

GRADO DE COMPENSACION ISOSTATICA EN EL ALTIPLANO: ANALISIS GRAVIMETRICO DE 2 Y 3 DIMENSIONES

GONZALO YAÑEZ (+), ALDO GIAVELLI (++) y JORGE CAÑUTA(#)

(+): SERNAGEOMIN, SANTA MARIA 0104 SANTIAGO
(++) SIPETROL S.A., TAJAMAR 183, 4° PISO, SANTIAGO
(#): ENAP, AHUMADA 341, SANTIAGO

RESUMEN

En el marco de un proyecto de investigación destinado a establecer el estado de compensación isostática en los distintos segmentos de la convergencia Andina, se ha completado una primera fase correspondiente al sector altiplánico. Análisis de dos y tres dimensiones en el dominio espectral, han permitido establecer que casi la totalidad del Altiplano se encuentra compensado en forma local (tipo Airy). Esta compensación local es independiente de la longitud de onda del rasgo topográfico involucrado, lo cual es evidencia de una ausencia de rigidez litosférica en la región. Flujos calóricos anómalamente altos permiten explicar esta falta de rigidez.

Una modelación directa de la anomalía de Bouguer en un perfil representativo, entrega una estructura cortical con un espesor medio superior a 50 km, y alcanzando valores cercanos a 70 km en la línea divisoria de aguas. Esta estructura cortical confirma la existencia de una compensación de tipo local en la región altiplánica.

El máximo espesor cortical observado en el segmento sur del Altiplano, se interpreta como el producto del escape tectónico en dirección sur ante una compresión de dirección E-W. La acumulación cortical en este segmento se habría visto favorecida por la presencia de un núcleo litosférico competente inmediatamente al sur.

INTRODUCCION

La génesis y evolución de grandes cadenas montañosas como los Andes, ha sido motivo de permanente atención en el ámbito de las Ciencias de la Tierra. Este interés, que puede remontarse a los tiempos de Darwin en el siglo pasado, se basa en el hecho que un rasgo fisiográfico de estas características, representa una de las evidencias más concretas de la existencia de actividad tectónica en un margen de convergencia entre placas litosféricas de dimensión continental. Si bien esta relación de causa-efecto entre la convergencia de las placas de Nazca y Sud-América y la existencia del macizo Andino no admite mayores dudas, aún no es posible resolver algunos procesos de segundo orden asociados al fenómeno orogénico fundamental. El caso específico del Altiplano es aún más particular, ya que junto al cordón de los Himalayas en la frontera Indo-Asiática, constituye el relieve montañoso de mayores dimensiones en la superficie terrestre. La ubicación geográfica del Altiplano, en el sector de máxima concavidad o flexura del margen de Sudamérica (Figura 1), ha dado origen a dos interpretaciones cuya relación causa-efecto, en relación a la génesis del Altiplano, es antagónica. Una hipótesis, sustentada por Beck (1987) y Beck *et al.* (1993), propone la existencia de una flexura continental previa al alzamiento del Altiplano. Al interactuar esta morfología continental con la placa de Nazca, habría generado movimientos relativos convergentes en dirección de la ubicación del Altiplano, induciendo así el engrosamiento cortical. En contraposición, Isacks (1988) propone el curvamiento del orógeno (oroclino), y en consecuencia del margen continental, como producto de las condiciones mecánicas y termales de la litósfera continental y cuña astenosférica. Dado el estado actual del conocimiento, no es posible discernir entre ambas hipótesis o alguna otra que intente recoger elementos de estas posturas extremas. Una forma de ir avanzando en la solución de este problema central, lo constituyen estudios tendientes al entendimiento de fenómenos asociados al proceso orogénico. Entre estos cabe mencionar, tasas de alzamiento-denudación y la influencia de un factor climático altamente variable, comportamiento reológico de la litósfera continental, naturaleza y propiedades de la corteza inferior, proporción de aporte magmático y tectónico en el orógeno. Muchas de estas preguntas son interdependientes y exigen de una visión interdisciplinaria para aproximarse a una respuesta correcta. Uno de los factores que debe ser considerado constituye el elemento central de esta comunicación, las características y propiedades de la corteza y manto continental desde el punto de vista de su respuesta gravimétrica.

Como parte del proyecto Fondecyt '93 #1930164, se ha completado una primera etapa de compilación y adquisición de información gravimétrica y topográfica digital del segmento norte de Sudamérica, entre la 1a y 3a región. La cobertura actual en la zona correspondiente al Altiplano permite efectuar un análisis parcial de esta información, con énfasis en la definición de espesores corticales y estados de equilibrio del plateau Altiplánico. Este marco geofísico del área, permite a su vez hacer algunas inferencias sobre los procesos geológicos y tectónicos que probablemente están relacionados a las particulares condiciones que dan origen a un relieve de las características del Altiplano.

