FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD NACIONAL DE JUJUY

Tema N° 4

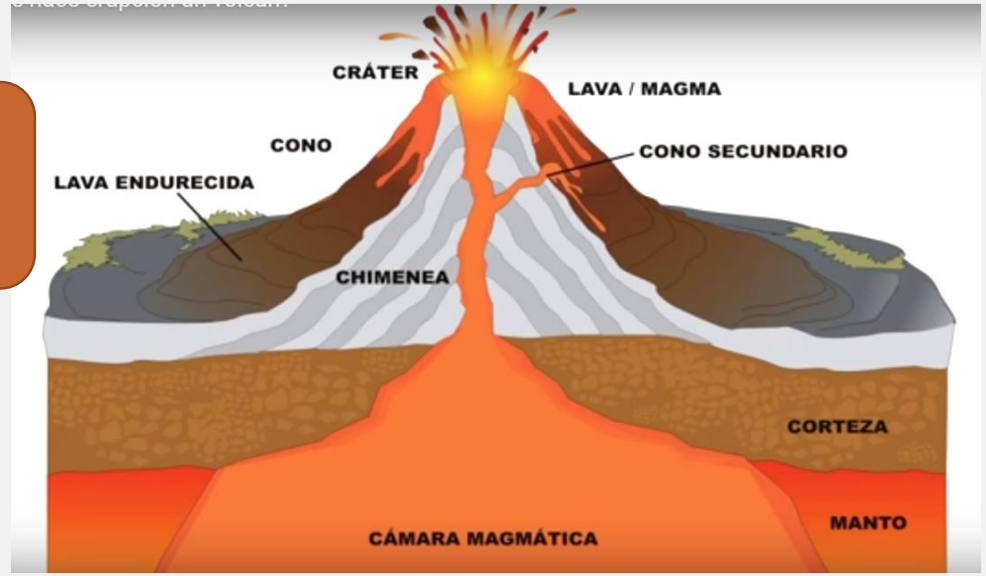
Modelado asociado a la actividad volcánica. Vulcanismo. Dinámica eruptiva. Erupciones volcánicas. Materiales proyectados. Corrientes de lava. Conos volcánicos. Cráteres y calderas. Cinturones volcánicos. Volcanes submarinos. Fumarolas. Sulfataras. Erosión de volcanes. Erupciones de fisura. Intrusiones: Tipos de intrusiones. Composición magmática. Génesis y morfología.

Prof. Carla D. Santamans

Vamos a repasar…

¿Qué es un volcán?

Un volcán es una abertura en la corteza terrestre por la que puede emerger material magmático junto a gases, cenizas y otros materiales.

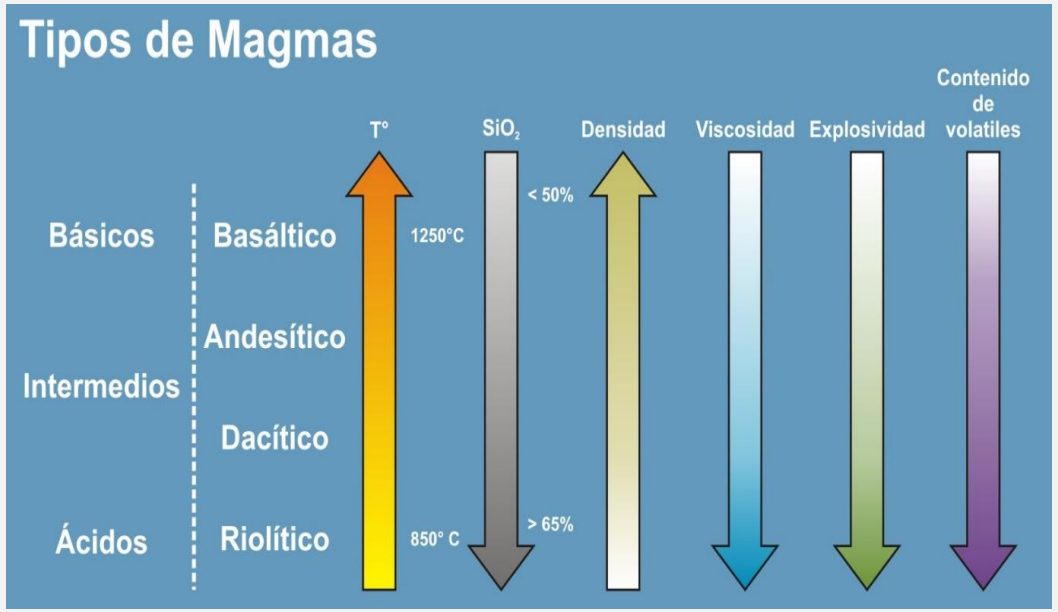


¿Cómo y porqué entra en erupción un volcán?

* El magma se genera por la fusión de rocas a profundidades mayores a 60 km, y se vincula a la composición original de dichas rocas y a las condiciones de P y T° a las que son sometidas.

* El magma está formado por una mezcla heterogénea de: *líquido* (material fundido), *gases* (volátiles, principalmente H_2O, y luego CO_2 y SO_2) y *sólidos* (cristales).

