

# Controles en la variación del volumen orogénico andino entre los 20° y 46°S

Fernando A. Pose, Mauro Spagnuolo, Andrés Folguera y Víctor A. Ramos

**RESUMEN.** La cadena andina presenta, desde los Andes Centrales hasta los Andes Patagónicos, una importante variación en su volumen orogénico. Recientemente se ha propuesto que esta variación estaría controlada por factores climáticos que condicionarían la abundancia de material sedimentario presente en la trinchera. Con el objetivo de evaluar esta hipótesis y determinar otros posibles mecanismos de generación de volumen orogénico, hemos realizado un estudio detallado de la relación entre espesores sedimentarios dentro de la trinchera, volúmenes orogénicos y tasas de precipitación entre 15°-46°S, considerando intervalos discretos de 2° de latitud. Los resultados demuestran que si el control climático fuese válido actuaría solo en el intervalo comprendido entre los 30°S y 44°S. Allí se observa que a medida que aumenta, de norte a sur, el volumen sedimentario presente en la trinchera, disminuye el volumen orogénico. Sin embargo, entre 20°-30° S se observa una progresiva disminución del volumen orogénico mientras que la cantidad de material sedimentario dentro de la trinchera no varía sustancialmente. Esto implica que si bien el factor climático podría ejercer algún tipo de control en el desarrollo del volumen orogénico andino, existirían otros condicionantes coexistentes con éste.

**Palabras clave:** *Andes-control climático-volumen orogénico-relleno sedimentario de la trinchera.*

**ABSTRACT.** *Controls in the variation of Andean volume between 20° and 46°S.* The Andean chain, from the Central Andes next to the Arica bending to the Patagonian Andes, shows an important variation in its orogenic volume. Recently it has been proposed that this variation could be controlled by climatic factors that would define the amount of sediments inside the trench. To evaluate this hypothesis and to determine other possible mechanisms that generate orogenic volume, we have made a detailed study about the existing relation between sedimentary thickness within the trench, orogenic volumes and rates of precipitation between 15°-46°S, considering discreet intervals of 2° latitude each. The results demonstrate that the climatic control, if valid, would act only in the interval between 30° and 44°S. Along this sector can be observed that, as sedimentary thickness in the trench increases, orogenic volume decreases. Nevertheless, between 20°-30°S a progressive decrease in the orogenic volume is observed, whereas the amount of sedimentary material within the trench does not vary substantially. This would imply that although the climatic factor could exert a limited role in constructing Andean volume, other coexisting conditioners would be acting at the same time.

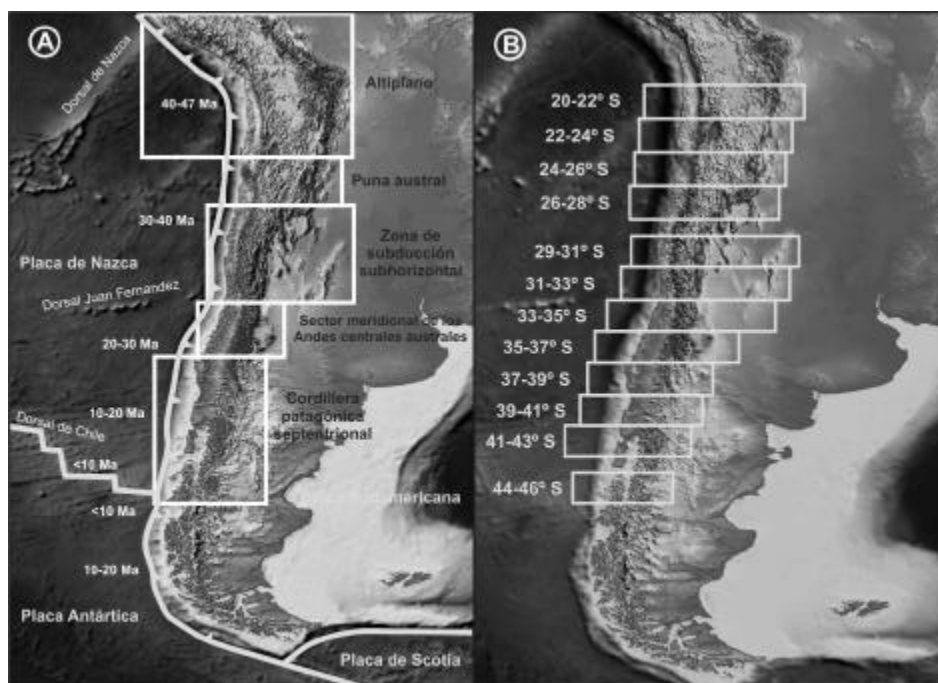
**Key words:** *Andes-climatic control-orogenic volume-trench sediment fill.*