A continuación presentamos una breve descripción de la metodología utilizada para el análisis de la información gravimétrica. En la siguiente sección analizamos los datos correspondientes a la región del Altiplano, con un procesamiento espectral de 3-D que permite establecer el grado de compensación isostática del macizo en su conjunto. Con este antecedente, efectuamos una modelación directa en un perfil perpendicular a la dirección estructural, a fin de establecer una estructura cortical preliminar. Finalmente analizamos estos resultados geofísicos en el contexto de la evolución geológica del Altiplano.

Método Gravimétrico: Aplicación a la determinación de comportamientos isostáticos y flexurales de cargas estáticas

Para estimar el espesor cortical y el tipo de compensación que opera en el segmento altiplánico de Los Andes, se analiza la

relación entre topografía y anomalía de Bouguer en el dominio de las frecuencias (para un desarrollo completo de la teoría consultar, Turcotte & Shubert, 1982; Parker, 1972).

La anomalía de Bouguer para el caso de una respuesta isostática local (tipo Airy) ante la carga de una cadena montañosa (Figura 2a) está dada por:

$$(1) \quad G(k) = 2 \rho g r \text{Exp}(-kd) H(k) \Delta r / r_c$$

donde:

g = Constante de Gravitación Universal

d = Cota Promedio de la Superficie Topográfica

r_c = Densidad cortical

$\Delta r = r_m - r_c$ = Contraste en densidad entre el manto y la corteza

k = número de onda

$H(k)$ = Transformada de Fourier de la topografía

$G(k)$ = Transformada de Fourier de la anomalía de Bouguer

Por el contrario, si la litósfera tiene cierta rigidez, la compensación isostática del orógeno tiene un carácter regional, provocando una flexura de la litósfera de mayor longitud de onda que el relieve topográfico (Fig. 2b). La Anomalía de Bouguer en este caso se deriva de la solución de la ecuación de una barra elástica delgada sometida a cargas distribuidas (Turcotte & Shubert, 1982).

$$(2) \quad G(k) = 2 \rho g r \text{Exp}(-kd) \frac{H(k)}{1 + \frac{(k^4 D)}{\Delta r g}} \Delta r / r_c$$

donde:

g = aceleración de gravedad

D = rigidez (parámetro flexural)

$D = ET^3/12(1-s^2)$; E = Módulo de Young; T = Espesor de la Placa; s = Razón de Poisson

Esta segunda ecuación que describe el comportamiento flexural de la litósfera depende de 2 parámetros fundamentales, el número de onda $k = 2\pi/l$ (l : longitud de onda) y la rigidez D . Cuando la rigidez tiende a cero, la ecuación (2) se reduce a la anomalía de Bouguer para el caso de un medio compensado localmente (ecuación 1). Del mismo modo para relieves topográficos de gran longitud de onda (k pequeño) la compensación también tenderá ser compensada localmente al tender a 1 el denominador de ecuación(2). En términos concretos, para relieves topográficos con longitud de onda superior a algunas centenas de kilómetros, la compensación debería ser local para espesores elásticos inferiores a 50 km. Para relieves de menor longitud de onda, el grado de compensación isostática dependerá de la rigidez del medio. Esta rigidez es probablemente función de una serie de parámetros entre las que destaca la litología, el gradiente geotérmico y los tiempos de sobrecarga (a mayor tiempo de sobrecarga, comienzan a operar los efectos de relajación viscosa).

ANÁLISIS GRAVIMÉTRICO Y TOPOGRÁFICO DEL NORTE DE CHILE

a. Gravimetría

La información analizada en este trabajo comprende aproximadamente 4500 estaciones gravimétricas, adquiridas por ENAP en la Primera y Segunda Región dentro de sus programas de exploración, con niveles de precisión variables. Un número importante de estas estaciones fueron posicionadas con GPS, con un error esférico de diámetro aproximado 30 m, lo que permite estimar en +/- 6 mGal el error asociado a la Anomalía de Bouguer, el cual se considera aceptable para una escala de trabajo de 1:500.000. Información gravimétrica adicional utilizada para esta compilación incluye estaciones de la base de datos de la Universidad de Cornell (cedidos por profesor B. Isacks), Universidad Libre de Berlín, y digitalización del mapa de Anomalía de Bouguer de Bolivia (compilado por Profesor J. Tellería). Los niveles de error y los parámetros usados en la reducción de estos datos, son equivalentes a los descritos para el proceso y compilación de los datos nacionales, con una envolvente de error inferior a 10 mGal. Este nivel de error es apropiado para estudios de carácter regional en donde interesa analizar señales con longitudes de onda de varias decenas de kilómetros y amplitudes superiores a 100 mGal.

Para la obtención de la Anomalía de Bouguer, mostrada en Figura 3a, se usó una densidad media de 2.67 gr/cm³. Las medidas fueron referidas al elipsoide de referencia WGS-84 y la corrección topográfica fue calculada en forma digital (Zhou *et al.*, 1990), considerando la base topográfica descrita en la siguiente sección.

