Ancochea Soto, E. (2023). Las rocas de la erupción de Cumbre Vieja 2021 y su variabilidad composicional. En Afonso-Carrillo, J. (Ed.), *Tajogaite. Enseñanzas de una erupción volcánica (La Palma, otoño 2021)*, pp. 25-61. XVIII Semana Científica Telesforo Bravo. Instituto de Estudios Hispánicos de Canarias. Puerto de la Cruz. 234 pp. ISBN 978-84-09-45782-1

1. Las rocas de la erupción de Cumbre Vieja 2021 y su variabilidad composicional

Eumenio Ancochea Soto

Catedrático de Petrología y Geoquímica, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid

anco@ucm.es

En primer lugar, agradecer al Instituto de Estudios Hispánicos de Canarias y a Julio Afonso que me hayan invitado a participar, por segunda vez, en una «Semana Científica Telesforo Bravo». En este caso para analizar algunos aspectos de la erupción de La Palma de 2021.

La reciente erupción de La Palma es sólo el último episodio de la historia geológica de la isla, pero nos ha proporcionado claves para poder entender mejor su evolución anterior. Los datos sobre esta erupción que se exponen a continuación han sido obtenidos por un grupo de investigadores de la Universidad Rey Juan Carlos (URJC), de la Fundación Telesforo Bravo – Juan Coello (FTB-JC) y de la Universidad Complutense (UCM), que juntaron sus esfuerzos para ayudar durante la emergencia en los aspectos relacionados con la geología y la petrología de la erupción.

Introducción

La erupción de Las Palma de 2021 ha sido una ocasión única para que importantes grupos de científicos de diferentes campos, con distintos enfoques y con distintos objetivos, trabajaran todos centrados en el estudio de un único episodio volcánico. Este hecho está permitiendo profundizar mucho más en el conocimiento de este tipo de procesos y comprender mejor cómo afectan a la naturaleza y a la vida de las islas Canarias y de otras islas de origen similar. Las conferencias de esta Semana son un ejemplo de ello. (Afonso-Carrillo, 2023).

Durante la emergencia volcánica hemos estado pendientes de los sismos, de la nube eruptiva, de los gases y también de los materiales no gaseosos emitidos por el volcán, porque todos ellos proporcionaban una información imprescindible para que los organismos competentes pudieran tomar las decisiones pertinentes. Nuestro grupo, coordinado por los responsables del Instituto Geológico y Minero de España (IGME), nos ocupamos de muestrear y analizar esencialmente los materiales lávicos emitidos cada día (Figs 1 y 2). Conocer la composición de las rocas ayudaba a deducir las características fisicoquímicas de los magmas (temperatura, viscosidad, densidad...) y a tener una idea de cuál podía ser el proceso eruptivo esperable. Del mismo modo, era básico controlar las posibles variaciones en la composición a lo largo de la erupción, por si pudieran tener implicaciones en la dinámica eruptiva.



Fig. 1. De izquierda a derecha Raquel Herrera (URJC), Eumenio Ancochea (UCM) y Álvaro Márquez (UCM) con una muestra de la colada en Todoque (23/09/2021).

Una vez finalizada la erupción se ha demostrado que ese muestreo diario no fue sólo importante durante la emergencia, sino que ha sido imprescindible para poder reconstruir la evolución del proceso eruptivo. Muchas de las coladas que se emitieron los primeros días han sido cubiertas por coladas posteriores y hoy día es prácticamente imposible muestrearlas o muestrearlas con la seguridad de saber el día exacto en que se emitieron. Si no se hubiera hecho ese muestreo se habría perdido una información indispensable.

En la conferencia nos centraremos en dar a conocer aspectos de las rocas en los que otro tipo de comunicaciones científicas no se detienen. Expondremos primero, brevemente, cómo aparecen las rocas en el terreno, para, a continuación, comentar cuáles son sus principales características petrológicas, mineralógicas y geoquímicas y que nos dicen estas características composicionales sobre el origen de los magmas.



Fig. 2. Juan J. Coello-Bravo (FTB-JC) muestreando la colada todavía caliente del primer delta de lava en la playa de Los Guirres (06/10/2021).

Las rocas en el terreno

En general, en una erupción se forman dos grandes grupos de productos rocosos cuando se enfría y consolida el magma: los que son expulsados fragmentados por el volcán, como consecuencia de fenómenos explosivos (materiales o productos o rocas piroclásticas) y los que son emitidos por el volcán de forma más tranquila y continua, esencialmente como coladas de lava (materiales o productos o rocas lávicas). Los materiales de esta erupción fueron similares a los de cualquier otra erupción estromboliana de magmas

básicos y por lo tanto a los de cualquiera de las erupciones históricas canarias. Pasaremos revista de forma rápida a esos productos, resaltando aquellas características más significativas o específicas de las rocas que se formaron en este caso.

Productos piroclásticos

Los productos piroclásticos reciben diferentes denominaciones según su tamaño: bombas o bloques si superan los 64 mm, lapilli entre 2 mm y 64 mm y ceniza si su tamaño es inferior a 2 mm. En general, los fragmentos más gruesos caen más cerca del centro de emisión y cuanto más finos son, más lejos pueden llegar.