## Introducción

El análisis topográfico de la cadena andina demuestra que, a lo largo de toda su extensión, existe una importante variación en su volumen orogénico, el cual disminuye hacia el norte y hacia el sur del Altiplano Boliviano en respuesta a gradientes de acortamiento (Kley *et al.* 1999). Existe un intenso debate acerca de si la morfología de la cadena andina es únicamente función de un factor dominante o depende de una multiplicidad de elementos, propios de las condiciones de borde que caracterizan un sistema subductivo: angularidad de la convergencia, inclinación y edad de la losa sub-

ducida y partición de la deformación entre otras (Kay *et al.* 1994; Liu *et al.* 1995; Chemenda *et al.* 2000). Estas variaciones morfológicas han sido también adjudicadas a anisotropías a escala litosférica, heredadas de la historia preandina de acreción al borde occidental del Gondwana (Allmendinger y Gubbels 1996; Ramos *et al.* 2004).

Recientemente se ha propuesto que la abundancia o escasez de material sedimentario en las trincheras sería el principal factor regulador del volumen orogénico andino (Lamb y Davis 2003). Estos autores sostienen que el relleno sedimentario actuaría como lubricante en la interfase de las placas en la zona de subducción. La presencia de sedimento disminuiría el acoplamiento entre las placas colisionantes provocando que la deformación, impuesta por la subducción de la placa de Nazca (Fig. 1A), no se transfiriera efectivamente a la placa Sudamericana. De esta manera el volumen orogénico levantado sería menor que en aquellos sectores con escasa presencia de sedimento en la trinchera, en donde el aco-



**Figura 1:** A) Morfología de los Andes y ambiente tectónico en el área de estudio. B) Bloques analizados.

plamiento entre las placas sería consecuentemente mayor.

La cantidad de sedimento que se deposita en la trinchera está directamente vinculada con las condiciones climáticas que se desarrollan en la zona continental del antearco. Dependiendo de la vertiente montañosa en la cual se desarrollen las precipitaciones orográficas, oriental u occidental, los productos de erosión de los sectores elevados serán acarreados por sistemas fluviales hacia el Atlántico o el Pacífico respectivamente. Por este motivo, de acuerdo a Lamb y Davis (2003), el clima y el consecuente patrón de circulación de vientos húmedos habrían tenido un papel decisivo como reguladores del volumen orogénico andino dentro del sector de estudio.

El objetivo de este trabajo es el de evaluar la reciente propuesta de Lamb y Davis (2003) en el segmento orogénico que se extiende desde los 20° hasta los 46°S, cuantificando la cantidad de relleno sedimentario en la trinchera y los volúmenes orogénicos levantados en el sector cordillerano adyacente, para estudiar que tipo de correlación existiría entre los mismos.

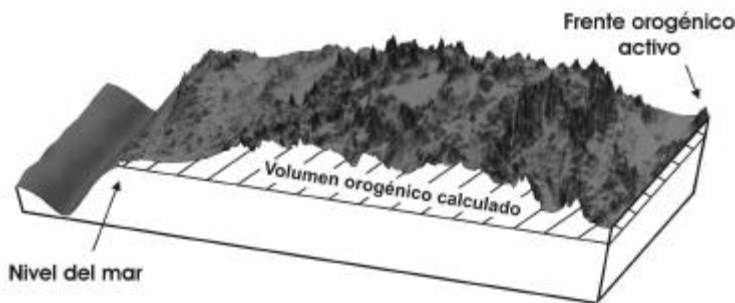
### Características de la cadena andina entre los 20° y 46° S

