la maduración (Cretácico - Paleoceno) (Cruz *et al.* 1996) asumiendo que los di-

ques se formaron poco después de alcanzada dicha maduración. La orientación de los diques es compatible con la dirección de convergencia de las placas de Nazca y Sudamericana para el Eoceno. Cristallini *et al.* (2002) presentan un mapa de subsuelo en base a información sísmica tridimensional en el que se observan gran cantidad de fracturas con la misma orientación que los diques de bitumen, mostrando que algunos de los diques superficiales se emplazan sobre las fracturas cartografiadas en subsuelo.

Diques volcánicos

Los diques volcánicos se forman a partir de la intrusión de rocas fundidas en fracturas de tensión formadas bajo la acción del campo de esfuerzos regional, asistidas, en este caso, por la alta presión del fluido volcánico. En la figura 5 se muestra el mapa de los diques reconocidos en el campo y cartografiados a partir de imágenes satelitales TM, ASTER e IKONOS. La figura 6, en cambio, es de carácter más regional y en ella se incluyen, además de los anteriores (Fig. 5), diques interpretados sólo en base a sensoramiento remoto (sin control de campo).

Analizando la figura 6 se puede observar la presencia de dos juegos principales de diques; uno de dirección NE (población I) y el otro de dirección NNE (población II). También se reconoce un tercer juego, de menor importancia, que presenta una dirección NO (población III). Se lograron medir alrededor de 30 diques distribuidos a lo largo de toda la sierra de Cara Cura y sector norte de las Bardas Bayas. En la cuadro 1 se presenta una lista de los diques reconocidos con su ubicación y orientación (ver figura 5 para conocer su ubicación dentro de la zona). La composición de los diques es variada: se encontraron diques de composición andesítica y basáltica y diques riódacíticos-riolíticos. Cabe destacar que no se ha encontrado relación entre la dirección y la composición de los diques. En su mayoría son verticales a subverticales de unos 60 cm a 1,5 m de ancho y de extensión variable. Analizando la figura 6 se observa que re-



Figura 5: Orientación de los diques volcánicos reconocidos a partir de imágenes satelitales graficados sobre una imagen. Se puede observar la presencia de dos juegos principales de diques, uno orientado NE (población I) y otro NNE (población II). Los diferentes números se corresponden con los diques reconocidos y medidos en el campo.

gionalmente también se reconocen las poblaciones I (NE) y II (NNE). Los diques pertenecientes a la población I cambian su orientación a lo largo de la sierra de Cara Cura, pasando de direcciones ENE al norte, a orientaciones más NE hacia el

sur. En el ámbito de la sierra de Reyes dominan los diques de la población II siendo poco frecuentes los de la I. Asimismo se ha observado la existencia de unos pocos diques de la población III (NO), al igual que en la zona de Cara

Cura muy poco frecuentes.

Para el análisis de las orientaciones de los diques, se graficaron aquellos mapeados sobre la imagen satelital en conjunto con los diques medidos en el campo en un diagrama de roseta; en total se computa-

CUADRO 1: Lista de los diques reconocidos y medidos en el campo.

| Nombre del dique | Latitud | Longitud | Azimut | Roca hospedante más joven reconocida en el campo |
|------------------|---------|----------|--------|--|
| 1 | 36,72 | 69,63 | 17 | Fm. Agrio |
| 3 | 36,72 | 69,64 | 50 | Fm. Agrio |
| 4 | 36,72 | 69,64 | 40 | Fm. Agrio |
| 5 | 36,70 | 69,65 | 160 | Fm. Agrio |
| 6 | 36,70 | 69,66 | 40 | Fm. Agrio |
| 7 | 36,70 | 69,66 | 35 | Fm. Agrio |
| 9 | 36,70 | 69,66 | 85 | Fm. Agrio |
| 10 | 36,70 | 69,66 | 7 | Fm. Agrio |
| 11 | 36,69 | 69,66 | 55 | Fm. Agrio |
| 12 | 36,69 | 69,66 | 25 | Fm. Agrio |
| 13 | 36,69 | 69,67 | 32 | Fm. Agrio |
| 14 | 36,69 | 69,67 | 35 | Fm. Agrio |
| 15 | 36,69 | 69,68 | 73 | Fm. Agrio |
| 16 | 36,68 | 69,68 | 70 | Fm. Agrio |
| 17 | 36,53 | 69,54 | 110 | Fm. Agrio/Huitrín |
| 18a | 36,56 | 69,61 | 104 | Fm. Vaca Muerta |
| 18b | 36,68 | 69,68 | 45 | Fm. Agrio |
| 19 | 36,58 | 69,57 | 34 | Fm. Remoredo |
| 20 | 36,58 | 69,57 | 10 | Fm. Remoredo |
| 21 | 36,60 | 69,56 | 84 | Fm. Agrio |
| 23 | 36,70 | 69,65 | 40 | Fm. Agrio |
| 24 | 36,70 | 69,65 | 26 | Fm. Agrio |
| 25 | 36,70 | 69,65 | 40 | Fm. Agrio |
| 26 | 36,70 | 69,64 | 161 | Fm. Agrio |
| 27 | 36,70 | 69,61 | 49 | Fm. Agrio |
| 28 | 36,70 | 69,61 | 124 | Fm. Agrio |
| 29 | 36,71 | 69,59 | 63 | Fm. Huitrín |
| 30 | 36,71 | 69,59 | 63 | Fm. Huitrín |

