

## EL SOLEVANTAMIENTO DE LOS ANDES CENTRALES

Kate Gregory

### 1. (Title)

La altura moderna es muy fácil de medir, pero desgraciadamente, la paleoaltura es mucho más difícil de obtener. En la última década, hemos desarrollado nuevos métodos de estimar la paleoaltura, como el uso de las paleofloras, y tenemos mejores datos de los métodos más antiguos, como estudios de acortamiento de la corteza. Entonces ahora existe una buena cantidad de estudios de varios métodos con implicaciones sobre la historia del solevantamiento de los Andes.

Hoy, voy a hablar sobre las estimaciones de paleoaltura para los Andes Centrales, especialmente las del Altiplano. También, voy a discutir los errores de las estimaciones, porque pueden ser bastante grandes, entonces es importante entender las incertidumbres.

Cuando se comparan las estimaciones de todos los métodos, estas son consistentes, y sugieren que la mitad del lanzamiento del Altiplano y de la Cordillera Oriental ocurrió después de 10 Ma. Sabemos menos sobre la Cordillera Occidental, pero parece que al menos la mitad del solevantamiento ocurrió después de 18 Ma.

### 2. Why is this interesting? (Plate tectonic diagram)

Por qué es interesante estudiar el solevantamiento de los Andes Centrales? Para la geofísica, los Andes son el ejemplo tipo de un sistema de subducción oceano-continental con deformación en la placa continental. La paleoaltura es una de las variables más interesantes que se pueden medir para la corteza, porque es una función del espesor, la temperatura, y la resistencia de la litósfera. Entonces las paleoalturas pueden ayudarnos a identificar los procesos dinámicos que crearon el orogen.

Para climatología, los Andes son la única barrera a la circulación atmosférica en el hemisferio sur, y los modelos climáticos muestran que tienen un gran efecto en el clima de Sudamérica, y quizás el mundo; es posible que su solevantamiento haya contribuido al enfriamiento global en el Neógeno. Entonces para entender la historia del clima y de la biota, se necesita estudiar la historia del solevantamiento.

### 3. Paleotopographic methods (Methods)

Hay una variedad de datos que se pueden usar para estimar la paleoaltura. La mayoría son datos indirectos, como el acortamiento de la corteza, la estratigrafía, la historia climática, las superficies geomórficas, la historia de erosión y sedimentación, y el volcanismo. Solo los métodos con puntos rojos pueden producir estimaciones cuantitativas. Voy a discutir los datos de estos métodos para los Andes Centrales, con un énfasis en los indicadores paleobotánicos de cambios climáticos, porque ellos son mi especialidad.

### 4. Crustal shortening and sedimentary history (Nazca plate)

Primero voy a hablar sobre el acortamiento y la estratigrafía. Los Andes son el producto de la subducción de la placa Nazca por debajo de la placa de Sudamérica. Los primeros depósitos tipo “foreland” aparecieron en el Cretácico tardío, alrededor de 89 Ma, y marcan el inicio del proceso de la orogénia Andina.

### 5. Deformation history (Cornell DEM)

En los Andes Centrales, la compresión creó un sistema de pliegue –cabalgamiento, y este sistema emigró al oriente durante la orogénia. En el segmento entre las latitudes de 15 a 24 grados, la Cordillera Occidental y zonas locales del Altiplano y la Cordillera Oriental estaban deformadas durante el Cretácico tardío hasta el Eoceno. Hubo depósitos marinos en el “foreland”, ahora el área del Altiplano y la Cordillera Oriental, que muestran que esta área estaba al nivel del mar hasta 60 Ma.

Alrededor de 27 Ma, la deformación se trasladó al este, al Altiplano y la Cordillera Oriental, y siguió hasta aproximadamente 10 Ma. El foreland, en el área que ahora es la Zona Subandina, estaba al nivel del mar hasta este tiempo.

Después, la deformación se trasladó otra vez al este. La compresión terminó en el Altiplano y la Cordillera Oriental, y empezó en la Zona Subandina entre 6 a 10 Ma.