La cordillera de los Andes presenta una extensión de más de 8.000 km de longitud desde los 5°N hasta los 50°S, a lo largo de la cual desarrolla alturas de casi 7.000 metros, siendo estas las máximas alturas de la Tierra para un orógeno no colisional. El área de estudio, situada entre los 20° y los 46° de latitud sur, fue elegida debido a que en este sector la velocidad absoluta de la placa de Nazca (6,8 cm/año) y el vector de convergencia (N78°E) entre las placas se mantienen aproximadamente constantes, a lo largo de toda su extensión, desde los últimos 26 Ma. Sin embargo, desde los 20°S y hacia el sur, se observa una progresiva disminución del volu-

men orogénico, diferenciándose una serie de segmentos que presentan características topográficas distintivas.

De acuerdo a criterios morfotectónicos, los Andes Centrales Australes (Fig. 1A), definidos desde los 20 hasta los 33° de latitud sur, pueden ser divididos en: i) la región de la Puna-Altiplano y el sector subandino adyacente, bajo los cuales la placa de Nazca ingresa con un ángulo de subducción medio de 30°E, ii) un segmento de subducción horizontal, asociado a las Sierras Pampeanas y iii) la parte más austral de los Andes Centrales ligada nuevamente a un segmento de subducción normal.

La región de la Puna-Altiplano comprende una altiplanicie (más de 3.600 metros), en gran medida endorreica, que se encuentra flanqueada, en su sector oriental, por un sistema epidérmico correspondiente a las Sierras Subandinas. Al sur de los 24°S involucra al basamento en la deformación conformando el Sistema de Santa Bárbara. El Altiplano se diferencia de la Puna por poseer alturas, en promedio, ligeramente menores y por presentar una relación espesor del manto litosférico vs. espesor cortical mayor (Kay *et al.* 1994). La Puna (24°-26°S) desarrolla las mayores cotas del relieve altiplánico, característica que se encuentra directamente relacionada con su excepcional espesor cortical, superior a los 70 km. El área de la Puna presenta productos volcánicos de edad cuaternaria muy poco evolucionados y con una signatura química similar a la de los basaltos de islas oceánicas (Kay *et al.* 1994), características que, en principio, se contraponen al gran espesor cortical que conduciría a la alta diferenciación de los magmas. Sin embargo, este hecho podría encontrar explicación en la última fase de deformación que afectó a este sector durante el Cuaternario, donde se produjo una extensión cortical que habría permitido el rápido ascenso de los magmas sin llegar a diferenciarse químicamente de su fuente astenosférica (Allmendinger y Gubbels 1996). El delgado manto litosférico y la química particular



**Figura 2:** El volumen orogénico fue calculado como el volumen comprendido entre el nivel del mar, la topografía y un plano vertical arbitrario ubicado en el frente orogénico activo.

de los basaltos descritos han llevado a Kay *et al.* (1994) a proponer que la Puna es afectada por un proceso de delaminación cortical. Este proceso explicaría la mayor altura promedio de la Puna respecto del Altiplano, la cual se relacionaría con el rebote isostático asociado a la pérdida de sectores del manto litosférico bajo el edificio andino.

Hacia el sur de la Puna (Fig. 1A) se desarrolla un segmento de subducción horizontal (27°-33°S) que coincide con el sector de máximo desarrollo longitudinal del orógeno en el área de estudio. La porción más austral de este segmento concuerda con la zona de colisión de la Dorsal de Juan Fernández, que se evidencia a partir de la batimetría de fondo oceánico (Fig. 1A).

Al sur de los 33°S, se ubica la parte más meridional de los Andes Centrales Australes, en donde el desarrollo longitudinal de la cadena decrece drásticamente y entre los 37°S y los 38°S ocurre uno de los mayores cambios topográficos a lo largo de todos los Andes. Desde los 38° hasta los 46°S, se desarrollan los Andes Patagónicos Septentrionales, en donde se observan las menores altitudes y los más bajos acortamientos de toda el área de estudio (Ramos *et al.* 2004).

