

ORIGEN Y EVOLUCIÓN DE LA CORTEZA CONTINENTAL

Agüera Àngel, Cristina

Tutor: **Martínez, Francisco J.**¹

¹Petrologia y geoquímica, Departament de Geologia, Universitat Autònoma de Barcelona.

RESUMEN

Tanto en el Arcaico como hoy en día, los granitoides constituyen el núcleo de la corteza continental formada en las zonas de subducción. Parte de estos granitoides proceden de magmas basálticos hidratados que ascienden desde el manto hasta la base de la corteza donde son sometidos a cristalización fraccionada para producir magmas graníticos más evolucionados. Hay otros modelos que explican que los magmas evolucionan desde la base de las mesetas oceánicas, pero este modelo es contradictorio ya que tales no tienen agua que es esencial para formar fundido granítico.

La corteza hadeana era máfica y sufrió una fusión parcial interna, esta fue interrumpida por un bombardeo meteorítico. Después de esto, hace unos 3900 Ma, la tectónica de placas comenzó a funcionar.

A final del Arcaico y hasta finales del Proterozoico, la corteza continental creció episódicamente por la convección acelerada del manto. El mayor volumen de corteza continental se dio con la llegada de superplumas mantélicas desplazando material de la parte superior del manto y acelerando la velocidad de subducción.

RESUM

Tant a l'Arqueà com avui en dia, els granitoids constitueixen el nucli de l'escorça continental formada a les zones de subducció. Part d'aquests granitoids procedeixen de magmes basàltics hidratats que ascendeixen des del mantell fins a la base de l'escorça on són sotmesos a cristal·lització fraccionada per a produir magmes granítics més evolucionats. Hi ha altres models que expliquen que els magmes evolucionen des de la base dels altiplans oceànics, però aquest model es contradictori ja que tals no tenen aigua que és essencial per a formar fos granític.

L'escorça hadeana era màfica y va patir una fusió parcial interna, aquesta va ser interrompuda per un bombardeig meteòric. Després d'aquest, fa uns 3900 Ma, la tectònica de plaques va començar a funcionar.

A final de l'Arqueà i fins a finals del Proterozoic, l'escorça continental va créixer episòdicament per la convecció accelerada del mantell. El major volum d'escorça continental es va donar amb l'arribada de superplomes mantèl·liques desplaçant material de la part superior del mantell y accelerant la velocitat de subducció.

ABSTRACT

Both the Archaic as today, the granitoids are the core of the continental earth's crust formed in subduction zones. Part of these granitoids are from basaltic hydrated magmas that ascend from mantle to the base of the earth's crust where they are subjected to fractional crystallization to produce more evolved granitic magmas. There are other models that explain the magmas evolve from the base of oceanic plateaus, but this model is contradictory as such do not have water that is essential to form granitic molten.

The Hadean crust was mafic and suffered internal partial melting, this was interrupted by a meteorite bombardment. After this, about 3900 million years, and plate tectonics began operating.

At the end of the Archean and until the last of Proterozoic, the continental earth's crust grew episodically by mantle accelerated convection. The largest volume of continental crust occurred with the arrival of mantélica junior lightweight material moving upper mantle and accelerating the rate of subduction.

ÍNDICE

| | |
|---|-------|
| 1. Introducción..... | 4 |
| 1.1. Características principales de la corteza terrestre..... | 4-5 |
| 1.2. La corteza continental..... | 5-6 |
| 1.2.1. La composición promedio de la corteza continental actual..... | 6-7 |
| 2. Sucesos desde la formación de la Tierra: Hadeano, Arcaico y Proterozoico..... | 7 |
| 2.1. Hadeano (4658-3850 Ma)..... | 8 |
| 2.1.1. El océano de magma y la diferenciación del núcleo mantélico (4658-4400 Ma)..... | 8 |
| 2.1.2. Protocorteza continental (4400-4000 Ma)..... | 8 |
| 2.1.3. Bombardeo meteórico (4000-3850 Ma)..... | 8-9 |
| 2.2. Arcaico (3850-2500 Ma)..... | 9 |
| 2.2.1. Composición de las tierras arcaicas..... | 9-10 |
| 2.2.2. La tectónica arcaica..... | 10-11 |
| 2.3. La transición Arcaico-Proterozoico (2500 Ma)..... | 11-12 |
| 3. El origen de la corteza continental..... | 12 |
| 3.1. Generación de corteza continental..... | 12-14 |
| 3.2. El papel del manto en la generación de corteza continental..... | 14-15 |
| 4. La evolución de la corteza continental..... | 15-16 |
| 4.1. El crecimiento de la corteza continental..... | 16-18 |
| 4.1.1. Evidencias geoquímicas y de campo esenciales..... | 18-19 |
| 4.1.2. ¿Cómo fue el crecimiento de corteza continental temprana?..... | 19-20 |
| 5. Conclusiones..... | 20-23 |
| 5.1. El material más antiguo de la Tierra desvela que la corteza se formó rápidamente → se descubre un circón de 4400 Ma (24/02/2014)..... | 23 |
| 6. Agradecimientos..... | 24 |
| 7. Anexo..... | 25-27 |
| 8. Bibliografía..... | 28-29 |

1. INTRODUCCIÓN

Los estudios del origen y la evolución de la corteza continental en los últimos 20 años se han basado principalmente en la teoría de la tectónica de placas, combinado con nuevos conocimientos de la litosfera, conocimientos geoquímicos y de paleomagnetismo y modelos geofísicos de los procesos del manto.

Hay muy poca información sobre cómo era la Tierra en épocas tan antiguas como el Hadeano (4568–3850 Ma), el Arcaico (3850–2500 Ma) o el Proterozoico (2500–541 Ma) dado que en esas edades tuvieron lugar muchos eventos que borraron toda huella posible, y que al ser tan antiguas, a lo largo de 600 Ma hasta hoy, la Tierra ha sufrido cambios muy intensos que hacen aún más difícil la reconstrucción de esos tiempos tan antiguos. Es necesario comparar los procesos actuales que tienen lugar en el planeta con los que pudo haber en el pasado. En una Tierra temprana tuvo que haber algún tipo de tectónica de placas primitiva y cambios en la dinámica interna de la Tierra como consecuencia de un enfriamiento global que provocó cambios en el comportamiento de la litosfera, esto sugiere mecanismos tectónicos y magmáticos que han dado lugar a la formación y crecimiento de la corteza a lo largo de los tiempos geológicos. Si no se hubiera formado corteza continental, la Tierra sería un mundo totalmente acuático envuelto por una corteza basáltica y cubierta por un océano global.

En el trabajo empezaré haciendo una breve descripción de la corteza terrestre, explayándome en la composición de la corteza continental (importante para comprender las claves del pasado). Seguidamente explicaré los eventos principales que tuvieron lugar en la Tierra desde su formación hasta los 2500 Ma (límite Arcaico-Proterozoico). En este trabajo hay dos puntos clave, el origen de la corteza continental, donde haré hincapié en la generación de esta, y las diferentes hipótesis sobre su origen y evolución. Finalmente acabaré con las conclusiones de los puntos clave del origen y la evolución de la corteza continental (hipótesis y teorías que la rodean).

1.1. Características principales de la corteza terrestre

La corteza terrestre es la capa superficial sólida de la Tierra, es una capa muy delgada, su espesor oscila entre los 60 km en los continentes y los 7 km en los fondos oceánicos. Hay dos tipos de corteza terrestre, la corteza continental y la corteza oceánica. Existen diferencias significativas entre ellas (Tabla 1).

| Corteza oceánica | Corteza continental |
|--------------------------------|------------------------------------|
| Espesor de ~6 km | Espesor de 35 km (media) |
| ~Uniforme | Heterogénea |
| Basáltica | Granítica |
| Densa → ~2,9 g/cm ³ | Poco densa → 2,7 g/cm ³ |
| Impermanente | Permanente |

Tabla 1: Diferencias principales entre la corteza continental y la corteza oceánica (Elaboración propia)

La corteza continental ocupa el 41,2% de la superficie terrestre, pero solo representa el 0,35% de la masa total del planeta. Es una reserva muy importante de elementos traza (contiene hasta el 70% del total de estos elementos). Tiene una composición granodiorítica, es muy antigua y es heterogénea. Esta corteza está compuesta por una gran variedad de tipos de rocas

(sedimentarias, ígneas y metamórficas) cuya edad abarca desde los 4000 Ma a muy recientes (Figura 2), esto refleja su historia larga y compleja.