Bombas: Las bombas y bloques cayeron en las proximidades de las bocas eruptivas y su acumulación constituyó una parte fundamental del cono volcánico. Por estar incandescentes eran especialmente visibles por la noche, cuando se podía apreciar mejor que seguían trayectorias de transporte balísticas, que estaban fundidas cuando caían y que rodaban después por la ladera del volcán (Fig. 3). Llegaron a alcanzar distancias de hasta un kilómetro y medio del centro de emisión (PEVOLCA Informe del Comité Científico 211225).



Fig. 3. Bombas cayendo en la ladera N del cono y rodando y acumulándose en las zonas bajas. Atardecer del 13 de diciembre de 2021, a pocas horas de finalizar la erupción.

Cuando caían podían producir impactos destructivos en edificios y construcciones (Fig. 4) y, si caían sobre materiales blandos dar lugar a cráteres de impacto muy abundantes y llamativos (Figs 5 y 6).



Fig. 4. Impacto de una bomba en una tapia a unos 1200 m al NNO del cono principal (09/10/2021).



Fig. 5. Campo de bombas con las marcas de impacto, a unos 400 m al este del cono volcánico (12/12/2021).



Fig. 6. Bombas y cráteres de impacto sobre depósitos de lapilli (12/12/2021).

Las bombas llegaron a tener varios metros de tamaño (PEVOLCA Informes del Comité Científico 211003 y 211213) y rara vez tenían la morfología fusiforme característica de las bombas volcánicas que giran durante su trayectoria por el aire (Fig. 7). Su superficie exterior era rugosa y áspera (Fig. 8) y no eran frecuentes las superficies en «corteza de pan», tan habituales en bombas de otras erupciones. Esa superficie rugosa era en ocasiones una costra escoriácea de algún centímetro que rodeaba una roca de la misma erupción, pero menos vesiculada y mucho más densa (Fig. 9). En algunos casos las bombas aún incandescentes rodaban por la ladera y se acumulaban en la base del cono (Fig. 10). A veces caían más fundidas, no producían estructuras de impacto y se aplastaban contra el suelo (bombas en «plasta de vaca», Fig. 11).

Lapilli: Los lapilli (2-64 mm) constituyen el material piroclástico más abundante en las zonas externas del cono volcánico (Fig. 12). Cabría destacar entre sus características más diferenciales la irregularidad de sus formas, el intenso color negro, el brillo vítreo, su gran vesicularidad y su fragilidad. Con frecuencia al caminar sobre él se rompían produciendo un sonido de vidrio roto. A veces, tenían formas alargadas, como bastoncillos o ramitas, pero siempre con terminaciones puntiagudas o espinosas (Figs 13 y 14).



Fig. 7. Bomba fusiforme en las proximidades del extremo oriental del cono. (13/12/2021).



Fig. 8. Bomba con superficie externa muy irregular y rugosa. (12/12/2021).



Fig. 9. Bomba y cráter de impacto. Se puede observar la costra rugosa muy vesiculada y el interior la roca más masiva (12/12/2021).



Fig.10. En el primer plano, huellas de impacto de bombas. En el pie del cono puede verse una acumulación de bombas que rodaron por la ladera (flecha). Foto tomada durante la parada de la erupción de la mañana del 12 de diciembre del 2021.



Fig. 11. Bomba en «plasta de vaca». Impactó sobre un lapilli fino (12/12/2021).



Fig. 12. Acumulación de capas de lapilli y cenizas en la zona de El Corazoncillo a unos 1200 m de distancia del cono volcánico principal.



Fig. 13. Aspecto general de un lapilli. El de la foto es de tamaño algo superior al máximo de lapilli (64 mm), pero es muy representativo de los mismos.



Fig. 14. Lapilli de tamaño medio (16 a 32 mm). Se puede apreciar la vesicularidad, color y brillo característicos y la forma alargada de alguno de ellos (13/11/2021).

Cenizas: El material piroclástico más fino son las cenizas (<2 mm). Su distribución está controlada por el viento. Cubrieron grandes extensiones, especialmente hacia el suroeste del volcán, arrastradas por los vientos alisios. Su espesor fue considerable hasta unos 6-7 km al suroeste del cono volcánico (Figs 15 y 16).

Las cenizas constituyeron un importante problema para las edificaciones, para los cultivos (Fig. 16) y para la vida diaria de la población, causando molestias en la piel, ojos y vías respiratorias. El examen al microscopio electrónico nos permite ver la morfología ampliada de los granos de ceniza, su gran vesicularidad, rugosidad y aspereza, ilustrándonos claramente sobre los daños que podían causar en las personas (Fig. 17).



Fig. 15. Coladas de la erupción del San Juan (1949), cubiertas de cenizas, junto al Centro de Interpretación Caños de Fuego (12/10/2021).

Coladas de lava

Las coladas de lava fueron las que causaron mayor destrucción recorriendo los 6-7 km que separaban las bocas de salida del mar y cubriendo todo a su paso. Su composición no varió mucho, pero sus características sí fueron diferentes a lo largo de la erupción y a lo largo de su recorrido, puesto que al irse alejando de la boca eruptiva se enfriaban, aumentando su

viscosidad y variando su tipología. Aunque mayoritariamente fueron lavas «aa», en los frentes, y sobre todo los primeros días, eran coladas en bloques, de gran espesor y de avance muy lento (pocos metros por hora) (Figs 18-20).



