

EL ORIGEN DE LAS ISLAS CANARIAS: UN MODELO DE SÍNTESIS
The Canary Islands Origin: A Unifying Model

Francisco Anguita () y Francisco Hernán (**)*

RESUMEN

Revisamos las ideas modernas sobre el origen del archipiélago canario como base para proponer una hipótesis sintética que se apoya especialmente en datos geofísicos y de geología regional. Este nuevo modelo toma elementos de los anteriores pero consigue resolver la mayor parte de sus inconvenientes. Las Islas Canarias se construyeron en lo que en la época de la apertura del Atlántico fue un punto triple. El magma proviene de un penacho térmico (plume²) de la misma época, pero la fusión fue provocado y canalizada mucho después por fallas de desgarre en régimen transtensivo que continúan las del Atlas, los bloques insulares se han elevado al actuar la compresión sobre esas mismas fracturas.

ABSTRACT

After a general overhauling of the ideas on the origin of the Canaries, we propose, mainly on the basis of geophysics and regional geology, a unifying model which borrows elements from the previous hypotheses but is able to solve most of their pending questions. The Canary Islands were built on an old triple junction dating from the times of the opening of the Atlantic, when the upper mantle of the area was filled with hot material from a plume, later melted and plumbed through the activity of Alpine transtensive fractures of the Atlas system. The islands blocks were uplifted when the same faults worked as transpressive shears.

Palabras clave: *Islas Canarias, puntos calientes, vulcanismo de fractura.*

Keywords: *Canary Islands, hotspots, fracture volcanism.*

INTRODUCCIÓN

Las Islas Canarias, un área clave en el nacimiento de la Vulcanología moderna, presentan características únicas entre las provincias volcánicas oceánicas. Seis de sus siete islas principales, que forman una cadena de dirección ENE (Fig. 1), han sido activas en el último millón de años. En las secciones más completas se distinguen tres unidades: complejos basales (formados por sedimentos marinos intruidos por plutones y por un denso enjambre de diques), series tabulares (en general restos muy erosionados de volcanes en escudo), y edificios post-escudo, como el pico Teide en Tenerife, el volcán Roque Nublo en Gran Canaria, o el de La Corona en Lanzarote. Estas unidades, cuyos volúmenes son netamente decrecientes, están separadas unas de otras por largos intervalos de inactividad, que duran hasta siete millones de años.

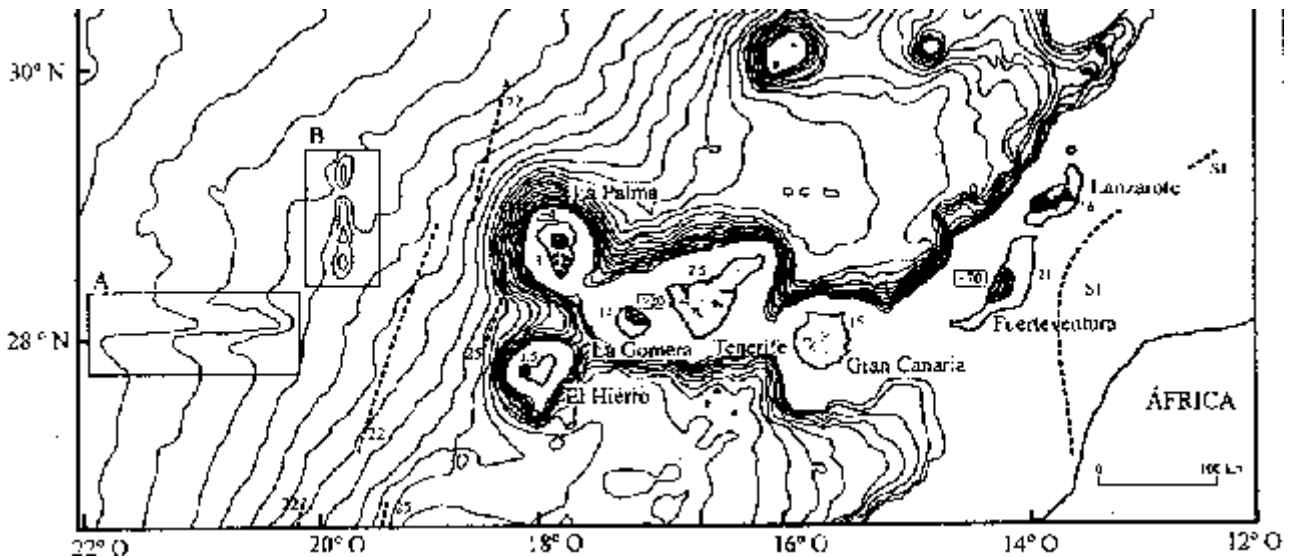


Figura 1 Las Islas Canarias: Entorno geográfico y datos cronológicos. Isobatas cada 100 m pero sólo por debajo de 2500 m. En negro, erupciones históricas; rayado, complejos basales (en cuadrados sus edades en Ma), edades de los afloramientos subaéreos más antiguos en cada isla. Los rectángulos A y B señalan un cañon submarino y una alineación de colinas abisales, probables huellas tectónicas con reflejo en la batimetría.

Un rasgo peculiar de las Canarias es que las islas occidentales son mucho más jóvenes. Así, mientras que las series tabulares de Fuerteventura fueron emitidas hace unos 20 millones de años (Ma), las de El Hierro sólo tienen 1,5 Ma; sin embargo (como puede apreciarse en la figura 1) esta pauta cronológica es muy irregular. Otra característica distintiva del archipiélago es su longevidad: su construcción (sobre corteza oceánica de edad jurásica, ~ 155 Ma) comenzó en el Cretácico Superior (entre 80 y 70 Ma), y ya hace unos 20 Ma que algunas islas emergieron sobre el nivel del mar. Las Canarias debían asemejarse entonces a la famosa isla de Surtsey, que en 1963 surgió del fondo marino al Sur de Islandia.