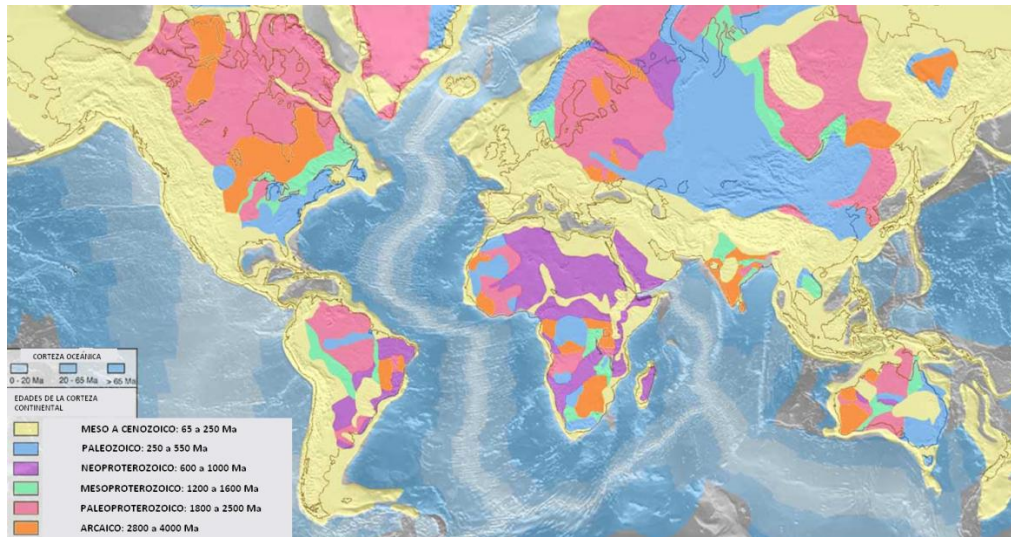


Figura 2: Mapa de la Tierra con las edades de la corteza continental y de la corteza oceánica (U.S. Geological Survey)

La corteza oceánica es joven (200 Ma) y delgada, de composición basáltica, oscura, con rocas volcánicas y rica en Mg y Fe, es más o menos uniforme. Es más densa que la corteza continental y es impermanente porque se va renovando constantemente a través de las dorsales oceánicas.

En la interfase entre continentes y océanos existe un tipo de corteza con estructura tipo continental pero grosor intermedio, del orden de los 20 km, se conoce como corteza transicional (Figura 3).

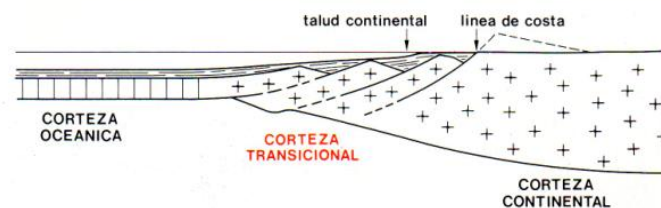


Figura 3: Esquema de la corteza terrestre que incluye la corteza continental, la corteza oceánica y la corteza transicional (Anguita Virella, F. et. al., 1991)

La composición de la corteza continental es muy importante porque la distribución y composición de los elementos de la corteza puede usarse para desarrollar modelos de evolución corteza-manto y pruebas de la producción y evolución de la corteza a lo largo del tiempo.

1.2. La corteza continental

La corteza continental es la parte de la litosfera que está sobre la discontinuidad de Mohorovicic (≈ 35 km). Está definida sísmicamente como el material con velocidades de ondas p menores de 8 km/s.

La corteza continental se generó durante el Arcaico. La diferenciación de la corteza podía haber sido alcanzada por procesos de fusión parcial y segregación de abundante fundido félsico desde los residuos máficos, esto originó la heterogeneidad de la corteza continental. Los magmas que cristalizaron después de la migración desde niveles menos profundos de la corteza contribuyeron a la evolución de la corteza superior, la corteza inferior está formada por los residuos.

Una fuente significativa de calor adicional, aparte de la de debajo del magma máfico en la base de la corteza, es la presencia y la distribución de elementos de producción de calor (U, Th, K). La deformación, el magmatismo y la erosión redistribuyen los elementos productivos de calor.

Hace 2500 Ma la composición de la parte superior de la corteza tenía menos elementos evolucionados, estaba compuesta por una mezcla entre basaltos y granitos ricos en sodio (los TTG). Esta composición difiere de la considerablemente diferente de la corteza continental actual, que es dominada por granitos ricos en potasio. Este cambio de composición parece que está relacionado con la tectónica de placas. Antes de los 2500 Ma, se estaba reciclando rápidamente la corteza oceánica debido a los altos e intensos niveles de calor radioactivo que condujeron a la creación de un motor para las placas tectónicas.

La fuente de roca granítica en la corteza continental la encontramos en el vulcanismo de subducción y en la acumulación de calor dentro de la corteza continental inferior que, en sí misma, puede causar fusión, y el magma resultante migra hacia la superficie, aunque parte de este calor podría venir de la descomposición de los elementos radioactivos. La fuente más probable de magma basáltico es el magma que asciende desde la profundidad del manto y queda atrapado bajo una capa granítica.

1.2.1. La composición promedio de la corteza continental actual

La composición de las cortezas media e inferior es más problemática porque hay menos afloramientos.

- **Corteza superior (<15 km) →** es litológicamente heterogénea y granodiorítica, constituye rocas sedimentarias dispuestas sobre rocas volcánicas y graníticas intrusivas, es de composición global félsica ($\pm 66\%$ de SiO_2), con $V_p = 6,2$ km/s.
- **Corteza media (± 15 -25 km) →** es litológicamente heterogénea, equilibrada en facies anfibolítica, de composición global intermedia ($\pm 60\%$ de SiO_2 ; 3,5% MgO), con $V_p = 6,2$ -6,5 km/s.
- **La corteza inferior (± 25 -45 km, o más) →** también es heterogénea litológicamente. Como promedio corresponde a una granulita máfica con piroxenos aluminicos y plagioclasa, es de composición basáltica ($\pm 52\%$ de SiO_2 ; 7% MgO), con $V_p = 6,9$ -7,2 km/s.

La corteza inferior más profunda ha sido exhumada desde profundidades próximas al Moho. La corteza continental, comparada con el manto, es en promedio relativamente rica en SiO_2 y pobre en MgO , y está enriquecida en elementos incompatibles respecto a la composición de la Tierra primitiva.

Hay mucha discusión sobre cuál es la composición promedio de la corteza continental, el modelo andesítico de Taylor y Mc Lennan (1981-1985) parece ser que ha sido el que ha tenido más aceptación entre los científicos. Este modelo se basa en la observación de que el crecimiento de corteza continental moderna tiene lugar principalmente en los márgenes convergentes, y tiene dos asunciones principales razonables: primero, que la corteza se puede dividir en dos partes, superior e inferior, diferentes geoquímicamente; segundo, que la composición global es andesítica. Dadas estas premisas y conocida la composición de la corteza superior, se deduce que la corteza inferior debe ser basáltica. Este modelo andesítico suscitó bastante criticismo porque hay discrepancias con la composición deducida y observada de la corteza inferior. Nuevos modelos en los 90 y en la primera década de los 2000 incluyen una estimación de la composición y volumen de la corteza media, ignorada anteriormente. Los volúmenes relativos de la corteza superior, media e inferior son del 31,7%, 29,6% y 38,8%.

Estimaciones de la composición de la corteza superior

En la corteza superior se pueden hacer dos aproximaciones según su composición. Por una parte tenemos los patrones de REE de las pizarras (shales-limolitas) marinas post Arcaicas que muestran una gran homogeneidad. Por otra parte, están los loess (sedimentos glaciares de grano fino transportados por el viento), que son producto de la erosión glacial, esta tritura mecánicamente y mezcla amplias áreas de roca cuyas partículas no han sufrido procesos de fraccionación debidos a la meteorización. Los loess parecen registrar la composición cortical más fielmente que las pizarras.

Estimaciones de la composición de la corteza inferior

La estimación de la composición de la corteza inferior es más difícil porque hay que integrar datos geofísicos y geoquímicos, hay que valorar la importancia relativa de las rocas aflorantes de la corteza superior comparándolas con los xenolitos corticales inferiores y, finalmente, está el dilema de si la corteza inferior formada actualmente es diferente a la corteza de la Tierra primitiva.

2. EPISODIOS DES DE LA FORMACIÓN DE LA TIERRA: HADEANO, ARCAICO Y PROTEROZOICO

Generalmente, la historia de los episodios de la Tierra desde su origen se puede dividir en 4 grandes periodos geológicos (Figura 4): el Hadeano, que se extiende desde el final de la acreción del planeta (± 4658 Ma) hasta los 4000 Ma, que es la edad de las rocas más antiguas conocidas; el Arcaico, cuyo límite con el Proterozoico (± 2500 Ma) se caracteriza por un cambio fundamental en la dinámica terrestre; y por último el Fanerozoico (540 Ma), que significa la aparición y proliferación de los seres vivos que tienen esqueleto interno o externo. Me centraré en explicar el Hadeano, el Arcaico y la transición Arcaico-Proterozoico.

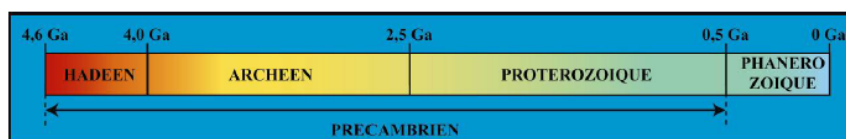


Figura 4: Esquema de los 4 grandes periodos de la Tierra (Martin, H.).