ron 257 diques (Fig. 7). Se realizaron dos diagramas de rosetas, en uno de ellos se tuvo en cuenta el largo de los diques (Fig. 7a), mientras que en el otro, se consideró sólo su frecuencia (Fig. 7b). La dirección media calculada para el diagrama donde se pondera la dirección de los diques según el largo es $37,4^\circ$ con un intervalo de confianza del 95% de $7,7^\circ$ y con una moda de 25° . En el diagrama de la figura 7b, donde se consideró sólo la frecuencia, la dirección media es $34,6^\circ$ con un intervalo de confianza del 95% de 7° , la moda coincide con la obtenida para el primer diagrama. La mayor separación entre dirección media y moda se da en el diagrama ponderado por largo, lo que implica que los diques de la población I (NE)

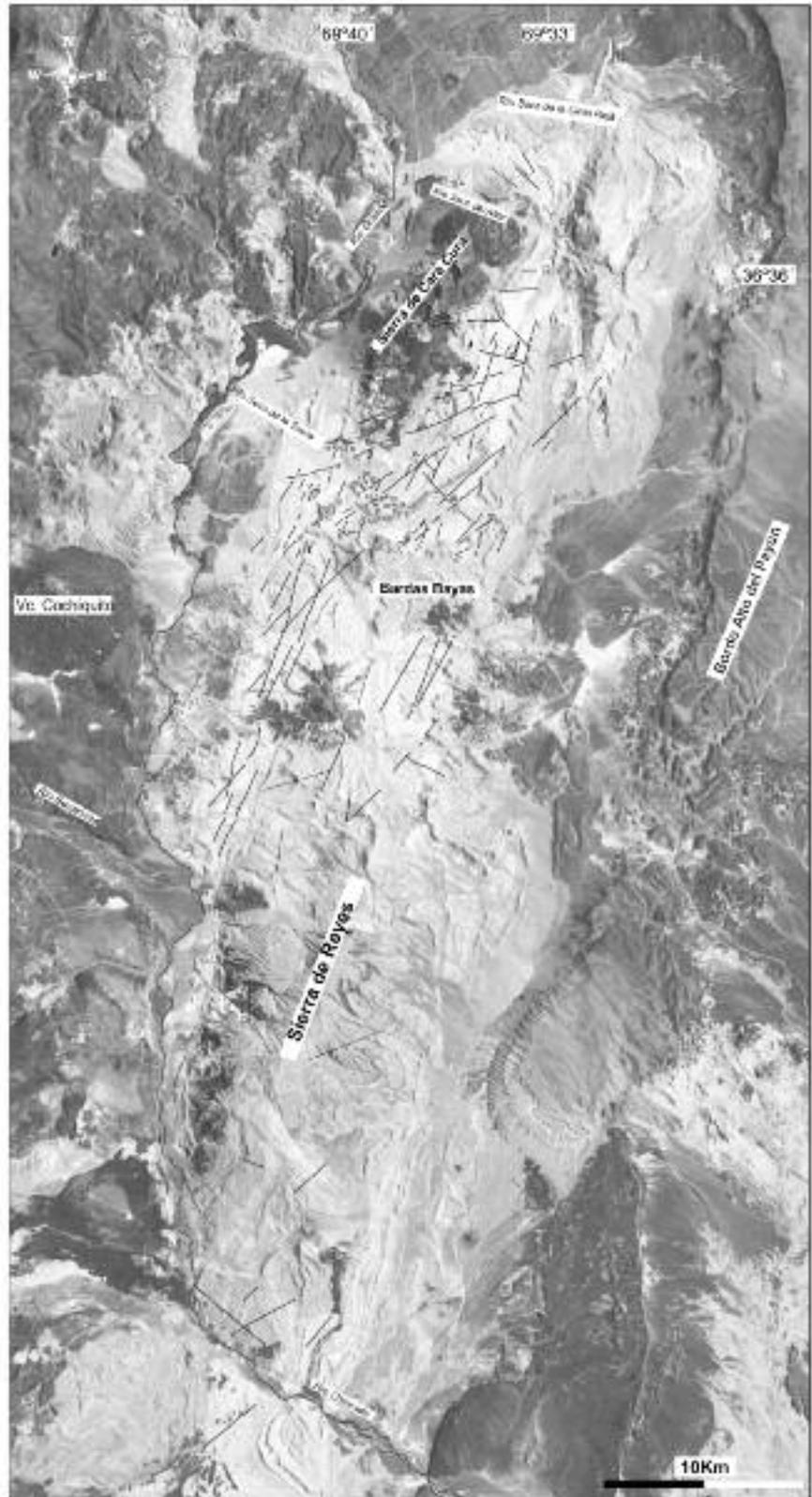


Figura 6: Ubicación y dirección de los diques volcánicos reconocidos en la imagen satelital en la zona de las Bardas Bayas y en las sierras de Reyes y Cara Cura.

tienden a ser más largos que los de la población II (NNE). También puede observarse la baja representación de diques de la población III. En la figura 8a se aisló sólo a la población I y la dirección media calculada para la misma es de 53,8°, con un intervalo de confianza del 95% de 5,8°. En la figura 8b y 8c se aíslan las poblaciones II y III. En el caso de la población II, la dirección media obtenida es de 19,9° con un intervalo de confianza del 95% de 2°, y en el caso de la población III, la media es de 128,4° con un intervalo de confianza del 95% de 12°.