Las rocas de Canarias son espectacularmente diversas. Si dijésemos que nos hallamos ante la típica provincia volcánica alcalina, con basaltos olivínicos y sus diferenciados, ricos (riolitas) o pobres (traquitas, fonolitas) en sílice, estaríamos cometiendo una gran injusticia. Ya que olvidaríamos el extremo (y extraño) contraste que se da, p.ej., entre las carbonatitas (rocas típicas del vulcanismo más alcalino) de Fuerteventura, y otras rocas como son algunos basaltos recientes de Lanzarote, que se parecen a los de los fondos oceánicos, y por tanto representan el polo geoquímico más empobrecido en álcalis. En suma, un auténtico museo petrológico, que toda hipótesis que aspire a desentrañar el origen de las islas debe explicar. Porque además, esta mezcolanza de tipos rocosos viene acompañada por la misma extraña heterogeneidad química: los datos de geoquímica isotópica han definido hasta cuatro fuentes diferentes para los magmas canarios. Parece que distintas zonas del manto inferior y superior contribuyeron a la formación de las islas, pero actualmente la única zona térmicamente anómala bajo Canarias es una "isla térmica" en el manto superior (Fig. 2) que además se extiende también bajo África y el Mediterráneo.

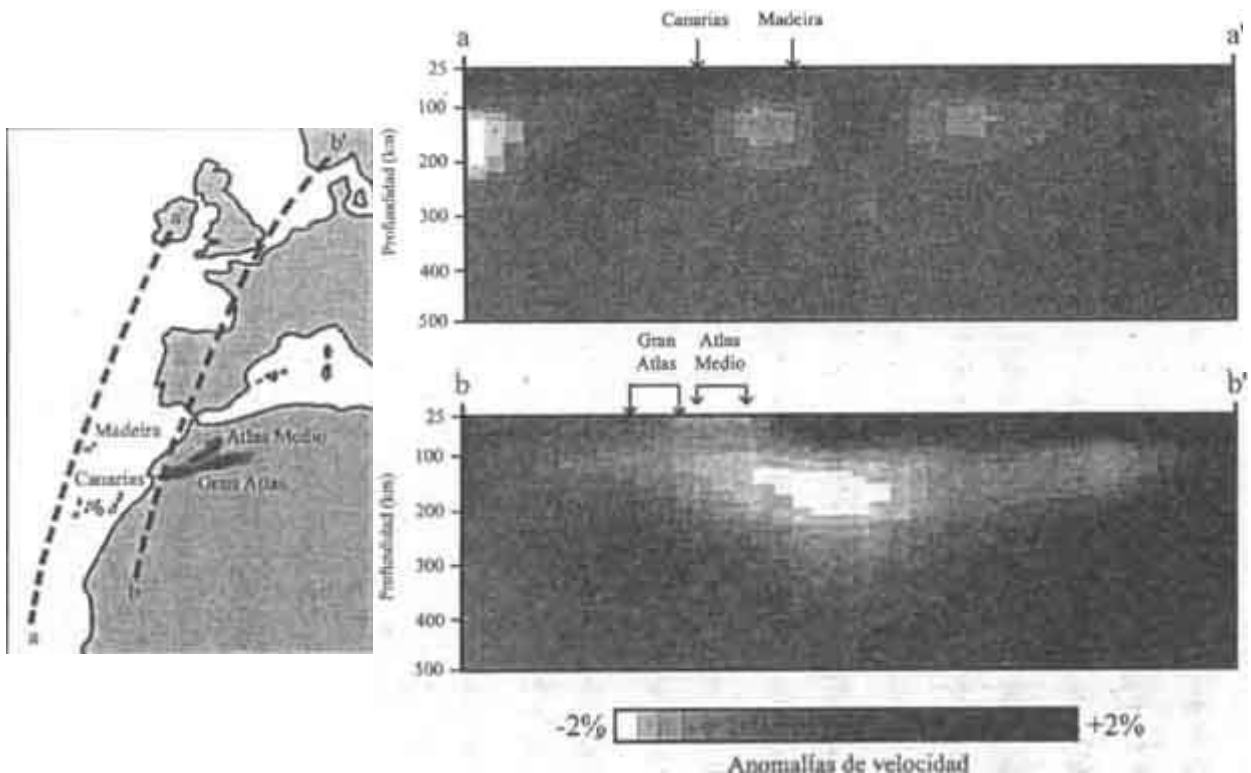


Figura 2. Resultados del experimento de tomografía sísmica realizado por Kaj Hoernle y su equipo en 1995. En el perfil a-a' se observa que la litosfera bajo Canarias no es caliente sino fría; en la sección b-b' se distingue una anomalía térmica mucho más importante bajo la cadena del Atlas

Desde el punto de vista del relieve, las Canarias se caracterizan por no estar rodeadas por una gran meseta submarina (a diferencia de otras islas volcánicas, como Bermudas o Cabo Verde, donde este rasgo se interpreta como la deformación producida en el fondo oceánico por una corriente ascendente de material del manto). El archipiélago de Cabo Verde, p.ej., está construido sobre una gran cúpula de unos 2 km. de elevación, que no existe en torno a Canarias. En el fondo oceánico alrededor de las islas sí existen, en cambio, importantes estructuras tectónicas, como pliegues, fracturas (algunas sísmicamente activas) y discordancias. No se ha detectado, en cambio, ninguna fractura en el gran conjunto sedimentario (> 12 km de espesor) existente entre las Canarias y la costa africana.