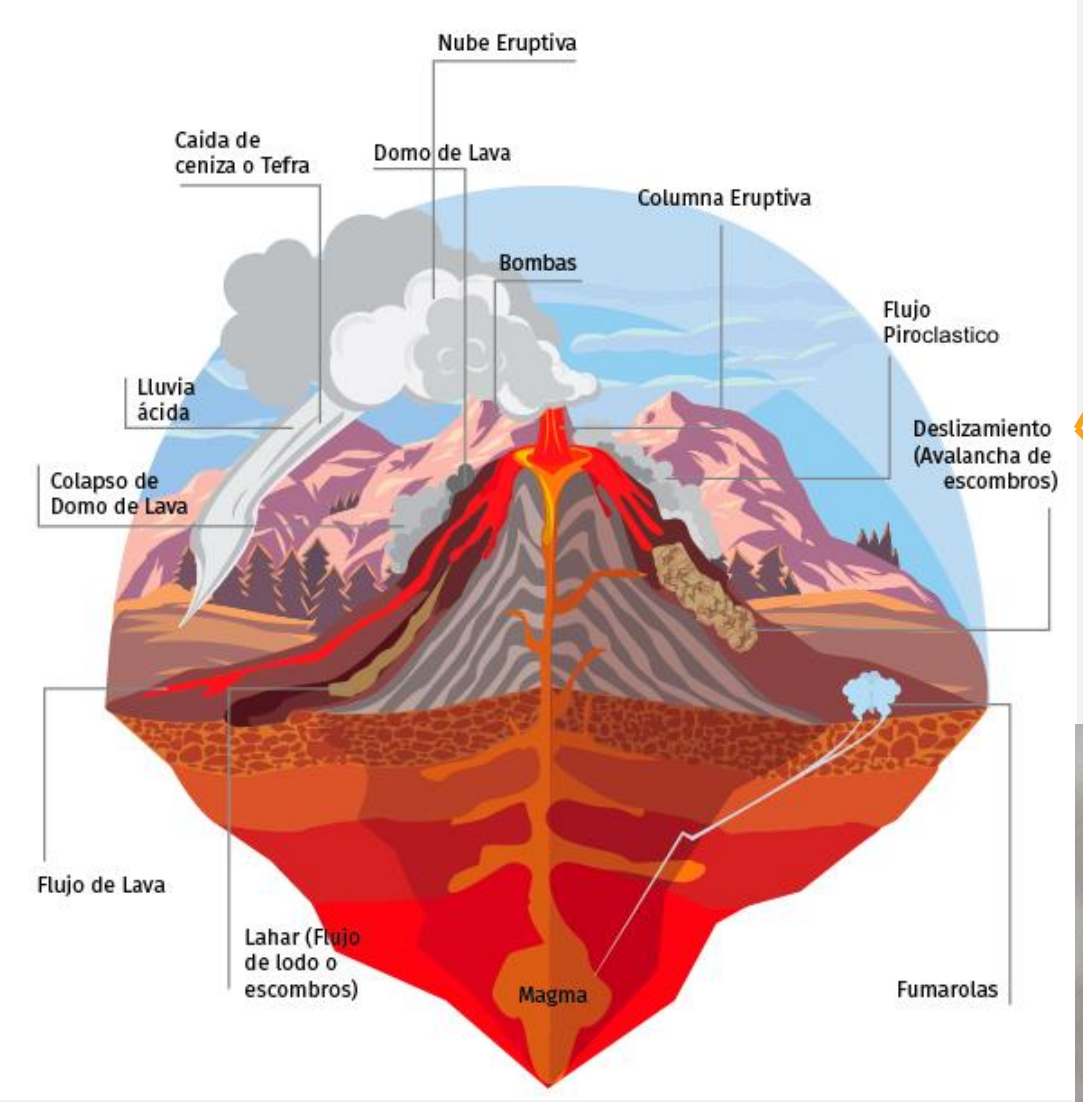
* Esta mezcla, al tener menor densidad que las rocas sólidas a su alrededor, tiende a "flotar", intentando abrirse camino a través de la corteza terrestre. A medida que asciende, los volátiles tienden a exolverse y expandirse, formando burbujas que se acumulan en la parte superior de la cámara magmática, aumentando la presión. Esta capa de espuma (burbujas) es la responsable de la explosividad.



Tipo de Erupción	Descripción	Productos	Volcanes (ejemplos)	Imágenes
Hawaiana	Erupciones suaves, de poca o nula explosividad (efusivas). Surgen a partir de un magma básico (de baja densidad) que fluye en forma de coladas.	Lavas muy fluidas (basálticas), escasa emisión de gases y cenizas. Generan cuerpos volcánicos muy aplanados.	Mauna Loa; Kilauea (Hawai)	
Islándica o Fisural	Se originan a lo largo de una fisura en la corteza terrestre, que puede ir desde metros hasta kilómetros.	Lavas fluidas (básicas), pueden recorrer grandes extensiones, formando amplias mesetas, y capas horizontales sucesivas. Su relieve es plano.	Meseta de Decán (India); Krafla (Islandia)	
Estromboliana	Erupciones explosivas poco violentas, rítmicas, separadas por periodos de calma. Formadas por magmas calcoalcalinos.	Lavas fluidas (básicas), bombas, lapilli escoriáceo, y poca cantidad ceniza, que alcanzan escasa extensión areal. Forman conos de ceniza y escoria de entre 100 y 200 m. de altura.	Stromboli (Italia); Villarrica (Chile)	

Tipo de Erupción	Descripción	Productos	Volcanes (ejemplos)	Imágenes
Vulcaniana	Se originan por la acumulación de presión o por una obstrucción en la chimenea. Explosividad alta. Originada por magmas andesíticos.	Lavas intermedias y viscosas, tefra, lapilli y gran cantidad de ceniza caliente, bombas, y gases. Columnas eruptivas de 3 a 20 km de altura, con forma de hongo. Cuerpos volcánicos de alta pendiente.	Vulcanus (Italia); Sabancayas y Ubinas (Perú)	
Pliniana	Erupciones fuertemente explosivas debido a la liberación de volátiles en magmas ácidos muy viscosos, con desarrollo de grandes columnas eruptivas (50 km).	Lavas ácidas muy viscosas, cenizas, escorias, bombas y bloques de trayectoria balística, y flujos piroclásticos. (https://es.wikipedia.org/wiki/Erupci%C3%B3n_del_Tambora_de_1815)	Vesubio (Italia); Popocatépetl (México); Fujiyama (Japón); Tambora (Indonesia)	
Peleana	Erupciones explosivas, violentas e intermitentes. Suelen generar el colapso de domos (formados a consecuencia de la gran viscosidad del magma) o de parte del edificio volcánico.	El colapso genera flujos piroclásticos de gran envergadura. Lavas muy viscosas (ácidas), gran cantidad de gases y cenizas.	Pelée (Isla Martinica, Francia); Sinabung (Sumatra)	

Productos volcánicos



Erupciones explosivas (magmas y lavas ácidas)

Escoria

Bomba (rodamiento)

Rocas Volcaniclásticas y Piroclásticas

Volcaniclásticas: rocas ricas en detritos volcánicos depositados en forma primaria (i.e. en forma directa por el volcán) o bien mediante erosión de rocas y sedimentos volcánicos esencialmente contemporáneos. El término volcaniclástico se restringe a la procedencia de aquellas rocas volcánicas formadas contemporánea o cuasi-contemporáneamente con la actividad volcánica (Tucker, 1991; Scasso y Limarino, 1997).