Fig. 16. Techo de invernaderos hundidos por el peso de las cenizas en las proximidades de Puerto Naos, a 4,5 km del cono del volcán (noviembre 2021).



Fig. 17. Imágenes de electrones secundarios de las cenizas de los primeros días de la erupción (Unidad de Técnicas Geológicas, CAI de Ciencias de la Tierra y Arqueometría Universidad Complutense de Madrid y Arroyo *et al.*, 2021).



Fig. 18. Frente de colada en bloques en Todoque, en los primeros días de la erupción (26/09/2021).



Fig. 19. Colada de lava de gran espesor que cubrió una parte de El Corazoncillo los primeros días de la erupción. En la foto, hecha desde Montaña Cogote, se aprecia su gran espesor en comparación con las casas. Su morfología externa aparece suavizada por depósitos posteriores de lapilli y de ceniza (06/11/2021).



Fig. 20. Primeras coladas en bloques, casi detenidas en Todoque (24/09/2021).



Fig. 21. Coladas «aa» avanzando lentamente en la carretera de Tajuya (13/10/2021).

Otras veces, días más tardes, eran coladas «aa» de espesores mucho menores, que avanzaban más rápidamente, sin grandes bloques, pero siempre con una escoria bien desarrollada en la parte superior y frontal de la misma (Figs 21 y 22).



Fig. 22. Escoria de techo y frontal de la colada «aa» de la figura 21 (13/10/2021).

También se emitieron coladas pahoehoe, pero en menos ocasiones. Fueron frecuentes en algunas bocas en la zona norte del campo de lavas y especialmente en el borde sur, donde a finales de noviembre se emitieron por centros marginales, alejados del cono principal. Su espesor es mucho menor que el de las demás coladas. Su superficie externa presentó distintas morfologías típicas de este tipo de coladas: en placas, en tripas, en dedos, cordadas..., pero siempre con la superficie áspera, rugosa o espinosa (Figs 23-25).



Fig. 23. Colada pahoehoe en El Corazoncillo, descendiendo de las zonas altas, junto al cono principal.



Fig. 24. Aspecto general de la superficie de una colada pahoehoe en El Corazoncillo, suavizada por depósitos posteriores de ceniza (13/12/2021).



Fig. 25. Estructuras cordadas en las coladas pahoehoe de El Corazoncillo parcialmente cubiertas por cenizas posteriores (12/12/2021).

Xenopómeces (restingolitas)

Durante la erupción se emitieron también fragmentos de rocas de carácter extraño al magma (xenolitos) y arrastrados al exterior por él. Entre ellos destacan unos fragmentos claros muy vesiculares y ligeros, similares a pómeces y análogos a los de la erupción de El Hierro de 2011 (Troll *et al.*, 2011), que también habían aparecido en otras erupciones como la del Teneguía (Araña & Ibarrola, 1973) y que han sido denominados xenopómeces o restingolitas. Normalmente han tenido tamaño lapilli y estaban rodeados parcialmente por una costra negra del magma de la erupción. Fueron frecuentes durante el mes de octubre, en un área de unos 2 km alrededor de las bocas de emisión principales. Los más abundantes eran de color blanco, pero también los había de color gris (Fig. 26).

Composición de las rocas

El análisis de la composición de las rocas puede realizarse a diferentes escalas: en muestra de mano, al microscopio o con diferentes análisis



Fig. 26. Xenopómeces (restingolitas).

químicos. Durante la erupción el examen de las muestras de mano, aunque menos preciso, era una buena herramienta para conocer la composición de los magmas de forma rápida y detectar posibles cambios.

Las rocas de la erupción han tenido siempre colores negros o grises oscuros, con diferentes grados de vesicularidad y con pocos cristales visibles. En las rocas de los primeros días se reconocían cristales negros milimétricos que podían corresponder tanto a anfíboles, como a piroxenos (Fig. 27).



Fig. 27. Muestra de tefrita anfibólica, poco vesiculada de los primeros días de la erupción (23/09/2021).

Después cambió la composición, el anfíbol desapareció y aparecieron cristales de olivino, más fácilmente reconocibles (Fig. 28). Ocasionalmente se podían ver cristales de plagioclasas de hasta algún centímetro (Fig. 29). La vesicularidad aumentó claramente en las coladas pahoehoe (Fig. 30).



Fig. 28. Basanita piroxénico - olivínica vesiculada, con cristales visibles de olivino (06/10/2021).

La clasificación correcta de una roca volcánica debe hacerse a partir de su análisis químico, proyectando su contenido en SiO₂ y Na₂O + K₂O en el Diagrama TAS de la IUGS (Le Maitre *et al.*, 2002) (Fig. 31); pero ese análisis tarda días en obtenerse. Por eso, al principio de la erupción las rocas recibieron denominaciones poco precisas. Se hablaba bien de basanitas o bien de tefritas. En sentido estricto, por la mineralogía visible, no podían recibir ninguna de esas dos denominaciones, pues para eso haría falta que se vieran minerales de tipo feldespatoide (nefelina, haüyna...) y éstos no se observaban. Lo correcto, con el grado de conocimiento que se tenía en esos momentos, era haber denominado a las rocas: basaltos (basaltos anfibólicos,



Fig. 29. Basanita piroxénico - olivínica, con un cristal centimétrico de plagioclasa (09/10/2021).



