

Modelo para la variación del volumen orogénico andino y acortamientos en el sector 20°-46°S

Fernando A. POSE, Mauro SPAGNUOLO y Andrés FOLGUERA

Laboratorio de Tectónica Andina. Departamento de Geología. FCEyN Universidad de Buenos Aires, Intendente Güiraldes 2160, C1428EHA Buenos Aires

Emails: jposef@fibertel.com.ar, maurospag@yahoo.com, folguera@gl.fcen.uba.ar

RESUMEN. El volumen orogénico levantado en los Andes es el resultado del delicado equilibrio entre el levantamiento y la erosión. Los diferentes grados de acortamiento sufridos por el borde occidental del continente americano, desde el codo de Arica hasta Tierra del Fuego, han definido contrastantes rasgos morfotectónicos, desde extensas altiplanicies endorreicas hasta reducidas y simples divisorias. El volumen orogénico a través de los Andes Centrales Australes y Patagónicos Septentrionales (20°-46°S) disminuye linealmente de norte a sur. Esta linealidad experimenta un drástico cambio de pendiente, a los 38°S, en la zona de transición entre los Andes Centrales Australes y los Patagónicos Septentrionales. La zona norte (20°-38°S) presenta mayor velocidad de variación que la sur (38°-46°S). Este quiebre coincide con un cambio relativo en el gradiente de edades de fondo oceánico, sugiriendo un control en el acortamiento, al menos parcial, por parte de la flotabilidad de la placa oceánica subducida. Esto se contrapone con las hipótesis que postulan que el factor climático sería el principal condicionante de estos contrastes morfológicos. Se presentan además dos ecuaciones empíricas para la obtención de volúmenes orogénicos a una latitud dada, fuera del ámbito de dos anomalías centradas en 27° y 33°S respectivamente. A estas latitudes, otros factores adicionales al acortamiento orogénico están definiendo el relieve observado. Adicionalmente se discute una ley de variación del acortamiento en función de la latitud, calculado a partir de datos gravimétricos, fuera de los entornos de estas anomalías alrededor de las cuales se observan fluctuaciones equivalentes al caso anterior.

Palabras clave: *Andes, acortamiento, control climático, volumen orogénico, partición de la deformación.*

ABSTRACT. *Model for Andean orogenic volume variation and shortening in the 20°-46°S sector.* The orogenic volume of the Andes is the result of the equilibrium between the tectonic uplift and erosion. The different rates of shortening along the western margin of the South American continent have defined contrasting morphostructural settings. The orogenic volume along the southern Central Andes and northern Patagonian Andes (20°-46°S) decreases linearly, from north to south. At 38°S, we have separated two segments with different rates of variation in the Andean volume. The northern sector (20°-38°S) shows a steeper linear law than the southern sector. Even though the Andean volume varies together with the decrease from north to south of the subducted oceanic slab age, latitude 38°S coincides with a sudden change related to this late parameter. This observation has led us to propose a linkage between subducted parameters and variation of Andean volume, which contrasts with other hypotheses that assume that climate, is the principal cause for the variations in the observed orogenic volume. We also present two empiric equations to calculate the orogenic volume at determined latitude, beyond the area of influence of two anomalies centered around 27°S and 33°S respectively. Those sectors are considered to be influenced by other factors related to isostatic rebounds, superposed to shortening. Additionally, we discuss a law for the latitudinal variation of the orogenic shortening away from the location of the mentioned anomalies.

Key words: *Andes, shortening, climatic control, orogenic volume, strain partitioning.*

Introducción

Las causas de la variación del volumen orogénico andino entre los 20°S y 46°S son aún tema de controversia. Este segmento orogénico, correspondiente a la zona de transición de los Andes Centrales Australes a los Patagónicos Septentrionales (Fig. 1), fue elegido como área de estudio por presentar un margen relativamente lineal que se extiende con rumbo N10°E, un vector de convergencia homogéneo de dirección N75°E y una velocidad de subducción relativamente constante. Sin embargo, a lo largo de estas latitudes se desarrollan los máximos gradientes topográficos de todos los Andes, con alturas que alcanzan los 4.000

metros promedio en el Altiplano, hasta 1.500 metros en la Cordillera Patagónica Septentrional.

Si bien existe consenso general acerca de que el volumen variable del orógeno andino sería función de los gradientes de acortamiento, no hay acuerdo acerca de los mecanismos que lo controlan. Tal como proponen Kay *et al.* (1994), Liu *et al.*, 1995, Allmendinger y Gubbels, 1996, Kley *et al.* (1999), Chemenda *et al.* (2000), Lamb y Davis (2003), Ramos *et al.* (2004), diversos controles regionales estarían interviniendo simultáneamente en este complejo sistema.