La existencia de sedimentos marinos y lavas almohadilladas a distintas alturas en las islas es una prueba contundente de que, tras su construcción, éstas se levantaron como bloques independientes: 2 km en el caso de La Palma pero hasta 4 km en el de Fuerteventura. En general, la tectónica es importante en el archipiélago, especialmente en los complejos basales. Sirvan como ejemplo cuatro estructuras, las tres primeras observables en el complejo basal de Fuerteventura: (1) la violenta discordancia entre sedimentos cretácicos (que están invertidos) y terciarios; (2) la distensión requerida por la inyección del enjambre de diques paralelos (inyección que necesita mucho espacio, ya que éstos llegan a ocupar el 90% del volumen total de roca); (3) las cizallas dúctiles, un tipo de fractura de desgarre característico de los orógenos, y que en este caso implican un desplazamiento lateral de más de 1 km; y (4) las fallas (más de 200, la mayoría de desgarre) localizadas en Lanzarote, que parecen condicionar la mayoría de las erupciones.

LAS HIPÓTESIS SOBRE LA GÉNESIS DE LAS ISLAS CANARIAS

Las principales ideas sobre el origen del archipiélago canario surgieron a raíz de la revolución movilita en Ciencias de la Tierra, Simplificando ligeramente, se pueden distinguir dos grupos de ideas, las térmicas y las tectónicas. Las térmicas son variantes de la hipótesis del punto caliente, que explicó con éxito el vulcanismo de Hawaii y otros archipiélagos volcánicos oceánicos. Las hipótesis tectónicas propuestas para Canarias han sido la de la fractura propagante y la de los bloques elevados.

La hipótesis del punto caliente en Canarias

El éxito hawaiano de la idea de John Tuzo Wilson hacía inevitable que este modelo se exportase a Canarias, un archipiélago de la misma longitud (500 km) y forma general, y en el que la actividad parece propagarse hacia un extremo. Los parecidos, sin embargo, acaban aquí: la actividad reciente en Canarias no se limita a un extremo de la cadena sino que es generalizada (y ésta es la causa de que los defensores de la idea del punto caliente sitúen a éste alternativamente bajo La Palma, Lanzarote o El Hierro), y el desplazamiento de la actividad hacia el Oeste, como hemos visto, se produce de forma muy irregular. Además, las larguísimas interrupciones de la actividad no caben en un modelo que propone una alimentación continua desde el manto inferior (los periodos sin vulcanismo en Hawaii duran menos de un millón de años); por el contrario, si las Canarias están conectadas a un penacho térmico (plume) que atraviesa un manto en movimiento, ¿cómo puede la actividad persistir hasta 70 Ma en la misma isla? ¿No debería Fuerteventura haber soltado ya anclas, apagándose, como hacen sucesivamente las islas hawaianas? Por último, el porcentaje de fusión que denotan los magmas canarios es mucho más bajo que el de Hawaii: si (olvidando todos los serios obstáculos anteriores) tuviésemos que aceptar que las Canarias son el resultado de un punto caliente, tendríamos que clasificar a éste como de tercera categoría. Esta diferencia en la fusión es, por otra parte, la razón por la cual hay en Canarias rocas muy distintas (mucho más alcalinas) que las de Hawaii, un archipiélago esencialmente toleítico.

Estos inconvenientes han llevado a la aparición de dos variantes del punto caliente canario: el modelo de pompas, y el modelo laminar. El primero (Fig. 3) fue propuesto en 1993 por el americano Kaj Hoerrile y el alemán Ulrich Selimincke para explicar las interrupciones en la actividad: el penacho térmico era un conducto inclinado compuesto de material estéril (o sea, incapaz de producir magmas) que arrastraría pompas fértiles: una isla sería activa cuando tuviese bajo ella una pompa fértil. Además, un penacho térmico tan ancho permitiría explicar la actividad simultánea en todo el archipiélago. Esta solución, sin embargo, creaba otros problemas: mientras que la inclinación del conducto bajo Hawaii se explicaba por el rápido movimiento de la placa pacífica, no es evidente que la placa africana se haya movido de forma significativa durante el periodo de construcción de las Canarias. Además, con la geometría propuesta, el magma debería llegar primero a las islas occidentales, que deberían por ello ser las más antiguas, o sea lo contrario de lo que sucede. Y, por último, esta variante seguía sin explicar la inexistencia de una elevación en el fondo oceánico, ni tampoco la tectónica en las islas y su entorno.