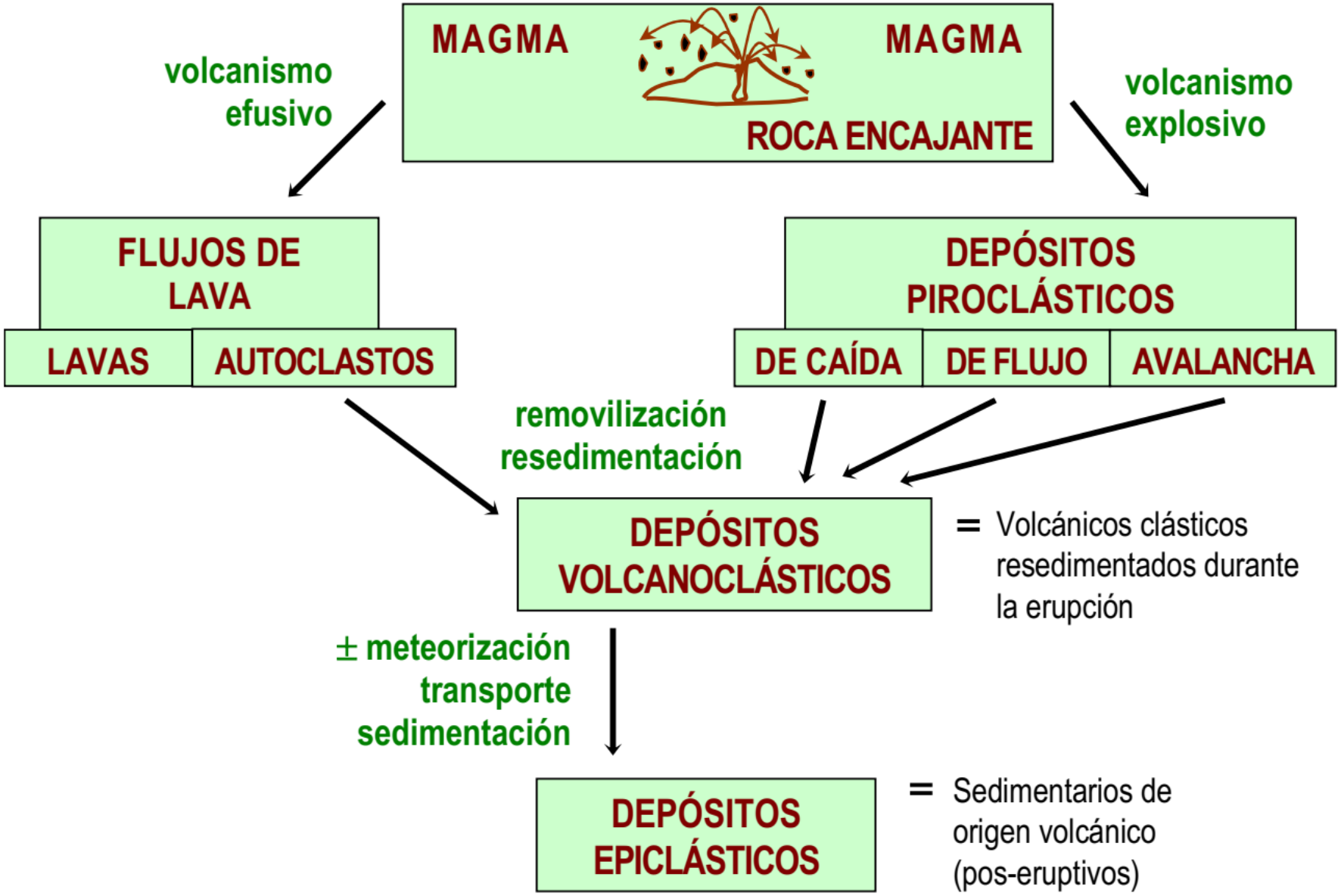
Piroclásticas: adjetivo reservado para las rocas volcaniclásticas primarias, originadas por fragmentación del magma durante un evento de volcanismo explosivo.

¿Rocas Volcaniclásticas secundarias? → **Rocas Epiclásticas**

Epiclásticas: Originadas por la meteorización y/o erosión de rocas y sedimentos volcánicos preexistentes. Suele haber mezcla de material volcaniclástico con sedimentos puramente epiclásticos.

FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIVERSIDAD NACIONAL DE JUJUY

▪ DEPÓSITOS VOLCANOCLÁSTICOS Y EPICLÁSTICOS:



FRAGMENTOS VOLCÁNICOS

Autoclasto: Fragmento formado por rotura mecánica o explosión de los gases de una lava en movimiento. Es decir, se forman durante el movimiento de la lava o por el desmoronamiento de domos por gravedad.

Piroclasto: Partícula expulsada por cráteres volcánicos.

Hidroclasto ó Hialoclasto: Piroclasto formado por el enfriamiento brusco del magma al contacto con el agua, sedimentos saturados en agua o hielo.

Epiclasto: Partícula generada por la erosión de rocas volcánicas pre-existentes. Incluye a fragmentos líticos (litoclasto) procedente de rocas volcánicas.

Proceso de origen	Transporte
Volcánico efusivo	~nulo. Localizados *in situ*
Volcánico explosivo	Largo
Volcánico ±explosivo	Corto
Sedimentario	Muy largo

Restos vítreos: componentes más característicos de las R. volcaniclásticas; le otorgan su carácter distintivo.