Fig. 30. Muestra de colada pahoehoe muy vesiculada (05/12/2021).

basaltos piroxénicos...), como se hizo, por ejemplo, con las rocas del Teneguía, que hoy sabemos que también eran basanitas y tefritas. Se utilizaron esas denominaciones porque, desde el punto de vista químico, los «basaltos», en La Palma, suelen ser tefritas o basanitas, no porque se tuviera certeza de que realmente lo fueran.

Como hemos mencionado, a lo largo de la erupción ha habido dos tipos rocosos: un Tipo 1, emitido durante los primeros días, que eran rocas con cristales visibles de piroxeno y anfíbol y después, hasta el final de la erupción, un Tipo 2: que eran rocas con cristales visibles de piroxeno y olivino. Lo mismo sucedió en la erupción del Teneguía (Araña & Fúster, 1974; Ibarrola, 1974), con la diferencia que, en esa ocasión, el Tipo 1 se emitió durante mucho más tiempo que el Tipo 2.



Fig. 31. Diagrama TAS de clasificación de las rocas volcánicas (sólo un sector del mismo) y proyección de las rocas de la erupción. Todas se proyectan en el campo de basanitas y tefritas. La diferencia entre ambas es que mientras las basanitas tienen olivino frecuente (>10%), en las tefritas éste es escaso (<10%). Triángulos: las rocas del Tipo 1 y círculos: las del Tipo 2.

Una vez realizados los análisis químicos se pudo comprobar (Fig. 31) que las rocas del Tipo 1 eran tefritas y las del Tipo 2 eran basanitas, eso, unido al tipo de minerales que aparecían con más frecuencia permite decir que las primeras son **tefritas piroxénico anfibólicas** y las segundas son **basanitas piroxénico olivínicas**.

Las rocas al microscopio: textura y mineralogía

La importancia del estudio petrográfico (microscópico) de las rocas radica en que no sólo permite conocer la composición mineralógica de las mismas, sino que también, a partir de la morfología y tamaño de los minerales y de las relaciones entre ellos (textura) deducir cuál ha sido su historia de formación y cuáles han sido los procesos que afectaron al magma a lo largo de su ascenso desde su zona de generación a la superficie. Eso es posible porque en las rocas volcánicas, el magma, al enfriarse rápidamente en la superficie terrestre, conserva las características que tenían esos minerales cuando estaban en profundidad en el manto o en la corteza terrestre.

En las rocas volcánicas podemos diferenciar unos minerales, los que denominamos fenocristales, que son los cristales de mayor tamaño (> 0,1 mm) que a veces, si son grandes, son visibles a simple vista y que están rodeados por una masa (que denominamos «matriz») de minerales más pequeños o de vidrio (Fig. 32).

Los fenocristales ya están en el magma que hace erupción. Han ido creciendo durante su ascenso o durante los momentos que han podido estar en reservorios magmáticos. Las variaciones que observamos en su composición o en su textura nos ayudan a identificar y caracterizar esos estadios de su crecimiento. La matriz y, a veces, el borde más externo de los fenocristales se forma en los últimos momentos de ascenso y enfriamiento del magma.

En las figuras 32 y 33 pueden verse dos ejemplos característicos de los dos tipos rocosos de la erupción.



Fig. 32. Microfotografía de una tefrita piroxénico anfibólica. A la izquierda con polarizadores paralelos y a la derecha con polarizadores perpendiculares. Px: piroxeno; Anf: anfíbol; PI: plagioclasa; OI: olivino; Ox: óxidos de Fe y Ti; V. vesículas. Los cristales más grandes (fenocristales) están incluidos en una matriz con cristales más pequeños y vidrio (de color negro).



Fig. 33. Microfotografía de una basanita piroxénico olivínica. A la izquierda con polarizadores paralelos y a la derecha con polarizadores perpendiculares OI: olivino; Px: piroxeno; PI: plagioclasa.

Tanto en las basanitas, como en las tefritas la matriz es el componente más abundante (65-70%). Las vesículas constituyen de media el 15% en ambos tipos de rocas, pero las variaciones de unas muestras a otras son muy importantes. El contenido medio en fenocristales, excluidas las vesículas, es del 15% en tefritas y algo más del 20% en basanitas.

El piroxeno es el fenocristal predominante: del orden del 60% en el total de los fenocristales, similar en ambos tipos de rocas. En las tefritas el anfíbol es el segundo fenocristal en abundancia ($\approx 19\%$) y en las basanitas lo es el olivino ($\approx 28\%$). La plagioclasa es minoritaria en ambos tipos ($\approx 5\%$).

Composición de los minerales

Así como las características texturales de los minerales se estudian mediante el microscopio polarizador, la composición química de los minerales se analiza mediante microsonda electrónica. De esa forma podemos conocer la composición química de cualquier punto dentro de un mineral (Fig. 34).

Los fenocristales más abundantes son de **piroxeno**. Se trata de un clinopiroxeno, normalmente de pocos milímetros, habitualmente subidiomorfo maclado y muy zonado (Figs 34 y 35).

Aunque se observan importantes variaciones composicionales dentro de un único cristal de piroxeno (Fig. 34), en términos generales son todos diópsidos (Fig. 36), sin que se aprecien variaciones de la composición de tefritas a basanitas, ni variaciones de la composición a lo largo de la erupción. La composición media de 500 análisis es Di_{50} - En_{37} - Fs_{13} (diópsido 50%, enstatita 37%, ferrosilita 13%).