## **6. Summary of history (Deformation history)**

Aquí pueden observar un resumen de esta historia, con el tiempo de deformación en verde, y el ultimo registro de sedimentos marinos en azul para cada provincia morfotectónica. Terry Jordan y sus colegas estimaron, basado en el monto de acortamiento, que la fase de deformación en el Eoceno produjo entre 25 a 50% del levantamiento de la Cordillera Occidental, y Simon Lamb estimó que alrededor de 30% del solevantamiento del Altiplano ocurrió antes de 25 Ma. Entonces estos estudios sugieren que la mayoría del solevantamiento ocurrió después del Eoceno para la Cordillera Occidental, y después del Oligoceno para el Altiplano y la Cordillera Oriental.

El problema con estas estimaciones es que solo tratan de la corteza superior. Pero pueden ser procesos en la corteza inferior y el manto que están manejando el solevantamiento. Por ejemplo, los cortes transversales balanceados de Kley y Monaldi sugieren que el acortamiento probablemente contribuyó solo alrededor de 30 % al espesamiento entre las latitudes de 18 a 26 grados. Entonces estos estudios pueden dar un idea del tiempo general de solevantamiento, pero es difícil producir estimaciones cuantitativas.

## **7. Climate from leaves (Fall leaves)**

Ahora voy a hablar sobre las estimaciones que están basadas en la climatología. Una variable climática que varía con la altura es la temperatura promedio anual. Se puede estimar esta variable con las paleofloras, usando el método de morfología de hojas dicotiledóneas.

Las hojas son una parte importante de la adaptación de una planta al clima, porque su tamaño y forma influye en el intercambio de calor, transpiración, fotosíntesis, y el suministro de nutrientes. Entonces hay ciertos tipos de hojas que son más eficientes para un clima que otro.

Por ejemplo, miren estos dos grupos de hojas. El grupo de arriba es típico de un clima templado-medio húmedo, y el de abajo de un clima subtropical y seco. Hay muchas diferencias morfológicas, lo más importante para nosotros es la diferencia en los bordes. Las hojas del clima templado tienden a tener bordes serrados, con dientes, mientras las hojas del clima caliente tienden a tener bordes enteros, sin dientes.

## **8. Databases of Climate from leaves (Data).**

Este gráfico muestra la relación entre la temperatura promedio anual versus el porcentaje de especies con bordes enteros para algunas bases de datos. Los símbolos rojos son del hemisferio norte. Hay una relación linear que explica 87 % de la variación con excepción de las floras subalpinas, aquí en azul, que tienen una relación distinta.

Estos círculos negros son datos de Bolivia y Perú. No hay muchos, pero sugieren que la vegetación actual de los Andes Centrales tiene una relación similar a la del hemisferio norte, especialmente una base de datos de Asia Este aquí en verde. Juntos, explican 97 % de la variación.

Entonces para estimar el clima de las paleofloras andinas, se puede usar este modelo, de los datos Sudamericanos y asiáticos. Las estimaciones tienen un error alrededor de dos grados.

Hay otro método que se puede usar para estimar el clima de las paleofloras se llama el método florístico. En este método, se suma los rangos ambientales de las especies modernas que son los parientes más cercanos a los géneros fósiles. Pero se necesita tener cuidado con este método, porque es posible que las especies modernas no representen el paleoambiente total del género.

## **9. Elevation from Climate (Hooghiemstra)**

Se puede usar la paleotemperatura de una flora para estimar su paleoaltura, porque, como se puede ver en este dibujo de los Andes Colombianos, cuando se sube, la temperatura promedio anual, en estos números negros, se enfría.

La tasa de enfriamiento adiabático en una columna de aire es alrededor de seis grados por kilómetro. Cuando hay un altiplano, la tasa de enfriamiento tiende a ser más bajo, porque hay efectos de calentamiento de la superficie alta. Por ejemplo, hoy la tasa de enfriamiento para las faldas orientales de los Andes es 4.4 grados por kilómetro. También la tasa varía con la humedad.