- **Elementos vítreos básicos:** colores oscuros (bajo contenido de sílice; ej.: sideromelano, taquilita)
- **Elementos vítreos ácidos:** colores claros (mayor contenido de sílice; ej.: trizas, fragmentos pumíceos)

CLASIFICACIÓN DE PIROCLASTOS Y ROCAS PIROCLÁSTICAS

A) Clasificación de piroclastos debido a la procedencia

Juveniles o esenciales: provienen directamente de la cámara magmática. Se conforman de: fragmentos líticos (que, a su vez, dominan en las fracciones más gruesas de las R. piroclásticas), cristales y vidrio.

No Juveniles

Accesorios: piroclastos que provienen de rocas volcánicas o subvolcánicas de erupciones previas del mismo volcán.

Accidentales: piroclastos que no tienen relación alguna con la erupción o el volcán, y que simplemente son arrastrados por la lava. Pueden provenir del basamento subvolcánico, y tener cualquier composición.

B) Clasificación en base a la granulometría

- **DEPOSITOS Y ROCAS PIROCLASTICAS:**
  → **f (tamaño de grano, grado de consolidación, angulosidad):**

LE MAITRE

Diámetro (mm) / TAMAÑO	64 – 2	2 – 0,062	0,062 – 0,002	< 0,002
Elemento: **PIROCLASTO**	**BOMBA // BLOQUE**	**LAPILLI**	**GRANO DE CENIZA GRUESA**	**GRANO DE CENIZA FINA**
Depósito sin consolidar: **TEFRA**	**CAPA O TEFRA DE BOMBAS // BLOQUES**	**CAPA O TEFRA DE LAPILLI**	**CENIZA GRUESA** (Coarse ash)	**CENIZA FINA** (Fine ash)
Depósito consolidado: **ROCA PIROCLÁSTICA**	**AGLOMERADO // BRECHA PIROCLÁSTICA**	**LAPILLITA** = TOBA DE LAPILLI (Lapillistone)	**TOBA GRUESA** (Coarse tuff)	**TOBA FINA** (Fine tuff)

Cinerita

Clasificación de los Piroclastos

Bomba: piroclasto > 64 mm; total o parcialmente fundido durante su formación y transporte.

Bloque: piroclasto > 64 mm; forma angulosa o subangulosa; estado sólido durante su formación y transporte.

Lapilli: piroclasto de tamaño medio, entre 64 y 2 mm; formas variadas.

Ceniza: piroclasto menor de 2 mm. Se clasifican en: ***grano de ceniza gruesa***, entre 2 y 0,062 mm (tamaño arena);

grano de ceniza fina o polvo, < 0,062 mm (tamaño lutita)

Clasificación de Rocas Piroclásticas

A) Por su granulometría

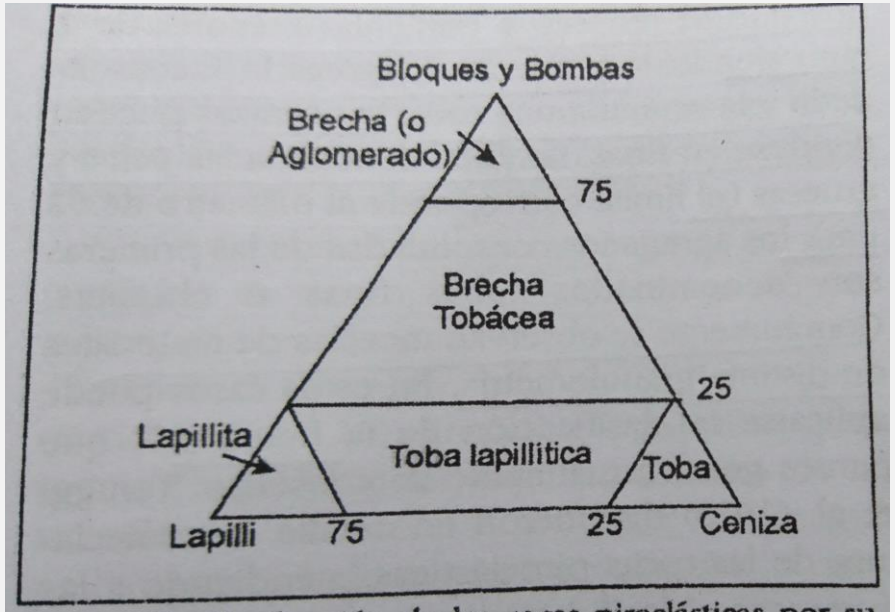
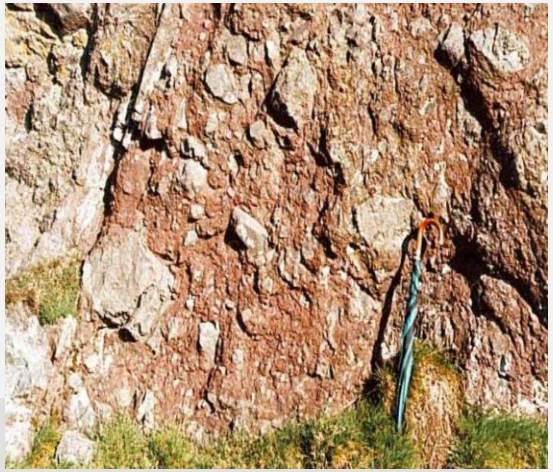


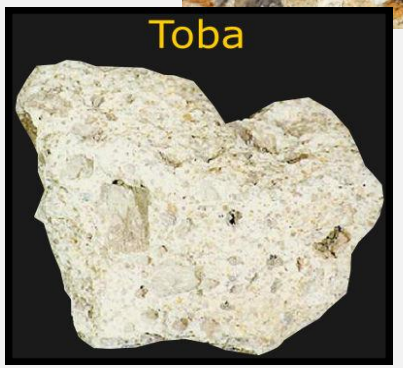
Figura 5.7: Clasificación de las rocas piroclásticas por su granulometría. Modificado de Fisher y Schmincke (1984) y Lajoie y Stix (1992).