2.1. Hadeano (4658-3850 Ma)

De manera sistemática, el Hadeano se puede dividir en 3 episodios mayores:

2.1.1. El océano magmático y la diferenciación del núcleo mantélico (4568-4400 Ma)

Justo después de la acreción, el calor acumulado era importante y no podía ser eliminado de manera eficiente porque aún no se había establecido la convección interna. Esto dio lugar a una fusión de toda la parte exterior del joven planeta que formó el océano de magma (Anexo, Imagen 1). Dentro de este magma se produjo una primera diferenciación del planeta, la prueba de esto se encuentra en las anomalías isotópicas de ^{142}Nd (Boyett y Carlson, 2005). El metal y los silicatos son diferenciados, por un lado tenemos un núcleo metálico y por otro un manto silíceo. Los datos basados en la radioactividad extinta de ciertos isótopos (por ejemplo, ^{182}Hf) muestran que la diferenciación tuvo lugar muy temprano, alrededor de los 30 Ma después de la acreción (Kleine *et. al.*, 2002). Después de la formación del núcleo podría haberse creado el campo magnético que aún hoy protege a la superficie terrestre del viento solar.

2.1.2. Protocorteza continental (4400-4000 Ma)

Se han hecho dataciones puntuales de circones sedimentarios en Jack Hill (Australia) que han revelado una gama de edades que van desde los 4400 a los 4000 Ma (Wilde *et. al.*, 2001). El circon contenía inclusiones de cuarzo, feldespato y mica que demuestran que cristalizó en un tipo de magma granítico. Los granitos son casi exclusivos de la corteza continental, se puede decir que esta se empezó a formar hace 4400 Ma y que continuó su génesis durante el Hadeano. Basado en datos isotópicos, el volumen de corteza continental hace 4000 Ma era de entre un 10 y un 15% del volumen de la corteza actual.

La composición isotópica del oxígeno ($\delta^{18}\text{O}$) de los circones de Jack Hills demostró que el magma reaccionó con grandes volúmenes de agua líquida (Mojzsis *et. al.*, 2001). Como consecuencia de esto, a partir de los 4400 Ma, la temperatura de la superficie terrestre era suficientemente baja como para permitir que el agua estuviera en estado líquido, el océano de magma se había enfriado para permitir grandes extensiones de agua (océanos) en la superficie de la Tierra. Estos hechos son muy importantes porque implican las condiciones para la ejecución de una química prebiótica, así como el surgimiento y desarrollo potencial de la vida en la Tierra, esta tuvo lugar 150 Ma después de la acreción del planeta.

2.1.3. Bombardeo meteórico (4000-3850 Ma)

Estudios recientes basados en la intensa formación de cráteres de la superficie lunar y teniendo en cuenta que la Tierra había sido más masiva y atraía a un mayor número de meteoritos de gran tamaño, desarrollan un modelo que teoriza que todo el periodo Hadeano fue objeto de un intenso y continuo bombardeo de meteoritos (Anexo, Imagen 2). Este bombardeo debió hacer imposibles la existencia de continentes y océanos. Estudios aún más recientes proponen que el bombardeo meteórico fue un fenómeno episódico que duró entre 4000 y 3850 Ma, es el fenómeno llamado “Bombardeo pesado tardío” o “Bombardeo intenso tardío” (Gomes *et. al.*, 2005). El origen de este bombardeo vendría de una modificación de las orbitas de Júpiter y Saturno que provocó la expulsión de la parte interior del cinturón de

asteroides a la parte central del Sistema Solar. De esta teoría se desprende que antes del bombardeo de meteoritos (antes de los 4000 Ma) la superficie de la Tierra no era hostil y podría permitir la formación de corteza continental estable y océanos, a este periodo también se le llama “Tierra primitiva fresca” (Valle *et. al.*, 2002). La pregunta que se hacen los científicos es si este bombardeo meteórico pudo tener o no un efecto esterilizante para nuestro planeta (vaporización de los océanos, fusión de la corteza continental y destrucción de una vida hipotética).

2.2. Arcaico (3850-2500 Ma)

La distribución de las tierras arcaicas en nuestro planeta está extensamente repartida, esta corteza continental primitiva se encuentra en grandes cratones presentes en todos los continentes (Figura 7).

El arcaico es un periodo de intensa actividad magmática que condujo a la extracción de 3/4 del volumen de la corteza continental actual a partir del manto.

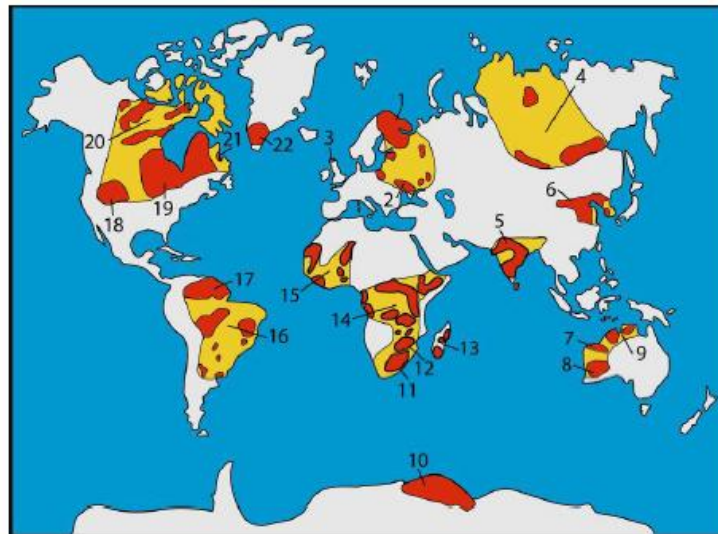


Figura 7: Distribución de las tierras arcaicas. Las manchas rojas del mapa indican las tierras arcaicas aflorantes, el color amarillo es el recubrimiento de estas por formaciones sedimentarias (Martin, H.). 1: Escudo Báltico, 2: Escudo de Ucrania, 3: Escudo escocés, 4: Escudo siberiano, 5: Escudo indio, 6: Cratón chino-coreano, 7: Bloque de Pilbara, 8: Bloque de Yilgarn, 9: Bloque de Australia del norte, 10: Complejo de Napier, 11: Cratón de Kaapvaal, 12: Cratón de Zimbabwe, 13: Cratón de Madagascar, 14: Escudo de África central, 15: Escudo de África del este, 16: Cratón de San Francisco, 17: Escudo de Guyana, 18: Provincia de Wyoming, 19: Provincia superior, 20: Provincia del Esclavo, 21: Escudo del Labrador, 22: Escudo de Groenlandia.

Las rocas más antiguas que afloran sobre grandes superficies ($\pm 3000 \text{ km}^2$) son los gneises de Amitsoq en Groenlandia, tienen una edad de $\pm 3822 \text{ Ma}$. Hay pequeños volúmenes de rocas volcánicas y sedimentarias asociadas a estos gneises con una edad de $\pm 3872 \text{ Ma}$.

2.2.1. Composición de las tierras arcaicas

El Arcaico presenta 3 grandes categorías litológicas principales:

- **Zócalo de granito gnéisico (Anexo, Imagen 3)** → estas formaciones son las más abundantes del Arcaico, representan un 80% del total. Estas rocas se conocen también

con el nombre de **TTG** (Tonalita, Trondhjemitita y Granodiorita), son rocas ígneas que contienen cuarzo, plagioclasa, biotita y, a veces, hornblenda. Son de textura fanerítica, esto indica que cristalizó lentamente a grandes profundidades.

Modelos geoquímicos recientes indican que la formación de TTG requiere una fuente enriquecida en LILE (*Large Ion lithophile elements* o Elementos litófilos de Radio Grande), similar a los basaltos de meseta oceánica, por lo tanto, los TTG se debieron originar por la subducción de estas grandes mesetas basálticas (Martín, H. *et. al* 2014). En el Arcaico había una corteza oceánica subducida mucho más joven y con un gradiente geotérmico mucho más alto. En estas condiciones el basalto alcanzó la temperatura de fusión antes de deshidratarse, por lo que podría fundir. Durante este periodo la fuente de la corteza continental no era la cuña del manto. Este modelo de génesis muestra que la Tierra Arcaica era mucho más caliente que hoy.

- **Los cinturones de rocas verdes (Greenstone belts) (Anexo, Imagen 4) →** son rocas volcánicas y sedimentarias que afloran en la superficie de la tierra sobre el zócalo de TTG. Frecuentemente forman estructuras sinformes alargadas (>100 km de largo y 20 km de ancho), de ahí su nombre. Típicamente estos cinturones tienen una serie litológica que comienza con lavas ultramáficas (Komatiites, Anexo, Imagen 5), seguidas de lavas básicas (basaltos) intercaladas con sedimentos predominantes en la parte superior de la serie (BIF o *Banded Iron Formation*) (Anexo, Imagen 6).
- **Los granitos tardíos →** son llamados granitoides ricos en magnesio, representan el 5-10% del volumen en el Arcaico. Se trata de granitos gnéisicos intrusivos en los cinturones de rocas verdes, son de afinidad calco-alcalina y, generalmente, ricos en magnesio y contienen fenocristales de feldespato potásico.

2.2.2. La tectónica arcaica

En el Arcaico se produce una evolución de la corteza terrestre, por lo tanto, tuvo que haber una tectónica de placas y una estructura interna terrestre similar a la que tenemos hoy en día. Sin embargo, las condiciones en las que operaban eran muy diferentes a las actuales, la producción de calor terrestre era mucho mayor (Figura 10). Se calcula que había más actividad tectónica debido a que había una mayor velocidad de producción de litosfera, por lo tanto, había mayor actividad en las dorsales y un mayor número de ellas, también mayor actividad en las zonas de subducción y muchas más placas y más pequeñas (Figura 11).