En Figura 3a la Anomalía de Bouguer es representada en contornos a un intervalo de muestreo de 50 Mgal. Se incluye además en esta figura la ubicación de las estaciones utilizadas para la generación del mapa de Anomalía de Bouguer (puntos grises), y en forma superpuesta la topografía (fondo en tonalidades de grises).

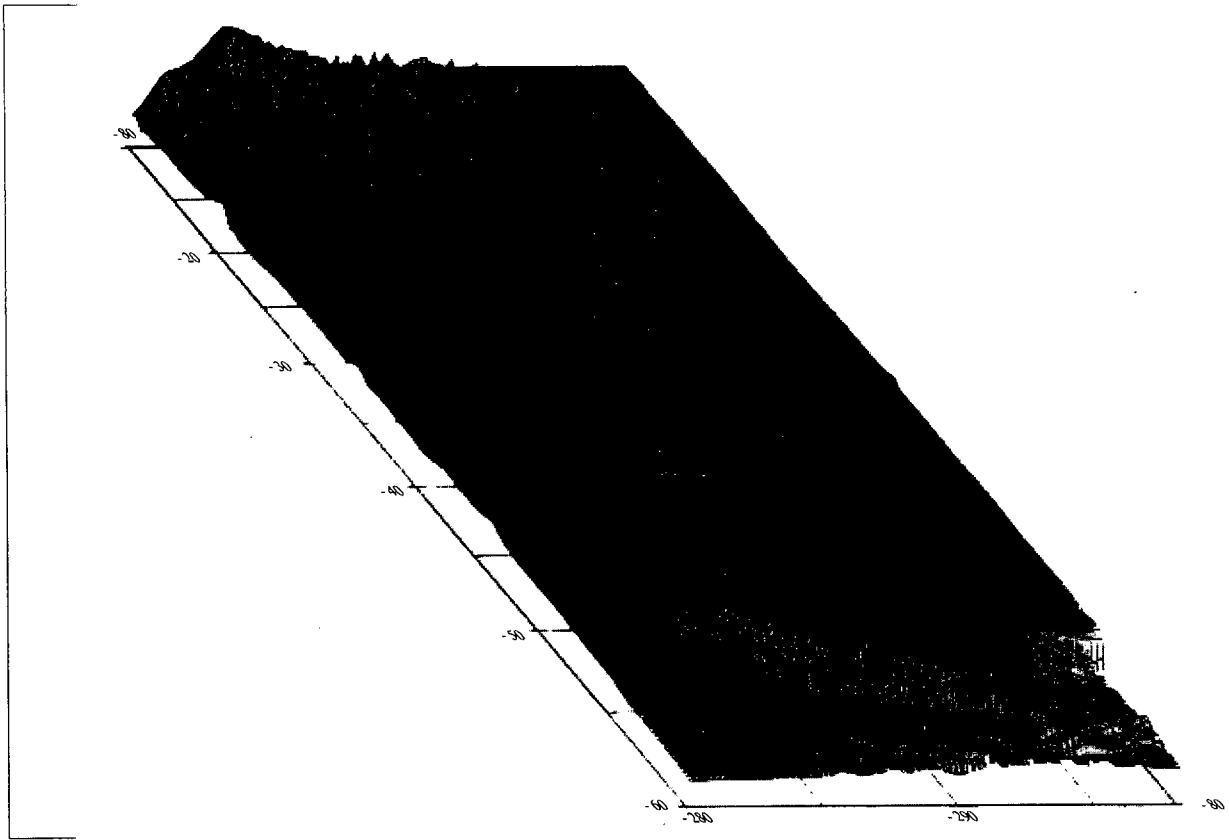


Fig. 1. Relieve del segmento sur-oeste de Sudamérica, imagen tridimensional.

b. Topografía

Se dispone de la topografía digital del margen occidental de Sudamérica correspondiente a la base de datos de la Universidad de Cornell (cedida por el profesor B. Isacks). Este set de datos ha sido recopilado mediante la digitalización de cartas topográficas y batimétricas a escalas en el rango de 1 :50.000 a 1 :500.000. Nosotros hemos reprocesado esta información a un intervalo de muestreo de 0.02 grados en direcciones ortogonales (Norte y Este), lo que constituye un muestreo aproximado de 2 km. Esta información topográfica digital ha sido utilizada en la generación de la Figura 1.

c. Análisis Isostático Espectral en 3-D

Mediante el uso del modelo digital de terreno es posible estimar la respuesta isostática de la carga representada por el relieve cordillerano, de acuerdo a una compensación local tipo Airy en la cual a cada punto con relieve positivo se le asocia una raíz con contraste de densidad negativo con respecto al manto litosférico.

Una extensión de la teoría presentada previamente para el análisis de un modelo isostático de 2-D, en el dominio espectral, es utilizada para ver la respuesta isostática desde una perspectiva areal o de 3-D. Este proceso es efectuado mediante una rutina del paquete GMT (Wessel & Smith, 1991), que utiliza como parámetros de entrada el modelo digital de terreno, la rigidez cortical (en este caso igual a cero), y las densidades medias del océano, corteza y manto (1.0, 2.7, 3.3 [gr/cm³], respectivamente).