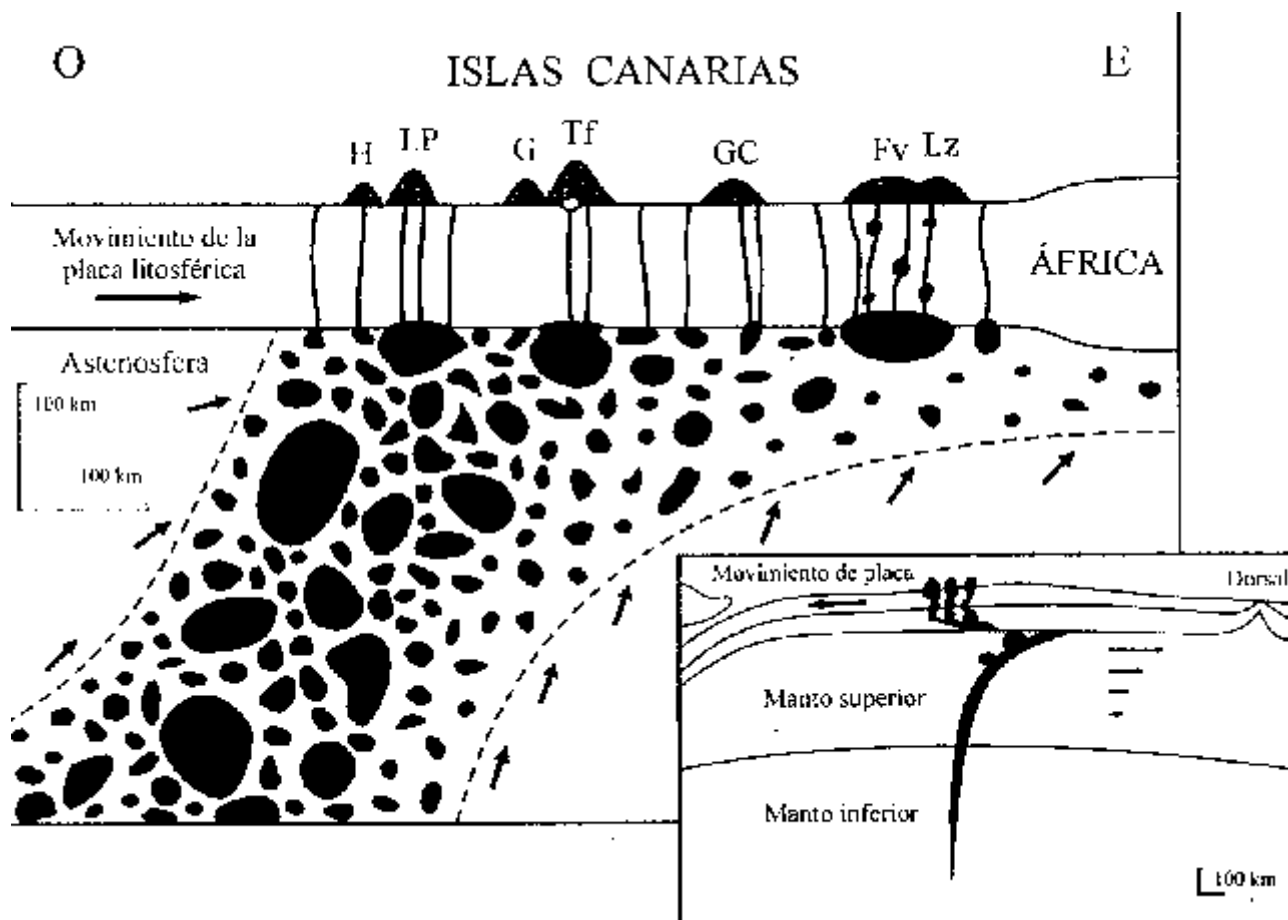


Figura 3. El modelo de bombas para las Isla Canarias publicado en 1993 por Hoernle y Schmincke. En el recuadro se puede ver el modelo análogo para Hawaii, debido a Ihinger. Mientras que en este último el conducto (arrastrado por el flujo en el manto superior) se inclina en el sentido opuesto al del movimiento de la placa pacífica, el hipotético conducto bajo Canarias se inclina en el mismo sentido en que se mueve la placa africana.

Hasta el momento, la última variante del punto caliente canario ha sido la de la lámina térmica. Un equipo dirigido por Kaj Hoernle publicó en 1995 un estudio de tomografía sísmica en el que detectó una zona caliente con forma de lámina en el manto superior (ver de nuevo la figura 2), zona que identificó con el penacho térmico que alimentaría el vulcanismo canario. Pero esta afirmación no parece apoyada en los datos, ya que los autores reconocían que la anomalía no proviene del manto inferior (el lugar de procedencia de los penachos, según las teorías más recientes, ver *Ens. Cien. Tierra*, 3, 137148, 1996). Además, la anomalía térmica no es exclusiva de las Canarias, sino que abarca a una amplísima región del Atlántico, África y Europa; y, como puede verse en la sección b-b', parece incluso más importante bajo la zona del Atlas, en Marruecos, que bajo Canarias, situada sobre una zona no especialmente caliente.

En conclusión, las distintas variantes del modelo de punto caliente dejan sin resolver la mayor parte de los datos petrológicos, cronológicos y geoquímicos de la geología de Canarias, y no explican en absoluto los datos tectónicos, lo que nos lleva al segundo grupo de hipótesis.

Las hipótesis tectónicas sobre el origen de Canarias

La idea más citada de este grupo es que el carácter lineal del archipiélago se debe a la

existencia de una gran fractura que prolonga la Falla del Sur del Atlas, una estructura compleja y discutida que termina en Agadir (ciudad en la que provocó una catástrofe sísmica en 1960). La apertura de la falla descomprimiría la astenosfera provocando su fusión parcial, y por ello vulcanismo; este proceso comenzaría en el Atlas y se propagaría hacia el Atlántico, lo que explicaría la migración del vulcanismo. Después, 'una etapa de compresión en el Atlas cerraría la subida de magma, explicando los periodos inactivos. Los rasgos tectónicos del archipiélago quedarían justificados, ya que esta zona del Atlántico sería en realidad la prolongación de un área orogénica.

En la hipótesis de los bloques levantados, cada isla es un horst delimitado por fallas inversas causadas por la compresión de la dorsal atlántica. Su principal acierto es explicar la elevación diferencial de cada isla.