En el presente trabajo se presenta, con mayor detalle, las ideas y conclusiones introducidas en Spagnuolo *et al.*

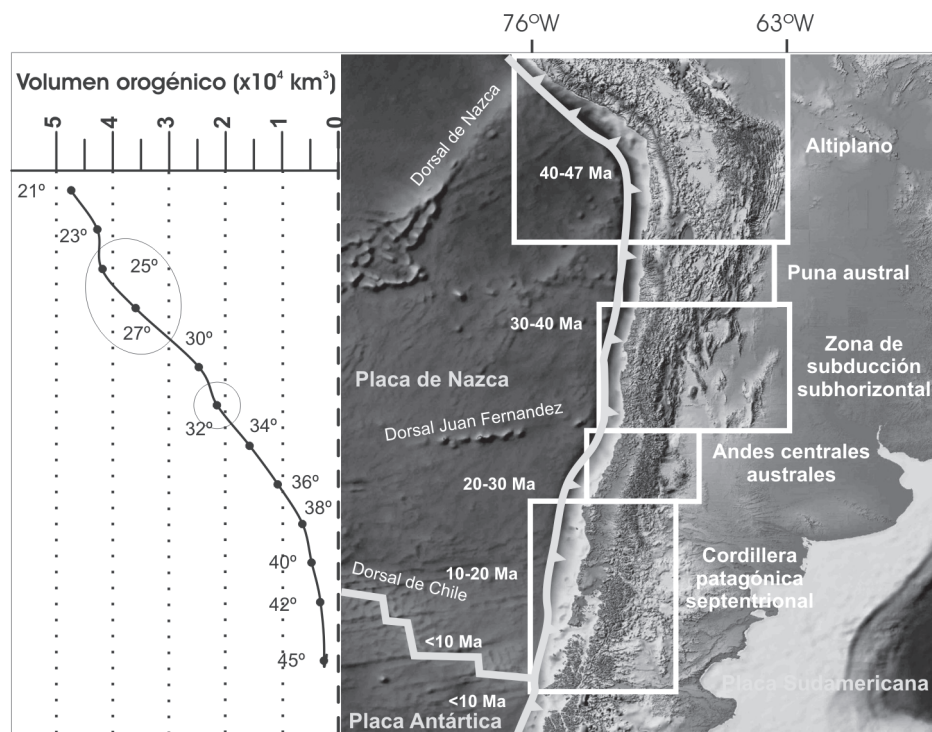


Figura 1: Variación latitudinal del volumen orogénico y marco tectónico del área de estudio. En la curva de variación del volumen orogénico se han destacado los valores anómalos.

(2005) y Pose *et al.* (2005) acerca de los controles que intervendrían en la variación del volumen orogénico andino entre los 20°-46°S. Se procura analizar la tendencia de la variación latitudinal del volumen orogénico y encontrar una expresión matemática sencilla que se ajuste a dicha variación a fin de poder estimarlo en forma cuantitativa, para una latitud dada, y a través de una interpolación simple. Por otra parte, hemos compilado los valores correspondientes a los acortamientos orogénicos en este sector de los Andes para verificar la posible existencia de una correlación entre ambos conjuntos de datos.

No se pretende aquí mostrar la compleja dependencia entre el volumen orogénico y los factores que lo determinan, sino aportar una fórmula empírica que surja de cuantificaciones sistemáticas y del análisis de una tendencia.

El volumen orogénico andino entre los 20°S y 46°S

El área cordillerana situada entre los 20°S y los 46°S presenta una marcada y progresiva disminución del volumen orogénico hacia el sur. Como consecuencia de estas variaciones, puede dividirse a los Andes Centrales Australes (20°-38°S) en tres sectores con características morfológicas bien diferenciadas: a) región sur del Altiplano y Puna Austral (20°-27°S), actualmente sobre un segmento de subducción normal (30°S); b) segmento de subducción subhorizontal (27°-33°S) y c) sector sur de los Andes Centrales Australes y Cordillera Patagónica septentrional, ligado a un segmento de subducción normal (33°-38°S) (Fig. 1).

La región del Altiplano y Puna Austral se compone de una altiplanicie que posee cotas superiores a los 3.600 metros. Este segmento presenta los máximos valores de volumen orogénico del sector de estudio.

Al sur de la Puna (Fig. 1) se extiende el segmento de subducción subhorizontal (27°-33°S) en donde se produce la máxima expansión longitudinal de la cadena andina derivada del imbricamiento del basamento en la zona de antepaís, pero en el cual los volúmenes orogénicos alcanzados son inferiores al segmento del Altiplano.