Es importante considerar que el único factor que varía en forma evidente a lo largo de todo el segmento de estudio (20°-46°S), paralelamente a las variaciones morfotectónicas detalladas relacionadas básicamente con las tasas de acortamiento, es la edad de la losa oceánica subducida.

**El volumen orogénico y su relación con el relleno sedimentario**

A lo largo de los Andes Centrales se ha constatado que los altos valores estimados de acoplamiento entre las placas de Nazca y Sudamericana coinciden con sectores en los cuales se registran menos de 500 metros de espesor de relleno sedimentario en las trincheras oceánicas (Lamb y Davis 2003). De manera inversa, en donde las trincheras se encuentran rellenas por mayores espesores, los valores de acoplamiento disminuyen. Esta relación, de acuerdo a la hipótesis de Lamb y Davis (2003), se debería a que los sedimentos presentes en la trinchera, enriquecidos en agua, actuarían como lubricante en la interfase entre las placas colisionantes, suavizando la rugosidad de la losa oceánica y así contribuyendo a disminuir el acoplamiento. De esta manera, los efectos de la colisión entre las placas se verían "amortiguados" y el levantamiento orogénico estaría disminuido. Por el contrario, en

sectores de trinchera vacía, este efecto lubricante estaría ausente permitiendo que se desarrollen altos valores de acoplamiento entre las placas. Estos altos valores favorecerían el desarrollo y posterior sustentación de sistemas orogénicos de mayores dimensiones.

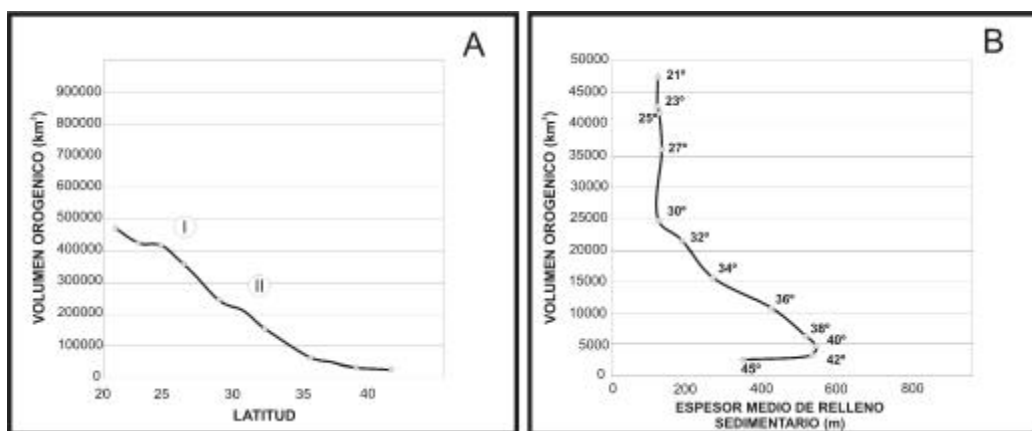
La presencia de sedimento en la trinchera depende, casi exclusivamente, del aporte continental siendo despreciable la cantidad de sedimento que es aportado por el fondo oceánico adyacente. La tasa de aporte continental está controlada por las condiciones climáticas reinantes en las áreas próximas al margen. Aquellos sitios de los Andes en donde las precipitaciones ocurren sobre la vertiente occidental de la cadena presentan una trinchera oceánica con grandes espesores de sedimentos. Contrariamente, en aquellos sitios en donde las precipitaciones se desarrollan sobre la vertiente oriental se observa una trinchera carente de sedimento. En el área de estudio podemos diferenciar dos sectores, sobre el margen occidental de la cordillera, que presentan condiciones climáticas muy disímiles: por un lado el sector que se ubica al norte de los 33°S en donde las condiciones son de extrema aridez, siendo las precipitaciones anuales menores a los 50 mm; y por otro el sector que se ubica al sur de esta latitud en donde existen condiciones de mayor humedad. Estas variaciones climáticas son consecuencia de la circulación oceánica y atmosférica y del efecto de sombra orográfica. Este efecto genera las condiciones áridas del norte de Chile y sur de Perú como consecuencia del bloqueo que provoca la cordillera de los Andes a los vientos húmedos provenientes de la región del Amazonas. A esto se suma la existencia de corrientes frías y fenómenos de upwelling que inhiben el desarrollo de precipitaciones sobre la costa. Al sur de los 31-33°S, las condiciones de circulación oceánica y atmosférica cambian notablemente. Los vientos húmedos provienen del oeste y generan precipitaciones sobre la vertiente occidental de la cordillera favoreciendo el desarrollo de sistemas fluviales que transportan sedimentos desde las áreas continentales hacia el pacífico, relleno la trinchera. Al norte de los 30°S, las condiciones de aridez limitan el transporte de importantes cantidades de sedimentos continentales hacia el océano.