Las hipótesis tectónicas se encontraron con diversos problemas que no pudieron resolver. La inexistencia de fallas entre las Canarias y África fue el principal obstáculo de la fractura propagante; otro igualmente serio, que sólo se puso de relieve recientemente, es la inexistencia generalizada de astenosfera (p.ej., en la figura 3 todo el manto superior es frío en algunas zonas, p.ej. bajo b'): si no existiese una zona caliente en el manto superior, la simple rotura de la litosfera no daría lugar a magmatismo alguno. Por último, esta hipótesis no explicaba la elevación de las islas. Éste era precisamente el punto fuerte de la hipótesis de los bloques elevados, que sin embargo no explicaba cómo se formaron los magmas canarios, ni tampoco los periodos de inactividad.

Así se llegó a un largo periodo de insatisfactorio equilibrio, durante el que ninguna hipótesis propuestas consiguió resolver sus problemas; la del punto caliente, defendida con más insistencia, pareció a pesar de sus limitaciones ser la idea definitiva sobre el origen de las Islas Canarias.

UNA HIPÓTESIS SINTÉTICA PARA LAS CANARIAS

Dos innovaciones han venido a alterar este panorama, la más importante de las cuales ha sido la reinterpretación de los trabajos de tomografía sísmica aplicándoles la fértil idea de las "superplumas" del norteamericano Roger Larson. Al obtener sus radiografías del manto, los geofísicos han encontrado extensas zonas térmicamente- anómalas en el manto superior. alguna de ellas, que se extiende por América, Europa y África, parece ser la raíz aún caliente de uno de los grandes penachos térmicos que contribuyeron a la apertura del Atlántico.

Supongamos que la anomalía térmica definida en la figura 2 es el residuo de un antiguo penacho, e intentemos construir a partir de aquí una nueva hipótesis para Canarias. En primer lugar, ¿cómo podríamos localizar la posición de aquel antiguo penacho térmico? Muy simple: buscando un antiguo punto triple, formado (como en los libros) por la dorsal más un rift abortado, un aulacógeno. En los años 50, los estudiosos de la génesis del Atlas habían localizado ya este punto triple (Fig. 4), precisamente el lugar donde iban a crecer, mucho tiempo después, las Islas Canarias.

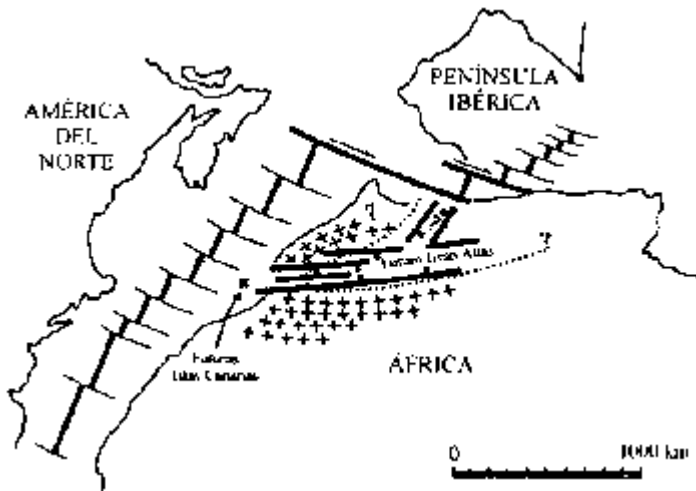


Figura 4. La causa de la situación y el origen de las Canarias podría ser la inatación de un punto triple jurásico en esta zona del Atlántico cuando este atarvesaba la fase "tipo Mar Rojo". El aulacógeno africano se transformaría después en la cadena del Atlas, por un proceso de pleacanalgamiento muy semejante al de la Cadena Ibérica. Según Lee y Burgess (1987)

Sobre esta base, casi todo encaja: los magmas canarios llevarían huellas del manto inferior (como los puntos calientes auténticos) y también del manto superior, donde este material ha residido durante los últimos 200 Ma. Canarias no estaría situada sobre ninguna cúpula batimétrica porque en esta zona no hay ninguna corriente de material proveniente del manto profundo. El magmatismo se expresaría siempre que existiese un sistema importante de fracturas, como el que vemos en las islas o el existente en África del Norte (ver más adelante), pero ya no haría falta ninguna teórica astenosfera para nutrir los volcanes canarios. La longevidad de las islas estaría justificada, ya que su suministro de

magma no dependería de un conducto pasajero, sino de una amplia zona estática. La diversidad petrológica, típica de las provincias volcánicas alcalinas (o sea, de bajo porcentaje de fusión del manto) sería una consecuencia del bajo contraste térmico de esta anomalía residual. Hasta la arquitectura básica de las islas (grandes complejos basales en su núcleo, importantes edificios en escudo, y conos terminales menores) se explicaría fácilmente en el nuevo esquema, como resultado del progresivo agotamiento de una fuente de magma no renovada.

Al principio de este apartado nos referimos a dos tipos de innovación. La segunda es el conocimiento detallado de la geología de Marruecos, que sólo se ha producido a finales de los años 80. Este avance ha permitido explicar otros datos de la geología de Canarias: los intervalos sin actividad, y la elevación de las islas.