Finalmente, el sector sur de los Andes Centrales Australes y de la Cordillera Patagónica Septentrional, desarrollado nuevamente sobre un segmento de subducción normal, experimenta una drástica caída del volumen orogénico levantado. Los valores de acortamiento de este sector son relativamente bajos en comparación a los segmentos ubicados inmediatamente hacia el norte (Ramos *et al.* 2004).

Determinación del volumen orogénico levantado y controles que lo afectan

Para analizar la variación del volumen orogénico andino entre los 20°-46°S procedimos a dividir al área de estudio en 12 bloques de 2° de latitud cada uno. Utilizando los modelos de elevación digital (DEM) SRTM3 y GTOPO30 calculamos, para cada bloque, el volumen orogénico, definido como el volumen comprendido entre un plano a nivel del mar y la topografía y hasta el frente orogénico activo (Fig. 2). Los volúme-

Cuadro 1: Resultados correspondientes a los valores de volúmenes orogénicos, edad de fondo oceánico (NOAA) y valores de acortamiento (Introcaso *et al.* 2000).

Bloque	Volumen orogénico (km ³)	Acortamiento (km)	Edad de fondo oceánico (Ma)
20-22	472917		46
22-24	427340	445	45
24-26	417307	389	43
26-28	359533	240	41
29-31	246791	154	38
31-33	214958	142	36
33-35	156233	85	34
35-37	107920	81	31
37-39	63848	72	29
39-41	48186	59	24
41-43	33038	60	19
44-46	25905	56	4
48-50	39877	23	12

nes orogénicos medidos se exponen en el cuadro 1.

En la figura 1 se representa la variación latitudinal del volumen orogénico a lo largo del área de estudio. Recientemente se ha propuesto que su variación latitudinal respondería a un cambio climático cenozoico (Lamb y Davis 2003). La hipótesis planteada por estos autores sugiere que la presencia o ausencia de sedimento en la trinchera, derivada de la erosión continental, que actuaría como lubricante entre las placas en la zona de subducción, regiría el acoplamiento y como consecuencia, el acortamiento alcanzado. A partir de una detallada cuantificación de los volúmenes orogénicos, tomando como referencia el nivel del mar, y de los espesores de relleno sedimentario en la trinchera a lo largo de este sector de los Andes, Spagnuolo *et al.* (2005) desestimaron la propuesta del control climático como factor único, al menos, para el sector que

se extiende al norte de los 33°S. A partir de allí se verifica una variación del volumen orogénico aún frente a la existencia de trincheras hambrientas a lo largo de cientos de kilómetros. Por su parte, Hartley (2005) ha desmerecido la propuesta de Lamb y Davis basándose en información paleoclimática (Evenstar *et al.* 2005), así como también en estudios que indicarían una homogeneidad en los rangos de fricción entre las placas a lo largo de todo el margen, independientemente del sedimento presente en la trinchera (von Heune y Ranero 2003). Por otra parte, Hartley (2005) sugiere que la variación en la dirección y velocidades de convergencia entre las placas a través del tiempo sería una de las causas principales para el levantamiento de los Andes. Sin embargo, el cambio en la oblicuidad de la placa de Nazca/Farallón a los 26 Ma al que alude (Pardo-Casas y Molnar 1987, Somoza 1998), habría ocurrido de igual forma a lo largo del margen rectilíneo (21°-45°S), no alcanzando para explicar las variaciones observadas a lo largo de los Andes en el segmento en cuestión.

Análisis de los resultados obtenidos y estimación cuantitativa de la variación del volumen orogénico

A partir del análisis de la curva de variación del volumen orogénico (Fig. 1) surgen anomalías al tren de progresión observado, las cuales serían introducidas por factores de orden local. En Pose *et al.* (2005) se destacó la presencia de estas anomalías en la variación del volumen orogénico centradas a los 27°S y 33°S. Las mismas se manifiestan como escalones en la curva que se alejan de la tendencia normal. Con respecto a la primera de ellas, situada a los 27°, se ha propuesto que podría estar relacionada con el rebote isostático regional que sufre el sector sur de la Puna como consecuencia de la delaminación litosférica, inferida inicialmente a partir de datos geoquímicos