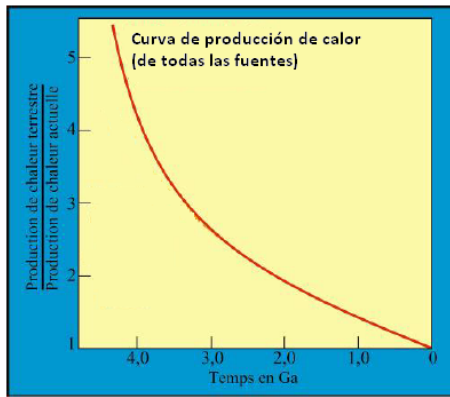


Figura 10: Variación de la producción de calor Terrestre en función del tiempo en Ga (Giga-Años) (Martin, H.).

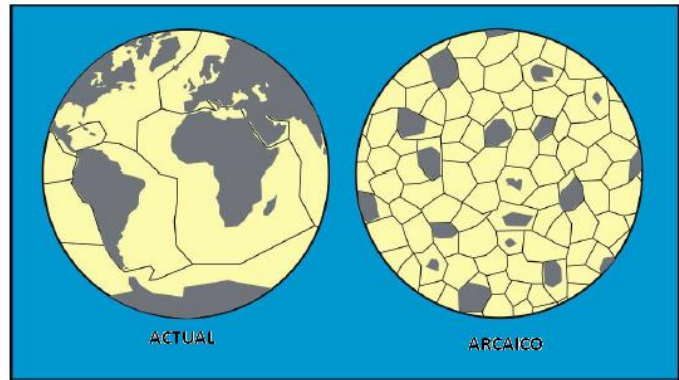


Figura 11: Diagrama comparativo del tamaño de las placas actuales con las del Arcaico (Martin, H.).

2.3. La transición Arcaico-Proterozoico (2500 Ma)

La transición Arcaico-Proterozoico fue un periodo de grandes cambios en la Tierra. Algunas rocas abundantes en el Arcaico disminuyeron drásticamente o desaparecieron, se trata de las Komatiites, los BIF y los TTG (Figura 12). Sin embargo, hay otras rocas que son abundantes en el Proterozoico, cuando en el Arcaico eran raras, son las andesitas, las rocas magmáticas peralcalinas y las eclogitas. Estas variaciones litológicas reflejan cambios muy profundos en los mecanismos petrológicos.

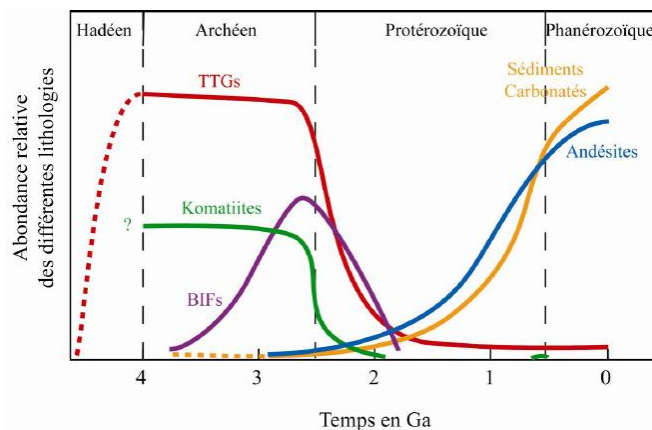


Figura 12: Evolución temporal de las abundancias de algunas litologías (Martin, H.)

La presencia de Komatiites indica que la parte superior del manto se encontraba a una temperatura significativamente más alta durante la primera mitad de la historia de la Tierra. Más tarde el planeta se enfrió, ya no se producían las altas temperaturas necesarias para la génesis de Komatiites (1600-1650 °C), por lo tanto, dejaron de producirse después de los 2500 Ma.

El tamaño de las placas litosféricas se fue incrementando desde el Arcaico. Todos los cambios que tienen lugar en este periodo son el resultado de un único fenómeno, el enfriamiento gradual de la Tierra. Debido al decrecimiento del gradiente geotérmico global, se fueron estabilizando, gradualmente, grandes áreas continentales, se formaron los Cratones.

Las rocas del Proterozoico se pueden dividir en tres grandes grupos: 1) Haces de diques basálticos y enormes intrusiones basálticas estratiformes, 2) Macizos de anortositas y rocas emparentadas, 3) Cinturas orogénicas móviles.

3. EL ORIGEN DE LA CORTEZA CONTINENTAL

La corteza continental, como se ha visto anteriormente, es comúnmente descrita por tener una composición intermedia (andesítica). Esto contrasta con las rocas máficas de la corteza oceánica y de naturaleza ultramáfica del manto, de donde deriva la corteza continental. Es ampliamente aceptado que la corteza continental ha sido extraída del manto, las evidencias geoquímicas y geocronológicas indican que la corteza continental no fue producto de la acreción primitiva, sino que se formó más tarde.

La corteza continental y la litosfera con creadas, destruidas y modificadas en los márgenes continentales (ambientes dinámicos), es en ellos donde se puede estudiar la evolución y origen litosféricos. La nueva corteza continental es acrecionada tectónica o magmáticamente en masas crustales preexistentes de subducción, transformantes y de márgenes de rift (Figura 13). Los procesos siguientes son el cambio en la composición y estructura de la corteza continental en estos márgenes.

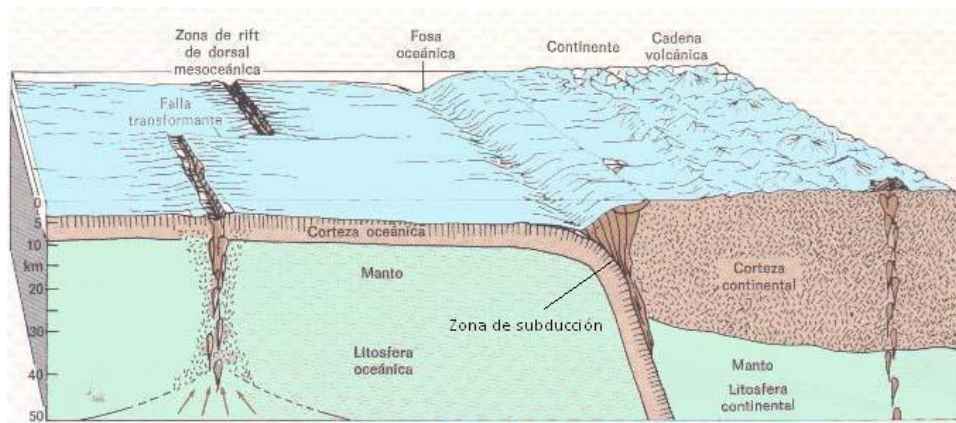


Figura 13: Procesos tectónicos que se producen en la litosfera actual (Ministerio de Educación y Ciencia, Proyecto Biosfera).

La composición principal de la corteza continental está más evolucionada que los magmas derivados del manto, esto requiere una fusión menos profunda, o una diferenciación y procesos dentro de la litosfera continental. Los magmas pueden ascender a la superficie a través de diques, o pueden acumularse en la base de la corteza incrementando su espesor a través del tiempo. Los magmas también pueden ascender hacia las cámaras de magma crustal donde ocurren procesos de cristalización fraccionada que destilan los elementos ligeros. Los cumulos máficos y ultramáficos de la diferenciación pueden ser más densos que el manto subyacente y pueden deslaminarse o volver al manto en periodos cortos de tiempo.

3.1. Generación de corteza continental

La corteza primitiva de la Tierra joven probablemente era máfica, estaba formada previamente por un océano de magmas convectivos de profundidad incierta. Aún y así, no hay ningún afloramiento que muestre evidencias de esta corteza joven primitiva, se sabe que no ha

.....

sobrevivido, probablemente, por el intenso bombardeo meteórico que afectó a la Tierra hace 4000 Ma. La corteza félsica, correspondiente a las primeras rocas terrestres preservadas (TTG) se debió formar, probablemente, por la diferenciación de una corteza máfica en el Hadeano. Hay un intenso debate de cómo fue el crecimiento continental a través del tiempo, tema del que se hablará más adelante.

Los datos de Scholl y von Huene (2004) sostienen que la corteza de la Tierra moderna es reciclada en el manto en las zonas de subducción y las nuevas adiciones desde el manto en los arcos son aproximadamente de $70 \text{ km}^3/\text{Ma}$. Esto implica que la masa de la corteza continental desde el comienzo del Proterozoico era aproximadamente equivalente a la masa de la corteza continental actual, que es menos del 1% de la masa del manto. Condie (2000) argumentó que la formación crustal fue episódica con picos significativos de producción a los 2700, 1900 y 1200 Ma por periodos de 100 Ma siempre relacionado con probables eventos de superplumas. Condie (2002) también argumentó que el crecimiento de la joven corteza ocurrió principalmente en forma de nuevos sistemas de arcos de islas acrecionados en los continentes durante las colisiones, pero el crecimiento neto puede haber sido incrementado por la reducción de las tasas de subducción de sedimentos, debido a los altos niveles del mar durante estos periodos. Según Scholl y von Huene (2004), el reciclaje crustal se produce a unos $30 \text{ km}^3/\text{Ma}$ y se realiza por subducción de sedimentos en la Tierra moderna; que haya habido una reducción de esta tasa en el pasado es probable que esto haya significado un incremento de la masa continental.