La Anomalía de Bouguer teórica que resulta de esta modelación isostática, es presentada en conjunto con la topografía en Figura 3b. Esta figura puede ser comparada directamente con la Figura 3a que corresponde a la Anomalía de Bouguer observada. En términos semicuantitativos se puede concluir que un modelo isostático permite reproducir en buena forma la Anomalía de Bouguer observada. Lo anterior confirma la predicción relativa a que cargas con longitudes de onda superiores a 100 km tenderán a estar compensadas en forma isostática. Sin embargo, es interesante resaltar que sobre el Altiplano, relieves positivos de longitud de onda inferior a 50 km, también se encuentran compensados isostáticamente. Esto es coherente con una litósfera de muy poca rigidez, probablemente como producto del alto flujo calórico (- 80-90 mW/m²) que caracteriza a la región altiplánica (Henry & Pollack, 1988). En los flancos del plateau, en dirección de la costa y el cratón Brasileño, se aprecian discrepancias entre el valor teórico y el observado. Estas diferencias están relacionadas a un cierto grado de rigidez de la litósfera en estas regiones. En el caso de la región de ante-arco, esta mayor rigidez está probablemente asociada a la cercanía de las placas continental y oceánica, lo cual incide en un menor gradiente geotérmico y un soporte dinámico de la corteza continental por la placa subductada. En la zona de precordillera, al oriente del Altiplano, la mayor rigidez está asociada a la cercanía del Cratón

Brasileño. De hecho, algunos autores (p. ej., Mpodozis & Ramos, 1989; Lyon-Caen *et al.*, 1985) consideran que el Cratón Brasileño estaría siendo subductado bajo el Altiplano ("a subduction").

Otros rasgos menores que se aprecian en la Anomalía de Bouguer teórica que no son reconocidos en la Anomalía de Bouguer observada, por lo general corresponden a localidades con falta de muestreo. Un caso particular constituye el salar de Atacama y el sector adyacente en dirección de la Sierra del Limón Verde en donde sí se cuenta con un set de datos relevante. En este caso, la Anomalía de Bouguer observada es inferior a la predicha para un medio sin rigidez, lo cual podría interpretarse como el producto de una corteza más delgada y una litósfera continental más competente. Cabe hacer notar que la depresión del salar de Atacama constituye un rasgo singular que puede extrapolarse probablemente hasta el Paleozoico con evidencias concretas de un ambiente lagunar de intraarco (Breitkreutz *et al.*, 1992). En consecuencia, la hipótesis de una corteza más delgada que el promedio de la región puede constituir un rasgo que ha sido preservado en el tiempo, condicionando la evolución geológica del área. Evolución en la cual destacan el desplazamiento al Este del frente volcánico (p. ej., Mpodozis & Ramos, 1989) y el desarrollo del mayor espesor cortical de los Andes (y Anomalía de Bouguer) inmediatamente al Noreste del salar. Nosotros proponemos como hipótesis de trabajo que la mayor competencia litosférica de la región sería responsable de ambos fenómenos: inhibiendo el desarrollo del frente volcánico, e impidiendo la extensión al sur del Altiplano. La acumulación cortical en el extremo sur del Altiplano sería entonces el efecto combinado de una especie de muro de contención o "backstop" y el escape tectónico (Molnar & Tapponier, 1975) asociado a un acortamiento de dirección E-W, que relaja la energía potencial acumulada en dirección N-S. De hecho Assumpção (1992) encuentra evidencias de una extensión de dirección N-S en la región altiplánica, basado en la distribución de mecanismos focales y mediciones de stress *in-situ*.

