

ANÁLISIS E INTERPRETACION DE LOS MATERIALES VOLCANICOS DEL CERRO DE LOS FRAILES (CABO DE GATA, ALMERIA) (1)

J. M. Fernández Soler (*)

RESUMEN

La formación del volcán de Los Frailes se produjo en dos ciclos, de composiciones andesítica anfibólica (Frailes-I) y andesítica de dos piroxenos (Frailes-II), apoyadas sobre la prolongación hacia el este de las andesitas y dacitas del extremo sur de Cabo de Gata (edificio de Revancha-Sabinal-Cabo de Gata). El ciclo Frailes-I es discontinuo y ha formado domos y brechas autoclásticas principalmente, mas un nivel intermedio de colada piroclástica pumítica; este ciclo contiene niveles sedimentarios intercalados. Al NE es cubierto por una formación de rocas sedimentarias e hidroclásticas. El ciclo Frailes-II es continuo, y ha producido coladas de lava, los dos domos sumitales, y brechas piroclásticas de formación poco o nada explosiva. Otras manifestaciones volcánicas presentes son diques y domos de composición dacítica (biotítica-anfibólica), que cortan a los materiales del ciclo Frailes-I, y que serían los representantes más meridionales del grupo volcánico dacítico de Rodalquilar-Rellana-Garbanzal. Por tanto la propuesta sucesión generalizada de ciclos que comenzaron siendo muy explosivos para acabar con extrusiones subvolcánicas (domos) no es válida esencialmente en la construcción de Los Frailes. Una revisión de los datos geocronológicos, y la disposición en el campo de los materiales permite considerar la hipótesis de que las andesitas piroxénicas del ciclo Frailes-II pudieron ser contemporáneas o posteriores a las dacitas (esencialmente ignimbríticas) del grupo de Rodalquilar.

Palabras clave: *Volcanismo, Mioceno, andesitas, dacitas, rocas piroclásticas, Cabo de Gata.*

ABSTRACT

The formation of Los Frailes volcano had two stages, which produced amphibole andesites (Frailes-I) and two-pyroxene andesites (Frailes-II) respectively, lying on the extension of the dacites and andesites of the southernmost Cabo de Gata volcanoes (Revancha-Sabinal). The FRAILES-I stage is discontinuous, and has mainly produced domes and autoclastic breccias, in addition to an intermediate level of pumice-and-ash flow; this unit has some intercalated sedimentary levels. To the NE it is covered by a formation of sedimentary and hydroclastic rocks. The Frailes-II stage is continuous, and has formed some lava flows, the two summit domes, and some pyroclastic rocks of scarcely explosive origin. Other volcanic features are some domes and dikes of biotite-amphibole dacites, which affect to the Frailes-I group; these are the southern continuation of the dacitic volcanic group of Rodalquilar-Rellana-Garbanzal. The generally accepted idea of a succession in Cabo de Gata of cycles which started very explosively and ended with subvolcanic extrusions (domes) does not seem to be very realistic at least in the building of Los Frailes. A review of geochronological data, and the field disposition of the described materials does not discard the hypothesis that the pyroxene andesites of Frailes-II might have been formed simultaneously or even than later the ignimbritic dacites of the Rodalquilar group.

Key words: *Volcanism, Miocene, andesites, dacites, pyroclastic rocks, Cabo de Gata.*

(1) Trabajo subvencionado por el subproyecto 463 del C.S.I.C., "Cinemática de los mantos bético-rifeños, reconstrucción del paleo-margen sudibérico y naturaleza de las manifestaciones básicas".

(*) Departamento de Mineralogía y Petrología e Instituto Andaluz de Geología Mediterránea (C.S.I.C.). Universidad de Granada. Granada-18071 (España).

Introducción

La zona volcánica de Cabo de Gata, localizada en el sureste de la península, al sur de la Falla de Carboneras (Fig. 1), y que se prolonga bajo el mar, es el mayor conjunto volcánico Neógeno dentro de la provincia magmática del sureste del España y de toda la zona de Alborán. Tres periodos de actividad han ocurrido en la zona de Cabo de Gata durante el Mioceno. Sobre un basamento metamórfico, el episodio más antiguo, de volcanismo andesítico basáltico a dacítico, ocurrió en el Mioceno Medio y fue profundamente modificado con posterioridad por la acción de fluidos hidrotermales. Al segundo episodio corresponden rocas que van desde dacitas a andesitas piroxénicas y piroxénico-anfibólicas, seguidas típicamente por emisiones de andesitas basálticas, de edad Tortoniense Inferior y Medio. El tercer episodio proporcionó grandes volúmenes de dacitas y riolitas biotíticas y anfibólicas, intensamente hidrotermalizadas y mineralizadas, en torno al área de Rodalquilar (grupo Rodalquilar-Rellana-Garbanzal), y es de edad Tortoniense Superior. El conjunto es fosilizado por sedimentos marinos (sistemas arrecifales del Mioceno Terminal, Addicott *et al.*, 1979; Dabrio y Martín, 1979).

El segundo episodio volcánico, en el cual se incluye el área que se estudia en este trabajo, es el más voluminoso de los tres y sus productos son con mucho los más variados y mejor conservados. Tuvo su mayor desarrollo en la zona de Los Frailes, Las Negras, Mesa Roldán y Carboneras.

Varios sistemas de fallas afectan a la zona volcánica de Cabo de Gata, y algunos de ellos presumiblemente eran ya activos cuando se produjo la emisión volcánica. El más importante es un sistema transcurrente NE-SW, coherente con la Falla de Carboneras, la cual delimita la zona de Cabo de Gata. Perpendicularmente se desarrolla otro sistema de componente normal, NW-SE, que compartimenta groseramente esta zona en "bloques". Al igual que se ha postulado para otros centros volcánicos de la zona de Alborán (Hernández *et al.*, 1987), la emisión de las rocas volcánicas se produjo en este área en relación con la formación de las cuencas sedimentarias, básicamente por fracturación del basamento alpino.