El origen y edad de los diques no se encuentran aun bien establecidos; Pomilio y Vila (2005) mencionan la presencia de estos diques volcánicos en la sierras de Cara Cura y Reyes. Proponen que estas intrusiones se relacionan generalmente a eventos volcánicos que van desde el Oligoceno tardío al Holoceno. Sugieren así tres edades posibles de emplazamiento: una fase antigua en el Oligoceno tardío - Mioceno, una fase terciaria indeterminada y una fase más joven que va desde el Plioceno al Holoceno.

Los diques de la población II son subparalelos a la estructura de las sierras de Cara Cura y Reyes y podrían estar relacionados a tensión perpendicular a sus ejes.

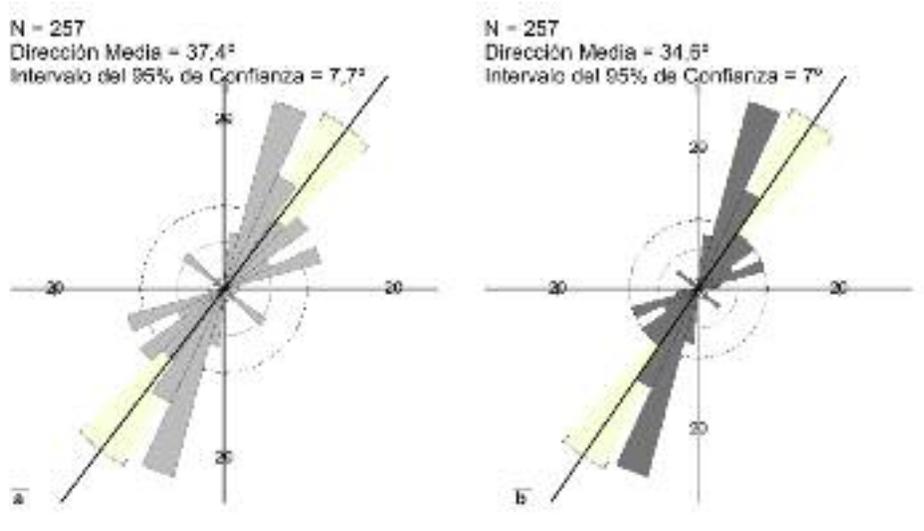


Figura 7: Diagrama de roseta de los diques volcánicos identificados en las imágenes satelitales. a) diagrama ponderado por el largo de los diques, tienen una media de Az. 37,4° y un intervalo de confianza del 95% de 7,7°; b) diagrama de rosetas ponderado por la frecuencia, la dirección media es de 34,6° con un intervalo de confianza del 95% de 7°.

Por el contrario, los diques volcánicos de la población I están claramente cortando a toda la estructura (Fig. 6) por lo que se deducen que son posteriores a la deformación en la zona; están cubiertos por el vulcanismo cuaternario indicando que son anteriores a esas coladas. En la quebrada del río seco de la Tosca (Fig. 6) se observa la presencia de diques volcánicos cubiertos por varios metros de depósitos cuaternarios fluviales (Fig. 9). Si bien hasta el momento no se ha tenido éxito con

las dataciones de estos diques, correlacionándolos con lo propuesto por Pomilio y Vila (2005), es probable que correspondan al pulso Oligoceno tardío - Mioceno o al pulso de edad terciaria indeterminada.

La población III está muy poco representada, su dirección es paralela a lineamientos como el del río seco del Altar y del río seco de la Tosca, que cortan toda la sierra de Cara Cura y que posiblemente estén relacionados a estructuras ten-