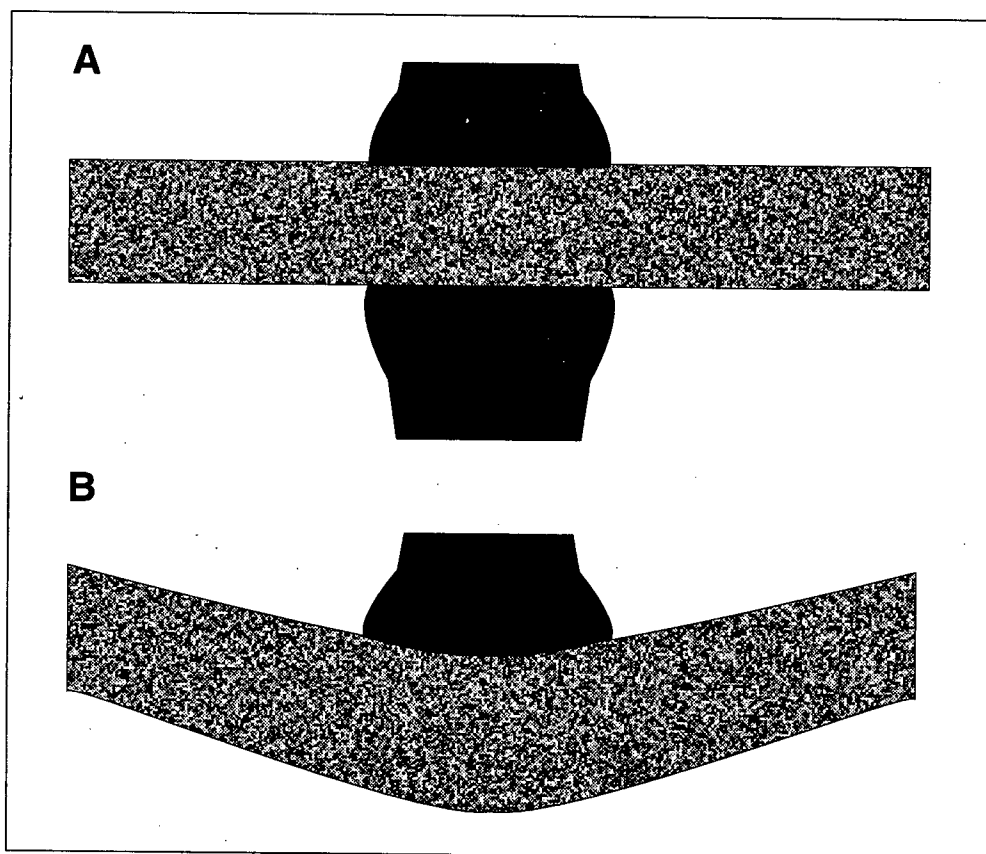


Fig. 2. A) *Compensación Local (rigidez=0)*. La masa de superficie en tonalidad negra es compensada localmente por una masa de mayor dimensión en la vertical como producto de la diferencia en densidad; B) *Compensación regional (rigidez > 0)*. La masa de superficie en tonalidad negra es compensada re-gionalmente en profundidad.

d. Modelación gravimétrica de 2-D

A fin de contar con una primera estimación del espesor cortical en la región altiplánica efectuamos una modelación directa de la Anomalía de Bouguer. En Figura 3a se aprecia que la Anomalía de Bouguer asociada al Altiplano tiene una forma elongada de dirección N-S que permite efectuar un análisis en secciones de dirección E-W que sea representativo del problema tridimensional. Se efectuó una serie de modelaciones en secciones a diferentes latitudes encontrándose en general que estas no diferían fundamentalmente. En Figura 4 se presenta el modelo correspondiente al perfil A-A' (mostrado en la Fig. 3a), el cual se considera representativo de la estructura cortical del Altiplano.

El modelo considerado utiliza un contraste de densidad corteza-manto de 0.4 gr/cm³. Para la placa oceánica consideramos una geometría coherente con la actitud del plano de Benioff en la región (Cahill, 1990), y un contraste de densidad de 0.08 gr/cm³. Este último valor es marginalmente superior al utilizado para el manto continental en consideración a los efectos de contracción térmica (Turcotte & Shubert, 1982) asociados a un medio sujeto a temperaturas un 30% inferiores.

En Figura 4 se aprecia un espesor cortical que en gran parte del Altiplano supera los 50 km, alcanzando valores cercanos a 70 km en las inmediaciones de la divisoria de las aguas. Este espesor cortical podría ser levemente inferior, al imponer un menor contraste de densidad como producto de una cuña astenosférica menos densa que el manto litosférico.