Uno de los debates más activos del origen y evolución de la corteza continental es el de las contribuciones relativas de los procesos de intraplaca (plumas) y arco en la generación de corteza continental. Este debate presenta una contradicción aparente, por una parte las curvas de crecimiento cortical indican que hubo periodos de rápido crecimiento durante la historia de la Tierra, lo cual se explica mejor con el modelo de plumas mantélicas. Por otra parte, la composición promedia de la corteza continental es muy parecida a la de la corteza de arco dejando poco lugar al modelo de plumas mantélicas (Figura 14).

Una manera de intentar solucionar esta contradicción de las contribuciones de pluma frente a las de arco es la relación La/Nb, los magmas de intraplaca tienen $\text{La/Nb} < 1$, mientras que los magmas de arco tienen $\text{La/Nb} > 1$. Esta relación ha servido para justificar que los continentes tienen el 5-20% de componentes de intraplaca (plumas).

Sería interesante saber en qué medida los magmas de pluma podrían haber contribuido a la formación de corteza continental Arcaica. Condie (2000) sugirió que, dado que la temperatura potencial del manto era más alta en el Arcaico, hubo más contribución de plumas en el Arcaico. Además, los TTG arcaicos parece que derivan de una fuente máfica enriquecida, posiblemente de pluma, aunque no se conoce la composición de las plumas durante el Arcaico.

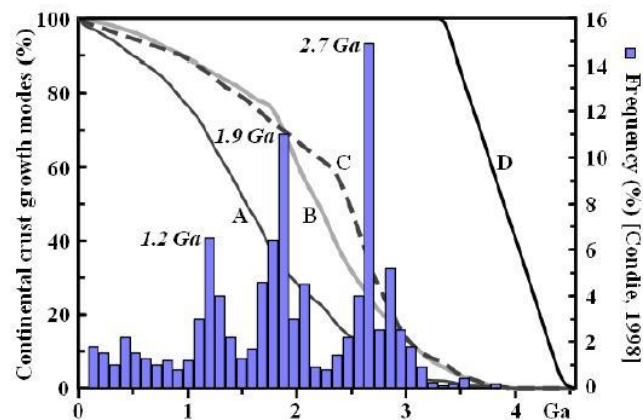


Figura 14: Histograma de la corteza "juvenil" (Yaoling Niu *et. al.* 2013). Las frecuencias de bajo fondo se interpretan como procesos de tectónica de placas, mientras que los picos se asocian a plumas del manto debido a las grandes anomalías de fusión del manto (Condie, 2000; McCulloch y Bennett, 1994; Hawkesworth *et.al.*, 2006.; Stein y Hofmann, 1994). Las curvas representan los modelos de crecimiento continental: A (Allegre y Rousseau, 1984), B (Kramers y Tolstikhin, 1997) y C (Taylor y McLennan, 1995) favorecen el crecimiento de la corteza gradual durante gran parte de la historia de la Tierra, la D (Amstrong, 1981) sugiere que la corteza continental alcanzó su volumen actual hace alrededor de 3500 Ma.

3.1.1. El papel del manto en la generación de corteza continental

Se asume que la fuente de la corteza proviene de muchos fundidos graníticos, pero, ¿qué es a lo que exactamente contribuye el manto? ¿Subministra el calor, los materiales fundidos o los dos?

Si la contribución del manto es el calor, entonces la corteza continental es reciclada extensamente, pero si se subministra material del manto, entonces podremos ver el crecimiento de la corteza. En el caso de los plagiogranitos oceánicos y de los granitoides de arcos de islas oceánicas, el manto subministra todos los elementos de los granitos. En la corteza continental, el papel del material mantélico es probablemente más variable, esto es sujeto de intensos debates científicos.

En las colisiones orogénicas se puede producir anatexia crustal (fusión parcial o diferencial de la corteza) por engrosamiento cortical. En otros casos, se pueden llegar a las temperaturas de fusión crustal como resultado del calor inducido por el ascenso del manto astenosférico y de los fundidos originados en el mismo. Además, estos fundidos basálticos pueden engrosar la corteza (*underplating*).

Huppert y Sparks (1988) sugirieron un modelo sobre como la inyección de basaltos derivados del manto en el interior de la corteza genera fundidos silíceos crustales (Figura 15). Este modelo su puede aplicar mejor al magmatismo bimodal en situaciones postorogénicas i anorogénicas que son dominadas por extensas surgencias astenosféricas. En el modelo, los magmas basálticos inyectados llegan a la superficie a través de fallas extensionales formando diques, sills e intrusiones (Figura 15a). El calor advectivo se introduce por estos magmas calientes de la corteza generando fundidos silíceos crustales y fundidos volcánicos máficos

(Figura 15b). Las intrusiones máficas muy calientes funden el material, las paredes y el techo de la cámara en la corteza. Happer y Sarks (1988) calcularon el espesor de los sills máficos, estos pueden crear grandes volúmenes silíceos suprayacentes en tan solo unos centenares de años. En los estadios tardíos de la corteza calentada (Figura 15c), largos cuerpos de magma granitoide pueden coalescer y ascender a niveles superficiales donde la caldera se colapsa y desarrolla campos de ignimbrita.

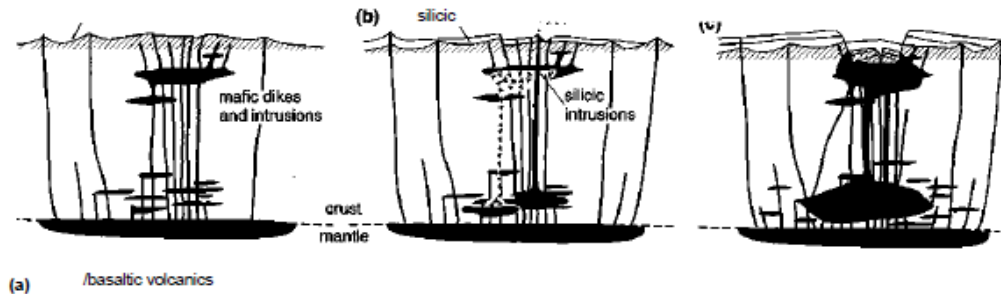


Figura 15: Evolución de las cámaras del magma silíceo formados por el emplazamiento del magma derivado del manto en el interior de la corteza (Huppert y Sparks, 1988). (a) Etapa temprana más fría, con la corteza fracturada, donde gran parte del magma máfico alcanza la superficie a través de las fallas. (b) El magma máfico calienta la corteza y provoca anatexis crustal local. Los magmas máficos densos son atrapados en la corteza más dúctil, pero el fundido silíceo asciende y forma intrusiones superficiales y alimentadores volcánicos. (c) Se pueden generar grandes cuerpos de magma silíceo cuando una gran región de la corteza es cerrada por fundido, a menudo se producen erupciones mayores de ignimbritas y colapsos de caldera.

El debate sobre la contribución del manto al magmatismo crustal es muy incierto respecto a las velocidades de formación de la corteza continental félsica, esta se tiene que llevar a cabo por una adición gradual de material magmático del manto. La pregunta es, ¿Cuándo y cómo fue creada la corteza continental?

La corteza continental arcaica fue probablemente delgada y los núcleos continentales eran pequeños e inestables. La mayoría de la corteza continental podía haber sido reciclada de nuevo dentro del manto durante un estadio de convección activa. La velocidad de crecimiento de la corteza sugiere que el 70-85% del volumen de la corteza presente fue creado en el comienzo del Proterozoico. Si las estimaciones en la composición de la corteza inferior y superior son correctas, la corteza continental se diferenció verticalmente con muchos elementos incompatibles migrando hacia arriba. El resultado es que la corteza superior desarrolló una composición más evolucionada que la corteza profunda.

4. EVOLUCIÓN DE LA CORTEZA CONTINENTAL

Explicar la evolución de la corteza continental es una tarea complicada, ya que tenemos pocas pistas en la geología de nuestro planeta que nos ayuden a deducir esta evolución. Se han desarrollado 2 tipos de modelos evolutivos. El primero postula que hubo un desarrollo en el Arcaico temprano (Burke *et al.* 1976, Burke 1981, Condie 1982, Moorbath 1978, Sleep & Windley, 1982), generalmente se refiere a que hubo algún tipo de tectónica de placas primitiva. El otro tipo explica que los cambios en los procesos internos de la Tierra son el resultado del enfriamiento global asociado a cambios en el comportamiento de la litosfera, esto sugiere que los mecanismos tectono-magmáticos que gobiernan la formación y el

.....

crecimiento crustal cambian a lo largo de los tiempos geológicos (Bear 1981, Goodwin 1981, Kröner 1981).

Considerando la historia más antigua del Sistema Solar, hace casi 5000 Ma, acababa de nacer una estrella, nuestro Sol, y estaba rodeada por grandes masas rocosas. Estos fueron acrecionando entre sí por efecto de la gravedad (Anexo, Imagen 7), formando el Planeta Tierra. Hace 4500 Ma, un planetesimal masivo chocó contra la Tierra, el manto rocoso impactado fue expulsado a la órbita y se convirtió en la Luna (Hetwartz, D. *et. al.* 2014), mientras que el núcleo metálico del cuerpo cayó en la Tierra. Este evento resultó ser catastrófico, el planeta recién formado fue totalmente fundido. A medida que la Tierra se enfrió y se solidificó, probablemente se formó una corteza basáltica temprana.