En este trabajo se revisan las principales características macro y microscópicas de las rocas volcánicas de la segunda fase de actividad eruptiva, en el volcán de Los Frailes, uno de los centros volcánicos mejor conservados y de aspectos mineralógicos y rangos composicionales más variados. Las características generales de este edificio fueron establecidas por Fúster *et al.* (1965) y Bordet

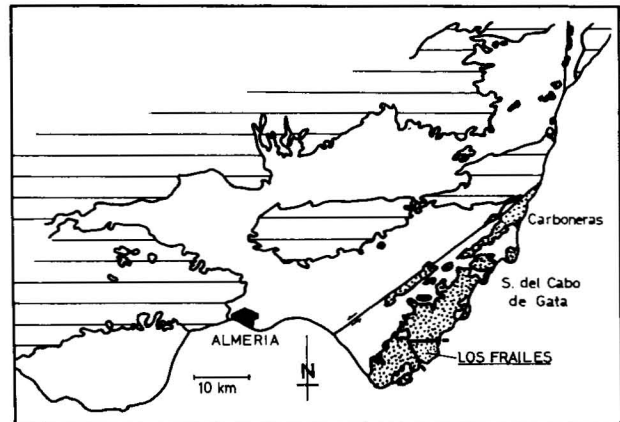


Fig. 1.—Esquema de posición del área investigada. Rayado: materiales béticos pre-orogénicos. Punteado: rocas volcánicas neógenas.

FUSTER <i>et al.</i> (1965)	BORDET (1985)	este trabajo
V. TORTONIENSE (dacítico)	ciclo C (torton. terminal)	? Volc. DACÍTICO ROJO ? (g. de Rodalquilar) 5
V. HELVECIENSE (andes. pirox.)	ciclo B _D (6 D)	FRAILES II 1 3 Unidad del Morrón de Mateo 4
V. BURDIG. PREHELVEC. (andes. anfibólicas)	ciclo B _A	FRAILES I 2
"aglomerado de transición"		
V. PREBURDIGALIESE (andes. anfib. pirox.)	ciclo A (serravaliense)	materiales PREFRAILES 1

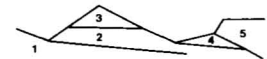


Fig. 2.—Cuadro de correlación entre unidades y edades propuestas en trabajos previos y unidades consideradas en este trabajo. Los números en el esquema de posición (abajo) se corresponden con los indicados en la 3.ª columna del cuadro.

(1985); una correlación entre las unidades distinguidas por dichos autores y la considerada en este trabajo se presenta en la Figura 2. Cada ciclo se inicia con fases de gran explosividad, formadoras de tobas, y es seguida por fases eruptivas de tipo nube ardiente, que originaron diversos tipos de aglomerados o conglomerados; el fin de cada ciclo lo marca la formación de intrusiones subvolcánicas (domos).

En esquema, este segundo ciclo que originó el edificio de Los Frailes se compone de dos litologías muy diferentes, caracterizadas por las asociaciones de fenocristales plagioclasa + ortopiroxeno + clinopiroxeno + opacos, y plagioclasa + hornblenda + opacos + (ortopiroxeno) + (biotita). En base al contenido en fenocristales, las llamaremos andesitas piroxénicas y andesitas anfibólicas respectivamente. Posiblemente, no obstante, algunas de las rocas llamadas andesitas en

base a las características mineralógicas pueden realmente caer en el campo de las dacitas de acuerdo con su contenido anhidro en SiO_2 . A su vez, estas dos litologías se distribuyen en dos grupos:

1. Un grupo inferior (Frailes-I), caracterizado por la predominancia de andesitas anfibólicas, pero variable desde andesitas anfibólico-piroxénicas a dacitas biotíticas. La característica más señalada es su discontinuidad: se compone de varias unidades eruptivas separadas por niveles sedimentarios de desigual importancia.

2. El grupo superior (Frailes-II), que forma los relieves más altos, se compone de rocas andesíticas piroxénicas de aspecto bastante homogéneo. No presenta interrupciones importantes en la emisión, y se superpone al grupo inferior por medio de una discontinuidad importante, señalada por niveles sedimentarios y zonas de erosión y alteración marina en las rocas anfibólicas.

Materiales pre-Frailes

Los materiales sobre los que se instala el edificio de Los Frailes aparecen representados a partir de la línea San José-Pozo de Los Frailes hacia el oeste. Es posible que se encuentren también en puntos de la costa de San José a Los Escullos. Hacia el sur se continúa hasta el área de Genoveses y Borronar. En su mayor parte esos materiales son rocas piroclásticas y masivas alteradas, aunque esta alteración en algunos puntos (Fuentecilla, Pedrizas) no es muy importante.

En la zona del Pozo de Los Frailes, estos materiales presentan dos tramos sucesivos:

(a) Un depósito de colada pumítica (del tipo "pumice-and-ash flow" según Smith y Roobol, 1982), de colores ocres y blancos (máximo tamaño de los fragmentos de pómez: 2-5 cm), muy alterado, y con indicios de soldadura en ocasiones. Además de los fragmentos de pómez, de naturaleza completamente irreconocible, este depósito contiene un pequeño porcentaje de elementos líticos, que tienden a agruparse a modo de lentes. El tamaño de los bloques líticos alcanza los 50 cm. en algunos casos. Un grupo de ellos son de una roca también muy alterada, y otros en cambio son de andesita piroxénica muy vítrea, con estructura fluidal, de color oscuro y bien conservada. En estas rocas, el único fenocristal abundante es la plagioclasa (8%), y escasos cristales de ortopiroxeno y magnetita (1%).

(b) Intruyendo en el depósito anterior, y cubriéndolo en casi su totalidad (Fig. 4), una formación de brechas y rocas masivas (domos-diques) se presenta como última manifestación volcánica previa a la formación de Los Frailes. A pesar de la alteración generalizada, es posible encontrar material bien conservado, especialmente en los cuerpos masivos. Componen este tramo rocas andesíticas con ortopiroxeno, hornblenda, biotita y magnetita, de colores muy oscuros (zona de Fuentecilla). Cuando están alteradas adoptan tonos verdosos característicos ("Volcanismo verde" de Bellon *et al.*, 1985). Textualmente la característica más llamativa de estas rocas es la abundancia de signos de desequilibrio mineral (plagioclasas esqueletales, coronas de clinopiroxeno en ortopiroxeno, bordes de óxidos de Fe, piroxeno y plagioclasa en hornblenda y biotita).