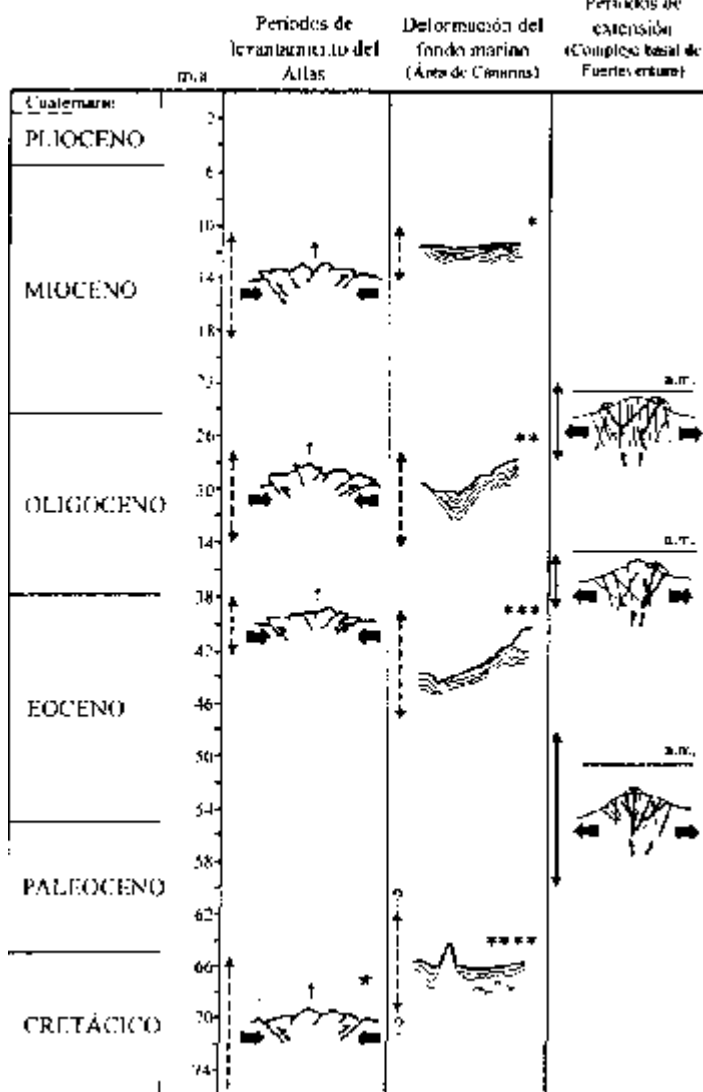


Figura 5. Un calendario de acontecimientos magmáticos y tectónicos significativos en el área de Canarias y el Atlas. Nótese cómo los periodos compresivos preceden a los de magmatismo, indicando aparentemente que

este último proceso aprovecha etapas distensivas regionales. Los periodos distensivos en Fuerteventura fueron datados por Stillman en 1987. Los asteriscos corresponden a distintos autores que han datado deformaciones regionales.

Como puede verse en la figura 5, los periodos de compresión en el Atlas (que, como en todas las cadenas de montañas, alternan con los distensivos) van acompañados en el tiempo por deformaciones en el fondo marino cerca del archipiélago (lo que demuestra que afectan a esa zona), y además preceden a los periodos de distensión mejor datados de Canarias, que son los del complejo basal de Fuerteventura. En estas épocas distensivas es precisamente cuando se inyectan los enjambres de diques: en general, éstos son los periodos de magmatismo generalizado. Así pues, a la pregunta "¿por qué el magmatismo no es continuo en las Canarias?" ya podemos responder que ello se debe a que la zona, como todas las que sufren los efectos de una orogenia, pasa por ¿pocas alternantes de distensión y compresión(3): en las primeras, hay vulcanismo; en las segundas, el magmatismo queda prohibido... y se levantan las islas. ¿Cómo?

La mejor hipótesis es aplicar la misma fórmula que explica la elevación de algunos relieves en el Atlas. Son las llamadas "estructuras en flor" (Fig. 6), elevaciones tectónicas producidas en las zonas de cizallamiento intenso, y en momentos transgresivos. La existencia de cizallas importantes en las islas, y la semejanza de escala horizontal y vertical entre estas estructuras y los bloques insulares hace que esta solución sea la más verosímil para explicar el levantamiento de las islas.

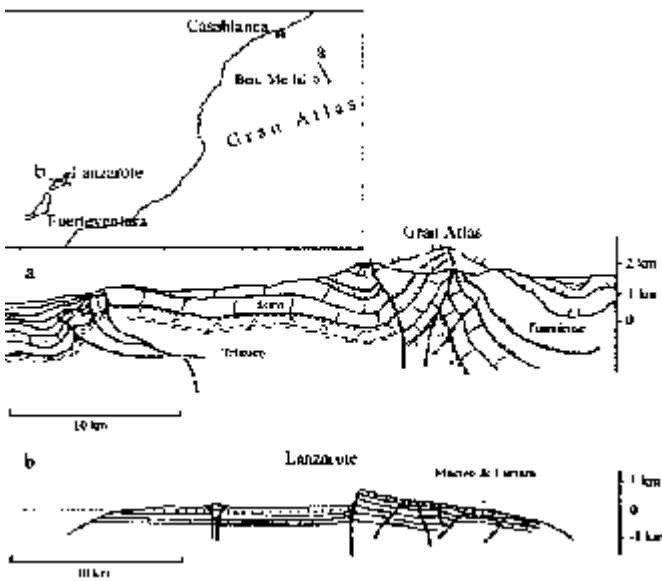


Figura 6. Estructura en flor cartografiada en 1992 por Laville y Piqué en el Sltto Atlas. b, corte geológico (E-O, por el paralelo 29°N) de Lanzarote, con estructuras tectónicas inspiradas en el trabajo de 1995 de Marinoni y Pasquarè. Las escalas horizontal y vertical (x2) son iguales en los dos esquemas.