Está ampliamente aceptada la idea de que el manto era de más alta temperatura en La Tierra primitiva que hoy en día. Si esto es cierto, este factor influyó mucho en los procesos de generación de los continentes. Evidencias geofísicas de la evolución secular de la corteza continental han demostrado que ha habido cambios en el espesor cortical y en el flujo de calor a lo largo del tiempo.

Evidencias geoquímicas de la evolución indican que las rocas más abundantes de la corteza continental de La Tierra primitiva, como se ha dicho al principio de este trabajo, son magmas de la serie TTG. Los granitoides arcaicos y post-arcaicos son claramente diferentes geoquímicamente. Parece ser que estas diferencias reflejan diferentes mecanismos de formación, uno implica la presencia de granate en la fuente del magma y el otro no.

4.1. Crecimiento de la corteza continental

La comprensión de cómo crecen y se diferencian los continentes sigue siendo un tanto oscura. Diversos autores tienen hipótesis distintas unas a otras. Gastil (1960) señaló que las edades geocronológicas de crecimiento continental fueron 3400, 3000, 2700 y 1000 Ma, pero no está demostrado. Hurley y Rand (1969) presentaron la primera curva de evolución del volumen de la corteza en relación con el tiempo, y mostraron evidencias de una masa mucho más pequeña de la corteza continental en el Arcaico. DePaolo (1980) mostró que la evolución secular de los isótopos de Nd en el manto y la corteza requiere que ambos sistemas estén abiertos, con crecimiento de corteza desde el manto superior y, más interesante, que la corteza continental se recicla desde el manto superior. Estudios geoquímicos mostraron que el material de la corteza se hunde y se pierde en el manto (von Huene y Scholl, 1991). Hay 3 ideas de las que casi todos los científicos están de acuerdo:

- 1) El volumen de la corteza terrestre se ha incrementado a través del tiempo a pesar de que el material continental ha sido erosionado y que la subducción lo devuelve al manto.
- 2) La tasa de crecimiento de la corteza fue más rápido en el Arcaico que hoy en día.
- 3) Las edades de formación de la corteza tienden a agruparse en torno a un pequeño número de períodos orogénicos.

La naturaleza del material del manto que forma el material de la corteza es menos clara. La tectónica de placas parecía ofrecer evidencias de acumulación horizontal a través de vulcanismo orogénico andesítico en los límites convergentes, el modelo de “andesita” ha sido probablemente el modelo más popular de crecimiento de la corteza terrestre. Este modelo (Taylor, 1967) más tarde fue rechazado por una idea más compleja de acreción de suites bimodales de vulcanismo máfico y félsico (Taylor y McLennan, 1985). Reymer y Schubert (1984) indicaron que el vulcanismo orogénico moderno casi no cumple con el requisito mínimo de que el proceso de crecimiento debe estar relacionado con el volumen actual de corteza terrestre ($1,6 \text{ km}^3/\text{año}$). Un modelo derivado de la hipótesis de la acreción horizontal es el de “subducción caliente” de Defant y Drummond (1990), que llegaron a la conclusión de que la subducción “normal” tal y como la conocemos hoy en día no puede producir suficiente material para el crecimiento de corteza terrestre. Cuando los segmentos de las dorsales subducían, la temperatura de la zona de subducción se volvió anormalmente caliente y la fusión aumentó.

Algunos autores propusieron la acreción de mesetas oceánicas, es decir, piezas de la corteza oceánica engrosada por la erupción de material de hot-spot (punto caliente), pudo contribuir al crecimiento de corteza terrestre. Abouchami (1990) y Boher (1992) presentaron detallados datos de campo y geoquímicos para mostrar que un segmento muy grande de la corteza continental juvenil, terrenos con edades de 2100 Ma de Birimian de África Occidental, son restos de la acreción de mesetas oceánicas y son producto de la diferenciación a través de procesos orogénicos. La figura 17 refleja los diferentes modelos de crecimiento continental.

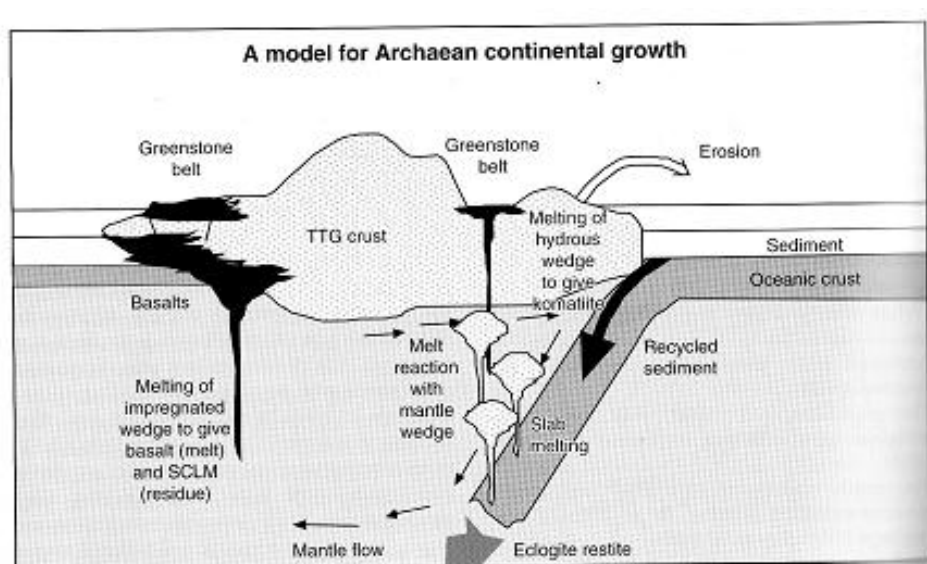


Figura 17: Diferentes contribuciones probables para el crecimiento de corteza continental (Rollinson, H. 2007).

A lo largo de los años, diferentes científicos han estimado como ha sido el crecimiento continental con el paso del tiempo, estos modelos se ilustran en la figura 18, y se pueden dividir en 2 tipos:

- **Una velocidad de crecimiento incrementándose temporalmente**, como por ejemplo, la curva de Veizer & Jansen y la de Taylor & McLennan, aunque esta última estima que

el inicio del crecimiento continental tuvo unos pequeños picos de crecimiento entre los 4500 y los 4000 Ma.

- **Al principio hubo un crecimiento rápido seguido más tarde por un crecimiento más lento o nulo**, como por ejemplo, las curvas de Armstrong, de Fyfe y de Reymer & Schubert. La primera muestra un cambio más brusco en el momento en que el crecimiento es nulo, la segunda muestra un cambio de crecimiento menos brusco, pero estima que hacia los 2500 Ma el crecimiento fue negativo, es decir, que se perdió volumen de corteza continental, y la tercera es parecida a la de Armstrong, pero el cambio de crecimiento fue con menos volumen de corteza continental, y después tuvo un crecimiento constante y ascendente.

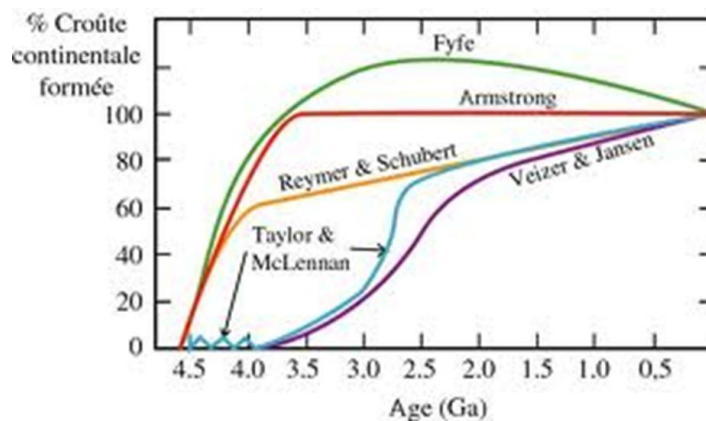


Figura 18: Modelos de las tasas de crecimiento de la corteza continental. Armstrong (1981), Rymer & Schubert (1984), Fyfe (1978), Taylor & Taylor (1982) y Veizer & Jansen (1979).

Durante el Proterozoico, el flujo de calor se fue reduciendo gradualmente, y las placas tectónicas, probablemente, asumieron el carácter que tienen actualmente. La corteza continental post-arcaica creció de manera que el material crustal se fue perdiendo, devuelto al manto como sedimentos en zonas de subducción. El papel relativo del reciclaje y la adición de material crustal era variable. Reymer y Schulbert (1984) calcularon que la corteza continental moderna crece a una velocidad de $1.65 \text{ km}^3/\text{año}$.

4.1.1. Evidencias geoquímicas y de campo esenciales

A continuación se describirán algunas características esenciales para comparar los diferentes modelos de crecimiento continental.

I. El registro temporal y espacial de los eventos de la formación de la corteza

Como se ha dicho al comienzo de este capítulo, han habido 4 supereventos de crecimiento crustal. Este patrón episódico no es el que cabría esperar en un proceso asociado con la tectónica de placas. La actividad de las dorsales y la subducción se asocian fuertemente con el enfriamiento secular de la Tierra, por lo tanto, es incompatible con el crecimiento episódico. Evidencias de edad fanerozoica indican que es compatible un crecimiento casi continuo de la corteza oceánica (Parson y Sclater, 1997; Sclater, 1980). Cualquier proceso de crecimiento de la corteza terrestre que se base en el magmatismo de arco, se espera que haya un registro casi

continuo de edades y lugares de formación y crecimiento de la corteza terrestre, aunque este registro tiene lugar en diferentes partes de la Tierra.