En San José se encuentra una situación equivalente: un "ash-flow" blanco, muy bentonitizado constituye la base en el barranco Caliguera, y es cubierto por un conjunto de rocas autoclásticas

verdosas (andesitas piroxénicas-anfibólicas, "Aglomerado Viejo" de Fúster *et al.*, 1965), que conectan hacia el SW con el conjunto andesítico-piroxénico de Carneros y Revancha-Sabinal (Fernández Soler y Muñoz, en prensa). Estas andesitas incluyen algunos depósitos piroclásticos tipo "surge". Más al Sur, en el Morrón de Genoveses aparece en la base también una manifestación de origen explosivo, de composición dacítica biotítica, la cual es cubierta discordantemente por el grupo andesítico piroxénico del Borronar.

Entre San José y el Pozo de Los Frailes (Las Pedrizas) aflora una brecha de composición andesítica piroxénica-anfibólica, a la que Fúster *et al.* (1965) diferenció bajo el nombre de "aglomerado de transición". Bordet (1985), en cambio, la asimila al grupo B, ligándola pues a las andesitas anfibólicas del aquí denominado ciclo Frailes-I. No obstante, puede observarse en algunos puntos que estos materiales pasan gradualmente al "aglomerado viejo" de San José, lo que unido a las características petrográficas y tipo de brecha muestran indudablemente que esta brecha de Las Pedrizas no es sino el techo, menos alterado, de los materiales previos a la edificación de Los Frailes. De hecho, es posible encontrar niveles sedimentarios de poco espesor en algunos puntos del contacto brecha de Las Pedrizas-andesitas anfibólicas de Frailes-I. Como puede observarse en la Fig. 3, las andesitas piroxénicas y anfibólicas de la zona de Fuentecilla también son previas a la formación de Los Frailes.

Materiales del ciclo Frailes I

El ciclo Frailes I, o ciclo andesítico anfibólico, es discontinuo. Se compone de varias unidades eruptivas separadas por niveles sedimentarios. Se apoya irregularmente sobre las rocas andesíticas piroxénico-anfibólicas descritas en el apartado anterior, al N, NW y SW, y en particular sobre las andesitas piroxénicas de Las Pedrizas al W, por medio de un delgado lecho sedimentario marino (conglomerado fosilífero).

Las sucesiones más completas de este ciclo se encuentran en el barranco de Caliguera (Fig. 5), y en la zona del cjo. de La Palma. Las unidades eruptivas reconocibles en este ciclo se componen de brechas líticas autoclásticas, muy vítreas y con grandes bloques masivos, coladas piroclásticas de bloques y ceniza, y coladas pumíticas. Todo este cortejo se asocia a domos de composición similar, que aparecen repartidos por todo el área del volcán (Caliguera, Loma Pelada, Cala del Tomate). Algunos de estos domos son efluentes, y han producido a modo de coladas de escaso recorrido, visiblemente enraizadas.

El límite superior es una superficie erosiva en la que aparecen:

- (1) Niveles calcareníticos de hasta 10 m. de potencia ("Calizas de Heterosteginas").
- (2) Niveles detríticos, conglomerados muy maduros y arenas de playa básicamente, con componentes procedentes de la erosión de las rocas andesíticas.
- (3) Paleotopografía en los materiales del ciclo Frailes I, más una zona de alteración superficial que penetra en las rocas, en las que produce una bentonitización intensa, especialmente en las rocas más vítreas. (Fig. 6).
- (4) Al NE (zona de Los Escullos) es cubierta por una serie en la que alternan niveles sedimentarios y materiales hidroclásticos.

Brechas líticas (esencialmente autoclásticas)

La mayor parte de este ciclo está compuesto por brechas líticas autoclásticas muy soldadas, de colores grises-blancos, compuestas por fragmentos muy heterométricos, de entre los que destacan grandes bloques, algunos de los cuales llegan a alcanzar dimensiones enormes (hasta varias decenas de metros; puede ser difícil saber si algunos de ellos son tales bloques aislados o auténticos domos pequeños, enraizados). Muchos de estos