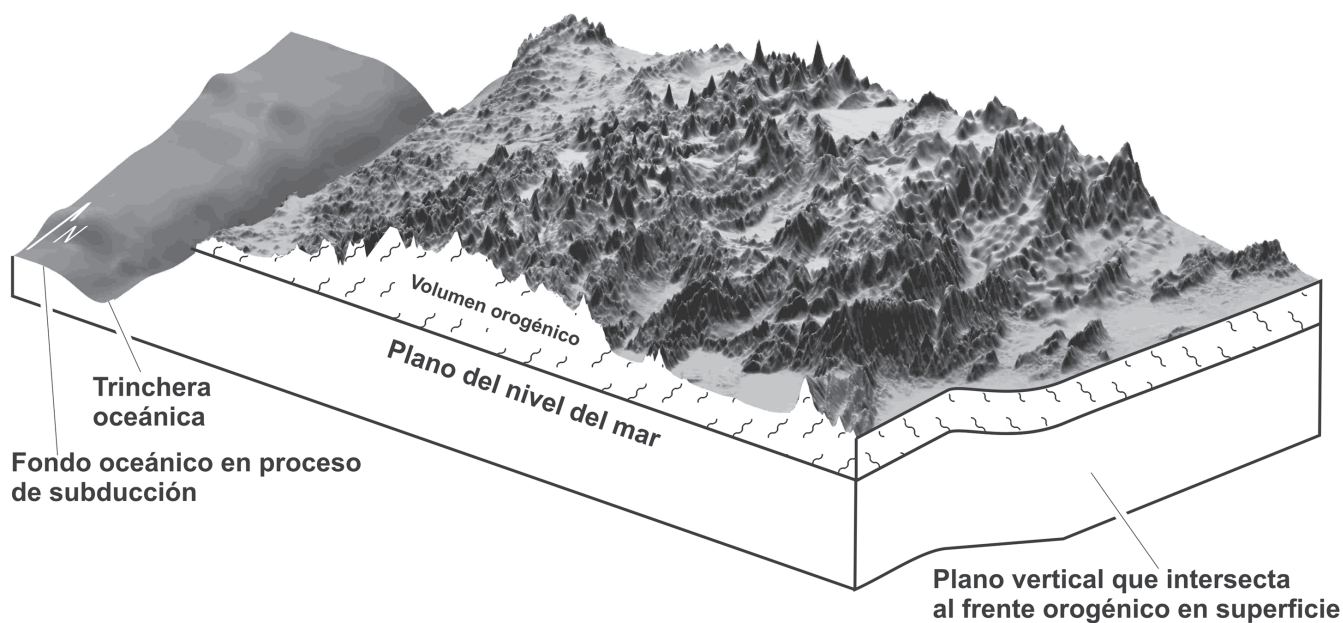


Figura 2: Medición del volumen orogénico.

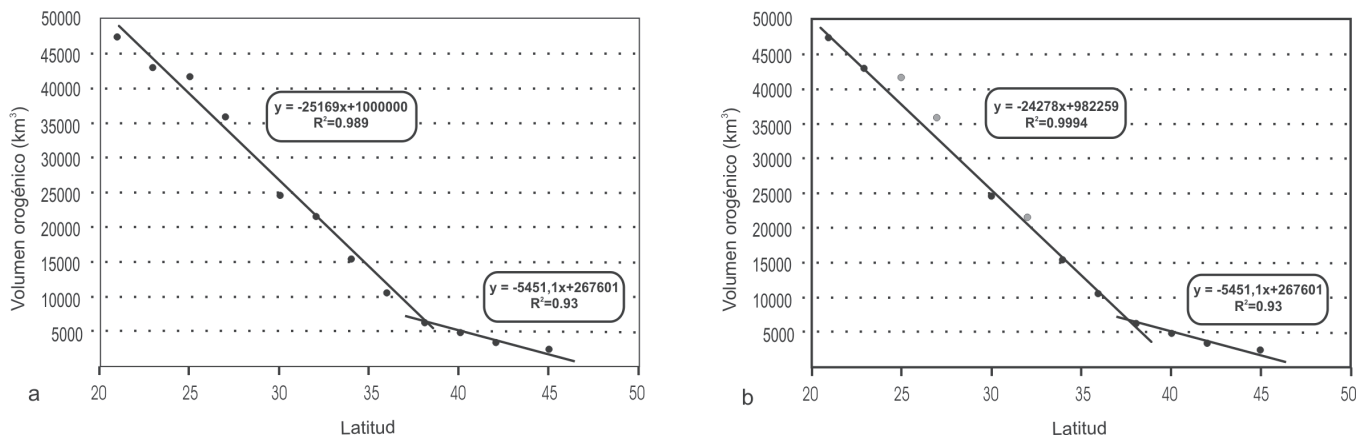


Figura 3: Análisis de la curva de variación de volumen orogénico en función de la latitud. Nótese que, en ambos gráficos, se presenta un quiebre en la pendiente de alineación de los datos a los 38°S. En la figura 2b la aproximación lineal para el sector norte muestra un mejor ajuste que en 2a por no considerar a los puntos anómalos descriptos en la primera sección (grises claros). Cuanto más cercano a 1 es el valor de R² mas se asemeja el conjunto de datos a una expresión lineal.