- **Brecha**: rocas compuestas por partículas mayores a 64 mm. Es decir que están formadas por bloques y bombas en más de un 75%.
- **Lapillita**: rocas compuestas por más de un 75% de lapilli (partículas entre 2 y 64 mm).
- **Toba**: rocas conformadas por cenizas en más de un 75% (partículas < 2 mm). Si la roca se conforma por cenizas gruesas, se la denomina ***chonita***, y si la componen cenizas de grano fino se la llama ***toba fina***.



Brecha formada por bloques

Lapillitas



Otros conceptos a tener en cuenta…

- ***Tefra:*** todo material piroclástico, cualquiera sea su tamaño, eyectado por un volcán.
- ***Tufita***: sedimento original que se verifica fue producto de la mezcla de material piroclástico con material epiclástico.

B) Por su composición

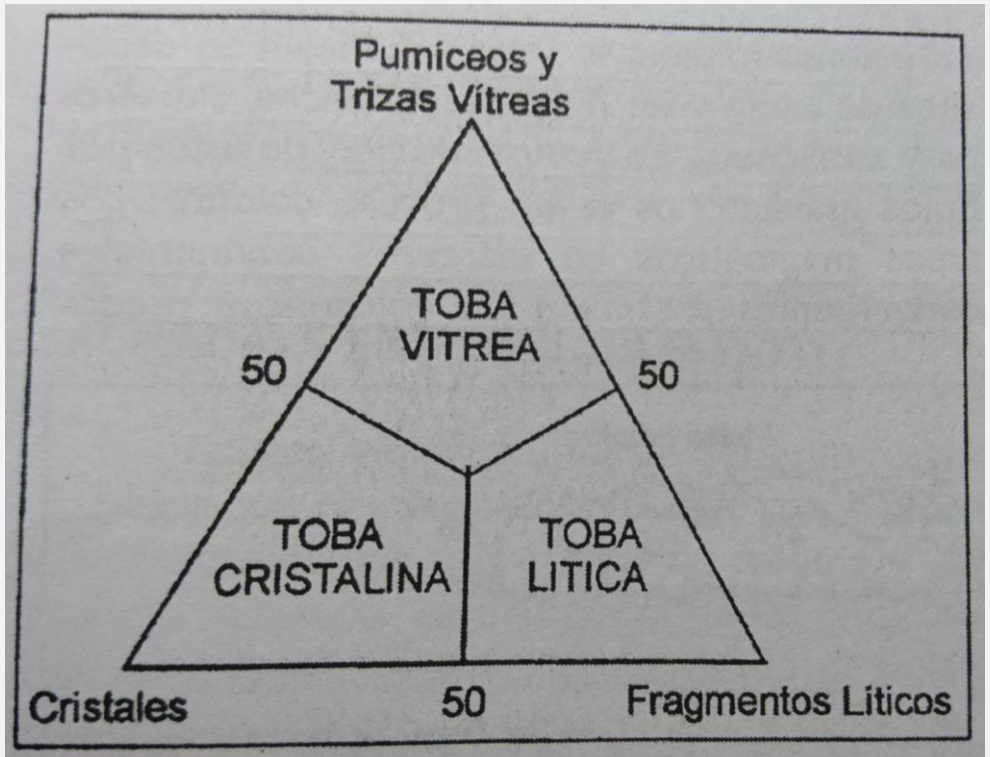
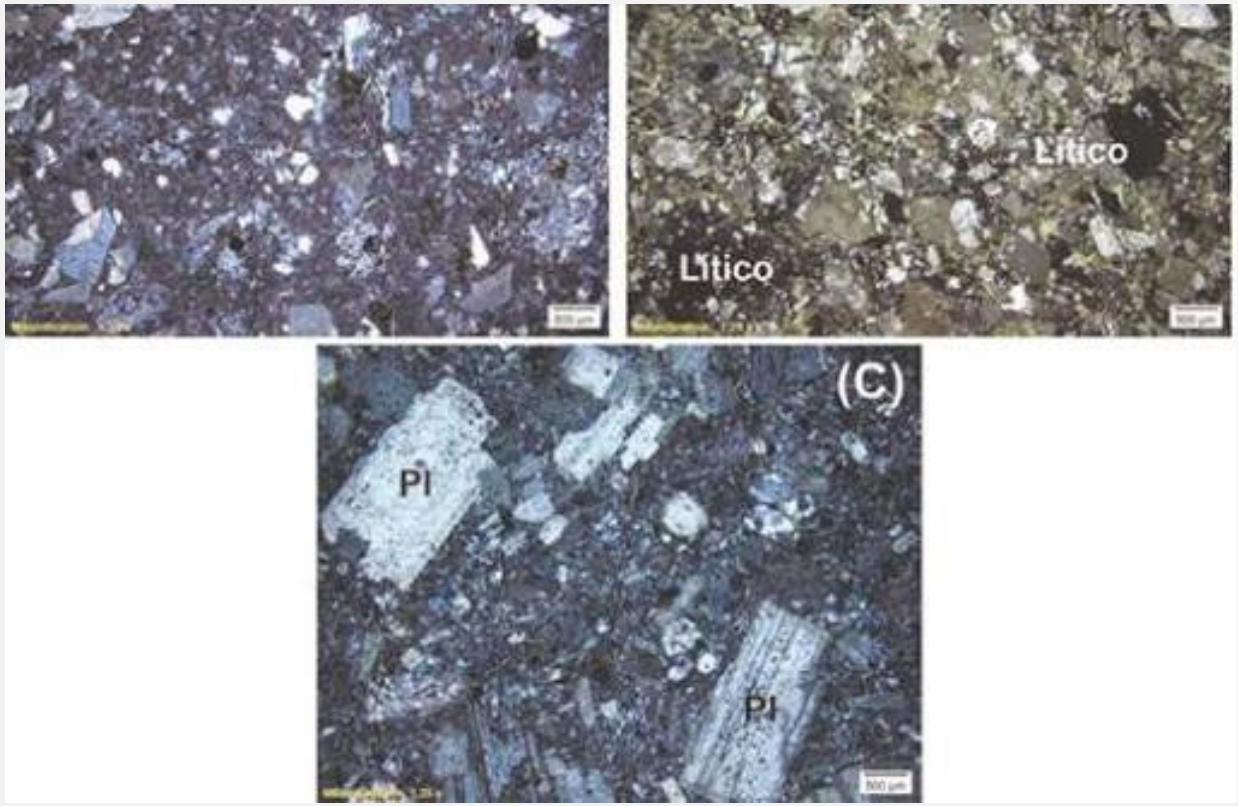


Figura 5.2: Clasificación de las tobas sobre la base de la naturaleza de sus componentes (de Pettijohn et al., 1987).