Anomalía de Bouguer

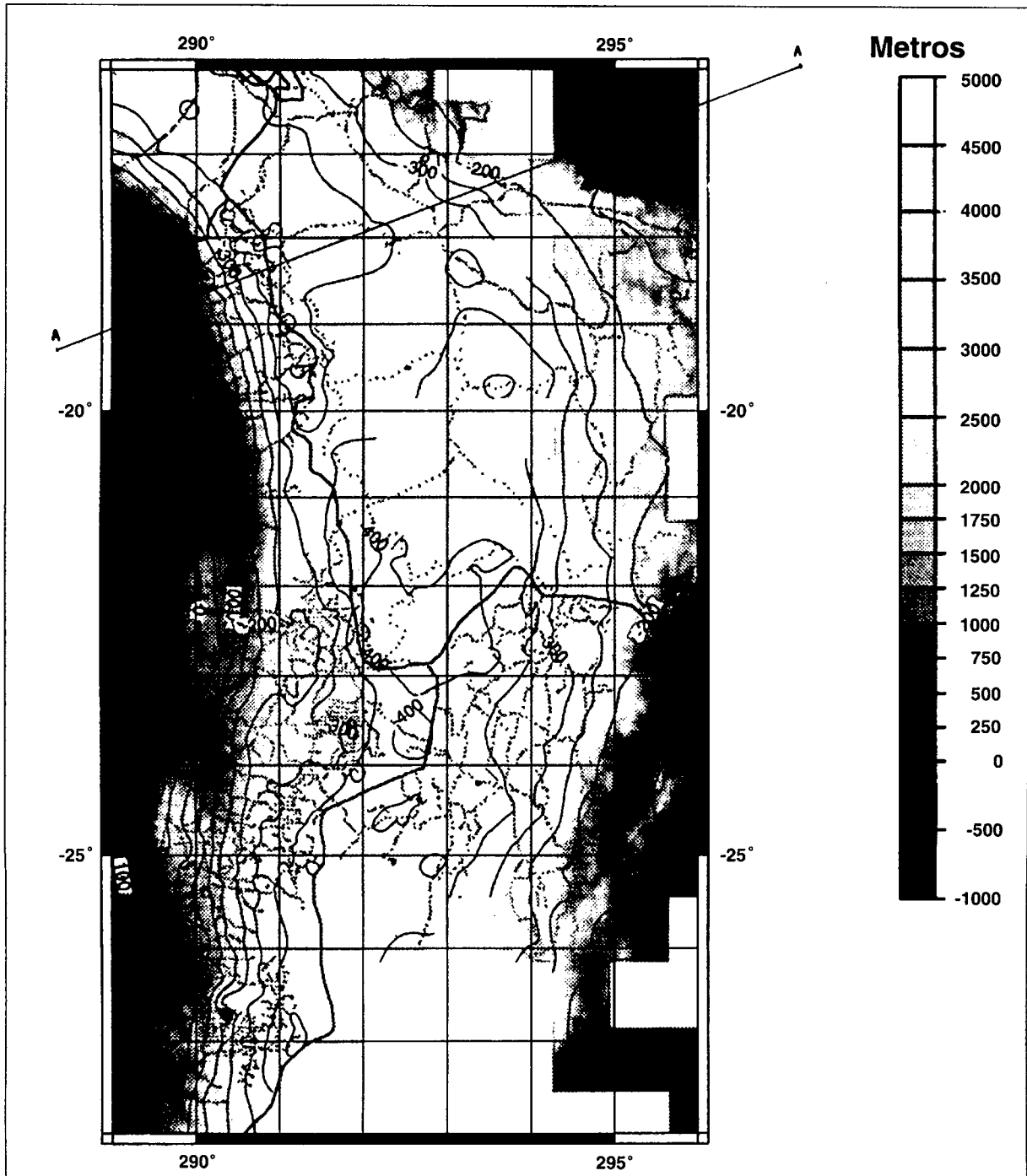


Fig. 3a. Anomalía de Bouguer. En contornos Anomalía de Bouguer observada a un intervalo de 50 Mgal. Estaciones gravimétricas en puntos grises. Topografía como fondo en tonalidades de grises.