Para estimar la paleoaltura de las paleofloras Andinas, se puede usar esta ecuación: Se resta la temperatura moderna del sitio, y el cambio de la temperatura debido a cambios globales y a los

desplazamientos continentales, de la paleotemperatura. Este número se divide por la tasa de enfriamiento.

Las paleofloras en este estudio son Miocenas, y para el Mioceno, esta cantidad no es muy grande.

### **10. Miocene climate (Oxygen isotope data)**

Se puede estimar el cambio global con datos de isótopos de oxígeno de foraminíferas. En el Mioceno, Bolivia estaba en latitudes tropicales, entonces se usa esta curva de arriba. Parece que no ha habido grandes cambios en la temperatura de la superficie del mar desde el Mioceno tardío, quizá un grado. Hubo un calentamiento en el Mioceno medio de alrededor de dos grados y un enfriamiento de alrededor de 6 grados en el Mioceno temprano.

### **11. Location map (location map)**

Hay 4 floras que han sido estudiadas usando estos métodos. De más antiguo a más joven son la flora Chucal de 21 Ma, la flora Potosí del Mioceno temprano a medio, la flora Jakokkota de 10.7 Ma y la flora Pislepampa de 6-7 Ma. Primero voy a hablar sobre las floras Jakokkota y Potosí. La flora Jakokkota esta ubicada en el norte del Altiplano, cerca de la frontera con Peru, a una altitud de casi 4000 m y la flora Potosi esta ubicada en la Cordillera Oriental a una altitud de 4300 m.

### **12. Fossil leaves (leaves, lower)**

Para darles un idea de la paleovegetación Mioceno, aquí se pueden ver algunas morfoespecies de la flora Jakokkota. Es una flora diversa, con 48 morphoespecies en total. Las improntas foliares tienen una morfología muy distinta, con una alta cantidad de bordes enteros, alrededor de 74%, y hojas muy pequeñas, esto es 5 milímetros. Si ponemos esta morfología en los modelos climáticos, obtenemos una estimación de 23.6 grados para la temperatura y entonces entre 0 y 1400 m de altura.

La flora Potosí, estudiado por Berry, tiene una morfología muy similar, y estimé una temperatura un poco más caliente y la misma altitud. Entonces los dos tenían un clima subtropical y altitudes bajas.

### **13. Jakokkota flora (outcrop photo)**

Hoy los dos sitios tienen una temperatura promedio anual entre 8 y 9 grados, y la vegetación es puna seca, caracterizada por una baja diversidad de arbustos microfoliados. Esto es el sitio de Jakokkota. Recuerden que no ha habido grandes cambios en la temperatura de la superficie del mar desde el Mioceno tardío. Entonces la mayoría del cambio entre la paleotemperatura subtropical y la temperatura moderna de Jakokkota es debido a solevantamiento.

### **14. Pislepampa - (outcrop slide)**

Ahora voy a hablar sobre las floras Pislepampa y Chucal. La flora Pislepampa está ubicada en la Cordillera Oriental de Bolivia, a una altitud de 3600 m. Hoy el sitio tiene una temperatura promedio anual de 10 grados, y la vegetación es puna. Berry describió las improntas de esta flora en 1922, y yo regresé con Alan Graham para recolectar muestras de polinosporas.

### **15. Pollen (modern forest)**

En total, Alan Graham descubrió 33 géneros diferentes. La mayoría de estos géneros hoy se encuentran en el bosque montano húmedo, o bosque nublado. Aquí se puede ver una foto de bosque montano húmedo para darles un idea del tipo de vegetación. Se le encuentra en las faldas bajas de la Cordillera Oriental de Bolivia.

### **16a. Elevation ranges**

En este gráfico se puede ver que la mayoría de los géneros hoy se encuentran entre 1200 y 2000 m, con excepto de Cavanillesia que es un género muy raro. Recuerden que el clima del Mioceno tardío era más o menos similar al clima de hoy, entonces las polinosporas sugieren que la paleoaltura era mucho más baja que hoy. También usando el método florístico, Sylvia Palma-Heldt, en un estudio con Profesor Charrier, estimó que la flora Chucal tuvo una paleoaltura de 1000 m.