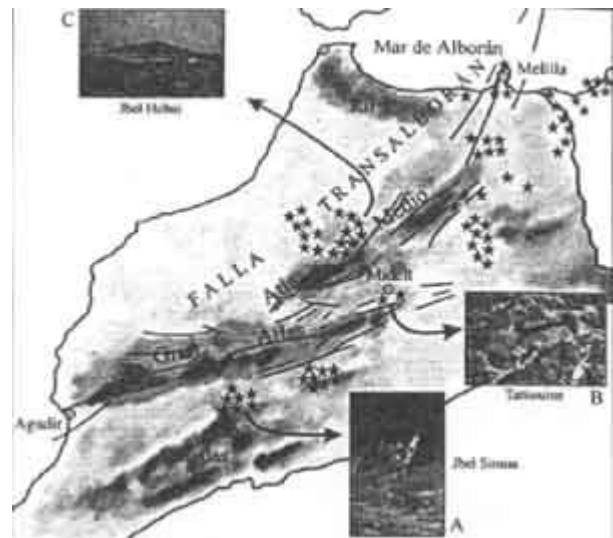


Figura 7. Los volcanes (estrella) del Atlas y Antiatlás, A es el pitón fonolítico de Jbel Siroua; B son las carbonatitas de Tattiouine; y C es un cono basáltico en Jbel Hebai.

Este modelo permite una comprobación sencilla: si (como parece indicar la figura 2) el manto anómalo bajo Canarias se extiende también bajo el Atlas, habrá también una comunidad magmática. Esta predicción se cumple incluso en los detalles: zonas del Atlas y

el Antiatlás han sido testigos desde hace casi 50 Ma de un vulcanismo (Fig. 7) gemelo del canario. Gemelo en cuanto a tipos rocosos (basaltos alcalinos, traquitas, fonolitas, incluso carbonatitas), en cuanto al tiempo (no hay vulcanismo histórico pero sí existen decenas de conos cuaternarios; y el vulcanismo se interrumpe durante millones de años), y también en cuanto al control tectónico: como puede verse en la figura 7, la mayoría de los centros volcánicos están próximos a un gran sistema de fracturas que incluye la falla del Sur del Atlas y también su prolongación hacia el Norte, el sistema de fallas Trans-Alborán, que cruza el Mediterráneo hasta Alicante.

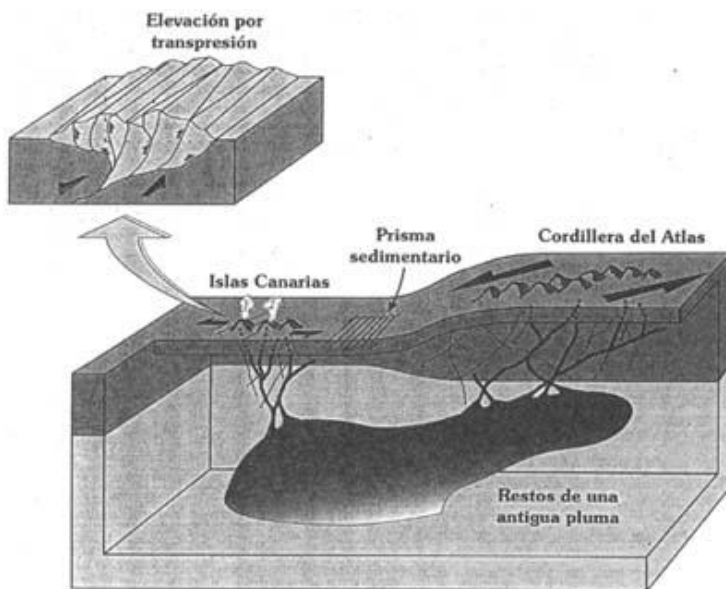


Figura 8. Esquema ilustrativo del modelo sintético del origen de Canarias. El recuadro ilustra la hipotética elevación de una isla como una estructura en flor.

Este modelo (Fig. 8) puede llamarse de síntesis, ya que engloba elementos de las tres hipótesis previas: del punto caliente toma la idea de un manto anómalo bajo Canarias; de la fractura propagante, la importancia del control tectónico en la producción y canalización (o interrupción) de los magmas; y de los bloques elevados, la explicación tectónica de la actual posición de las islas. Las únicas características importantes de la

geología canaria que quedan sin una explicación clara son (1) los basaltos toleíticos de Lanzarote, probablemente una expresión de la heterogeneidad química de un residuo que ha residido tan largamente en el manto, y (2) la propagación del vulcanismo hacia el Oeste; aunque es interesante subrayar que también el vulcanismo del Atlas se propaga hacia el Norte, hacia los volcanes cuaternarios del Sureste español. En cambio sí existe una explicación coherente para un punto crítico: la inexistencia de una red de fracturas entre Canarias y África. En los estudios sísmicos regionales destaca la existencia de una laguna sísmica casi absoluta en esa zona, mientras que los seísmos se reanudan en el área de Canarias y hacia el Atlántico (Fig. 9). Los sismólogos marroquíes creen que en esta inexplicable zona de calma sísmica la deformación se produce por flujo dúctil, asísmico. ¿Por qué? Quizá porque la enorme acumulación de sedimentos (un regalo del antiguo aulacógeno) absorbe preferentemente la deformación de esta manera. Porque deformación existe, como puede comprobarse en la figura 5. Una confirmación (reconocemos que circunstancia) de esta idea es que el mismo fenómeno sucede en la desembocadura del Tajo, otro lugar de fuerte sedimentación. Es interesante pensar que, de no ser por esta característica, la fracturación (y, por lo tanto, también el vulcanismo) podría ser continua entre África y Canarias ... con lo que habría habido un más fácil corredor hacia Canarias para la fauna africana: la biogeografía (incluyendo la geografía humana) del archipiélago seguramente sería hoy muy distinta.