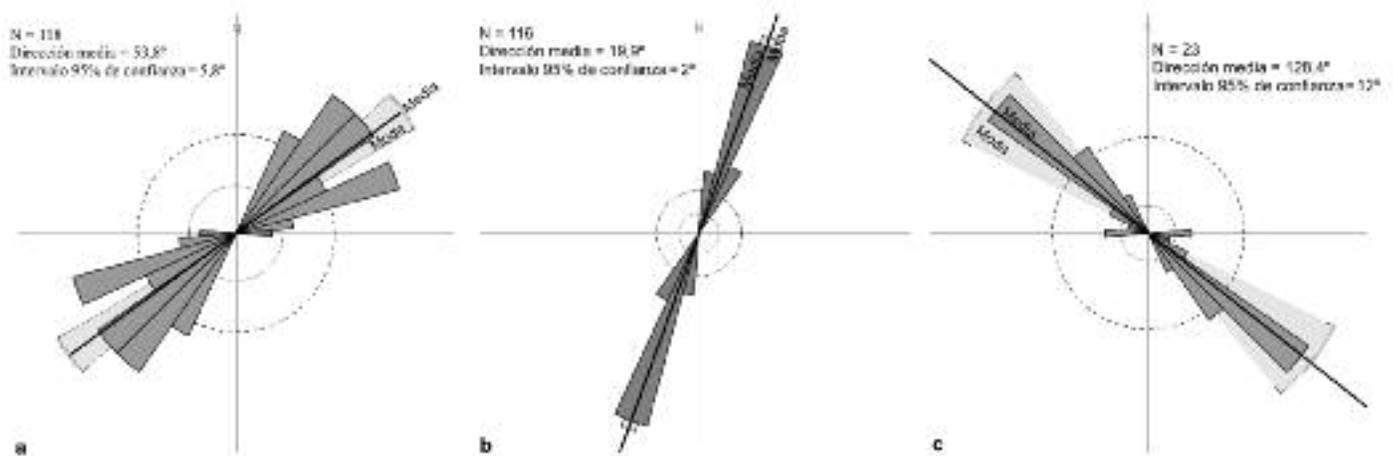


Figura 8: Diagrama de roseta de los diques volcánicos: a) Pertenecientes a la población I identificada como NE. La dirección media calculada es de 53,8°, con un intervalo de confianza del 95% de 5,8°; b) Pertenecientes a la población II, posee una dirección media de 19,9° con un intervalo de confianza del 95% de 2°; c) Población III, tiene una media es de 128,4° con un intervalo de confianza del 95% de 12°.

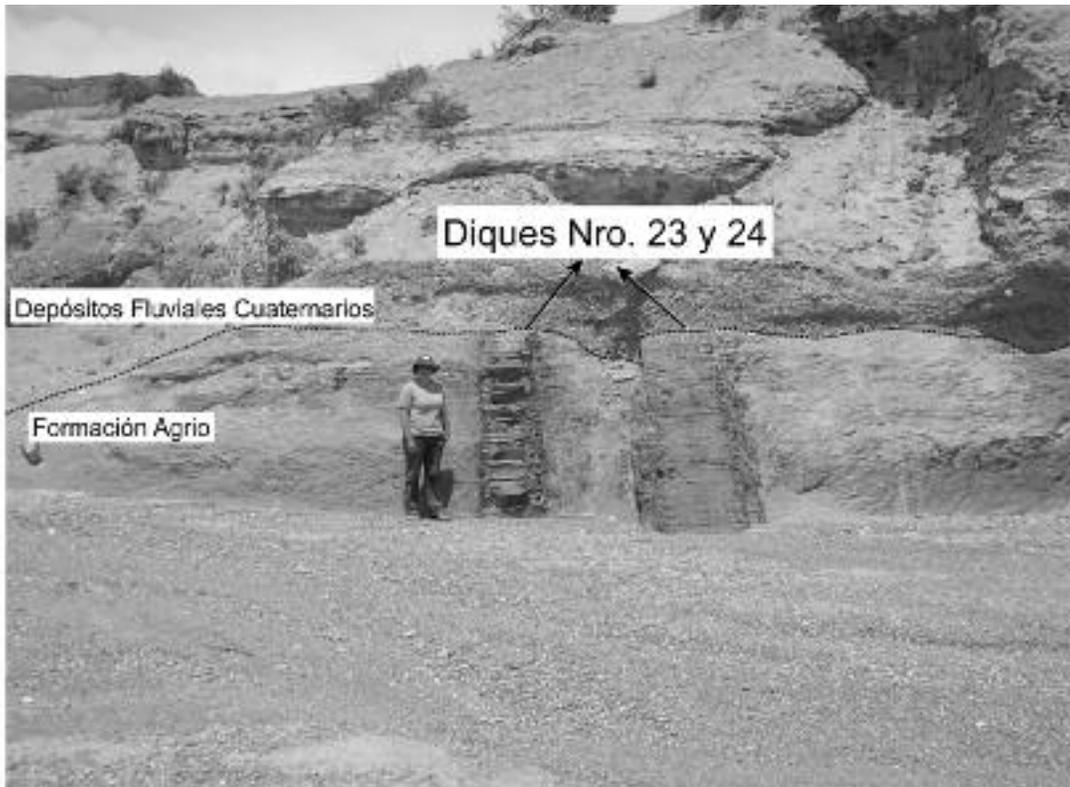


Figura 9: Diques volcánicos cubiertos por varios metros de depósitos cuaternarios fluviales en la quebrada del río seco de la Tosca.

sionales inducidas por las fallas normales del sinrift de la cuenca Neuquina durante el Triásico Tardío al Jurásico Temprano (véase mecanismo de subsidencia diferencial en Cristallini *et al.* 2009).

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Se analizaron los diques de bitumen y volcánicos de la región de las sierras de Cara Cura y Reyes encontrándose dos poblaciones principales y una secundaria. Las dos primeras de direcciones NE (población I) y NNE (población II) y la segunda de dirección NO (población III). Las poblaciones II y III están relacionadas con la estructura de plegamiento y extensional previa respectivamente. Sin embargo, la población I es claramente posterior al plegamiento de la región y no se la considera relacionada genéticamente al mismo (Fig. 10).