Fig. 34. Arriba: imagen de microsonda de un piroxeno. En él se pueden apreciar cambios de coloración, que reflejan cambios composicionales, que permiten conocer los distintos momentos de formación del cristal. Los puntos que aparecen dentro de él son los puntos en los que se han realizado los análisis. Abajo: variación del contenido en diferentes elementos en ese piroxeno.



Fig. 35. Microfotografías de piroxenos (Px). A la izquierda con polarizadores paralelos y a la derecha con polarizadores cruzados (perpendiculares).



Fig. 36. Clasificación de los piroxenos. Proyección en el diagrama Mg-Ca-Fe.

El **antíbol** es el segundo mineral en abundancia en las tefritas y aparece sólo esporádicamente en algunas basanitas. Tienen todos unos aspectos muy similares. Al microscopio aparecen esencialmente como fenocristales aislados anaranjados y ocasionalmente en agregados con los demás fenocristales habituales (clinopiroxeno y olivino). Los fenocristales tienen tamaños que varían de 0,3 μ m a algunos milímetros. Son subidiomorfos a alotriomorfos, redondeados con bordes de reacción de 25 a 150 μ m (Fig. 37). Composicionalmente todos son antíboles cálcicos de tipo kaersutita (Leake *et al.*, 2004).



Fig. 37. Microfotografías de anfíboles (Anf) con bordes de reacción. A la izquierda con polarizadores paralelos y a la derecha con polarizadores cruzados (perpendiculares).

El olivino es el segundo fenocristal más abundante en las basanitas y es también frecuente en las tefritas. Es idiomorfo o subidiomorfo, en ocasiones con formas hexagonales. Su composición es la de forsterita: Fo_{78-85} y la media de los 200 análisis es: Fo_{82} (Fig. 38). Puede estar ligeramente zonado.



Fig. 38. Microfotografías de olivinos. Los cristales coloreados sin las flechas son esencialmente piroxenos. Polarizadores cruzados (perpendiculares).

Las plagioclasas aparecen siempre en la matriz, como bastones alargados en cristales muy pequeños (<100 μ m). Es menos frecuente que se observen cristales de mayor tamaño, como fenocristales. Aun así, constituyen el cuarto fenocristal en abundancia. En los fenocristales se puede observar su maclado polisintético característico (Figs 29 y 39). Su composición es muy homogénea, son labradoritas, media (200 medidas): An₆₂Ab₃₆Or₂ (anortita 62%, albita 36%, ortosa 2%) y no hay diferencias a lo largo de la erupción (Fig. 40). Los fenocristales son ligeramente diferentes a los microlitos.



Fig. 39. Microfotografías de plagioclasas. En los cristales más grandes (fenocristales) se aprecia la macla polisintética. En la matriz aparecen como microlitos. Los cristales coloreados sin las flechas son esencialmente piroxenos. Polarizadores cruzados (perpendiculares).



Fig. 40. Clasificación de las plagioclasas. Proyección en el diagrama Ab (albita) – An (anortita) – Or (ortosa).

Composición química de las rocas

Las características químicas de las rocas se utilizan en primer lugar, como hemos destacado, para clasificarlas. Todas las rocas de la erupción tienen un contenido en SiO₂ muy parecido: entre el 42,5% y el 44,5% del total en peso de la roca y un contenido en álcalis (Na₂O + K₂O) entre el 4,5% y el 6,5%, lo que indica que todas son basanitas o tefritas (Fig. 31).

Los contenidos medios (Tabla 1) evidencian algunas diferencias: el contenido medio en SiO₂ de las tefritas (43,6%) es casi igual que el de las basanitas (43,7%). En cambio, el contenido medio en álcalis es claramente superior en tefritas que en basanitas: 6,0% frente 5,1%. Lo mismo sucede con el Al₂O₃: 14,7% frente 13,5%. Por el contrario, los contenidos medios en MgO y CaO son más bajos en tefritas que en basanitas: MgO: 6,4% en tefritas frente a 8,0% en basanitas y CaO: 10,6% frente a 11,4% respectivamente. Todas estas diferencias, aunque escasas, son significativas e indican que las tefritas son claramente rocas más evolucionadas que las basanitas.

	Tefritas	Basanitas
SiO ₂	43,6	43,7
Al ₂ O ₃	14,7	13,5
Fe ₂ O _{3(Tot)}	13,3	13,4
MnO	0,2	0,2
MgO	6,4	8,0
CaO	10,6	11,4
Na ₂ O	4,2	3,6
K ₂ O	1,8	1,5
TiO ₂	3,8	3,6
P ₂ O ₅	1,0	0,8
LOI	-0,4	-0,5
Total	99,4	99,6

Tabla 1. Composición media (elementos mayores) de los dos tipos litológicos (datos de Pankhurst *et al.* 2021, Day *et al.* 2022 e Inéditos (IGME).

Composición y origen de las rocas

Las características composicionales de las rocas están siendo estudiadas en detalle por diferentes e importantes grupos de científicos de todo el mundo (p.e.: Day *et al.*, 2022) y, entre ellos, por nuestro grupo (Ubide *et al.*, 2022;

Ubide *et al.*, 2023) y están obteniendo resultados muy interesantes e importantes, que se irán dando a conocer. Por eso, en este apartado nos limitaremos a hacer unas consideraciones de carácter muy general sobre diferentes aspectos genéticos y compararemos la composición de las rocas de la erupción de 2021 con el resto de las erupciones históricas de La Palma.