**Resultados y conclusiones**

Para poder evaluar la hipótesis de Lamb y Davis (2003) y su relación con otros controles orogénicos que no habían

Latitud	Profundidad media de la trinchera (m)	Espesor sedimentario medio (m)	Volumen orogénico (km <sup>3</sup> )	Precipitaciones medias (mm/año)	Edad de fondo oceánico (Ma)
20-22	6040	122	472917	35	43
22-24	5923	120	427340	35	43
24-26	5450	125	417307	34	39
26-28	5360	132	359533	29	36
29-31	5144	125	246791	97	36
31-33	4858	185	214958	318	36
33-35	4743	267	156233	634	31
35-37	4721	421	107920	918	26
37-39	4491	514	63848	1281	26
39-41	4071	540	48186	1472	26
41-43	3190	530	33038	1482	15
44-46	3160	348	25905	1815	15

**Tabla 1:** Resultado cuantitativo de los elementos analizados en cada uno de los bloques.



**Figura 3:** A) Volumen orogénico vs. Latitud. Pueden observarse las dos anomalías localizadas en 27° S (I) y 33° S (II) y la progresiva disminución del volumen orogénico hacia el sur. B) Volumen orogénico vs relleno sedimentario.

sido incluidos en dicha propuesta, hemos dividido al área de estudio en doce bloques de 2° de latitud cada uno (Fig. 1B), los cuales se extienden desde el frente orogénico hasta el borde occidental de la trinchera. Para cada uno de estos bloques hemos obtenido los siguientes parámetros: i) el espesor de relleno sedimentario en la trinchera, ii) el volumen orogénico, calculado entre el nivel del mar y la topografía y el plano vertical imaginario ubicado en el frente orogénico activo (Fig. 2), iii) la profundidad media de la trinchera libre de relleno sedimentario, iv) la edad de la corteza oceánica subducida (NOAA) y v) las tasas de precipitación sobre la vertiente occidental de la cordillera (Global Climate Database, USGS). (Tabla 1). Estos valores fueron obtenidos a partir de retículas de datos y modelos de batimetría (NOAA) y elevación digital (GTOPO30 y SRTM90), los cuales fueron analizados y procesados usando Surfer 8.0, Global Mapper 6.0 y ArcView 3.2 (Tabla 1).

El análisis de los datos demostró la existencia de una relación variable entre el espesor del relleno sedimentario en la trinchera y el volumen orogénico existente. Si bien, como hemos citado anteriormente, el volumen orogénico disminuye hacia el sur de los 20°S, hemos observado la existencia de dos anomalías a esta tendencia general centradas en 27° y 33°S respectivamente. Las mismas se manifiestan como escalones en la curva del volumen orogénico (Fig. 3A). La primera de ellas, a los 27°, podría estar reflejando el rebote isostático regional en el sector sur del Altiplano que sería

producto de la delaminación litosférica (Kay et al. 1994). La segunda anomalía, ubicada en los 33° sur, podría ser consecuencia de la interacción entre la placa Sudamericana y la placa de Nazca anómalamente gruesa a estas latitudes, y por lo tanto con alta flotabilidad, debido al aditamento magmático que formara la dorsal de Juan Fernández.