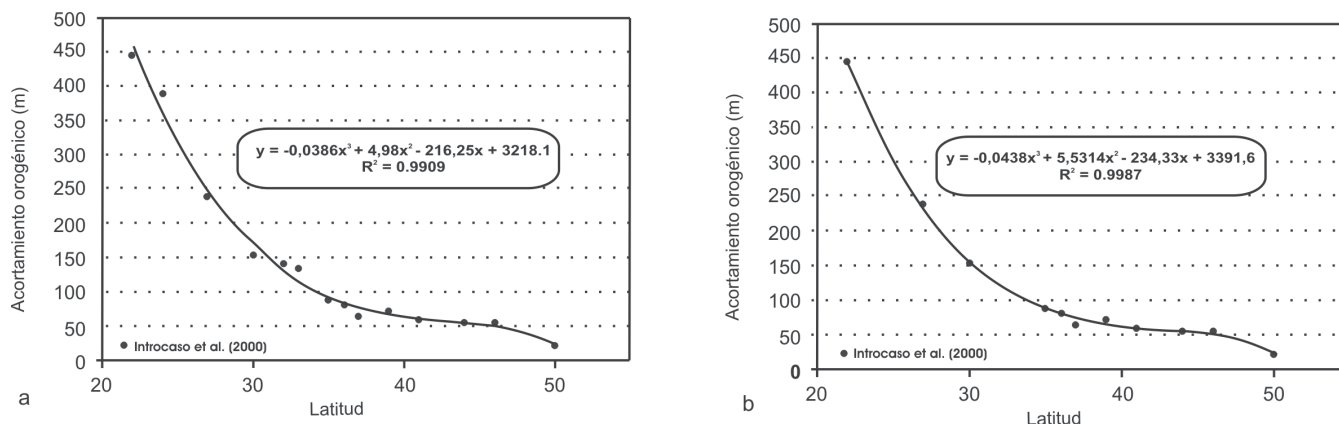


Figura 4: Variación latitudinal de los valores de acortamiento para el sector de estudio. Nótese que en la figura 3b el ajuste de la curva presenta un R² mayor, al no tener en cuenta los datos correspondientes a las anomalías.

de las volcanitas eruptadas durante los últimos 5 Ma (Kay *et al.* 1994) y posteriormente verificada a partir de tomografías sísmicas. La segunda anomalía, ubicada a los 33°S, sería el producto de una más alta flotabilidad de la placa oceánica de Nazca, que en este sector es anómalamente gruesa debido al aditamento magmático que conllevó a la formación de la dorsal asísmica de Juan Fernández, y el consecuente levantamiento extra del sector andino por encima de este rasgo.

En la figura 3 puede observarse la distribución de los puntos de muestreo correspondientes a los valores de volumen orogénico para diferentes latitudes del área de estudio. La curva de distribución presenta un marcado quiebre a los 38°S, de manera que los puntos ubicados al norte y al sur de esta latitud tienden a alinearse según dos rectas de diferente pendiente. Las distintas pendientes de las rectas evidencian distintos gradientes latitudinales de variación del volumen orogénico. Para el sector comprendido entre los 20°-38°S, en donde se encuentran las anomalías anteriormente citadas, se verifica un mayor gradiente de disminución del volumen orogénico levantado que para el segmento comprendido entre 38-46°S.

Con el objetivo de encontrar una expresión matemática que describa las variaciones latitudinales del volumen orogénico, se halló la ecuación de la recta que mejor ajusta a los puntos alineados de cada segmento (20°S-38°S y 38°S-46°S), pudiéndose observar los resultados en la figura 3a.

Con la finalidad de verificar la forma en la cual las anomalías locales mencionadas afectan a la variación lineal del volumen orogénico, se procedió a recalculer la ecuación de la recta del segmento 20°-38°S sin considerar los valores de volúmenes orogénicos correspondientes a dichas anomalías. Los resultados se presentan en la figura 3b, pudiéndose observar un mejor ajuste lineal.