En la colección de improntas de Berry de Pislepampa, todos las morfoespecies tienen bordes enteros. No podemos derivar una estimación cuantitativa de la temperatura, porque la colección es muy pequeña. Pero podemos decir que las improntas son más consistentes con las alturas inferiores de los parientes de los microfósiles. Entonces, estimamos que la flora Pislepampa tenía un medioambiente similar a los límites inferiores del bosque nublado, o alrededor de 1200-1400 m, con una temperatura de 20 grados.

### ***16b. Elevation ranges***

Aquí está un resumen de las estimaciones del clima y altitud para las paleofloras. Por lo tanto, sugieren que el Altiplano y la Cordillera Oriental tenían altitudes no más de 1500 m en el Mioceno. Los problemas con este método son primero, el modelo entre los bordes y la temperatura, necesitamos más estudios de la vegetación actual de los Andes Centrales para calibrarlo, segundo la tasa de enfriamiento, que hoy varía mucho e introduce bastante error, y tercero, el asumir que el Mioceno tenía un clima similar a el de hoy. Sería mejor estudiar floras coetáneas de la costa para saber el paleoclima del nivel del mar. Entonces estas estimaciones tienen errores alrededor de 1200 m.

### ***17. Using the onset of aridity (SA precip)***

Ahora, me voy a referir a las otras estimaciones que usan cambios climáticos. Algunos autores han intentado correlacionar el inicio de la aridez en los Andes Centrales con su altura. Aquí está un mapa de precipitaciones para Sudamérica, con zonas áridas en naranja y roja. La Cordillera Occidental y el Altiplano son áridos debido a tres factores:

1. La sombra de lluvia causada por los Andes
2. La circulación atmosférica. Hay un anticiclón tropical en el sudpacífico, con un brazo de aire muy seco que desciende por la costa y
3. La corriente de agua fría de Humboldt por la costa, que es manejado por el anticiclón.

### ***18. Timing of drying trend (location map)***

Hay dos datos que sugieren que el desierto de Atacama y el Altiplano llegaron a ser áridos alrededor de 15 Ma. En la puna, la parte del sur del Altiplano, sedimentos tipos evaporitas empezaron a depositar alrededor de 15 Ma.

En Chile, hubo un episodio de enriquecimiento supergénico en los depósitos de cobre entre 23 a 15 Ma. Este episodio sugiere un descenso del nivel de saturación y entonces sugiere solevantamiento o secamiento. El enriquecimiento terminó cuando el clima se secó demasiado. Alpers y Brimhall calcularon tasas de erosión en la mina Escondida, y descubrieron que la tasa disminuyó a niveles muy bajas, consistente con un clima hiperárido, alrededor de 15 Ma.

### ***19. Mid-Miocene climatic event (Ox isotope data)***

La transición a un clima más árido ocurrió al mismo tiempo que un cambio climático global. Estos son los datos de isótopos de oxígeno otra vez, y esto es la curva para latitudes medias y altas. Se puede ver un incremento en la proporción de oxígeno 18 a 16 entre 15 a 12.5 Ma debido a una expansión de la capa de hielo de la Antártica y un enfriamiento de aguas profundas. Este enfriamiento causó una intensificación de la circulación atmosférica, la corriente de Humboldt, y la surgencia. Esta intensificación de la circulación probablemente contribuyó al secamiento. En efecto, al mismo tiempo había secamiento en Australia y África sin solevantamiento.

Pero, durante un año con la corriente El Niño, cuando hay aguas más templadas por la costa, el desierto de Atacama tiende a ser más lluvioso, y el Altiplano más seco, entonces no están en fase. Pero en el Mioceno, las dos regiones secaron al mismo tiempo, y este patrón sugiere una sombra de lluvia. Observaciones en regiones montañosas muestran que se necesita entre 1000 a 2000 m para crear una sombra de lluvia.