A) ***Toba de vidrio*** con fragmentos de cristales en matriz vítrea desvitrificada. **B)** ***Toba lítica*** con fragmentos de líticos y cristales en matriz vítrea desvitrificada. **C)** ***Toba de cristales*** con fragmentos de cristales principalmente de plagioclasa en matriz vítrea.

SEDIMENTOS Y DEPÓSITOS VOLCANICLÁSTICOS

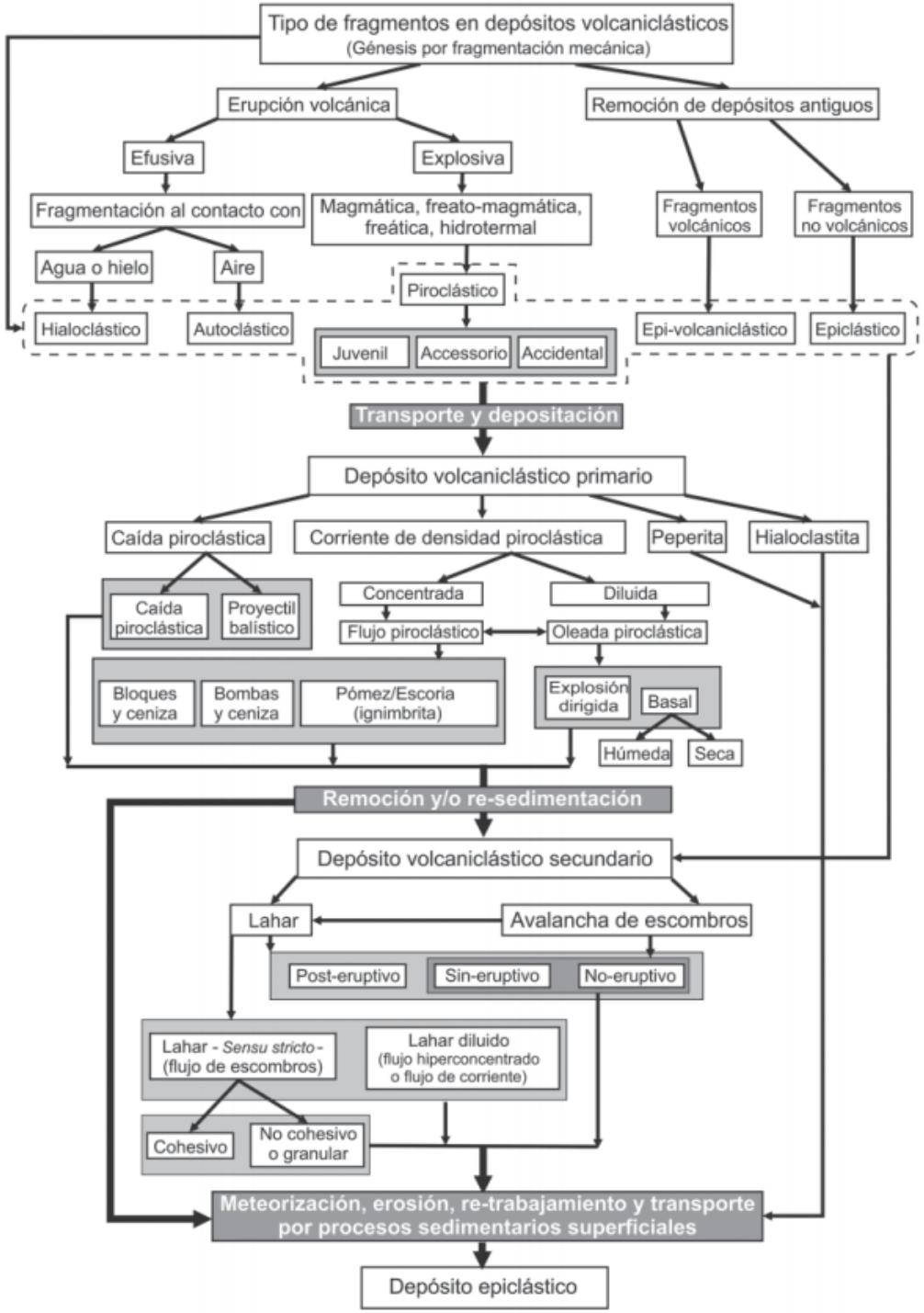
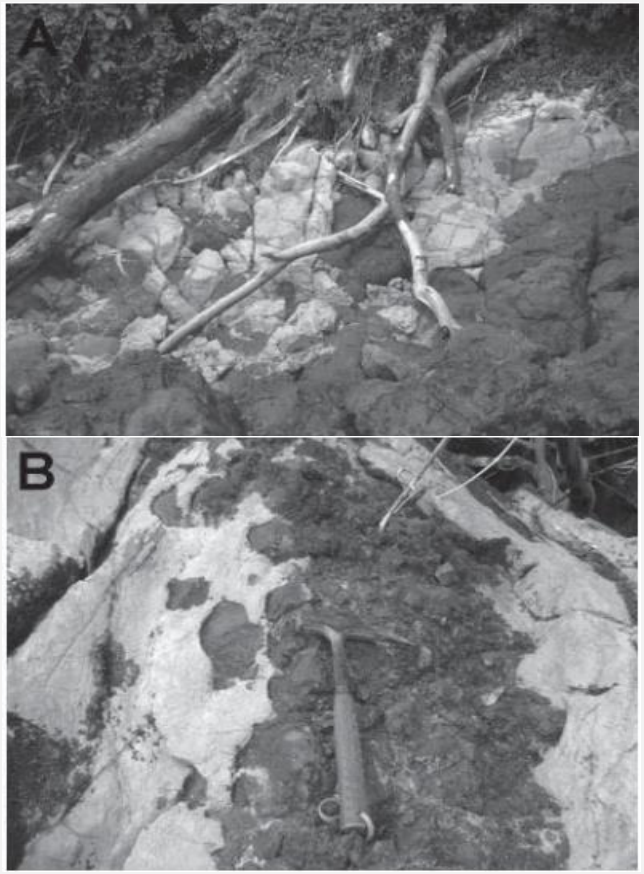


