

Los Andes:

topografía y acortamiento orogénico

*Por Víctor A. Ramos,
Laboratorio de Tectónica Andina, Universidad de Buenos Aires*

Si se analiza la topografía del continente sudamericano, y en especial del desarrollo de la Cordillera de Los Andes, surge una serie de interesantes observaciones. Los datos topográficos han demostrado contener una importante información tectónica que permite, en forma independiente a otros métodos, evaluar el acortamiento orogénico producido durante la deformación ándica.

Lo que sigue es una síntesis de la conferencia de alto nivel científico que el autor dio en el IAPG el pasado 7 de mayo.

Topografía digital

En los últimos años se ha tornado una rutina en los levantamientos topográficos presentar sus resultados en un formato digital. Más aun, numerosas instituciones y empresas han dedicado cuantiosos esfuerzos en digitalizar la información topográfica previa disponible. Esto ha facilitado su análisis en los sistemas de información geográfica integrados, donde la comparación de los rasgos topográficos puede visualizarse en forma directa con imágenes



satelitarias del terreno, mapas geológicos y toda otra serie de mapas temáticos. Sin embargo, el libre acceso en varios sitios de la Internet a bases topográficas en formato digital a escala global, ha incrementado la utilización de la topografía en el análisis de los más diversos problemas.

Si se analiza la topografía del continente sudamericano, y en especial del desarrollo de la Cordillera de Los Andes, surge una serie de interesantes observaciones. Por ejemplo en la figura 1 se puede observar

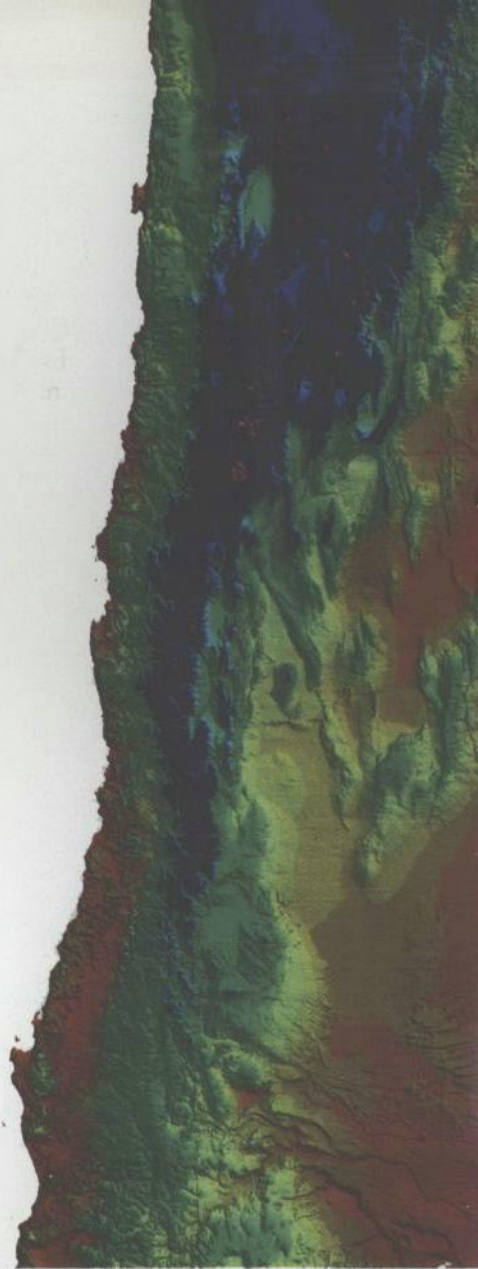


Figura 1. Topografía digital de los Andes argentino-chilenos desde aproximadamente los 20°S hasta los 40°S (basada en la compilación efectuada por el U.S.G.S.)

la expresión topográfica digital de los Andes Centrales y Australes, que abarcan gran parte de los Andes argentino-chilenos. Esta topografía ha sido compilada sobre la base de diferentes mapas topográficos disponibles a diversas escalas de todo el continente y expresa con un gran volumen de datos las peculiaridades del relieve andino.

Estos datos topográficos han demostrado contener una importante información tectónica que permite, en forma independiente a otros métodos, evaluar el acortamiento orogénico producido durante la deformación ándica.