II. La rareza de los registros de la corteza oceánica

Las observaciones de campo indican que la corteza oceánica no está, por lo general, conservada en la superficie. La química y las características geométricas de la mayoría de las ofiolitas no pueden equipararse a la corteza del fondo oceánico, como la que se encuentra en el Atlántico o el Pacífico. Nur y Ben-Avraham (1982) señalaron que las ofiolitas fueron cabalgadas sobre los continentes. En cuanto a las evidencias geológicas y geoquímicas en los basaltos antiguos de las dorsales medio-oceánicas solo se han encontrado evidencias ocasionales (de Wit, 1987). No se conoce el espesor de la antigua corteza oceánica y las placas litosféricas. Estas observaciones sugieren que la mezcla ineficiente de la corteza oceánica subducida puede haber tenido un fuerte efecto en la diferenciación del manto (Chase y Patchett, 1988), la acumulación de la corteza oceánica anterior a la subducción no parece contribuir muy eficazmente al crecimiento de la corteza terrestre.

III. Presencia de basaltos de meseta oceánica en protolitos continentales

Usando evidencias geoquímicas, como las tierras raras y los isótopos de Nd, Abouchami (1990) rechazó la suposición de una afinidad entre los basaltos de Birimian de 2100 Ma y los basaltos de arco moderno. Los basaltos de arco parecen ser de transición entre los magmas orogénicos y los basaltos de dorsales oceánicas. Abouchami (1990) señaló la fuerte afinidad geoquímica de los basaltos de Birimian con los basaltos del Cretácico de la cuenca de Nauru en el Pacífico occidental. Además, la residencia del Nd en la corteza y la ausencia de circones detríticos de edad temprana en los sedimentos clásticos de Birimian indican que estos se deben haber formado lejos de cualquier influencia continental (Boher *et. al.*, 1992). La conexión de la meseta oceánica ha sido apoyada por observaciones en otros entornos geológicos, como por ejemplo, los terrenos modernos del noroeste de la Cordillera Americana (Richard *et. al.*, 1991), orógenos recientes (Stein y Goldstein, 1996) y segmentos de corteza arcaica (Kusky y Kidd, 1992; Kimura *et. al.*, 1993).

IV. Evidencias isotópicas de Nd

Shirey y Hanson (1986) señalaron que el carácter radiogénico del Nd en rocas derivadas del manto del Arcaico exige que el manto fuera diferenciado por extracción muy temprana de fundido. Galer y Goldstein (1991) argumentan que el régimen de la geodinámica terrestre en el Arcaico no implicaba una tectónica de placas. Ellos sostienen que la corteza continental temprana se formó a partir de material de pluma y estaba cerca de la composición de basaltos alcalinos. La mayoría de los rastros de tal precursor parece que se han perdido, posiblemente por la posterior subducción o reciclaje de la corteza terrestre.

4.1.2. ¿Cómo fue el crecimiento de la corteza continental primitiva?

Anteriormente se ha dicho que el crecimiento de la corteza debió ser por principales eventos episódicos. Por lo contrario, hoy en día, el magmatismo orogénico es un proceso, típicamente, en estado estacionario. En segmentos orogénicos de tamaño reducido hay la presencia de grandes volúmenes de basaltos no orogénicos procedentes de magmas calco-alcalinos que no

tienen ninguna similitud con la corteza oceánica moderna. Por lo tanto, las erupciones basálticas de gran escala debieron ocurrir como el primer evento de construcción continental. Por otra parte, la mayoría de los magmas orogénicos modernos surgen a lo largo de los márgenes continentales, mientras que los de arco intra-crustales, como por ejemplo la Fosa de las Marianas, son raros. La amplia extensión de terrenos menores como el de Birimian requieren que el protolito continental se formó en zonas oceánicas, lejos de los continentes preexistentes, esto rechaza la mayoría de los análogos modernos de la zona de subducción. Localmente, en la provincia volcánica del Pacífico, la producción de magmas calco-alcalinos es originada por fusión inducida por deshidratación del manto por encima de las zonas de subducción. Existen 3 modelos de crecimiento continental primitiva: subducción caliente, acreción de mesetas oceánicas y recarga prolongada por magma de pluma de las placas sueltas (Figura 19).

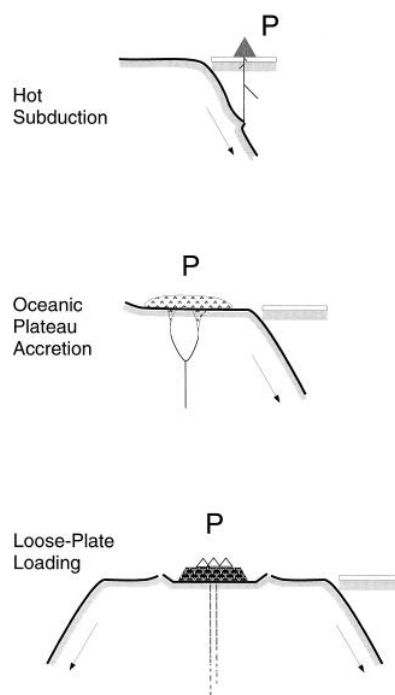


Figura 19: Tres modelos de protolito continental (Albarède, F. 1998). *Hot Subduction*: o subducción de dorsales medio-oceánicas y de litosfera oceánica joven hace posible la producción de magmas intermedios y félsicos por fusión de la corteza oceánica hidratada. *Oceanic Plateau Accretion*: acreción de mesetas oceánicas creadas durante eventos de superplumas. *Loose-Plate Loading*: acumulación de magma de pluma intraplaca (no arrastradas por el hundimiento de la litosfera), es comparable con la placa de Kerguelen (Océano Índico). En los últimos dos casos, el protolito es basáltico, la corteza es gruesa y llega a la flotabilidad crítica pudiendo fundir en la base.

5. CONCLUSIONES

Los procesos que había en la Tierra primitiva aún no están muy detallados en la actualidad, especialmente si los comparamos con los que tenemos en la Tierra moderna. La tarea de averiguar que pasó en la Tierra en el Arcaico es complicada porque prácticamente no hay afloramientos porque estos fueron erosionados o destruidos por los procesos que tenían lugar en esa época, las suposiciones se basan básicamente en datos geoquímicos y geofísicos, unido a los pocos datos mineralógicos que nos proporcionan las pocas rocas arcaicas que afloran en la superficie. Pero, a pesar de que existen lagunas en los registros geológicos y ambigüedades en la interpretación de algunos terrenos, actualmente sabemos lo suficiente como para trazar

una secuencia detallada de los acontecimientos de la Tierra y los procesos principales que operaban entonces. Hay que remarcar 4 eventos clave para nuestro planeta: la formación de los océanos, la formación del núcleo terrestre, la separación de la Luna y la acreción de la primera corteza basáltica. También hay que tener en cuenta que las rocas de la Tierra cambian de composición a lo largo del tiempo.

A continuación expongo las conclusiones sobre los temas de mayor debate: El crecimiento, la composición y la formación de la corteza continental, la diferenciación de la Tierra temprana y la evolución arcaica de la corteza continental.

Crecimiento de la corteza continental

Los eventos cortos de superplumas y la acumulación de rocas volcánicas en placas sueltas casi estacionarias pueden formar un protolito basáltico que evoluciona rápidamente en la corteza continental y que puede reproducir la composición actual y la distribución de edades discontinuas. Las erupciones de grandes volúmenes de basaltos de pluma en el fondo marino, la acreción de placas oceánicas existentes en continentes, el magmatismo consecuente y los procesos de erosión del protolito basáltico, son los responsables del comienzo del crecimiento de la corteza terrestre.

Evidencias de Nd en la diferenciación temprana de la Tierra

Los datos isotópicos de Nd proporcionan la evidencia de una diferenciación del manto los primeros 150 Ma después de la acreción.

Evolución arcaica de la corteza continental

Aunque existe un acuerdo entre los científicos acerca de un crecimiento rápido y masivo de corteza continental en el Arcaico, el mecanismo de este crecimiento aún no se entiende muy bien. La mayoría de los modelos relacionan la formación continental con una gran acreción de arco como resultado del rápido movimiento de las placas (Figura 11).

Una de las principales incertidumbres es la de la interpretación de los ambientes tectónicos en el Arcaico. Se debe seguir estudiando si la evolución de la corteza arcaica es compatible con los procesos que ocurren actualmente en la Tierra, pero no se debe suponer, necesariamente, que el presente es la clave del pasado.

Composición de la corteza continental

Hay muchas discrepancias referentes a la composición antigua y actual de la corteza continental. ¿Qué pasó en el Arcaico? Este es una cuestión muy activa entre los científicos que estudian el origen de la corteza continental. El debate se centra en cómo es posible que la corteza continental fuese más máfica en el Arcaico que en la actualidad. Hay modelos basados en la Tierra moderna y en los de procesos de arco volcánico en la Tierra primitiva y con alto gradiente geotérmico, en la que había una composición TTG predominante.