Estimación cuantitativa de la variación latitudinal de los valores de acortamientos

En la figura 4 fueron representados los valores de acortamiento para el área de estudio (Introcaso *et al.* 2000, Ramos *et al.* 2004) en función de la posición latitudinal (Cuadro 1). Los acortamientos fueron determinados a par-

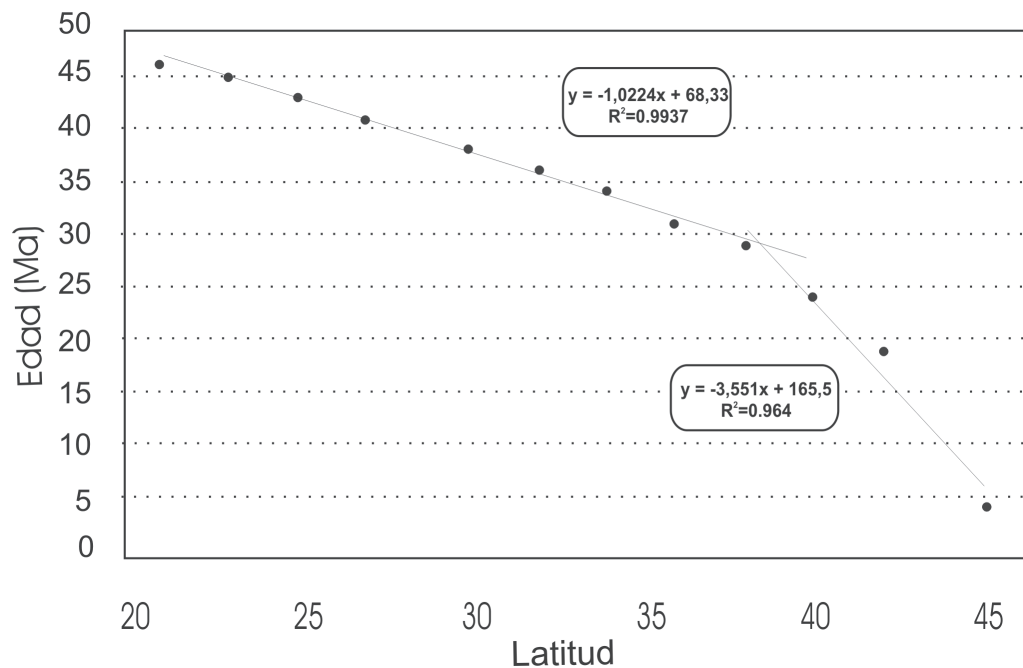


Figura 5: Edad de fondo oceánico en función de la latitud (Cuadro 1).

tir del análisis de las sucesivas curvas de la anomalía de Bouguer a las diferentes latitudes, determinando un espesor cortical teórico bajo el edificio andino que surge de asumir un estado de equilibrio hidrostático (Introcaso *et al.* 2000). Teniendo en cuenta dichas premisas, se cuantifica la superficie comprendida entre la topografía y la raíz cortical calculada para una sección dada y se determina el acortamiento teórico necesario para alcanzarla a partir de una sección de 33 a 35 km de espesor, que representaría al espesor de la corteza previo al engrosamiento.

Como puede observarse en la figura 4, el mejor ajuste de los puntos se logra mediante una función polinómica de grado tres. En la figura 4a se presentan los resultados correspondientes a la ecuación de la función que tiene en cuenta a todos los valores de acortamiento, mientras que en la figura 4b la ecuación corresponde a la función que considera a todos los puntos excepto los correspondientes a las anomalías locales observadas, previamente, en la figura 1. De la misma manera que en el caso del volumen orogénico, el ajuste de los datos a la curva es mayor sin tener en cuenta dichos valores anómalos.

Resultados

A continuación se presentan dos ecuaciones sencillas para el cálculo del volumen orogénico en el sector comprendido entre 20°-38°S (Eq. 1) y 38°-46°S (Eq. 2), para una latitud dada y fuera de las anomalías mencionadas, donde $V_{o(x)}$ es el volumen orogénico y x la latitud.

$$V_{o(x)} = \begin{cases} -24278x + 982259 & \text{para } 20^\circ\text{S} < x < 38^\circ\text{S} \text{ (Eq. 1)} \\ -5451,1x + 267601 & \text{para } 38^\circ\text{S} < x < 46^\circ\text{S} \text{ (Eq. 2)} \end{cases}$$

La variación en los valores de acortamiento, calculados a partir de la gravedad, se ajusta a la curva de un polinomio de tercer grado. Debido a que existen anomalías locales en la tendencia general de variación del volumen orogénico y que los valores de acortamiento representados dependen fuertemente de estos valores, se analizó la tendencia de estos últimos fuera del ámbito de influencia de las anomalías. Tal como lo muestra la figura 4b, el ajuste es mejor sin incluir en el análisis dichos puntos. De esta manera, un sencillo polinomio permitiría realizar un cálculo estimado de las variaciones de acortamiento fuera del ámbito de las anomalías (Eq. 3), siendo Ac el acortamiento y x la latitud (comprendida entre 20°S y 46°S).

$$Ac = -0,0438x^3 + 5,5314x^2 - 234,33x + 3391,6 \\ (\text{para } 20^\circ\text{S} < x < 46^\circ\text{S}) \quad (\text{Eq. 3})$$