Raíces corticales

Si se combinan los datos topográficos con los levantamientos gravimétricos de la región, aplicando sencillos métodos de inversión y asumiendo modelos de densidades sobre la base de la información geofísica existente, se puede obtener la profundidad a la discontinuidad de Mohorovičić (Introcaso et al., 1992). La precisión del método dependerá de la información sísmica existente de la corteza, en especial si hay disponibles perfiles de sísmica de refracción que permitan conocer las diferentes capas y sus densidades promedios. Esta información es casi continua en una transecta a los Andes del sur de Bolivia y del noroeste argentino, donde estudios de sísmica de refracción han sido realizados mediante registros con explosiones de dinamita. Parte de estos disparos procedieron de la sincronización de operaciones comerciales de explotación de minas como Chuquicamata y Tocopilla, entre otras (Schmitz, 1993). Esto ha permitido construir modelos precisos de la distribución de las densidades de la corteza (Schmitz, 1993), o el presentado por Romanyuk et al. (1999), donde se han tenido en cuenta los efectos de la losa subducida y su aporte a la gravimetría observada en superficie. En esta región los modelos corticales han sido cotejados con la nueva información del programa ANCORP, que ha levantado la primera sección sísmica de reflexión profunda de la región del antearco (Ancorp, 1999).

Estos modelos corticales se han realizado a diversas latitudes (Introcaso et al., 1992; Schmitz, 1993) y han permitido reconstruir las raíces de la corteza. La precisión de estos modelos depende del control sísmico de refracción disponible, de los datos gravimétricos y de la calidad de la topografía. La figura 2 presenta las raíces corticales a diferentes latitudes obtenidas por estos métodos.