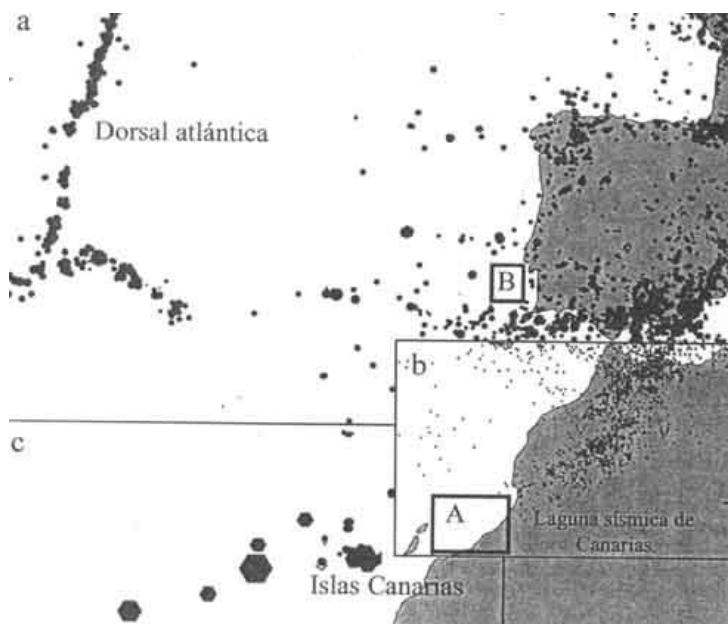


Figura 9. Sismicidad reciente en Canarias y áreas adyacentes. No hay estudios conjuntos, por lo que se han usado tres fuentes distintas, conservando su simbología. a está tomado de Andeweg et al. (1999); b, de Medina y Cherkaoui (1991); c, de Wysession et al. (1995). A y B designan las lagunas sísmicas de Canarias y Lisboa; se propone que ambas se deben a la gran masa de sedimentos, que induce deformación por flujo dúctil.

ALGUNAS REFLEXIONES

Los aficionados a elucubrar sobre filosofía de la Ciencia pueden encontrar materia de reflexión en la historia de las hipótesis genéticas sobre Canarias: las pompas y la lámina térmica son ejemplos perfectos de las hipótesis auxiliares defensivas que, según Lakatos, emite una teoría dominante cuando se ve en peligro. Asimismo, la pretensión de Kaj Hoernle de haber demostrado el punto caliente canario cuando sus datos fueron decisivos para arruinarlo son un caso paradigmático de ideas preconcebidas aplicadas torcidamente a la interpretación de un excelente conjunto de datos.

Por último, una pequeña crítica para los enseñantes de la Ciencia (entre los que podrían hallarse ocasionalmente los autores) que tienden a ignorar la tecnología. Las revoluciones científicas suelen cabalgar instrumentos nuevos. En los años sesenta fueron los magnetómetros; ahora, la hibridación de sismógrafos y ordenadores que ha permitido la tomografía sísmica. Esto significa al menos dos cosas interesantes: una, que la revolución movilista ha logrado resoluciones suficientes para abordar problemas a escala regional, lo que augura una

época apasionante de vuelcos de modelos aparentemente sólidos. Y otra, que el que tiene el aparato adecuado ¡lo es necesariamente el que sabe qué hacer con los datos que el aparato proporciona. Lo cual augura una época apasionante para los estudiosos de los países en vías de desarrollo científico, como es el nuestro.

BIBLIOGRAFÍA

Andeweg, B., De Vicente, G., Cloetingh, S., Giner, J. y Muñoz, A. (1999). Local stress field and intraplate deformation in spatial and temporal interplay of regional stress sources. *Tectonophysics*. 305, 153-164.

Anguita, F. (1996). La evolución de la tectónica de placas: el nuevo interior de la Tierra. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*. 3, 137-148.

Casillas, R., Ahijado, A. y Hernández-Pacheco, A. (1994). Zonas de cizalla dúctil en el complejo basal de Fuerteventura. *Geogaceta*. 15, 117-120.

Hoemle, K. y Schmincke, H.U. (1993). The role of partial melting in the 15-Ma geochemical evolution of Gran Canaria: A blob model for the Canary hotspot. *J. Petrol.* 34, 599-626.

Hoemle, K., Zhang, Y.S. y Graham, D. (1995). Seis mie and geochemical evidence for large-scale mantle upwelling beneath the eastern Atlantic and western and central Europe. *Nature*. 374, 34-39.

Laville, E. y Piqué, A. (1992). Jurassic penetrative deformation and Cenozoic uplift in the Central High Atlas (Morocco): A tectonic model. Structural and orogenic inversions. *Geol Rundsch*. 81, 157-170.

Lee, C. W. y Burgess, C.J. (1978). Sedimentation and tectonic controls in the Early Jurassic Central High Atlas trough, Morocco. *Geol. Soc. Am. Bull.* 89, 1199-1204.

Marinoni, L.B. y Pasquaré, G. (1994). Tectonic evolution of the emergent part of a volcanic ocean island: Lanzarote, Canary Islands. *Tectonophysics*. 239, 111-135.

Medina, F. y Cherkaoui, T. (1991). Focal mechanisms of the Atlas earthquakes, and tectonic implications. *Geol. Rundsch*. SO, 639-648.

Stilman, C.J. (1987). A Canary Islands dyke swarm: Implications for the formation of oceanic islands by extensional fissural volcanism. In: H.C. Halls y W.F. Fahrig (Eds.): Mafic dyke swarms. *Geol. Ass. Can. Sp. Paper*, 34, 243-255.

Wyssession, M.E., Wilson, J., Baitkó, L. y Sakata, R. (1995). Intraplate seismicity in the Atlantic Ocean basin: A teleseismic catalog. *Bull. Seism. Soc. Am.* 85, 755-774. 9