Según Cobbold *et al.* (1999) los diques de asfaltita se formaron a partir del Paleoceno-Eoceno, a partir de rocas generadoras pertenecientes a las Formaciones A-

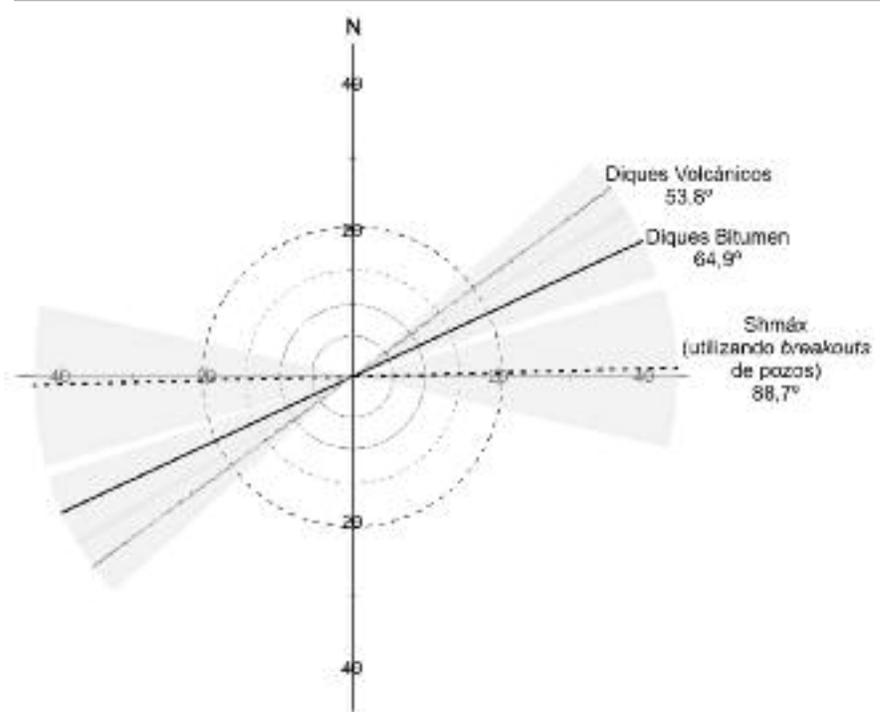


Figura 10: Diagrama de rosetas donde se grafican las direcciones medias calculadas para la población I de diques de bitumen en conjunto con la población I de los diques volcánicos y la dirección media del esfuerzo horizontal máximo obtenido a partir del *breakout* de pozos.

grio y Vaca Muerta. La naturaleza extensional de las fracturas aprovechadas por

los mismos, indican que para entonces, el esfuerzo horizontal máximo habría teni-