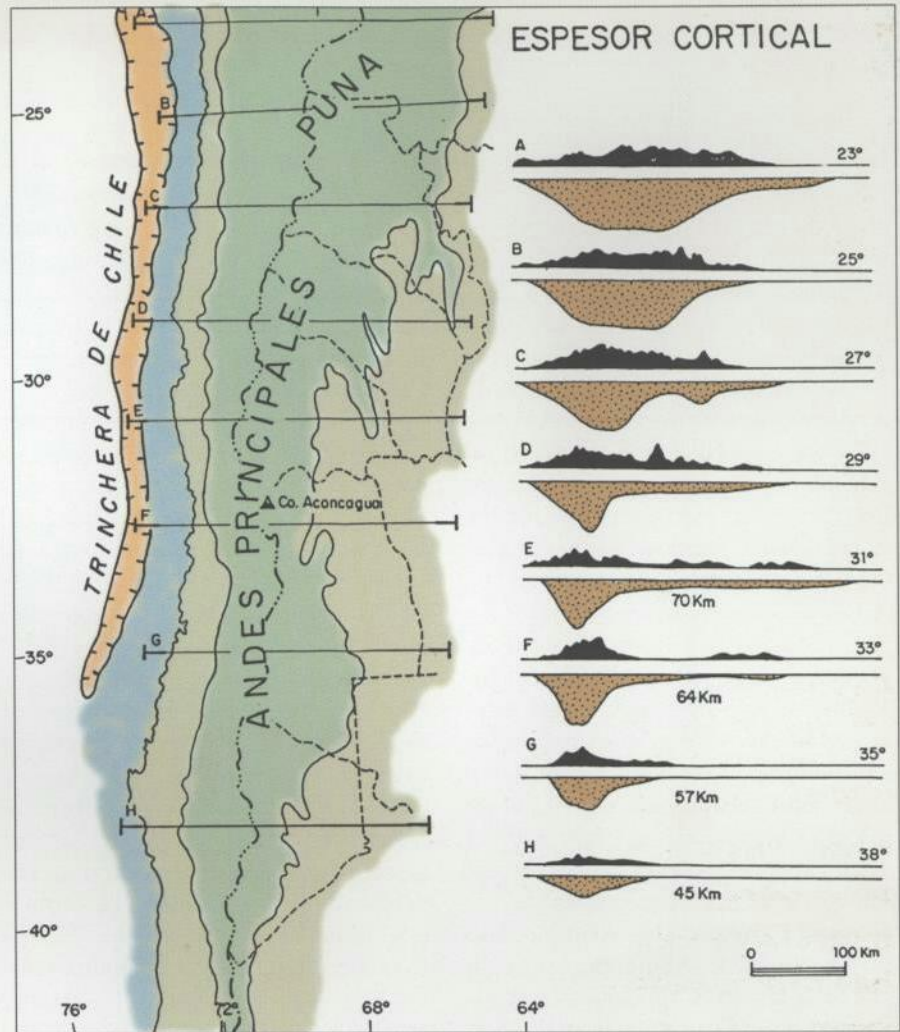


Figura 2. Raíces corticales a diferentes latitudes (basado en los modelos de Introcaso et al., 1992, Martínez et al., 1997)

Raíces corticales y acortamiento orogénico

Una de las primeras premisas que se debe conocer para poder correlacionar estas raíces con el acortamiento orogénico, es establecer cuándo se desarrollaron estas raíces. Estas podrían ser el resultado de una o más orogénias superpuestas y podrían contener una historia compleja de acortamientos más antiguos producidos por deformaciones anteriores a la orogenia andina. Es por lo tanto fundamental establecer las condiciones iniciales de la corteza en el tiempo.

Se sabe que si una región está en equilibrio isostático a nivel del mar o cubierta por el mismo, la región tiene un espesor normal (33-35 km) o menor. Es por ello que las condiciones iniciales se pueden establecer conociendo la paleogeografía de las ingresiones

marinas previas en la región. Por ejemplo, en el noroeste argentino, el mar paranense invadió gran parte de la Cordillera Oriental y todo el Sistema Subandino durante el Mioceno medio (Ramos y Alonso, 1995). Las dataciones foraminiferológicas de esta ingresión indican que corresponde a la zona NN5 ubicada aproximadamente a los 13,5 Ma (Malumian y Nañez, 1996).

A su vez la ingresión marina somera correspondiente a la Formación Yacoraite, a fines del Maestrichtiano y principios del Daniano, cubrió la Cordillera Oriental y gran parte de la Puna septentrional (Salfity y Marquillas, 1994). Esto permitiría establecer que las condiciones iniciales de la corteza eran normales o levemente menores a 33-35 km, dadas las características someras de ese mar y su transición a cuerpos lagunares salo-

bres, que sólo esporádicamente estaban conectados con el mar.

En la región central, las intrusiones marinas procedentes del Pacífico durante el Jurásico y Cretácico inferior, permiten establecer condiciones normales de corteza hasta la base del Cretácico superior en los Andes de San Juan, Mendoza y Neuquén.

Sobre esta base se puede afirmar que las raíces corticales del sector norte y sur han sido formadas durante el Cenozoico, mientras que en el sector al sur podrían abarcar también una deformación cretácica superior.

Cuando se comparan las raíces corticales se observa un decrecimiento continuo de norte a sur. Los diferentes modelos de corteza realizados en el noroeste argentino indican un engrosamiento cortical del orden de 320-350 km (Schmitz, 1993; Kley et al., 1999), destacando que en el antearco existen volúmenes anómalos no explicados por este acortamiento. Los estudios de Allmendinger et al. (1990) a los 30°S indican valores entre 130 a 170 km, dentro del rango calculado por Introcaso et al. (1992). A los 32°S de latitud el acortamiento medido por Cristallini y Ramos (1997) es de 175 km, mientras que a los 33°S decrece a 153 km (Cegarra y Ramos, 1996). A los 36° es de sólo 97 km, a los 37°S de 44 km y a los 39° es de 20 km (Martínez et al., 1997). Las pequeñas discrepancias entre algunos valores calculados se deben principalmente al valor de corteza inicial asumido. Si bien la mayoría asumió 33 km, algunos autores como Allmendinger et al. (1990) sólo han tenido en cuenta el acortamiento mioceno, dado que asumen un espesor previo de corteza de 38 km.

Los diversos análisis muestran un decrecimiento notable del acortamiento orogénico hacia el sur: 320 km en el sistema Puna-Cordillera Oriental-Sistema Subandino; 170-175 km y 153 km en el sistema Cordilleras Principal y Frontal-Precordillera-Sierras Pampeanas entre los 30 y 33°, para decaer a 97 km, 44 km y 20 km entre los 36° y 39°S.