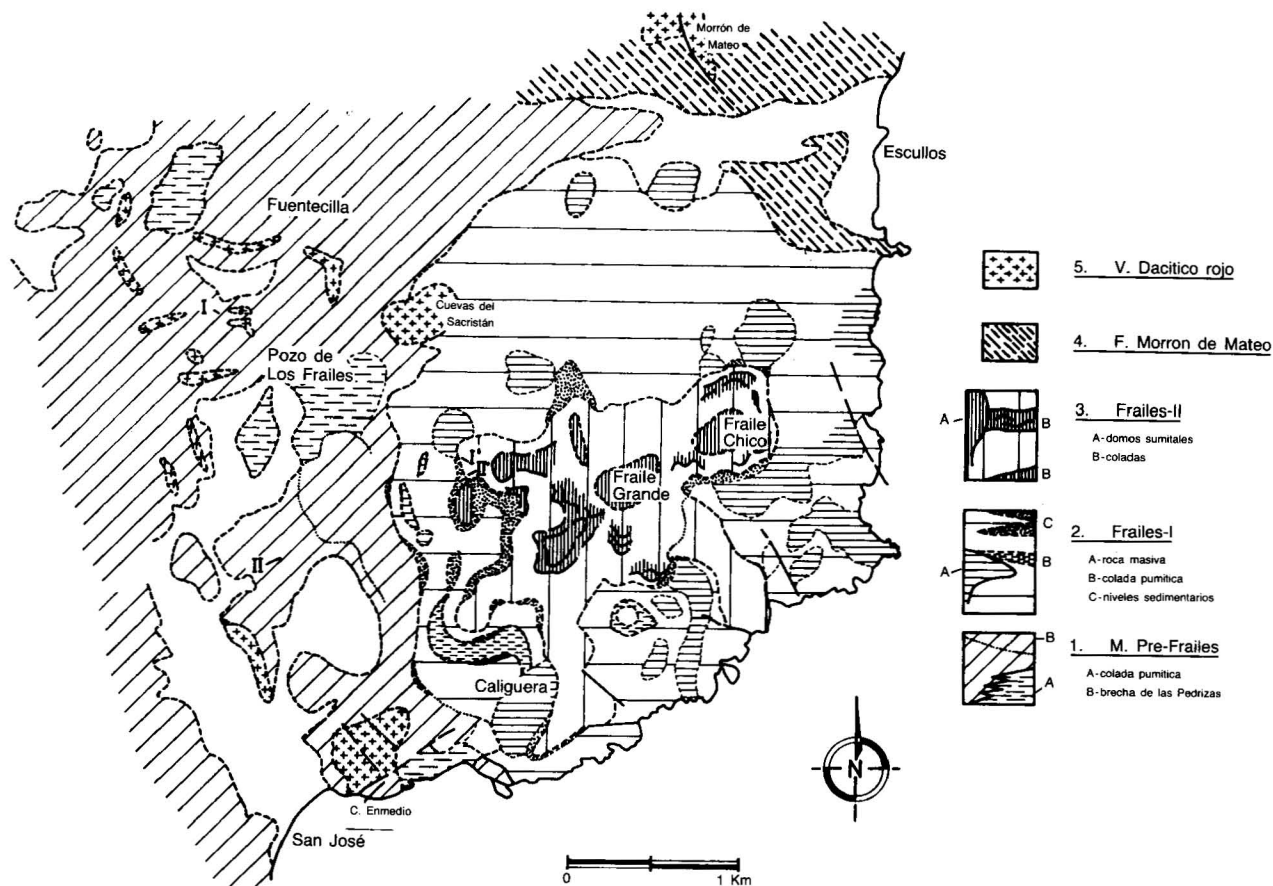


Fig. 3.—Disposición cartográfica de los materiales en el área del Cerro de Los Frailes.

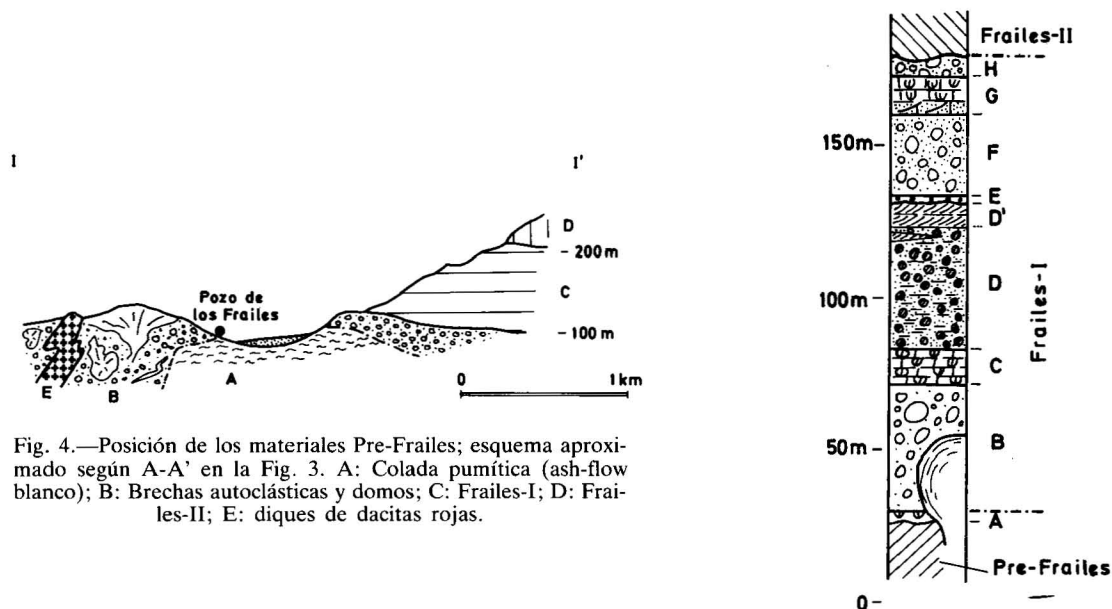


Fig. 4.—Posición de los materiales Pre-Frailes; esquema aproximado según A-A' en la Fig. 3. A: Colada pumítica (ash-flow blanco); B: Brechas autoclásticas y domos; C: Frailes-I; D: Frailes-II; E: diques de dacitas rojas.

Fig. 5.—Columna estratigráfica de los materiales del ciclo Frailes-I en el Bco. Caliguera. A, C y G: niveles sedimentarios; B, F y H: brechas autoclásticas; F: nivel epiclástico rojizo; D: colada pumítica (D': depósito de surge). Alturas sobre el nivel del mar.

bloques parecen restos de coladas lávicas, con estructura fluidal subhorizontal, y poco desarrollo de disyunción columnar.

La morfología general de las unidades de brechas autoclásticas es tabular, careciendo de cualquier otro tipo de ordenación. Los buzamientos que pueden medirse en los restos de coladas, de hasta 70° a veces, no necesariamente indican paleopendientes. Las características expuestas sugieren que estos cuerpos de brechas líticas proceden de la fragmentación de lavas andesíticas ácidas que aparecieron como domos y coladas de corto recorrido. La interstratificación con niveles sedimentarios marinos sugiere que la extrusión y disrupción subsiguiente se produjo en un ambiente marino somero; la fragmentación, no obstante, fue causada por la elevada viscosidad de la lava, de manera que los mecanismos de actuación hidroclásticos fueron minoritarios.

En el barranco de Caliguera aparecen tres unidades de estas brechas autoclásticas, entre las que hay un nivel de colada pumítica (Fig. 5). Es de destacar que la última unidad de brechas autoclásticas se sitúa, aparentemente sin interrupción importante, bajo las andesitas piroxénicas del grupo Frailes II, y por encima del nivel sedimentario ("calizas de Heterosteginas" y arenas de playa) en las que otros autores han reconocido el límite entre los ciclos piroxénico y anfibólico.

En algunos puntos de la costa estas brechas líticas muestran una mayor proporción de matriz, mayor redondeamiento de los fragmentos y menor tamaño máximo de éstos: estas son características propias de las coladas piroclásticas de bloques (Block-and-ash flows) formadas en erupciones tipo St. Vincent. A estas coladas piroclásticas se asocian delgados depósitos de "surge".

Cortando irregularmente a estas brechas se encuentran algunos pebble-dykes (Fúster *et al.*, 1965; Montenat *et al.*, 1984). Bordet *et al.* (1983) describen algunos fragmentos de granitoides encontrados en estos pebble-dykes y en niveles epiclásticos; para ellos, dichos fragmentos son los representantes de un plutonismo simultáneo al volcanismo, que no aflora en superficie. No hay que descartar, en nuestra opinión, que estos fragmentos sean en realidad grandes acúmulos de cristales ("crystal clots") formados en las cámaras magmáticas que alimentaron a los diferentes ciclos volcánicos, como sugiere su tamaño generalmente pequeño, las características petrográficas y mineralógicas de los mismos, y el hecho de que sean especialmente frecuentes en los niveles epiclásticos procedentes de la erosión de "ash-flows", en los que los elementos más resistentes son estos acúmulos de cristales.