En el sector comprendido entre los 30° y los 46° 30'S, la disminución de norte a sur del volumen orogénico, está acompañada de un progresivo aumento del espesor de sedimentos alojado en la trinchera. Sin embargo, en el sector que se desarrolla entre los 20° y 30° S, el espesor sedimentario medio se mantiene prácticamente invariable y con valores bajos, menores a los 500 m (Fig. 3B). A partir de estos resultados, podemos realizar dos observaciones: 1) en principio estas relaciones podrían estar de acuerdo con lo postulado por Lamb y Davis (2003), ya que los máximos volúmenes orogénicos coinciden con los sectores de menor relleno sedimentario y viceversa; 2) sin embargo el aparente control que ejerce el aumento del relleno sedimentario en el desarrollo de volumen orogénico en el sector 30°-46°S, no se registra en el sector 20°-30°S ya que éste varía independientemente del escaso a nulo material presente en las trincheras (Fig. 3B).

Lamb y Davis (2003) sostienen que las condiciones regionales de circulación oceánica y atmosférica actuales se habrían mantenido similares, en promedio y durante los períodos interglaciarios, desde el Mioceno tardío. De esta forma, analizamos también la relación existente entre el relleno

sedimentario y las precipitaciones anuales que se desarrollan sobre la vertiente occidental de la cordillera, verificando que los bajos valores de espesores que se observan entre los 20° y 30°S se corresponden con tasas bajas de precipitaciones. Sólo cuando las mismas se hacen más abundantes (al sur de los 30°S), el relleno sedimentario se incrementa de modo importante. De acuerdo con estos resultados, y asumiendo que las tasas de sedimentación en las trincheras se mantuvieron constantes, en promedio, desde el Mioceno tardío, podríamos afirmar que el clima jugó un papel importante en la regulación de la cantidad de sedimento que fue aportado a la trinchera durante, aproximadamente, los últimos 10 Ma. Sin embargo, no existen actualmente evidencias suficientes como para aceptar o rechazar la hipótesis de que el clima se haya mantenido constante durante los últimos millones de años en el sector de estudio (Rind 1998; Zachos *et al.* 2001; Starck y Anzótégui 2001).

Finalmente, a) tanto la existencia de anomalías al tren de variación regional centradas en torno a los 27° y 33°S respectivamente, las cuales parecen depender de factores locales tales como delaminación y subducción de dorsales, y b) la variación del volumen orogénico, en aquellos segmentos en los cuales el relleno de las trincheras no varía sustancialmente (20-30°S); nos permitiría concluir que el volumen orogénico andino no sería únicamente función del relleno sedimentario en las trincheras, siendo el caso que éste tenga alguna participación. Diversos factores estarían definiendo la topografía actual de los Andes en el sector de estudio, algunos de ellos dependientes de la variación en la edad de la losa oceánica subducida como así también, de su espesor. Estas dos variables determinan la flotabilidad de la losa oceánica la cual alteraría, al igual que el clima, el grado de acoplamiento existente entre las placas colisionantes y, en consecuencia, las tasas de acortamiento registradas.

### Agradecimientos

Los autores desean agradecer las exhaustivas y críticas revisiones de Gustavo González Bonorino y Ricardo Omarini, gracias a las cuales se han reevaluado numerosos

conceptos tendientes a la clarificación de la primera versión del texto.

### 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.
- 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.
- Ramos, V.A., Zapata, T., Cristallini, E. e Introcaso, A., 2004. The Andean thrust system: Latitudinal variations in structural styles and orogenic shortening. En: McClay, K.R. (Ed): *Thrusts Tectonics and Hydrocarbon Systems*. American Association of Petroleum Geologists, Memoir 82: 30-50.
- Rind, D., 1998. Latitudinal temperature gradient and climate change. *Journal of Geophysical Research* 103:(D6), 5943-5971.
- Starck, D. y Anzótégui, L. M., 2001. The late Miocene climatic change-persistence of a climatic signal through the orogenic stratigraphic record in northwestern Argentina. *Journal of South American Earth Sciences* 14, (7):763-774.
- Zachos, J., Pagani, N., Sloan, L., Thomas, E. y Billoups, K., 2001. Rhythms, and aberrations in the global climate 65 Ma to present. *Science* 209, 686-693.