Diagrama de clasificación que ilustra los tipos de fragmentos que forman un depósito volcaniclástico, y los tipos de depósitos volcaniclásticos primarios y secundarios.

Fuente: Murcia et al., 2013. Depósitos volcaniclásticos: términos y conceptos para una clasificación en español. RAGA 48, p. 15-39.



Depósito de peperita (roca formada cuando la lava entre en contacto con sedimentos húmedos).
A) Afloramiento. B) Detalle del depósito.

Clasificación en función de su modo de formación

A) Depósitos Autoclásticos

* Producidos por el autobrechamiento de las lavas, mayormente básicas (basálticas) debido a su mayor capacidad de fluir.

* A medida que la lava fluye, se enfría y su sector superficial puede desarrollar una corteza que se fractura y se brecha al moverse la colada.

* Puede ocurrir de forma subaérea o subacuática (***hialoclastitas***).

B) Depósitos piroclásticos de caída

* Resultado de la sedimentación luego de una erupción explosiva, de material volcánico transportado en forma subaérea.

* Acumulaciones en forma de manto, cubriendo todo el relieve, (incluso altas pendientes). Espesor: de pocos cm a decenas de cm.

* Según la intensidad del viento, en planta desarrollan geometría elipsoidal (elongada en dirección del viento); si no hay viento, la forma será circular.

* Pueden cubrir cientos de miles de km^2 (según la altura de la columna eruptiva). Disminuye el espesor del depósito y el tamaño de los individuos, a mayor distancia de la chimenea del volcán. Así, los bloques y bombas se depositan cerca del cráter, mientras que las cenizas y el polvo pueden hacerlo hasta miles de km.

* Distribución granulométrica bimodal (entre arena fina-limos).

C) Depósitos de flujos volcaniclásticos

- **De relación directa con erupciones explosivas**
  - ***Flujos piroclásticos***
  - ***Surges***
- **Indirectamente relacionados con erupciones**
  - ***Deslizamientos volcánicos / Avalanchas de detritos***
  - ***Lahares***

c.1) Flujos Piroclásticos

* Se desplazan a favor de la gravedad en forma de dispersiones de gas y sólidos, con alta concentración de partículas, a veces fluidificados.

* Son densos, calientes y laminares.

+ La expansión de los gases del magma junto con el aire que es entrampado a medida que avanza al flujo, contribuyen a darle fluidez.

* Probablemente el modo de avance se de por "oleada sucesivas", que permiten que el flujo puede ascender pendientes.

* Pueden originarse por el colapso de una columna eruptiva o por el colapso de domos lávicos.

c.1) Flujos Piroclásticos (continuación)

a) Depósitos de flujos de bloques y cenizas:

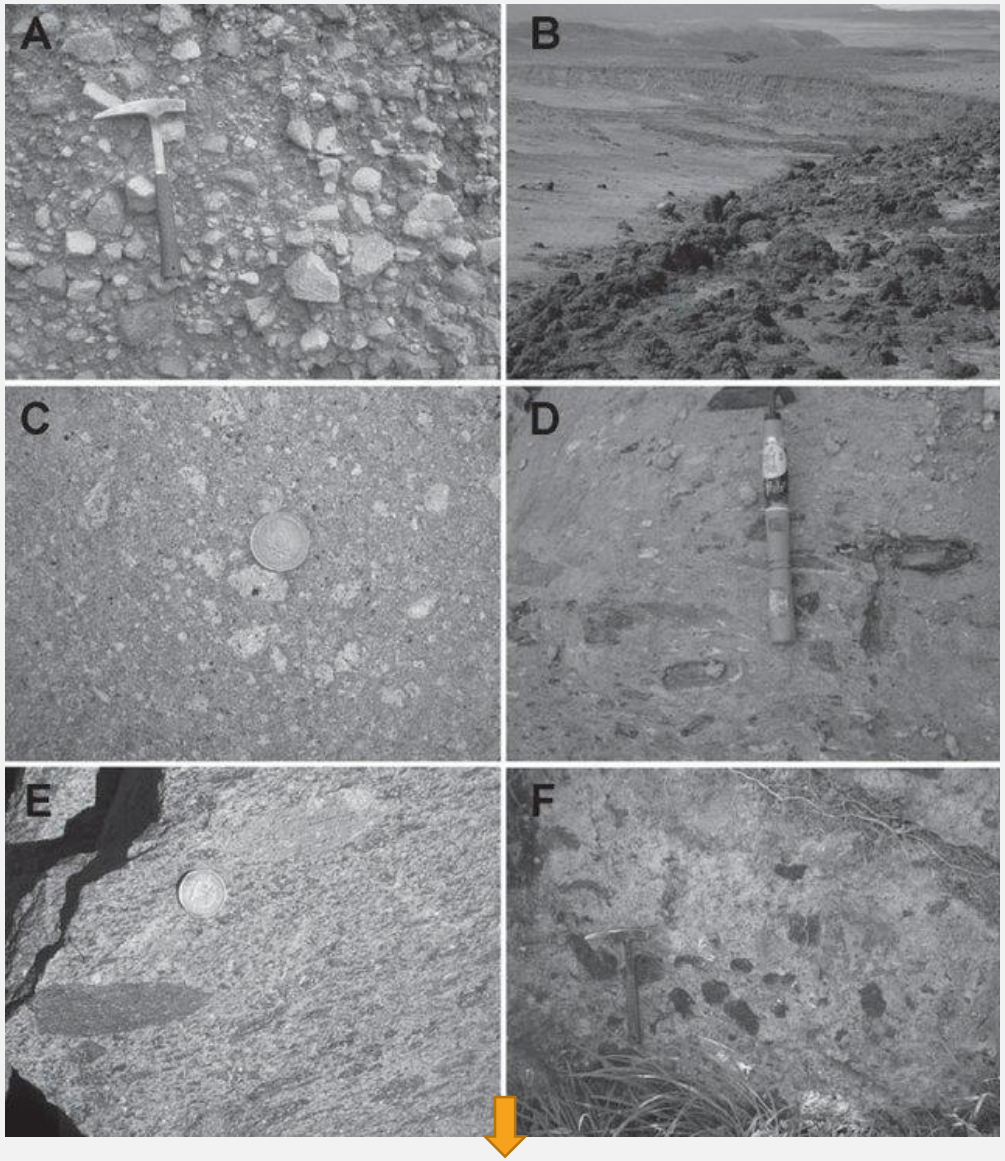
- Contienen bloques líticos no vesiculados, connatos, de hasta 5 m de diámetro, dentro de una matriz tamaño ceniza.
- Gradación inversa.
- Clastos monolitológicos. Bloques con fracturamiento radial (evidencia de su depositación en caliente).
- Son comunes las estructuras de tubos, consecuencia de la segregación de gases.