### ***20. fission track (location map)***

Ahora, voy a hablar sobre un estudio de huellas de fisión en la Cordillera Oriental para mostrar qué pasó con la tasa de erosión en la parte este del orógeno. Es un estudio de Benjamin y sus colegas localizado cerca de la ciudad de La Paz.

### **21. Fission track (Age vs. Uplift Rate)**

Este es un gráfico de la edad de las huellas de fisión versus la tasa de solevantamiento. Probablemente es el modelo más citado del solevantamiento de los Andes Centrales. Aparentemente, muestra que el solevantamiento aumentó significativamente después de 10 Ma. Pero, este gráfico es muy engañoso. Primero, las huellas de fisión miden la erosión, no el solevantamiento. Benjamén asumió que la erosión es una función de solevantamiento, pero esto no es siempre correcto. Entonces debe ser erosión, no solevantamiento.

Segundo, la tasa de erosión estaba calculado como el espesor erosionado dividido por la edad de las huellas de fisión. Por lo tanto, en realidad es un gráfico de la edad versus una constante sobre la edad, que es la ecuación para una curva hiperbólica. Entonces, por supuesto se obtiene una curva hiperbólica y no dice nada sobre la historia de erosión.

### **22. Age vs. elevation plot (Age vs. Elevation)**

Una manera mejor para interpretar los datos de huellas de fisión es un gráfico de la edad versus la altura. En este gráfico, la inclinación de la línea representa la tasa de erosión. Pueden ver que hay un cambio en la inclinación entre 25 a 15 Ma, que sugiere que la tasa de erosión incrementó. Otra vez, la pregunta es, es este cambio debido al solevantamiento, o al cambio climático. Probablemente es debido al solevantamiento, porque se ve un patrón de secamiento en el Altiplano y en Atacama y un incremento de erosión en la falda oriental.

### **23. Terrigenous flux**

Con más erosión, debe haber habido más sedimentos depositados en el abanico amazónico. Aquí está un gráfico del monto de deposición en el abanico versus edad. Se puede ver un incremento en la tasa de deposición alrededor de 10 Ma. Entonces el incremento es más joven que el incremento de erosión en la Cordillera Oriental, y correlaciona con la deformación de los sedimentos de foreland de la zona Subandina. Posiblemente significa que el incremento de erosión de Benjamén fue un evento local.

En resumen, pueden ver que estos datos sobre la tasa de erosión y secamiento son difíciles de interpretar, porque los cambios pueden deberse a cambios climáticos o a solevantamiento. Obviamente, una combinación del cambio climático y solevantamiento ocurrió entre 25 a 10 Ma de años, pero es difícil decir que monto de solevantamiento sin más estudios. Probablemente, no había altitudes menos a 1000 m en la Cordillera Occidental y Oriental alrededor de 15 Ma, porque probablemente había una sombra de lluvia.

## **Geomorphic surfaces**

### **24. Location map**

Ahora, voy a hablar sobre estudios geomorfológicos de superficies de erosión en la Cordillera Occidental de Perú y la Cordillera Oriental de Bolivia.

### **25. Geomorphology (Sebrier cross section)**

Sebrier y Tosdal y sus colegas documentaron tres etapas geomórficas en la Cordillera Occidental del Perú. El más viejo es una superficie de erosión de 18 a 25 Ma de baja relieve en la Cordillera que corresponde a una planicie de agradación en la Cordillera Costal, que contiene sedimentos marinos. Si había la misma inclinación en el Oligoceno, estos sedimentos marinos sugieren que la Cordillera Occidental tenía una altura alrededor de 1000–1500 m. Probablemente tenía una inclinación menor porque ahora estos sedimentos son inclinados. Entonces, probablemente tenía una altura no más que 1000 a 1500 m.