Desde el punto de vista petrográfico, en las brechas autoclásticas, domos y coladas piroclásticas de bloques y ceniza se presentan dos tipos de asociaciones mineralógicas diferentes (ver Tabla 1).

- (1) Plag. + Hornb. + Opx. + (Biot.) + opacos + matriz
- (2) Plag. + Hornb. + Biot. + opacos + matriz

La primera asociación presenta mesostasis vítrea, a veces vesicular en la que comúnmente se desarrollan texturas perlíticas; en ocasiones aparecen vacuolas aplastadas. En lámina delgada es, en la mayoría de las muestras estudiadas, imposible distinguir los fragmentos de la matriz.

La asociación (2) se da comúnmente con matriz desvitrificada poco vesicular. Es la asociación más común en los domos, aunque también se da en fragmentos de las brechas.

En todos los casos, la plagioclasa se presenta como fenocristales idiomorfos o subidiomorfos, rotos, y como xenocristales con texturas "sieve" y zonaciones muy complejas. La hornblenda verde típicamente aparece como cristales idiomorfos, también rotos pero *no desestabilizados* (no hay bordes de reacción, o en todo caso son muy estrechos, lo que las diferencia de las andesitas con anfíbol del ciclo pre-Frailes). El ortopiroxeno (hiperstena) es idiomorfo, y no presenta relaciones de reacción con la hornblenda. Los cristales de biotita no suelen presentar tampoco bordes desestabilizados, y en muchos casos está incluida en cristales de anfíbol; su abundancia parece guardar una relación inversa con la del piroxeno.

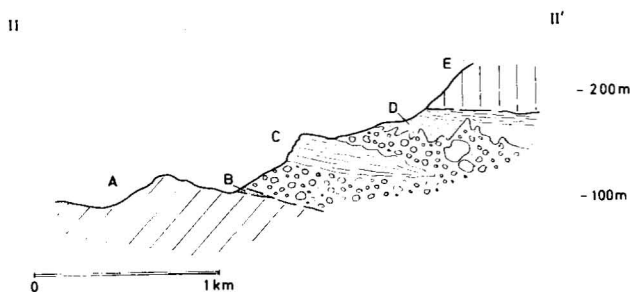


Fig. 6.—Disposición de los materiales del ciclo Frailes-I. Corte aproximado según B-B' en la figura 3. A: materiales Pre-Frailes; B: nivel sedimentario (conglomerado con ostreoides); C: brecha autoclástica con grandes fragmentos masivos; D: zona de alteración y niveles epiclásticos-sedimentarios; E: Frailes-II.

Tabla 1.—Análisis modales (por conteo de puntos) de muestras representativas de los distintos materiales.

A: fragmento lítico en "ash-flow" blanco (base de los materiales pre-Frailes). B y C: brechas autoclásticas (m. pre-Frailes). D y E: brechas autoclásticas del ciclo Frailes-I. F y G: ciclo Frailes-II (F: coladas IIA; G: coladas IIB)

	A	B	C	D	E	F	G
Matriz	89,2	59,5	53,2	61,6	59,0	48,6	35,8
Plagio.	8,6	29,3	32,6	24,6	25,1	38,8	45,1
Ortopx.	1,1	5,6	7,0	8,7	1,0	7,2	9,9
Clinopx.	—	5,3	—	—	—	3,9	4,6
Hornbl.	—	—	4,5	2,7	12,7	—	—
Biotita	—	—	—	—	0,1	—	—
Oxidos	0,8	1,0	2,0	1,4	1,2	2,5	4,6

Colada pumítica de Caliguera

Esta unidad, que aflora únicamente contorneando el cerro de La Palma y a ambos lados del cerro de Caliguera, tiene unos 40-50 m. de espesor y esta coronado por un depósito de "ash-cloud surge" de potencias variable entre 3-4 m. y unos 12 m. Se apoya netamente sobre un nivel calcarenítico, y a techo es cubierto por un delgado nivel epiclástico muy oxidado, de color rojizo.

Los fragmentos de pómez son de una andesita-dacita blanca, muy rica en Biotita y Hornblenda. El tamaño de estos fragmentos no es muy grande (máximo unos 30 cm., medio unos 3 cm.). Los fragmentos líticos que se encuentran en este depósito definen la laminación, y en ocasiones tienden a concentrarse en "bolsadas"; son fragmentos de andesitas piroxénicas y anfibólicas arrancados de unidades más bajas. Los fragmentos de pómez son de menor tamaño en el tercio inferior del depósito. La matriz que rodea a estos fragmentos está muy enriquecida en cristales de plagioclasa, hornblenda y biotita.

El depósito de "ash-cloud surge", con componentes tamaño arena o microbrecha de pómez, se caracteriza por la laminación cruzada de gran ángulo, en sets más o menos tabulares, y por laminación horizontal. Estas estructuras señalan direcciones de movimiento del flujo N120-140E. El paso colada-surge se hace gradualmente por medio de lentes de surge interstratificadas con niveles de lapilli.

Edad de los materiales del ciclo Frailes I

Sólo una datación radiométrica de las existentes en la literatura relativa al volcanismo de SE de España (Di Battistini *et al.*

1987, muestra SP310) parece corresponder a una muestra de este ciclo. La edad obtenida (12.4 m.a.), no obstante, es mayor que la edad de rocas inferiores, por lo que dicho valor no es fiable. En cualquier caso, la "caliza de Heterosteginas" incluida en la parte superior de este ciclo indica una edad Tortoniense Inferior (Di Battistini *et al.* 1987). Debe tenerse en cuenta el carácter discontinuo de esta fase de emisión, y una adecuada cronoestratigrafía de sus unidades es fundamental para la comprensión del desarrollo magmático en Cabo de Gata.