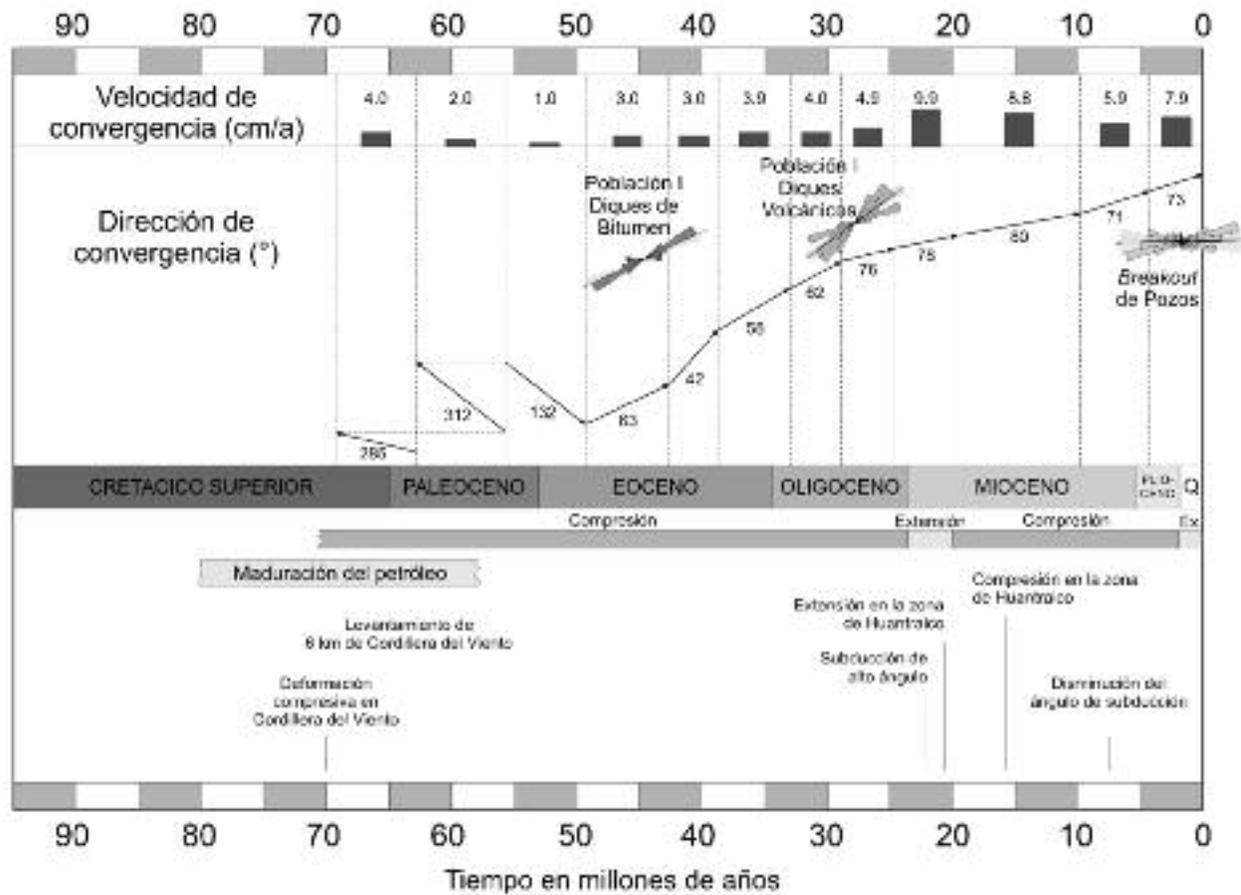


Figura 11: Cuadro esquemático donde se ve la evolución del ángulo de convergencia para las placas de Nazca y Sudamericana y la velocidad de convergencia para los últimos 70 Ma, donde también se indican los períodos de deformación principales (modificado de Cristallini *et al.* 2001). También se grafica la evolución de la dirección media de esfuerzo máximo a lo largo del tiempo, tomando las orientaciones de la población I de los diques de bitumen (Paleoceno - Eoceno) y volcánicos (Oligoceno - Mioceno) y la dirección perpendicular al *breakout* de pozos (Actual). Se ve que ha cambiado hacia una dirección más cercana al E-O, registrando una rotación en sentido horario.

do una disposición NE (Fig. 11). En la sierra de Cara Cura y en la de Reyes la orientación de los diques volcánicos es similar. Si se considera aceptable que su edad es oligocena tardía - miocena (Pomilio y Vila 2005) implicaría la no existencia de cambios importantes en la dirección del esfuerzo horizontal máximo entre el Paleoceno y Mioceno. La distribución dispersa de diques de asphaltita y volcánicos de la población I en la región y las características tensionales de las fracturas rellenas por los mismos, indican que durante gran parte del terciario, el esfuerzo horizontal máximo tuvo una dirección NE (dirección media de los diques de asphaltita: 64,9°; dirección media de los diques volcánicos: 53,8°). Los datos expuestos por Guzmán (2007)

y Guzmán *et al.* (2007), muestran que la disposición actual del esfuerzo horizontal máximo es distinta y de dirección ENE (dirección media 88,7°), lo que implica una variación entre la geometría del campo desde el Terciario a la actualidad. Esta variación es compatible con la rotación del vector de convergencia que determina Somoza (2005) a partir de datos paleomagnéticos desde el Eoceno a la actualidad (Fig. 11). Puede verse que el cambio en la dirección de esfuerzo horizontal máximo calculado en base a los diques de bitumen y volcánicos (paleo-esfuerzo) y en base a los *breakout* de pozos (esfuerzo actual) es consistente con el cambio en la dirección de convergencia que ocurre durante el Oligoceno.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad de Buenos Aires (subsidió UBACYT X055, X220 y 200201001 00855), a la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (subsidió: PICT 38295, PICT 2010-1441), al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (subsidió PIP-CO-NICET-5758).

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Abraham, H. 1960. Asphalts and allied substances. Historical Review and Natural Raw Materials 1, 325 p., New York.
- Ask, D. 2004. New developments of the Integrated Stress Determination Method and application to the Äspö Hard Rock Laboratory,