Secciones estructurales y acortamiento orogénico

Una forma independiente de calcular el acortamiento es la obtenida por secciones estructurales balanceadas en la región de retroarco. Diversos autores han estimado los acortamientos sobre la base de estas secciones estructurales. Con excepción del sector subandino, donde las líneas sísmicas permiten acotar con cierta precisión la inclinación y profundidad del basamento, el cálculo en los otros sectores va a depender del modelo de deformación asumido. Por ejemplo, en el Sistema Subandino sur de Bolivia y Argentina se han estimado valores medios de acortamiento del orden de 100 km, que si se tienen en cuenta las condiciones iniciales de espesor que se infieren de la ingresión paranaense, implicarían valores de acortamiento del orden de 7 a 9 mm/a. Diversos autores han tratado de estimar este acortamiento con el de la Puna y Cordillera Oriental, obteniendo valores totales de 215-250 km (Schmitz, 1993 y Kley y Monaldi, 1998) y 230 km (Baby et al., 1996). Este acortamiento es menor que el obtenido por las raíces corticales, diferencia que puede ser asumida por subplacado magmático, acreciones en el antearco, o más simplemente por valores de acortamiento subestimados. Este podría ser el caso de la Puna, donde no existen secciones estructurales confiables, con excepción de algunas áreas específicas (Gangui, 1998).

Hacia el sector sur, los valores obtenidos en las Cordilleras Principal y Frontal, así como en la Precordillera y Sierras Pampeanas, son del orden de magnitud esperado (Ramos y Cegarra, 1996; Cristallini y Ramos, 1997).

Donde existen algunas discrepancias es en el sector más austral entre los 36° y 39°S. Si se aceptan modelos de acortamiento epidérmicos (*thin-skinned belts*) como los propuestos por Chaveau et al. (1996) y Allen et al. (1984), el acortamiento obtenido excedería ampliamente al calculado sobre la base de las raíces orogénicas (44 km). Si se adoptan modelos más

conservadores como el propuesto por Kozłowski et al. (1996), Booth y Coward (1996), Ramos (1998) o Zapata et al., 1999), donde el basamento está involucrado en la deformación en diferente grado, se pueden obtener valores más cercanos a la realidad.

Nuevos métodos de calcular el acortamiento

Si se sabe el período en el cual se produjo la deformación, deducido sobre la base de la historia geológica de la región, se pueden calcular tasas de acortamiento más precisas. Por ejemplo, si se asume que el acortamiento orogénico es de 320 km en el noroeste argentino, ello implicaría una velocidad media de acortamiento de 7 mm/a, tasa de acortamiento similar a la obtenida en forma independiente a través de secciones estructurales (Sierras Subandinas, 7 a 9 mm/a). A los 33°S esa tasa sería de 7,65 mm/a, si asumimos que el acortamiento se produjo en los últimos 20 Ma.

Es interesante cotejar estos valores con los obtenidos por Kendrick et al. (1999) mediante observaciones satelitarias en estaciones continuas de GPS en los últimos tres años (figura 3). Estos valores muestran que el acortamiento medido en diversas estaciones del continente es muy superior al esperado. Por ejemplo, si se comparan las velocidades relativas de cuatro estaciones, tomando como fijo el cratón sudamericano, se obtienen las siguientes tasas de acortamiento: Isla de Pascua en la placa de Nazca (68 mm/a); Santiago de Chile en el margen Pacífico (19,4 mm/a); San Juan al pie de la Precordillera (7,3 mm/a) y La Plata en el cratón (1,9 mm/a). El estudio de las anomalías magnéticas había establecido que la velocidad de convergencia en los últimos 10 Ma era de 90 mm/a, valor de un orden similar al obtenido por GPS en los tres últimos años (68 mm/a). Sin embargo la sorpresa se da cuando comparamos los valores a ambos lados de la cordillera. La distancia entre San Juan y Santiago de Chile se está acortando

12 mm/a, valor superior al obtenido a estas latitudes utilizando las raíces corticales (7,65 mm/a) o mediante el cálculo de acortamiento en secciones balanceadas en la Cordillera Principal (5,25 mm/a) (Ramos, 1996). El acortamiento entre San Juan y La Plata se debe al acortamiento de las Sierras Pampeanas, y a estas latitudes principalmente al levantamiento de Pie de Palo. Ramos y Vujovich (1995) han establecido un acortamiento de 5 mm/a en los últimos 3 Ma, similar al observado de 5,4 mm/a por GPS.