Anomalía Isostática

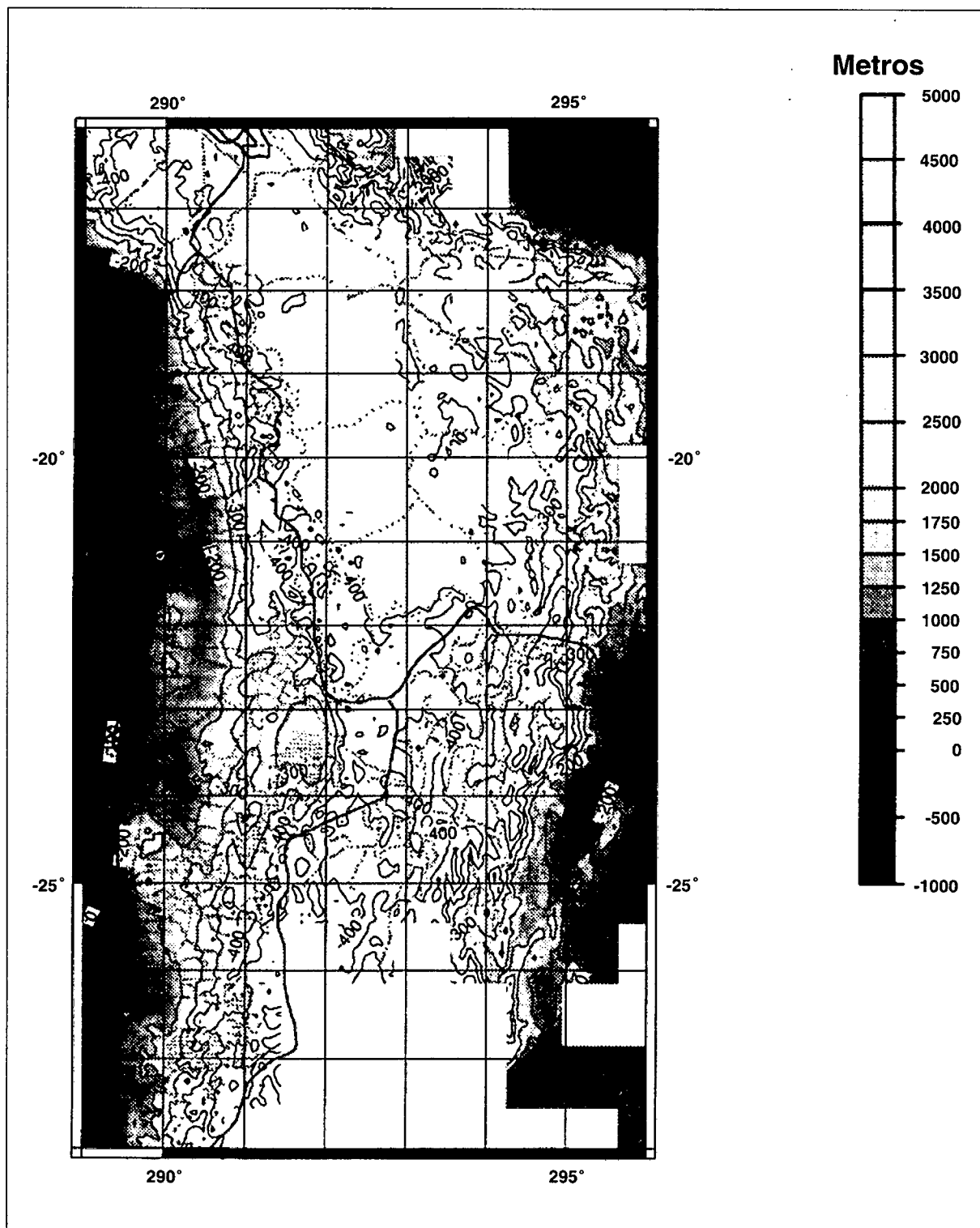


Fig. 3b. Anomalía Isostática tipo Airy derivada de la compensación isostática local de la topografía. En contornos anomalía de Bouguer calculada a un intervalo de 50 Mgal. Estaciones gravimétricas en puntos grises. Topografía como fondo en tonalidades de grises to utilizado es de -0.4 Gr/cm^3 , mientras que para la placa oceánica se considera una densidad ligeramente superior a la del manto ($+0.08 \text{ Gr/cm}^3$).

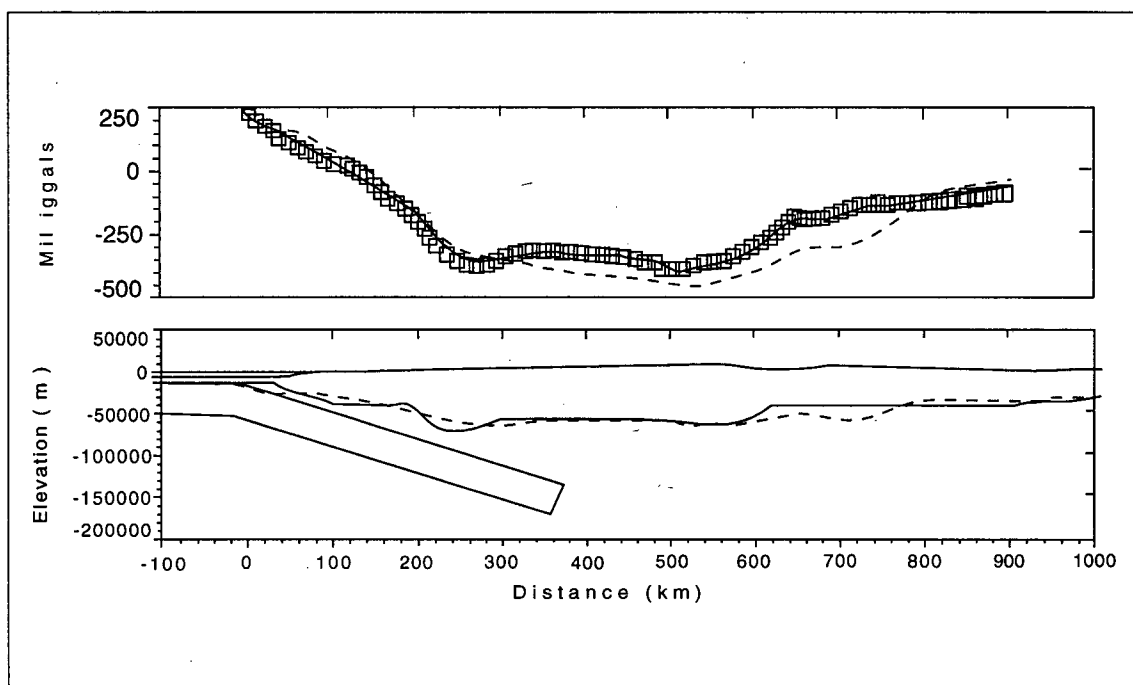


Fig. 4. Modelación Gravimétrica de 2-D en perfil A-A'. Los cuadrados representan las observaciones, en línea llena respuesta del modelo, y en línea segmentada respuesta isostática. El contraste de densidad corteza-manto utilizado es de -0.4 Gr/cm^3 , mientras que para la placa oceánica se considera una densidad ligeramente superior a la del manto ($+0.08 \text{ Gr/cm}^3$).