- Sweden. Tesis Doctoral, Research Group of Engineering Geology, Department of Land and Water Resources Engineering, Royal Institute of Technology (inérita), 59 p., Stockholm.
- Bechis, F. 2009. Deformación transtensiva de la cuenca Neuquina: Análisis a partir de ejemplos de campo y modelos análogos. Tesis doctoral, Universidad de Buenos Aires (inérita), 264 p., Buenos Aires.
- Bell, J.S. y Babcock, E.A. 1986. The stress regime of the Western Canadian Basin and the implications for hydrocarbon production. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology* 34: 364-378.
- Borrello, A.V. 1956. Recursos minerales de la República Argentina. III Combustibles sólidos minerales. *Revista Instituto Nacional de Investigación Ciencias Naturales, Ciencias Geológicas* 5: 275-282.
- Carey, P.F., Parnell, J. y Prozzi, C.R. 1993. Tectonic and Pore-Fluid Pressure Controls Upon the Formation of Solid Bitumen Veins in the Neuquén Basin, South-West Argentina. 12° Congreso Geológico Argentino y 2° Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Actas 1: 401-406, Buenos Aires.
- Cobbold, P.R. y Rossello, E.A. 2003. Aptian to recent compressional deformation, foothills of the Neuquén Basin, Argentina. *Marine and Petroleum Geology* 20: 429-443.
- Cobbold, P.R., Diraison, M. y Rossello, E.A. 1999. Bitumen Veins and Eocene Transpression, Neuquén Basin, Argentina. *Tectonophysics* 14: 423-442.
- Cristallini, E.O., Pérez, D. y Tomezzoli, R. 2001. Fracturación regional en el norte de Neuquén y sur de Mendoza. Informe interno YPF (inérita), 115 p., Buenos Aires.
- Cristallini, E.O., Bottesi, G., Pérez, D., Tomezzoli, R., Cómeron, R., Varadé, R., Vitulli, N., Bojarski, G., Pioli, O., Zardo, E., Olea, G., Cortés, L., Ramirez, J., Mallimaci, D., Vernales, G. y Grinberg, M. 2002. Fracturación regional en el norte de Neuquén y sur de Mendoza. 5° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Trabajos Técnicos, Actas en CD: 16 p., Buenos Aires.
- Cristallini, E.O., Tomezzoli, R., Pando, G., Gazzera, C., Martínez, J.M., Quiroga, J., Buhler, M., Bechis, F., Barredo, S. y Zambrano, O. 2009. Controles Precuyanos en la Estructura de la Cuenca. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 65(2): 248-264.
- Cruz, C.E., Villar, H.J. y Muñoz, N.G. 1996. Los sistemas petroleros del Grupo Mendoza en la Fosa de Chos Malal. Cuenca Neuquina, Argentina. 3° Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Actas 1: 45-60, Buenos Aires.
- Dicarlo, D.J. 2005. Geología en la margen norte del río Grande, Bardas Blancas, provincia de Mendoza. Trabajo Final de Licenciatura, Universidad de Buenos Aires (inérita), 124 p., Buenos Aires.
- Fuchs, K. y Müller, B. 2001. World stress map of the earth: a key to tectonic processes and technological applications. *Naturwissenschaften* 88: 357-371.
- Giambiagi, L.B., Bechis, F., Barredo, S. y Tunik, M. 2008. Cinemática de la apertura de los depocentros Atuel y Cara Cura-Reyes, cuenca Neuquina: rift con múltiples sets de fallas. 7° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Trabajos Técnicos: 431-442, Buenos Aires.
- Gulisano, C.A. 1981. El Ciclo Cuyano en el norte de Neuquén y sur de Mendoza. 8° Congreso Geológico Argentino, Actas 3: 579-592, Buenos Aires.
- Guzmán, C.G. 2002. Análisis de esfuerzos horizontales en el antepaís de Mendoza y Neuquén y su vinculación con las estructuras del sector sur de sierra de Reyes y la zona de Pampa Tril. Trabajo Final de Licenciatura, Universidad de Buenos Aires (inérita), 62 p., Buenos Aires.
- Guzmán, C.G. 2007. Estudio de la deformación andina entre los 32° y los 39° latitud sur mediante el análisis de *breakout* de pozos. Tesis doctoral, Universidad de Buenos Aires (inérita), 241 p., Buenos Aires.
- Guzmán, C.G. y Cristallini, E.O. 2009. Contemporary stress orientations from borehole breakout analysis in the southernmost flat-slab boundary Andean retroarc (32°44' and 33° 40' S). *Journal of Geophysical Research* 114 (B2): B02406. doi: 10.1029/2007JB005505.
- Guzmán, C.G., Cristallini, E.O. y Bottesi, G.L. 2007. Contemporary stress orientations in the Andean retroarc between 34° and 39° from borehole breakouts. *Tectonics* 26: TC3016. doi:10.1029/2006TC001958.
- Heidbach, O., Tingay, M., Barth, A., Reinecker, J., Kurfeß, D. y Müller, B. 2008. The 2008 release of the World Stress Map: www.world-stress-map.org
- Hunt, J.M. 1995. *Petroleum geochemistry and geology*. W.H. Freeman, 743 p., New York.
- Kozłowski, E.E. 1991. Structural Geology of the NW Neuquén Basin, Argentina. 4° Simposio Bolivariano, Exploración Petrolera en las Cuenas Subandinas 1: 5-13, Bogotá.
- Kozłowski, E.E., Manceda, R. y Ramos, V. 1993. Estructura. En Ramos, V. (ed) *Geología y Recursos Naturales de Mendoza*, 12° Congreso Geológico Argentino y 2° Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Relatorio: 235-256, Buenos Aires.
- Kozłowski, E.E., Cruz, C. y Sylwan, C.A. 1996. Geología estructural de la zona de Chos Malal. Cuenca Neuquina, Argentina. 13° Congreso Geológico Argentino y 3° Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Actas 1: 15-26, Buenos Aires.
- Manceda, R. y Figueroa, D. 1993. La inversión del rift mesozoico en la faja fallada y plegada de Malargüe. Provincia de Mendoza, 12° Congreso Geológico Argentino y 2° Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Actas 3: 219-232, Buenos Aires.
- Manceda, R. y Figueroa, D. 1995. Inversion of Mesozoic Neuquén rift in the Malargüe fold and thrust belt, Mendoza, Argentina. En Tankard, A.J., Suárez, R. y Welsnik, H.J. (eds.) *Petroleum Basins of South America*, American Association of Petroleum Geology Memoir 62: 369-382, Tulsa.
- Narciso, V., Santamaría, G. y Zanettini, J.C. 2001. Hoja Geológica 3769-I, Barrancas. Servicio Geológico Minero Argentino, Instituto de Geología y Recursos Minerales, Boletín 253, 61 p., Buenos Aires.
- Pángaro, F., Pereira, M. y Giorgetti, M. 2004. Relevamiento geológico del precuyano en las sierras de Reyes y Cara Cura, provincia de Mendoza, Argentina. Informe interno Repsol YPF (inérita), 19 p., Neuquén.
- Parnell, J. y Carey, P.F. 1995. Emplacement of bitumen (asphaltite) veins in the Neuquén Basin, Argentina. *American Association of Petroleum Geology Bulletin* 79(2): 1798-1816.
- Pomilio, A. y Vila, M. 2005. Review of igneous intrusives in the Ranquil Norte Area, Neuquén Basin-southern Mendoza Province. 6° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Trabajos Técnicos, Actas en CD, 14 p., Buenos Aires.