Discusión

El sector de estudio se desarrolla en el marco de un ambiente de subducción oblicua donde tanto la velocidad como el vector de convergencia de la losa oceánica subducida se mantienen prácticamente constantes a lo largo de todo el margen. Sin embargo, la edad del fondo oceánico que se subduce aumenta progresivamente hacia el norte desde el punto triple de Aysén (Fig. 1). En la figura 5 se encuentra representada la curva que relaciona la edad del fondo oceánico respecto de la latitud. Es interesante destacar que esta variación no responde a una ley única a lo largo de todo el margen, sino que presenta un quiebre en la pendiente de distribución de los datos a los 38°S, marcando dos rectas bien diferenciadas. Este quie-

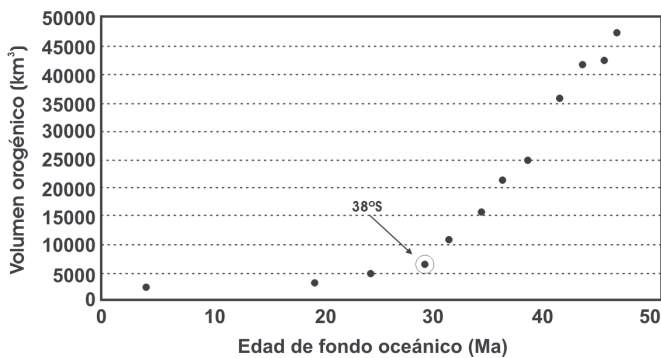


Figura 6: Variación del volumen orogénico en el sector de estudio de acuerdo a la edad de losa oceánica subducida.

bre está centrado en la misma posición latitudinal en donde existe un cambio en la velocidad de variación de los volúmenes orogénicos (Fig. 3). Estas observaciones serían concordantes con la propuesta de Folguera y Ramos (2001) acerca de la forma en la cual la deformación, impuesta por la convergencia oblicua entre la placa de Nazca y Sudamericana, se distribuye en el margen continental formando los Andes Australes y definiendo las variaciones morfológicas que esta cadena posee a lo largo de su extensión. Estos autores propusieron que a los 38°S, en la zona de transición desde los Andes Centrales Australes a los Andes Patagónicos Septentrionales, se verifica un cambio en las condiciones de la partición de la deformación que se traduce en variaciones morfológicas de primer orden de la cadena andina, que son a su vez función de la distribución y mecánica de estructuras regionales con actividad neotectónica. La relativa alta partición de la deformación permite la individualización de la componente ortogonal al margen de la convergencia entre las placas continental y oceánica. La mayor resolución de ésta componente es la que produce fajas plegadas y corridas antitéticas a la polaridad de la subducción, que se asocian a los sectores en los cuales se forman los mayores volúmenes orogénicos en los Andes Australes. El grado de partición de la deformación alcanzado en cordilleras formadas por subducción de fondo oceánico se ha relacionado con la flotabilidad de la losa oceánica subducida (Liu *et al.* 1995). En el caso específico de los Andes Australes (al sur del codo de Arica, Fig. 1), la flotabilidad de la losa subducida se correlaciona inversamente con su edad (Folguera y Ramos 2001).

Conclusiones

A partir del análisis de la curva de variación del volumen orogénico, se obtienen tres conclusiones principales: 1) Se observa que el volumen orogénico decrece de norte a sur a través de dos leyes lineales cuyo quiebre se encuentra en 38°S; 2) el ajuste lineal de los puntos es mayor al no tener en cuenta los valores estimados para los 27°S y 33°S; y 3) el hecho de que estos valores se alejen de la

tendencia regional da cuenta de la naturaleza anómala en estos sectores con respecto a los mecanismos generadores de relieve: se propone que el «extra» de volumen orogénico que se infiere en esos puntos a partir de su alejamiento de la ley regional calculada, revela componentes no orogénicas, probablemente isostáticas, asociadas al levantamiento de montañas.

Por otro lado, el marcado quiebre en la pendiente de distribución de los datos que se observa en las figuras 3 y 4 permite suponer la existencia a estas latitudes de algún factor de primer orden que podría estar controlando regionalmente la variación de los valores de acortamiento y en consecuencia, los volúmenes orogénicos desarrollados. En la figura 6 se muestra la variación del volumen orogénico de acuerdo a la edad de fondo oceánico subducido, observándose un quiebre en la distribución de los datos centrado en 38°S. La concordancia de este quiebre (38°S) con el punto en el cual se infiere un salto cualitativo en el grado de la partición de la deformación postulado por Folguera y Ramos (2001) nos permite inferir que la edad de fondo oceánico podría ser un factor de control primario en la variación del volumen orogénico, relación que había sido previamente planteada por Ramos *et al.* (2004).