Materiales del ciclo Frailes II

A diferencia del grupo anterior, esta fase de construcción fue más continua en el tiempo, como lo prueba la ausencia de testigos de interrupciones importantes en la emisión volcánica. Una de las características más distintivas es un cambio brusco en la composición con respecto a los materiales de Frailes I. Las lavas andesíticas son aquí las más básicas, con dos piroxenos (relación Opx-Cpx aproximadamente 3), fácilmente reconocibles en el campo por su color negro o parduzco y por la rareza de alteraciones posteriores. Ocasionalmente pueden encontrarse restos de fenocristales de olivino completamente iddingsitizados y rodeados de una corona de piroxeno. Esto, y la ausencia de cristales de anfíbol claramente distinguen a las andesitas del ciclo Frailes II de las andesitas piroxénicas pre-Frailes.

La construcción de la unidad Frailes II se caracteriza por una alternancia de fases efusivas y piroclásticas, que han dado lugar a la formación de coladas de lava y brechas piroclásticas, concluyendo con la extrusión de los domos (pitones) sumitales (y diques asociados). Estas facies son las mismas que aparecen en otros edificios andesíticos-piroxénicos del área de Alborán (Mesa Roldán, Los Lobos, Borronar, Ras Tarf, etc.) (Fúster *et al.*, 1967; León, 1967; Bourdier, 1986).

Coladas de lava IIA

Estas coladas, que son la primera manifestación de la actividad del ciclo andesítico piroxénico, aparecen en la zona de canteras del inicio de la serie del Barranco de La Palma. Dada su posición, no es posible identificar su extensión original, aunque parece que estuvieron restringidas a un área no mucho mayor que la que ocupan ahora. Típicamente estas lavas andesíticas son muy poco vesiculares y presentan una alta proporción (superior al 50%) de matriz hialopilitica. Este alto porcentaje de matriz las distinguen de las andesitas de las coladas IIB superiores.

Rocas piroclásticas

La mayor parte de la serie baja del ciclo Frailes II está formado por *brechas piroclásticas* (Fig. 7). La parte inferior tiene estructura masiva, y está formada por coladas piroclásticas de bloques y ceniza ("block-and-ash flow"), aproximadamente horizontales, que irradian desde el Fraile Grande, formando las cumbres de los cerros de La Palma y Caliguera. En el barranco de La Palma, estas coladas piroclásticas son minoritarias, y en cambio dominan otras rocas piroclásticas estratificadas y de tamaño de grano inferior, cuyo significado será tratado más tarde.

El conjunto más importante de brechas piroclásticas en torno a los Frailes se caracteriza por una estratificación gruesa, reconocible a gran escala pero no apreciable a escala de detalle. Presenta intercalaciones de rocas piroclásticas finas. Los buzamientos son muy variables en distancias muy pequeñas (desde horizontales a unos 60°, en menos de 500 m.). En estos materiales, la estratificación está definida groseramente por variaciones en el tamaño medio de los fragmentos, cuya disposición, en detalle, es muy caótica (baja granoclasificación, ausencia de granoselecciones). Los elementos son muy angulosos y no están soldados.

Estas características se explican por una formación de estas brechas por fragmentación tranquila o poco explosiva en un medio submarino, en donde la movilización se produjo por flujos densos gravitacionales. Un mecanismo similar fue propuesto por Bourdier (1986) para el volcán de Ras Tarf (Marruecos).

Entre estas brechas aparecen *rocas piroclásticas finas* bien estratificadas, en especial en la parte baja de la serie. La primera de estas manifestaciones en un nivel de "surge" apoyado directamente sobre el sedimentario de Caliguera, y bajo una colada de bloques y ceniza de andesitas piroxénicas. Dicho nivel está formado exclusivamente por fragmentos de pómez de bordes muy angulosos, lo que los distingue de las arenas sobre las que se apoya, cuyo granos están apreciablemente muy retrabajados.

Otros depósitos de "surge" aparecen:

(a) Cerca de la base de la serie de Frailes II, en la zona de canteras del barranco de La Palma, posiblemente como equivalente temporal lateral de las coladas de bloques y ceniza (ver Fig. 7), llegando a alcanzar potencias de 10-15 m. En estos "surges" se encuentran con frecuencia laminaciones y estratificaciones cruzadas.

(b) Como depósitos muy delgados entre las brechas piroclásticas estratificadas. El tamaño de los fragmentos en este caso es muy variable: se encuentran niveles de tamaño muy fino interestratificados con otros con fragmentos de varios cm. esencialmente tienen estructuras laminares, y aparecen como lentejones residuales entre las brechas.

En ambos casos los componentes texturales esenciales son los fragmentos de andesita piroxénica y cristales, con minoría de material vítreo.

Coladas de lava IIB

A la formación del conjunto de rocas piroclásticas siguió un episodio caracterizado por la emisión de varias coladas, que actualmente aparecen apiladas dando inconfundibles resaltes en el terreno. Generalmente son subhorizontales, o bien se adaptan a morfologías de terreno previas, como en el barranco de la Palma. Estas coladas presentan bases autoclasticas muy desarrolladas, con bloques de 1-2 m; las coladas individuales (2 ó 3) alcanzan potencias de 10-15 m. Las andesitas son bastante vesicula-

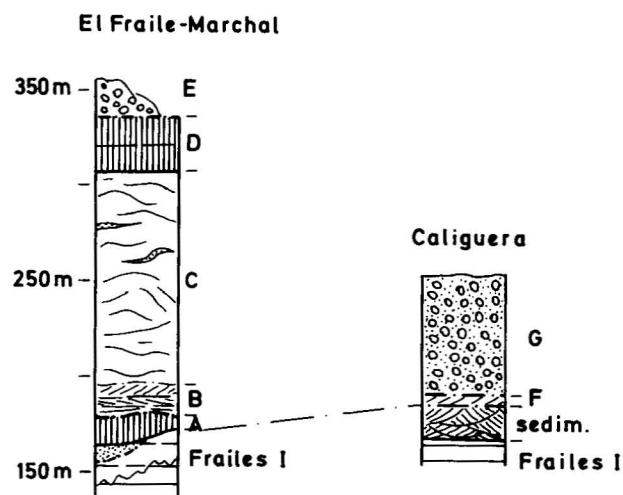


Fig. 7.—Columnas de los materiales del ciclo Frailes II. A: coladas IIA; B: zona de "surges"; C: rocas piroclásticas (ver texto); D: coladas IIB; E: brechas autoclasticas del domo sumital; F: "surge" vítreo; G: brechas de bloques y ceniza. Alturas sobre el nivel del mar.

res, y con menor proporción de matriz (35-45%) que en las coladas IIA anteriores. Los fenocristales de plagioclasa, de varios mm. de tamaño, forman casi un armazón entre el que quedan un vidrio limpio, pardo y cristales de piroxeno y plagioclasa de menor tamaño.