La proyección de la composición de las rocas en el diagrama TAS de la IUGS (Le Maitre *et al.*, 2002) nos proporciona una información inicial, pero muy importante, sobre los magmas/rocas. El grado de alcalinidad de las rocas es un primer indicador de sus condiciones de formación. En el caso de la isla de La Palma (Fig. 41) la mayor parte de las rocas analizadas se proyecta en los campos de las rocas fuertemente alcalinas, lo que indica que se trata de magmas que se han formado por menor grado de fusión parcial y/o mayor profundidad que los de otras islas como Tenerife, Gomera, Lanzarote o Fuerteventura (Fig. 42).



Fig. 41. Proyección de la composición de las rocas de toda la isla de La Palma en el diagrama TAS de la IUGS (Le Maitre *et al.*, 2002). La mayor parte de las rocas son fuertemente alcalinas.



Fig. 42. Proyección en el diagrama TAS de las rocas de las islas Canarias (Ancochea & Brändle, 2004). Las rocas más alcalinas son las de La Palma, las de Gran Canaria las de mayor variabilidad composicional.

Por otro lado, también en términos generales y para rocas de la misma familia, cuanto menor es el contenido en SiO_2 y en álcalis (Na₂O + K₂O) de una roca, menor es el grado de evolución magmática de la misma. De modo que, dentro de las rocas fuertemente alcalinas, las menos evolucionadas son las basanitas y las más evolucionadas las fonolitas (Fig. 41). Las de la erupción del 2021 (Fig. 31) son, por lo tanto, todas ellas rocas poco evolucionadas.

Las erupciones históricas de La Palma han sido composicionalmente muy parecidas (Hernández Pacheco & Valls, 1982; MAGNA, 2015). Todas son rocas fuertemente alcalinas, mayoritariamente basanitas y tefritas, poco evolucionadas. Sólo en las erupciones de Jedey y en la de San Juan hay algunas rocas más evolucionadas (Fig. 43). Esa similitud composicional tiene como consecuencia que, si no hay otros factores, el tipo de erupción esperable en esta ocasión (y en ocasiones futuras) iba a ser similar al de otras erupciones históricas, como así ha sido, en términos generales.

Fig. 43. Composición de las rocas de las erupciones históricas de La Palma (Datos de Hernández Pacheco & De La Nuez, 1983; De Vicente Mingarro,1986; Krügel *et al.*, 1999; MAGNA, 2015 e IGME, inéditos).

La similitud con las rocas de la erupción del Teneguía, resulta especialmente llamativa. Las dos erupciones empezaron con la emisión de

lavas de tefritas anfibólicas y terminaron con lavas de basanitas olivínicas (Fig. 44). Aunque hubo una gran diferencia: en el Teneguía las tefritas se emitieron durante la mayor parte de la erupción (hasta el 12 de noviembre), mientras que en la erupción de 2021 sólo se emitieron los primeros días (Figs 45 y 46).

Fig. 44. Comparación de la composición de las rocas de la erupción del Teneguía (Ibarrola, 1974) y de la erupción del 2021 (IGME, inéditas), en el diagrama TAS de la IUGS.

Por otra parte, mientras que el cambio de composición en la erupción del 2021 según Day et al. (2022) fue gradual (ver, por ejemplo, la variación de MgO, Fig. 45), el del Teneguía fue brusco (Fig. 46).

Fig. 45. Variación del contenido en MgO a lo largo de la erupción del 2021. Las muestras en negro corresponden a las tefritas (Day *et al.*, 2022). Se puede apreciar que existe un cambio gradual de composición.

Fig. 46. Variación del contenido en MgO a lo largo de la erupción del Teneguía. Las muestras en negro corresponden a las tefritas (basado en Ibarrola, 1974). Se puede apreciar que, en este caso, el cambio de composición es más tardío y brusco.

Aunque las basanitas y las tefritas son tipos de rocas poco evolucionadas, las tefritas lo son algo más que las basanitas (más álcalis, menos CaO y MgO). Las basanitas pueden en ocasiones ser magmas primarios, es decir magmas que se han formado en el manto y han llegado a la superficie rápidamente, sin experimentar procesos de evolución magmática, que requieren que el magma en su ascenso se detenga en algún momento.

Para saber si un magma es muy poco o nada evolucionado (magma primario) existen diferentes criterios químicos, como son, por ejemplo, el contenido en Cr o Ni. En general, se considera que los magmas poco evolucionados tienen un contenido en Ni superior a 400 ppm y de Cr superior a 1000 ppm. En la figura 47 podemos ver como las tefritas, tanto de la erupción de 2021, como las del Teneguía, tienen menos Cr y Ni que las basanitas (de nuevo son más evolucionadas) y ninguna alcanza contenidos en esos elementos para poder suponer que son magmas primarios. Lo mismo podemos decir del resto de los magmas de las erupciones históricas.

Otro criterio que suele utilizarse para identificar un magma primario es el contenido en forsterita de los olivinos que suele ser superior al 86% en los olivinos de magmas primarios; como hemos visto ninguno de los 200 olivinos medidos alcanza ese valor.