La deducción de la composición de la corteza continental es incompleta, esta deducción se ha hecho basándose de flujos de calor y en que la composición relativamente máfica de los xenolitos de la corteza inferior, pero datos más recientes indican que las cortezas media e

inferior podrían contener volúmenes significativos de rocas félsicas y tendrían un contenido medio de SiO_2 de 64%. En las zonas de subducción las rocas sufren metamorfismo progrado, fusión parcial y procesos de extracción de fundido que conducen al aumento en la velocidad sísmica y de la densidad. Las rocas máficas son lo suficientemente densas como para hundirse en el manto, mientras que las rocas félsicas tienden a tener flotabilidad, este proceso puede desacoplar y delaminar la base de la corteza superior. Este proceso puede producirse en la subducción de la corteza de arco y la subducción de la corteza continental. Estos procesos podrían haber perfeccionado la composición de toda la corteza continental a lo largo de la historia de la Tierra hasta llegar a la composición actual.

Formación de corteza continental

Uno de los temas de más discusión desde la perspectiva geoquímica es saber cómo se formó la corteza continental y en qué porcentaje. La composición mineralógica y química de los granitoides es una de las principales limitaciones, en particular la de los TTG, que son el componente principal de la corteza continental arcaica. La fuente principal de estas rocas son los basaltos derivados del manto, estos basaltos, bien habrían originado magmas silíceos en forma de fusión parcial, o bien procedería de la cristalización fraccionada de magmas de los basaltos.

La producción más eficiente de granitos en la actualidad se encuentra en las zonas de subducción, esta se produce en dos pasos:

1. La corteza oceánica hidratada, al ser subducida se deshidrata, y el agua generada entra en el manto convectivo suprayacente disminuyendo la temperatura de fusión del manto fértil y produciendo grandes cantidades de magma máfico hidratado.
2. El magma asciende a la base de la corteza, a través de arcos de islas o márgenes convergentes, donde es sometido a complejos procesos de cristalización fraccionada y pudiendo inducir la fusión de basaltos previamente intruidos. Finalmente, los magmas así producidos ascienden en la corteza sometidos, de nuevo, a cristalización fraccionada, y se forman los magmas graníticos silíceos.

Si hubo algún tipo de tectónica de placas en el Arcaico, es posible que los procesos descritos puedan generar TTG arcaicos.

Se cree que la tectónica de placas en el arcaico pudo haber operado de forma episódica. De los 2700 a los 1800 Ma el manto tenía una convección irregular. Durante 4 o 5 grandes eventos, grandes plumas ascendían desde las profundidades hasta la superficie, desplazando material del manto superior y acelerando la velocidad de subducción. Este proceso produjo el incremento de generación de magma granítico y, por tanto, un incremento de formación de corteza continental. La transferencia de calor desde las plumas hizo aumentar la temperatura de la parte superior del manto y esto dio lugar a la generación de una gruesa corteza oceánica que resistió la subducción. Como consecuencia de esta gruesa corteza se originaba un periodo de dinámica lenta que siguió cada clímax de crecimiento de la corteza. El enfriamiento posterior del manto produjo una disminución de la génesis de corteza oceánica, como

.....

consecuencia de esto se fue generando una corteza oceánica más delgada que subducía fácilmente.

5.1. EL MATERIAL MÁS ANTIGUO DE LA TIERRA DESVELA QUE LA CORTEZA SE FORMÓ RÀPIDAMENTE → SE DESCUBRE UN CIRCÓN DE 4400 Ma (24/02/2014)

Este nuevo descubrimiento significa un cambio en algunas de las conclusiones expuestas en este trabajo.

La corteza terrestre se formó 100 Ma de años después del nacimiento del Sistema Solar, esto lo sabemos ahora gracias al descubrimiento de una pequeña pieza de cristal de circón, considerada la más antigua del planeta, encontrada en Jack Hills en Australia. El mineral cristalizó hace 4400 Ma, 100 Ma de años después del nacimiento de la Tierra. Este cristal pasa a ser el material más antiguo del planeta. Además, es la prueba de una clara evidencia de que la corteza continental se comenzó a enfriar y a desarrollar mucho antes de lo que se pensaba, solo 100 Ma después de que la Tierra impactara con un planetesimal formando la Luna.

La edad arcaica del circón es confirmada mediante una nueva técnica de datación (Tomografía por sonda atómica – *Atom-probe tomography*). Los datos de esta técnica confirman que muchos eventos de la Tierra silicatada debieron ocurrir antes de los 4400 Ma, en consonancia con la formación del océano de magma por el impacto que formó la Luna hace 4500 Ma. Cualquier edad de homogeneización de la corteza de la Tierra y el manto es anterior a la formación de este circón, que se formó poco después de la formación de la Tierra.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mi tutor, Francisco J. Martínez, su implicación en este trabajo de final de grado, siempre ha estado dispuesto a ayudarme, además de la bibliografía que me ha proporcionado, muy útil para realizarlo. También quiero agradecer el apoyo que me ha dado mi pareja en todo momento, ayudándome a que el texto sea mejor comprendido. Quiero dar las gracias también al Departamento de Geología de la UAB por darme la oportunidad de realizar un trabajo tan interesante como este.

ANNEXO



Imagen 1: Océano de magma de la Tierra primitiva.



Imagen 2: Reproducción del bombardeo meteórico sobre la Tierra hadeana.



Imagen 3: TTG de Gurur, India. Tienen 3300 Ma. El gneis es la roca gris, está atravesado por venas de granito (venas blancas).



Imagen 4: Las rocas blancas son diques félsicos de gneis atravesando transversalmente los “*greenstone belts*” (Sermerssoq, Groenlandia).



Imagen 5: Komatiite de 3445 Ma en Komatiji, África del Sur.



Imagen 6: BIF o *Banded Iron Formation*, son rocas sedimentarias con capas alternantes de minerales ricos en hierro y chert.



Imagen 7: Recreación artística del nacimiento del Sistema Solar donde se dibujan las grandes masas rocosas (NASA).

BIBLIOGRAFIA

- Albarède, F. (1998). **The growth of continental crust**. Tectonophysics, 296: 1-14.
- Anguita Virella, F. (1988). **Origen e historia de la Tierra**. Editorial Rueda.
- Anguita Virella, F.; Moreno Serrano, F. (1991). **Procesos geológicos internos**. Editorial Rueda.
- Arndt, N. T. (2013). **Formation and Evolution of the Continental Crust**. Geochemical Perspectives, volume 2, number 3.
- Brown, M.; Rushmer, T. (2005). **Evolution and differentiation of the Continental Crust**. Published by Cambridge University Press.
- Cavosie, A. J.; Wilde, S. A.; Dunyi Liu; Weiblen, P. W.; Valley J. W. (2004). **Internal zoning and U-Th-Pb chemistry of Jack Hills detrital zircons: a mineral record of early Archean to Mesoproterozoic (4348-1576 Ma) magmatism**. Precambrian Research, 135: 251-279.
- Hacker, B. R.; Kelemen, P. B.; Behn, M. D. (2011). **Differentiation of the continental crust by reamination**. Earth and Planetary Science Letters, 307: 501-516.
- Hervé Martin. **L'environnement de la terre primitive**. Laboratoire Magmas et Volcans, Clermont-Ferrand.
- Herwartz, D.; Pack, A.; Friedrichs B.; Bischoff, A. (2014). **Identification of the giant impactor Theia in lunar rocks**. Science, vol. 344, nº 6188, pp. 1146-1150.
- Kröner, A. (1985). **Evolution of the Archean continental crust**. Ann. Rev. Earth Planet Sci., 13: 49-74.
- Martin, H.; Moyern, J. F.; Guitreau, M.; Toft-Blichert, J.; Le Pennec, J. L. (2014). **Why Archean TTG cannot be generated by MORB melting in subduction zones**. Lithos 198-199: 1-13
- Martínez, Francisco J. (1983). **Constitución petrológica y evolución de la corteza durante el Precámbrico**. Revista d'Investigacions Geològiques, 37: 231-254.
- Maud Boyet; Blichert-Toft, J.; Mink Rosling; Storey, M.; Télouk, P.; Albarède F. (2003). **¹⁴²Nd Evidence for early Earth differentiation**. Earth and Planetary Science Letters, 214: 427-442.
- Ross Taylor, S.; M. McLennan, S. (1996). **The evolution of continental crust**. Scientific American.
- Rudnick, R. L. (2003). **Composition of the Continental Crust**. Treatise on Geochemistry, vol.3, pp. 659.
- Valley, J. W. (2008). **The origin of the Habitats**. Dept. of Geology & Geophysics, University of Wisconsin (USA).
- Valley, J. W.; Cavosie, A. J.; Takayuki Ushikubo; Reinhard, D. A.; Lawrence, D. F.; Larson, D. J.; Clifton, P. H.; Kelly, T. F.; Wilde, S. A.; Mosers, D. E.; Spicuzza, M. J. (2014). **Hadean age for a post-magma-ocean zircon confirmed by atom-probe tomography**. Nature Geoscience.

Winter, J. D. (2010). **An introduction to Igneous and Metamorphic petrology**. Second Edition, edited by Prentice Hall PTR.

Yaoling Niu; Zhidan Zhao; Dicheng Zhu; Xuanxue Mo (2013). **Continental collisions zones are primary sites for net continental crust growth – A testable hypothesis**. Earth Science Reviews.