### **26. (Eastern Cordillera surfaces) (Lamb map and cross-section)**

También, hay una superficie de erosión de relieve baja en la Cordillera Oriental de Bolivia estudiado por Lorcan Kennan. Tiene una edad de 10 Ma. Este corte transversal muestra el gradiente de los restos de la superficie y de los valles modernos, y el gradiente reconstruido del Mioceno tardío. Recuerden que alrededor de 10 Ma, el foreland estaba en la Zona Subandina, y estaba al nivel del mar.

Si la inclinación de la superficie no ha cambiado, sugiere que la Cordillera Oriental tenía una altitud de alrededor de 1000 – 1500 m.

Pero hay problemas con esta estimación. Primero, no es como las superficies en la Cordillera Occidental, donde se puede proyectar la inclinación de la superficie a la planicie de agradación. había mucha deformación después de 10 Ma en la Zona Subandina, y pudo haber sido un knickpoint, o un cambio de inclinación repentino, como hoy. También asumimos que la inclinación de la superficie en la Cordillera Oriental no ha cambiado. Entonces, probablemente hay un error de al menos 1000 m.

## **Geochemistry**

### **27. Location map**

Ahora, voy a hablar brevemente sobre la evidencia de la geoquímica de rocas volcánicas. Kay y sus colegas analizaron la composición de los elementos trazas de rocas volcánicas Oligocenas y Miocenas de tres lugares en Chile.

### **28. LM (ree patterns)**

Ahora, los volcanes por arriba de una corteza gruesa son enriquecidos en los elementos “rare earth” ligeros, mientras los por arriba de una corteza delgada son reducidos. Esta relación es debido a la presencia de granate, que es estable solamente en profundidades muy grandes en la corteza. Entonces se puede usar esta correlación entre proporciones altas de los elementos “rare earth” ligeros y pesados y corteza gruesa para saber algo de la coordinación del espesamiento de la corteza.

Basado en los datos geoquímicos de las rocas Chilenas, Kay et al. estimaron que la corteza se espesó de 35 a 40 km en el Oligoceno tardío y Mioceno temprano a 50 a 55 km en el Mioceno medio a espesores modernos de 55 a 65 km no después de 6 Ma.

El problema con estas estimaciones es primero, en la calibración entre espesor y la proporción, el espesor es inferido de la altura, entonces pueden haber errores grandes. También, es difícil convertir espesor a altura porque se necesita saber las condiciones en el manto. Entonces estos datos sugieren que había levantamiento en el Mioceno, pero es difícil obtener estimaciones cuantitativas.

### **29. SUMMARY OF DATA**

Este gráfico es un resumen de todas las estimaciones que he discutido. Muestra edad versus el porcentaje de la altura moderna, no la paleoaltura prima, porque con esta variable es más fácil comparar sitios con alturas modernas diferentes.

La parte en amarillo es la fase de la deformación principal del Altiplano, y las barras muestran las estimaciones de paleoaltura, con rojo para la Cordillera Occidental, azul para el Altiplano, y verde para la Cordillera Oriental.

Todas las estimaciones tienen una precisión baja, con errores alrededor de 1000 a 1500 m. Pero noten que los errores de cada método dependen de factores diferentes. Entonces el hecho que las estimaciones son más o menos consistentes sugiere que los valores actuales no están ubicados a los extremos de los límites de confianza.

Los estudios tectónicos y geomórficos sugieren que la Cordillera Occidental tenía no más de 50 % de su altura moderna no después de 18 Ma, y los datos geoquímicos sugieren que probablemente alcanzó las alturas modernas no después de 6 Ma.

Los estudios tectónicos, geomórficos, y paleobotánicos sugieren que el Altiplano y la Cordillera Oriental tenían no más de 50% de su altura moderna no después de 10 Ma. Entonces había sollevamiento significativo en los Andes Centrales en el Mioceno tardío y el Plioceno. Pero no hay evidencia para un incremento exponencial de la tasa en el Plioceno, como ha sido inferido de los datos de huellas de fisión.

Todos los hechos discutidos aquí parecen interesantes en relación al significativo sollevamiento que ocurrió después de la fase del acortamiento de la corteza superior del Altiplano.