Los Domos Sumitales

La construcción de los Frailes concluyó con la extrusión de los domos que forman las dos cumbres principales, Fraile Chico y Fraile Grande, alimentados probablemente por fracturas ENE-WSW. El Fraile Chico extruyó directamente sobre las formaciones sedimentarias y andesíticas anfibólicas anteriores, rodeando de una orla de brechas autoclásticas y coladas de escaso desarrollo. La historia eruptiva del Fraile Grande fue en cambio más compleja, y este domo señala el final de la actividad de una fase volcánica variada.

Edades de los materiales del ciclo Frailes II

Las dataciones radiométricas (K/Ar) efectuadas sobre muestras procedentes de este ciclo dan valores de 7.9 m.a. (Bellon *et al.*, 1983) y 8.5-8.6 m.a. (Di Battistini *et al.*, 1987), lo que corresponde a un Tortoniense Superior. Las muestras datadas, de acuerdo con las indicaciones de estos autores, parecen pertenecer a los domos sumitales, por lo que la edad de inicio de este volcanismo queda imprecisa.

Unidad Morrón de Mateo

El ciclo Frailes-I es cubierto al NE por un conjunto de rocas piroclásticas y sedimentarias, en la zona entre Los Escullos y Morrón de Mateo. En este conjunto, que no será descrito en detalle aquí, se interstratifican niveles epiclásticos y sedimentarios, ricos en fauna marina somera (briozoos, pectínidos, ostreidos, etc.), niveles semejantes a caliches (exposiciones subaéreas?), y niveles de origen volcánico procedentes de actividad hidromagmática (sobre todo depósitos de "base surge"); entre las características más llamativas de estos depósitos, destacaremos la presencia de lapilli acrecional y las ciclidades en el tamaño de fragmentos y potencias de las capas individuales. Los depósitos de "surge" están en la actualidad muy bentonizados, y son explotados en canteras. La potencia los niveles individuales de "surge" disminuye a grosso modo hacia el sur y hacia el este (unos 10 cm. en el Morrón de Mateo, 2-3 cm. entre Los Escullos y la Isleta); simultáneamente se produce un mayor desarrollo de los niveles sedimentarios y epiclásticos.

Volcanismo dacítico rojo

En la zona del Pozo de los Frailes-San José, las series andesíticas de Frailes-I (en ningún caso los de Frailes-II) son cortadas por diques y domos dacíticos biotíticos o anfibólicos de colores rojizos. Los elementos más importantes de esta fase volcánica en este sector son los dos pitones de cerro de Enmedio y Cuevas del Sacristán, y algo más al Norte el Morrón de Mateo, de similar composición. En todos los casos estas dacitas aparecen muy alteradas y en muchas muestras ni siquiera es posible identificar la mineralogía original. Las características de estas rocas las asocian indudablemente al conjunto dacítico que está muy bien desarrollado inmediatamente al norte en la Rellana-Garbanzal, y que constituye la roca de caja de las conocidas mineralizaciones de Rodalquilar. Este conjunto, asimilable al grupo C de Bordet (1985), incluye importantes depósitos de coladas pumíticas (Presillas), a las que se superponen domos efluyentes (Garbanzal) y formaciones de brechas líticas (co-ignimbríticas?) (Rellana).

Como ya indicaron Fúster *et al.* (1965), este ciclo comenzó con erupciones muy explosivas y finalizó con la extrusión de materiales masivos (domos).

El grado de alteración impide los estudios geoquímicos precisos y las dataciones K/Ar fiables en estas rocas. Bellon *et al.* (1983) indican 8.7-8.9 M.a., y Di Battistini *et al.* (1987) sólo señalan que esta fase de actividad ocurrió hace menos de 9 m.a. En todo caso no parece descartable que este volcanismo, de características geoquímicas imprecisadas, pudiera ser anterior o simultáneo al volcanismo de composición andesítica piroxénica (tipo Frailes II).

Conclusiones

(1) De un modo simplificado, interpretaciones previas (e.g. Fúster *et al.*, 1965) afirmaban que el volcanismo en la zona de Cabo de Gata se ha desarrollado en ciclos que comenzaron con fases de gran explosividad, seguidas por fases formadoras de brechas ("aglomerados de nube ardiente") y acabaron con intrusiones subvolcánicas (domos). Si bien esta secuencia a grosso modo es válida para el ciclo inferior, Pre-Frailes, y sus equivalentes en zonas adyacentes al SW (Revancha-Sabinal-Cabo de Gata, Fernández Soler y Muñoz, *en prensa*), y posiblemente para el ciclo dacítico terminal (Grupo de Rodalquilar), en la construcción del Cerro de los Frailes, probablemente jugaron papeles más importantes otros mecanismos.

La emisión en el ciclo Frailes-I se produjo dispersamente en multitud de puntos, aunque centrados en lo que actualmente es el edificio de Los Frailes. En un medio marino somero se produjo la emisión de lavas muy viscosas (como domos efluyentes) y con alto contenido en volátiles, que debido a su alta viscosidad se fragmentaron dando las formaciones de brechas descritas. Esta emisión se produjo varias veces en un intervalo dilatado de tiempo, y con interrupciones importantes. A causa de la separación entre los distintos puntos de emisión, los niveles sedimentarios formados entre las distintas fases eruptivas adquieren formas y relaciones de facies sedimentarias complicadas.

Es de resaltar que la fragmentación se debió a la viscosidad de las lavas, relacionada a su composición ácida y aumentada por un valor alto de la actividad del fluido disuelto en el magma; este valor alto explicaría además por qué no están desestabilizados anfíbol y biotita. Una cantidad mayor de fase gaseosa en el magma pudo provocar su repentina exsolución, ocasionando la formación explosiva de la colada pumítica de Caligüera; como consecuencia de esta exsolución se produjo además una transferencia gaseosa que favoreció la formación de los cristales de biotita.