En resumen, estos primeros datos composicionales nos indican que, ni en esta erupción, ni en todas las erupciones históricas, hay rocas que procedan del enfriamiento de magmas primarios y que por lo tanto han tenido que estar retenidos un tiempo en reservorios en su ascenso desde el manto superior donde se originaron, a la superficie.

Fig. 47. Contenido en Cr y Ni de las rocas de las erupciones históricas de La Palma (Datos de Hernández Pacheco & De La Nuez, 1983; De Vicente Mingarro,1986; Krügel *et al.*, 1999; MAGNA, 2015 e IGME, inéditos).

Los modelos conceptuales basados en datos petrogenéticos que se han propuesto para las erupciones históricas de La Palma o incluso para todo el Edificio Cumbre Vieja (p.e.: Klügel *et al.*, 2000 o Barker *et al.*, 2015) plantean efectivamente la existencia de reservorios magmáticos en el manto superior y en la corteza, en los que los magmas se detienen y evolucionan antes de hacer erupción. Esos modelos parecen perfectamente válidos también para la erupción del 2021 (p.e.: Day *et al.*, 2022; Ubide *et al.*, 2023).

Consideración final

En el fragor de la erupción, es posible que a nivel del público general se le diera una importancia menor a la composición de las rocas y que éste haya sido uno de los aspectos más desconocido. Espero haber podido cubrir esa laguna y haber puesto en evidencia la importancia que tiene el estudiar las rocas para poder entender los procesos volcánicos y como el conocerlas puede ayudar en las actuaciones durante las emergencias volcánicas.

AGRADECIMIENTOS.- El equipo que ha obtenido los datos que se exponen en esta conferencia está formado por Raquel Herrera (URJC), Álvaro Márquez, María José Huertas y el autor (UCM), Juan José Coello y Jaime Coello (FTB-JC), David Sanz e Inés Galindo (IGME) y Teresa Ubide (Universidad de Queensland, Australia). Un agradecimiento especial por el apoyo en el trabajo de campo y muestreo durante la erupción de 2021 a Pilar Llanes, Marta Rincón, Fidel Martín, Iván López, Jacinto Leralta, Gabriel Leralta, Javier Coello, María Pilar García-Alonso, Ricardo Balcells y todos los participantes en el equipo de urgencias del IGME-CSIC URGE, así como a Carmen López y Ramón Casillas por las facilidades para el acceso a la toma de muestras. Nuestro agradecimiento también a Alfredo Larios del Centro Nacional de Microscopía Electrónica de la Universidad Complutense, por su ayuda en los análisis de los minerales y a María Ascensión Barajas, Carmen Valdehita y Pedro Lozano por su trabajo en la preparación de las muestras, realizado con una urgencia especial. Para las campañas de campo se ha contado con la ayuda económica de la Universidad Complutense de Madrid (Acción Especial AENC1/21-29277) y de la Universidad Rey Juan Carlos.

Bibliografía

- AFONSO-CARRILLO, J. (Ed.) (2023). *Tajogaite. Enseñanzas de una erupción volcánica (La Palma, otoño 2021).* XVIII Semana Científica Telesforo Bravo, Instituto de Estudios Hispánicos de Canarias, Puerto de la Cruz.
- ANCOCHEA, E. & J.L. BRÄNDLE (2004). Capítulo 8.1.9: Características composicionales del vulcanismo canario. En: J.A. Vera (Ed.), *Geología de España*, pp. 662-665. Instituto Geológico y Minero de España y Sociedad Geológica de España.
- ARAÑA, V. & J.M. FÚSTER (1974). La erupción del volcán Teneguía, La Palma, Islas Canarias, 1971. *Estudios Geológicos* Vol. Teneguía, pp. 15-18.