Estas mediciones de GPS, si bien aún preliminares y obtenidas en muy corto intervalo de tiempo, están brindando una nueva alternativa de medición del acortamiento orogénico en forma independiente de las anteriores. Estos valores son superiores a la media obtenida por cualquiera de los otros dos métodos. Sin embargo es necesario tener en cuenta que los valores de GPS pueden llegar a ser afectados por una recuperación elástica (si la energía acumulada es disipada por un terremoto), o que, como el registro geológico indica, la deformación no es homogénea en el tiempo. Esta última premisa indicaría cortos intervalos de tiempo donde actuarían los procesos de deformación.

Cuando se comparan los valores de GPS de norte a sur se observa nuevamente un decrecimiento hacia el sur de la tasa de acortamiento: Iquique (20°S) 23,5 mm/a, Copiapó (27°S)

22,9 mm/a, Santiago (33°S) 19,4 mm/a, Antuco (37°S) 16,3 mm/a y Coyhaique (45°S) 5,7 mm/a (Kendrick et al., 1999).

La coherencia observada entre los valores de acortamiento obtenidos por las raíces corticales, las secciones balanceadas y las mediciones de GPS, está indicando que existe una diferencia de acortamiento real de

norte a sur en la Cordillera de Los Andes. Esta se correlaciona linealmente con la edad de la corteza oceánica subducida. La edad decrece hacia el sur, siendo eocena a los 22°S, miocena a los 38°S y cuaternaria a los 46°S. Aparentemente una corteza oceánica fría es más rígida y transmite los esfuerzos mejor que una corteza más caliente y no tan rígida, lo que



Figura 3. Valores de acortamiento medidos por GPS en los últimos tres años en estaciones de observación continua. Los vectores de velocidad media anual (mm/a) tienen como patrón de referencia el cratón sudamericano fijo (basado en Kendrick et al., 1999).



permitiría explicar las diferencias encontradas.

Este breve análisis no sólo tiene valor científico, sino que poder conocer el acortamiento orogénico a una latitud en particular nos brinda un medio independiente de evaluar el estilo estructural en áreas donde la cobertura sísmica es inadecuada o inexistente. Sobre estas bases se puede dilucidar si estamos en presencia de una faja plegada y corrida epidérmica o si el basamento está involucrado en la deformación.