El ciclo Frailes-II es composicional y volcano-lógicamente diferente de las otras manifestacio-

nes volcánicas de esta zona. Es además cronológicamente equivalente a otras zonas de composición similar (Mesa Roldán, Los Lobos), con las cuales comparte además una similitud de facies volcánicas (brechas, coladas, domos). En esencia, la relativamente baja viscosidad de estos materiales, debido a la composición más básica, condiciona una actividad fundamentalmente efusiva, en la que se generan coladas de lava de escaso recorrido, y domos cuando la viscosidad es algo mayor; las características de la mayor parte de las brechas piroclásticas correspondientes a este ciclo también parecen señalar la poca importancia de la actividad explosiva (restringida a la formación de coladas de bloques y ceniza de tipo peleano) en este ciclo; la mayor parte de las brechas procederían de algún tipo de fragmentación "no explosiva" del material lávico en un medio submarino (Bourdier, 1986). Los niveles de "surge", por último, se generaron bien como resultado de actividad hidroclástica, o como facies distales de las coladas de bloques y ceniza. Conviene resaltar también la escasa dispersión de los puntos de salida de magma (básicamente dos), a diferencia de lo que ocurría en los ciclos anteriores, donde esa salida se producía por una multitud de centros, relacionados entre sí por sistemas de fallas (ver apartado 3, y Fernández Soler y Muñoz, en prensa).

(2) Los materiales de base del volcán de Los Frailes son la prolongación hacia el Este de las series de conjunto volcánico de Revancha-Sabinal-Cabo de Gata.

(3) Las características petrográficas y mecanismos de emisión (los datos cronoestratigráficos son insuficientes), unidas al carácter disperso o centralizado de los centros de emisión (ver Fig. 3) apuntan a una mayor afinidad entre estos materiales de base y los del ciclo Frailes-I que entre Frailes I y II.

Por lo que respecta al volcanismo dacítico post-Frailes-I, no hay ninguna indicación clara de que sea anterior o posterior al ciclo Frailes-II (las medidas radiométricas existentes son poco fiables dada la fuerte alteración). Con toda seguridad son posteriores al ciclo Frailes-I y al complejo sedimentario-hidroclástico del Morrón de Mateo; no hay que descartar, pues, la posibilidad de coexistencia de un magmatismo ácido (dacitas-riolitas; grupo de Rodalquilar) con otro más básico (andesitas piroxénicas del ciclo Frailes-II); un dato interesante se observa algo más al Norte, en la zona del Cerro de Los Lobos (León, 1967), donde las andesitas piroxénicas, de edad (8.4 m.a., Di Battistini *et al.* 1987) y características similares a las del ciclo Frailes II, se apoyan sobre los términos más bajos de las dacitas y riolitas

(ignimbéricas) del grupo de Rodalquilar, en el centro de una zona relativamente deprimida (caldera?).

AGRADECIMIENTOS

El autor desea expresar su gratitud a M. Muñoz por la dirección de este trabajo, consejos en el campo y revisión del manuscrito, y a G. Venturelli, S. Capedri y L. Toscani la aportación de datos cronológicos en prensa, y su colaboración en los muestreos de campo. F. Fernández amablemente realizó parte de la delineación. Este trabajo ha sido financiado por una beca del P.F.P.I. y por el subproyecto 463 del CSIC, "Cinemática de los Mantos bético-rifeños...".

Referencias

- Addicott, W.O.; Snavely, P.D.; Poore, R.Z. y Burky, D. (1979). La secuencia Neógena marina en los campos de Dalías y de Nijar (Almería). *Estudios Geol.*, 35, 609-631.
- Battistini, G.D. di; Toscani, L.; Iaccarino, S. y Villa, J.M. (1987). K/Ar ages and the geological setting of calc-alkaline volcanic rocks from Sierra de Gata, SE Spain. *N. Jb. Miner. Mh* (en prensa).
- Bellon, H.; Bordet, P. y Montenat, C. (1983). Le magmatisme néogène des Cordillères bétiques (Espagne): chronologie et principaux caractères géochimiques. *Bull. Soc. géol. France*, (7) 25, 205-218.
- Bordet, P. (1985). Le volcanisme miocène des Sierras de Gata et de Carboneras (Espagne du Sud-Est). *Doc. et Trav. IGAL*, París, 8, 70 p.
- Bordet, P.; Esquevin, J. y Larouziere, F.D. de (1982). Sur l'âge tortonien de certains granitoïdes inclus dans les conglomérats miocènes de l'Espagne du Sud-Est. *C.R. Acad. Sci. Paris*, 295, 483-486.
- Bourdier, J.L. (1986). Formation sous-marine de brèches andésitiques au Ras Tart (Rif, Maroc). *C.R. Acad. Sci. Paris*, 303, 619-622.
- Dabrio, C.J. y Martin, J.M. (1979). Los arrecifes Messinienses de Almería (S.E. de España). *Cuad. Geol. Univ. Granada*, 8-9, 83-100.
- Fernández Soler, J.M. y Muñoz, M. Secuencias de rocas volcánicas en el extremo sur de la Sierra de Cabo de Gata (Almería) (en prensa).
- Fuster, J.M.; Aguilar, M.J. y García, A. (1965). Las sucesiones volcánicas en la zona del Pozo de los Frailes dentro del vulcanismo cenozoico del Cabo de Gata (Almería). *Estudios Geol.*, 21, 199-222.
- Fuster, J.M.; Ibarrola, E. y Martin, J. (1967). Las andesitas piroxénicas de la Mesa de Roldán (Almería, SE de España). *Estudios Geol.*, 23, 1-13.
- Hernández, J.; Larouziere, F.D. de; Bolze, J. y Bordet, P. (1987). Le magmatisme néogène bético-rifain et le couloir de décrochement trans-Alboran. *Bull. Soc. géol. France*, (8) 3, 257-267.
- León, C. (1967). Las formaciones volcánicas del Cerro de los Lobos (Almería, S.E. de España). *Estudios Geol.*, 23, 15-28.
- Montenat, C.; Bolze, J.; Bordet, P. y Ott D'Estevou, P. (1984). Extrusions de type "pebble dyke", à éléments plutoniques miocènes, dans le Tortonien des Cordillères bétiques orientales (Espagne). *C.R. Acad. Sci. Paris*, 299, 343-346.
- Smith, A.L.; y Roobol, M.F. (1982). Andesitic pyroclastic flows. In: *Andesites* Thorpe, R.S. (Ed.). Wiley and sons, New York, 415-433.

Recibido el 23 de Noviembre de 1987
Aceptado el 27 de Diciembre de 1987