- ARAÑA, V. & E. IBARROLA (1973). Rhyolitic pumice in the basaltic pyroclasts from the 1971 eruption of Teneguía volcano, Canary Islands. *Lithos* 6: 273-278.
- ARROYO, X., L. ANDREU, S. LÓPEZ-ANDRÉS, M.L. GARCÍA-LORENZO, M.J. HUERTAS & E. ANCOCHEA (2021). Caracterización de materiales geológicos del volcán de Cumbre Vieja (La Palma, España) y su posible revalorización como materia prima en aplicaciones ambientales. XXVII Reunión de la Sociedad Española de Arcillas, Póster y Libro de Resúmenes, pp. 13-14.
- BARKER, A.K., V.R. TROLL, J.C. CARRACEDO & P.A. NICHOLLS (2015). The magma plumbing system for the 1971 Teneguía eruption on La Palma, Canary Islands. *Contrib. Mineral. Petrol.* 170: 1-21.
- DAY, J.M.D., V.R. TROLL, M. AULINAS, F.M. DEEGAN, H. GEIGER, J.C. CARRACEDO, G.G. PINTO & F.J. PÉREZ-TORRADO (2022). Mantle source characteristics and magmatic processes during the 2021 La Palma eruption. *Earth Planet. Sci. Lett.* 597, 117793.
- DE VICENTE MINGARRO, I. (1986). Estudio Geoquímico de las Erupciones Históricas del Archipiélago Canario. Tesis de Licenciatura. Universidad Complutense de Madrid.
- HERNÁNDEZ-PACHECO, A. & J. DE LA NUEZ (1983). Las extrusiones sálicas del sur de la Isla de la Palma. *Estudios Geol.* 39: 3-30.
- HERNÁNDEZ-PACHECO, A. & M.C. VALLS (1982). The historic eruptions of La Palma Island (Canarias). Arquipelago, Universidade dos Açores. Série Ciências da Natureza 3: 83-94.
- IBARROLA, E. (1974). Temporal modification of the basaltic materials from 1971 eruption of the Teneguía volcano (La Palma, Canary Islands). *Estudios Geol.*, Vol. Teneguía, pp. 49-58.
- KLÜGEL, A., K.A. HOERNLE, H.U. SCHMINCKE & J.D.L. WHITE (1999). The chemically zoned 1949 eruption on La Palma (Canary Islands): Petrologic evolution and magma supply dynamics of a rift-zone eruption. *Jour. Geophys. Res.*, 94 (1-4): 267-282.
- KLÜGEL, A., K.A. HOERNLE, H.U. SCHMINCKE & J.D.L. WHITE (2000). The chemically zoned 1949 eruption on La Palma (Canary Islands): petrologic evolution and magma supply dynamics of a rift zone eruption. *Jour. Geophys. Res., Solid Earth*, 105 (B3): 5997-6016.
- LE MAITRE, R.W. (ED.), A. STRECKEISEN, B. ZANETTIN, M.J. LE BAS, B. BONIN, P. BATEMAN, G. BELLIENI, A. DUDEK, S. EFREMOVA, J. KELLER, J. LAMERE, P.A. SABINE, R. SCHMID, H. SORENSEN & A.R. WOOLLEY (2002). *Igneous Rocks: A classification and glossary of terms*. Recommendations of the International Union of Geological Sciences, Subcommission of the Systematics of Igneous Rocks. Cambridge University Press.
- LEAKE, B.E., A.R. WOOLLEY, W.D. BIRCH, E.A. BURKE, G. FERRARIS, J.D. GRICE, F.C. HAWTHORNE, H.J. KISCH, V.G. KRIVOVICHEV, J.C. SCHUMACHER, C.N. SSTEPHENSON & E. WHITTAKER (2004). Nomenclature of amphiboles: additions and revisions to the International Mineralogical Association's amphibole nomenclature. *European Journal of Mineralogy* 16: 191-196.
- MAGNA: MAPA GEOLÓGICO DE ESPAÑA 1085 III-IV El Pueblo (2015). Escala 1:25.000. Instituto Geológico y Minero de España. *Mapa y Memoria*, 170 pp.

- PANKHURST, M.J., J.H. SCARROW, O.A. BARBEE, J. HICKEY, B.C. COLDWELL, ROLLINSON, J.A.R. RODRÍGUEZ-LOSADA, A. MARTÍN-LORENZO, F. RODRÍGUEZ, W. HERNÁNDEZ, P.A. HERNÁNDEZ & N.M. PÉREZ (2021). Petrology of the opening eruptive phase of the 2021 Cumbre Vieja eruption, La Palma, Canary Islands. *Volcanica* 5: 1-10.
- PEVOLCA Informe del Comité Científico 211003. https://www3.gobiernode canarias.org/noticias/wp-content/uploads/2021/12/251221-INFORME-Comit%C3%A9 -Cient%C3%ADfico-PDF.pdf
- PEVOLCA Informe del Comité Científico 211213. https://www3.gobiernode canarias.org/noticias/wp-content/uploads/2021/12/131221-INFORME-Comi% C3%A9 -Cient%C3%ADfico-PEVOLCA-PDF.pdf
- PEVOLCA Informe del Comité Científico 211225. https://www3.gobiernode canarias.org/noticias/wp-content/uploads/2021/12/251221-INFORME-Comit%C3%A9 -Cient%C3%ADfico-PDF.pdf
- TROLL, V., A. KLÜGEL, M.-A. LONGPRÉ, S. BURCHARDT, F.M. DEEGAN, J.C. CARRACEDO, S., WIESMAIER, U. KUEPPERS, B. DAHREN, L.S. BLYTHE, T. HANSTEEN, C. FREDA, D.A. BUDD, E.M. JOLIS, E. JONSSON, F. MEADE, S. BERG, L. MANCINI & M. POLACCI (2011) Floating sandstones off El Hierro (Canary Islands, Spain): The peculiar case of the October 2011 eruption. *Solid Earth Discuss.* 3: 975-999.
- UBIDE, T., Á. MÁRQUEZ, E. ANCOCHEA, M.J. HUERTAS, R. HERRERA, J.J. COELLO-BRAVO, D. SANZ-MANGAS, J. MULDER, A. MACDONALD & I. GALINDO (2023). Discrete magma injections drive the 2021 La Palma eruption. *Science Advances* 9 (27), eadg4813. DOI: 10.1126/sciadv.adg4813.
- UBIDE, T., Á. MÁRQUEZ, R. MAGEE, E. ANCOCHEA, M.J. HUERTAS, D. SANZ, R. HERRERA, J.J. COELLO-BRAVO, A. MACDONALD, J. MULDER, E. CONN, J.T. CAULFIELD & I. GALINDO (2022). Using high-resolution geochemistry to monitor variations in magma dynamics during eruption, EGU General Assembly 2022, Vienna, Austria, 23-27 May 2022, EGU22-9743, 2022.