- Ramos, V.A. 1978. Estructura. 7° Congreso Geológico Argentino, Geología y Recursos Naturales del Neuquén, Relatorio: 99-118, Neuquén.
- Ramos, V.A. y Barbieri, M. 1988. El volcanismo Cenozoico de Huantraico: Edad y relaciones isotópicas iniciales, provincia del Neuquén. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 43: 210-223.
- Sagripanti, L., Bottesi, G., Naipauer, M., Folguera, A. y Ramos, V.A. 2011. U/Pb ages on detrital zircons in the southern central Andes Neogene foreland (36°-37°S): Constraints on Andean exhumation. *Journal of South American Earth Sciences* 32(4): 554-565, doi: 10.1016/j.jsames.2011.03.010.
- Somoza, R. 2005. Recent tectonic activity in the Precordillera of the North Chilean forearc at the Salar de Punta Negra latitude (24° - 25°S). 6° International Symposium on Andean Geodynamics, Extended Abstracts: 681-684, Barcelona.
- Uliana, M.A., Arteaga, M.E., Legarreta, L., Cerdán, J.J. y Peroni, G. 1995. Inversion structures and hydrocarbon occurrences in Argentina. En Buchman, J.G. y Buchman, P.G. (eds.) *Basin Inversion*, Geological Society of London, Special Publication 88: 211-233.
- Verbeek, E.R. y Grout, M.A. 1992. Structural evolution of gilsonite dikes, eastern Uinta Basin, Utah. En Fouch, T.D., Nuccio, V.F. y Chidsey, T.C. (eds.) *Hydrocarbon and Mineral Resources of the Uinta Basin*, Geological Association Guidebook 20: 237-255, Utah.
- Vergani, G.D., Tankard, A.J., Belotti, H.J. y Welsink, H.J. 1995. Tectonic evolution and paleogeography of the Neuquén Basin, Argentina. En Tankard, A.J., Suárez, R. y Welsink, H.J. (eds.) *Petroleum Basins of South America*, American Association of Petroleum Geologists, Memoir 62: 383-402, Tulsa.
- Viñes, R. 1990. Productive duplex imbrication at the Neuquén Basin thrust belt front, Argentina. En Letouzey, J. (ed.), *Petroleum and tectonics in mobile belts*. Proceedings of the IFP exploration and production research conference 69:80, Paris.
- Zamora Valcarce, G. 2006. Estructura y cinemática de la faja plegada del Agrio, cuenca Neuquina. Tesis doctoral, Universidad de Buenos Aires, Argentina (inédita), 302 p., Buenos Aires.
- Zamora Valcarce, G. y Zapata, T. 2005. Estilo estructural del frente de la faja plegada neuquina a los 37°S. 6° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Trabajos Técnicos, Actas en CD: 16 p., Buenos Aires.
- Zapata, T. y Folguera, A. 2005. Tectonic evolution of the Andean Fol. Thrust Belt of the southern Neuquén Basin, Argentina. En Veiga, G.D., Spalletti, L.A., Howell, J.A. y Schwarz, E. (eds.) *The Neuquen Basin, Argentina: A Case Study in Sequence Stratigraphy and Basin Dynamics*, Geological Society, Special Publications 252: 37-56, London.
- Zapata, T., Brissón, I. y Dzelalija, F. 1999. La Estructura de la faja plegada y corrida andina en relación con el basamento de la Cuenca Neuquina. *Boletín de Informaciones Petroleras*: 112-121.
- Zoback, M.L. 1992. The First and second order patterns of stress in the lithosphere: The World Stress Map Project. *Journal of Geophysical Research* 97(B5): 11703- 11728.
- Zoback, M.L., Zoback, M.D., Adams, L., Assumpcao, M., Bell, S., Bergman, E.A., Blümling, P., Bereton, N.R., Denham, D., Ding, J., Fuchs, K., Gay, N., Gregerson, S., Gupta, H.K., Gvishiani, A., Jacob, K., Klein, R., Knoll, P., Magee, M., Mercier, J.L., Müller, B.C., Paquin, C., Rajendran, J., Stephansson, O., Suarez, G., Suter, M., Udías, A., Xu, Z.H. y Zhizhin, M. 1989. Global patterns of tectonics stress. *Nature* 341: 291-298.

Recibido: 21 de octubre, 2010.

Aceptado: 2 de septiembre, 2011.