Bibliografía

- Allen, R., E. García y J. Feehan, 1984. Low angle thrusting in the Neuquén basin, south of Chos Malal, north-west Neuquén province, Argentina. IX° Congreso Geológico Argentino, Actas II: 137-146, Buenos Aires.
- Allmendinger, R.W., D. Figueroa, D. Snyder, J. Beer, C. Mpodozis, and B.L. Isacks, 1990. Foreland shortening and crustal balancing in the Andes at 30° S latitude. *Tectonics* 9(4): 789-809, Washington.
- ANCORP Working Group, 1999. Seismic reflection image revealing offset of Andean subduction-zone earthquake locations into oceanic mantle. *Nature* 397: 341-344.
- Baby, P., P. Rochat, G. Herail, G. Mascle, y A. Paul, 1996. Neogene thrust geometry and crustal balancing in the northern and southern branches of the Bolivian orocline (Central Andes). 3rd. International Symposium on Andean Geodynamics, 281-284, Saint Malo.
- Booth, J.L.M. y M.P. Coward, 1996. Basement faulting and inversion of the NW Neuquén basin, Argentina. 3rd. International Symposium on Andean Geodynamics, 295-298, Saint Malo.
- Cegarra, M.I. y V.A. Ramos, 1996. La Faja Plegada y Corrida del Aconcagua. En V.A. Ramos et al., *Geología de la región del Aconcagua*, provincias de San Juan y Mendoza. Dirección Nacional del Servicio Geológico, Anales 24: 387-422, Buenos Aires.
- Chaveau, V., B. Nivière, P.R. Cobbold, E.A. Rossello, J-F. Ballard y H.T. Eichenseer, 1996. Structure of the Andean foothills, Chos Malal region, Neuquén basin, Argentina. 3rd. International Symposium on Andean Geodynamics, Abstracts: 315-318.
- Cristallini, E.O. y V.A. Ramos, 1997. Estructura profunda de los Andes a los 32° de latitud Sur (Argentina y Chile). VIII° Congreso Geológico Chileno, Volumen III: 1622-1625, Antofagasta.
- Gangui, A., 1998. A combined structural interpretation based on seismic data and 3-D gravity modeling in the northern Puna/Eastern Cordillera. Ph. D. Dissertation, Freie Universität, B(27): 1-176, Berlín.
- Introcaso, A., M.C. Pacino y H. Fraga, 1992. Gravity, isostasy and Andean crustal shortening between latitudes 30 and 35° S. *Tectonophysics* 205 (1-3): 31-48, Amsterdam.
- Kendrick, E.C., M. Bevis, R.F. Smalley Jr., O. Cifuentes, and F. Galban, 1999. Current rates of convergence across the Central Andes: estimates from continuous GPS observations. *Geophysical Research Letters*, 26(5): 541-544.
- Kley, J. y C.R. Monaldi, 1998. Tectonic shortening and crustal thickness in the Central Andes: How good is the correlation? *Geology* 26(8): 723-726.
- Kley, J., C.R. Monaldi & J.A. Salfity, 1999. Along-strike segmentation of the Andean foreland: causes and consequences. *Tectonophysics* 301: 75-94.
- Kozłowski, E.E., C.E. Cruz y C.A. Sylwan, 1996. Geología estructural de la zona de Chos Malal, Cuenca Neuquina, Argentina. XIII^{er} Congreso Geológico Argentino y III^{er} Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Actas I: 15-26, Buenos Aires.
- Malumián, N. y C. Nañez, 1996. Microfósiles y nanofósiles calcáreos de la Plataforma Continental. En V.A. Ramos y M.A. Turic (eds.) *Geología y Recursos Naturales de la Plataforma Continental Argentina*, XIII^{er} Congreso Geológico Argentino y III^{er} Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Relatorio 5: 73-93.
- Martínez, M.P., M.E. Giménez, A. Introcaso y J.A. Robles, 1997. Excesos de espesores corticales y acortamientos andinos en tres secciones ubicadas en 36°, 37° y 39° de latitud sur. 7° Congreso Geológico Chileno, I: 101-105, Antofagasta.
- Ramos, V.A., 1996. Interpretación tectónica. En V.A. Ramos et al. *Geología de la Región del Aconcagua*, provincias de San Juan y Mendoza, Dirección Nacional del Servicio Geológico, Anales 24(16): 447-460, Buenos Aires.
- Ramos, V.A. 1998. Estructura del sector occidental de la faja plegada y corrida del Agrio, Cuenca Neuquina, Argentina. X° Congreso Latinoamericano de Geología (Buenos Aires), Actas II: 105-110.
- Ramos V.A. y R.N. Alonso, 1995. El mar paranense en la provincia de Jujuy. *Revista Instituto de Geología y Minería* 10: 73-82, S.S. de Jujuy.
- Ramos, V.A. y G.I. Vujovich, 1995. Descripción Geológica de la Hoja San Juan, provincias de San Juan y Mendoza. Servicio Geológico y Minero de Argentina, 1-230, Buenos Aires.
- Romanyuk, T.V., H.-J. Götze, y P.F. Halvorson, 1999. A density model for the Andean Subduction zone. *The leading Edge* (February) 264-268.
- Salfity, J.A. y R.A. Marquillas, 1994. Tectonic and sedimentary evolution of the Cretaceous-Eocene Salta Group basin, Argentina. In J.A. Salfity (ed.) *Cretaceous Tectonics of the Andes*, Vieweg ed., 266-315.
- Schmitz, M., 1993. Kollisionsstrukturen in den Zentralen Anden: Ergebnisse refraktionsseismischer Messungen und Modellierung kurstaler Deformation. *Berliner Geowissenschaftliche Abhandlung B* 20: 1-127, Berlín.
- Zapata, T.R., I. Brissón y F. Dzelalija, 1999. The role of basement in the Andean fold and thrust belt of the Neuquén basin. *Thrust Tectonics, Abstracts*, London.