La estructura cortical es en primera aproximación análoga a la obtenida asumiendo una compensación local del tipo Airy y calculada considerando un espesor de equilibrio de 33 Km (cuya Anomalía de Bouguer asociada está representada por línea segmentada en Figura 4), salvo en el borde oriental, donde el espesor cortical resulta menor que el isostático, lo que podría indicar la existencia de una componente elástica en este sector. Este resultado es coherente con el análisis previo de 3-D, en el cual los relieves topográficos de longitud de onda de varias centenas de kilómetros están compensados en forma local, y donde también se aprecia una mayor rigidez en el borde oriental del Altiplano, asociada al Cratón.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha presentado un análisis cuantitativo de la estructura cortical del Altiplano y las características de la compensación isostática del edificio Andino. Gran parte del Altiplano se encuentra compensado en forma local, incluso en aquellos rasgos topográficos de pequeña dimensión. Esta particular situación es el producto de una rigidez prácticamente nula en la región altiplánica, probablemente como producto de un flujo calórico anómalamente alto. Discrepancias de una compensación isostática del tipo local en los flancos del Altiplano se asocian a la presencia de la placa subductada en la región de ante-arco y el cratón Brasileño al interior del continente.

El mayor espesor cortical y Anomalía de Bouguer del extremo sur del Altiplano se interpreta en términos de un escape tectónico en dirección perpendicular a la dirección de mayor compresión (E-W). La "acumulación" cortical inmediatamente al norte de un segmento de marcado carácter anómalo en la geología andina, en donde destacan la Península de Mejillones, el Salar de Atacama, y el corrimiento al Este del frente volcánico actual, sugieren mecanismos comunes para estos fenómenos. Se postula que la franja al sur de los 23° constituye un núcleo litosférico competente que se ha preservado en el tiempo y que actúa como un frente de contención ("backstop") para el colapso en dirección sur del Altiplano.

AGRADECIMIENTOS

La presente publicación es una contribución que forma parte del proyecto Fondecyt 93-94 #1930164 (Espesor cortical y compensación de la Cordillera de los Andes y su relación con la segmentación del margen convergente de Sudamérica: Transectas Gravimétricas).

REFERENCIAS

- Assumpção, M. The regional intraplate stress in South America. *J. Geophys. Res.* 97, 11889-11903, 1992.
- Beck, M.E. Jr. Tectonic rotations on the leading edge of South America: The Bolivian orocline revisited. *Geology*, 15, 806-808, 1987.
- Beck, M.E. Jr., C. Rojas, J. Cembrano. On the nature of the buttressing in margin-parallel strike-slip fault systems. *Geology*, 21, 755-758, 1993.
- Breitkreutz, C., F.F. Helmdach, R. Kohring y V. Mosbrugger. Late Carboniferous Intra-arc sediments in the North Chilean Andes: Stratigraphy, Paleogeography and Paleoclimate. *Facies*, 26, 67-80, 1992.
- Cahill T., Earthquake and tectonics of the central Andean subduction zone. Unpub. PhD. Thesis, Cornell Univeristy, USA, 1990.
- Henry, S.G. y H.N. Pollack. Terrestrial heat flow above the Andean subduction zone in Bolivia and Peru. *J. Geophys. Res.*, 93, 15153-15162, 1988.
- Isacks, B.L. Uplift of the Centra Andean Plateau and Bending of the Bolivian Orocline. *Journal of Geophysical Research*, 93, 3211-3231, 1988.
- Lyon-Caen H., P. Molnar y G. Suárez. Gravity anomalies and the flexure of the Brazilian shield beneath the Bolivian Andes. *Earth and Planetary Science Letters*, 75, 81-92, 1985.
- Molnar P. y P. Tapponier. Cenozoic tectonics of Asia: effects of continental collision. *Science*, 189, 419, 1975.
- Parker, R.L., The rapid calculation of potential anomalies. *Geophys. Jour. of the Royal As. Soc.*, 31, 447-455, 1972.
- Turcotte D.L. y G. Shubert. *Geodynamics, aplications of continuum physics to geological problems.* John Wiley & Sons, 1982.
- Mpodozis C. y V. Ramos. The Andes of Chile and Argentina. In *Geology of the Andes and its relation to hydrocarbon and mineral resources: Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources Earth Sciences Series*, Ericksen, G.E., M.T. Cañas, A. Reinemund, eds., Chapter 5, 59-90, 1989.
- Wessel P. y H.F. Smith. Free Software Helps Maps and Display Data. *EOS Trans AGU*, 1991, 72, 441.
- Zhou X., B. Zhong y X. Li. Gravimetric Terrain Correction by Triangular Element Method. *Geophysics*, 232-238, 1990.