Finalmente, considerando que no existirían suficientes evidencias que definan al relleno sedimentario presente en la trinchera como único factor condicionante de la variación en el volumen orogénico levantado, concluimos que éste en caso de existir podría formar parte de una jerarquía de controles, entre los que destacamos a la edad, y relacionada flotabilidad, del fondo oceánico subducido como uno de los principales, debido a la notable correlación existente entre ambos parámetros.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su reconocimiento al Dr. Víctor A. Ramos por su introducción a la temática de la presente contribución y sus valiosos comentarios. Además agradecen las críticas enriquecedoras de los correctores Rubén Somoza (Universidad de Buenos Aires) y de César Arriagada (Universidad de Chile).

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Allmendinger, R. y Gubbels, T. 1996. Pure and simple shear plateau uplift, Altiplano-Puna, Argentina and Bolivia. *Tectonophysics* 259: 1-13.
- Chemenda, A., Lallemand, S. y Bokun, A. 2000. Strain partitioning and interplate friction in oblique subduction zones: Constraints provided by experimental modelling. *Journal of Geophysical Research* 105 (B3): 5567-5581.
- Evenstar, L., Hartley, A.J, Rice, C.M., Stuart, F., Mather, A.E. y Chong, G. 2005. Miocene-Pliocene climate change in the Peru-Chile Desert. 6th International Symposium on Andean Geodynamics. Extended Abstracts: 258-260, Barcelona.
- Hartley A. J. 2005. What cause Andean uplift? 6th International Symposium on Andean Geodynamics. Extended Abstracts: 824-827, Barcelona
- Folguera, A. y Ramos, V.A. 2001. Distribución de la deformación en los Andes australes (33°-46°S). *Asociación Geológica Argentina, Publicación Especial Serie D*, 5: 13-18.

- Inrocaso, A., Pacino, M. A. y Guspi, F. 2000. The Andes of Argentina and Chile: crustal configuration, isostasy, shortening and tectonic features from gravity data. *Temas de geociencia* 5: 31 pp., UNR Editora, Rosario.
- Kay, S., Coira, B. y Viramonte, J. 1994. Young mafic back-arc volcanic rocks as indicador of continental lithospheric delamination beneath the Argentine Puna plateau, Central Andes. *Journal of Geophysical Research* 99: 24323-24339.
- Kley, J., Monaldi, C. y Salfity, J. 1999. Along-strike segmentation of the Andean fore-land: causes and consequences. *Tectonophysics* 301: 75-94.
- Lamb, S y Davis, P. 2003. Cenozoic climate change as a possible cause for the rise of the Andes. *Nature* 425: 792-797.
- Liu, X., Mc Nally, C. y Zheng-Kang, S. 1995. Evidence for a role of the down-going slab in earthquake slip partitioning at oblique subduction zones. *Journal of Geophysical Research* 100 (B8): 15351-15372.
- Pardo-Casas, F. y Molnar, P. 1987. Relative motion of the Nazca (Farallón) and South American plates since late Cretaceous time. *Tectonics* 6(3): 233-248.
- Pose, F., Spagnuolo, M., Folguera, A y Ramos, V.A. 2004. Controles en la variación del volumen orogénico andino entre los 15 y 48° S. *Serie Especial de la Revista de la Asociación Geológica Argentina* con resúmenes extendidos de la 12ª Reunión sobre microtectónica y geología estructural (Cafayate) (en prensa).
- Ramos, V.A., Zapata, T., Cristallini, E. e Introcaso, A. 2004. The Andean thrust system: Latitudinal variations in structural styles and orogenic shortening. En K.R. McClay (ed.) *Thrusts Tectonics and hydrocarbon systems*. American Association of Petroleum Geologists, *Memoir* 82: 30-50.
- Somoza, R. 1998. Updated Nazca (Farallon) – South America relative motions during the last 40 My: implications for mountain building in the Central Andean region. *Journal of South American Earth Sciences* 11: 211-215.
- Spagnuolo, M.; Pose, F.; Folguera, A. y Ramos, V.A. 2005. Controls in Andean volume between 20 and 48°S. 6th International Symposium on Andean Geodynamics. *Extended Abstracts*: 697-700, Barcelona
- von Huene, R. y Ranero, C.R. 2003. Subduction erosion and basal friction along the sediment-starved convergent margin of Antofagasta, Chile. *Journal of Geophysical Research* 108 (B2): 2079, doi:10.10129/2001JB001569.

Recibido: 15 de septiembre, 2005

Aceptado: 5 de diciembre, 2005