b) Depósitos de escoria:

Similares a los anteriores, pero compuestos principalmente por fragmentos de basalto y andesitas vesiculares o escoriáceos con superficies cordadas.

c) Ignimbritas:

- Compuestas mayormente de fragmentos pumíceos.
- Los depósitos se concentran en valles y bajos topográficos.
- Presentan carácter homogéneo, poca selección y gradación normal de líticos, y reversa de pumíceos.
- Por las altas T°, las ignimbritas suelen soldarse, formando ***tobas soldadas:*** son rocas densas con fragmentos pumíceos aplastados y estirados (*fiammes*).
- El depósito de un flujo individual puede superar los 10 m de altura, y expandirse por cientos de Km.
- Pueden estar asociados a depósitos de caída.



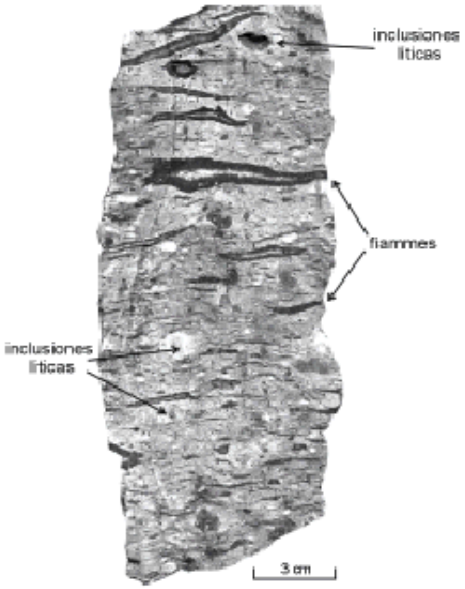
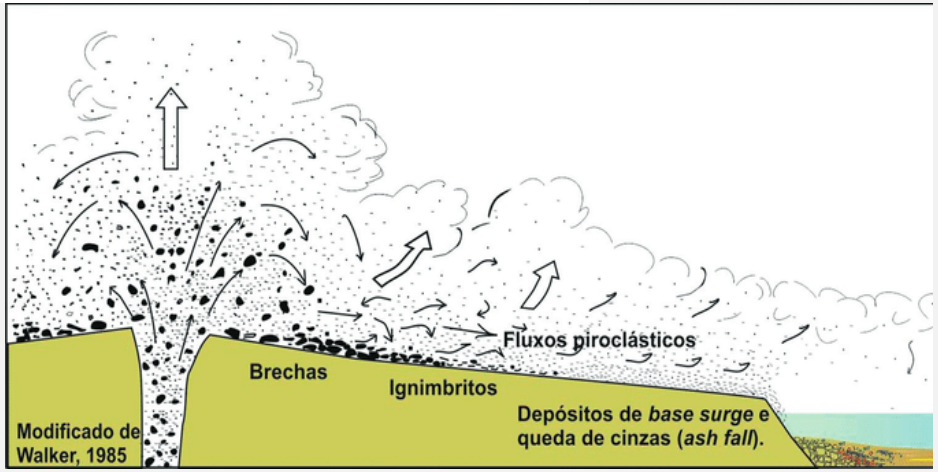


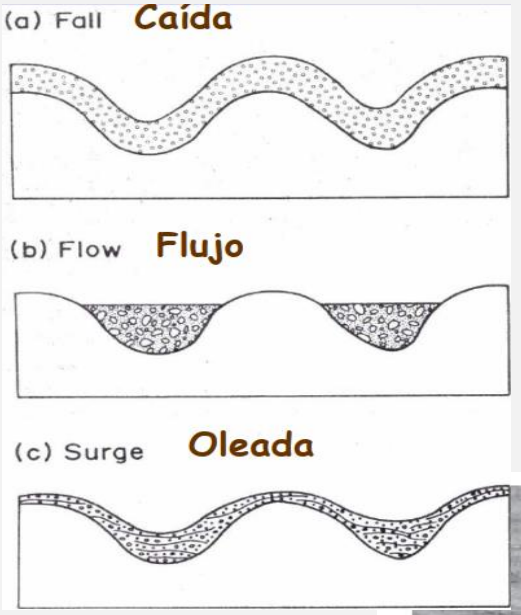
Figura 11. Ignimbrita con fuerte soldamiento. Las fiammes son discoidales y han cristalizado durante la compactación y liberación de gases del flujo. Ignimbrita "Piel de Tigre", quebrada del León, Barda Colorada, provincia de Chubut. La estratigrafía de este sector ha sido descripta por Aragón y Mazzoni (1997).

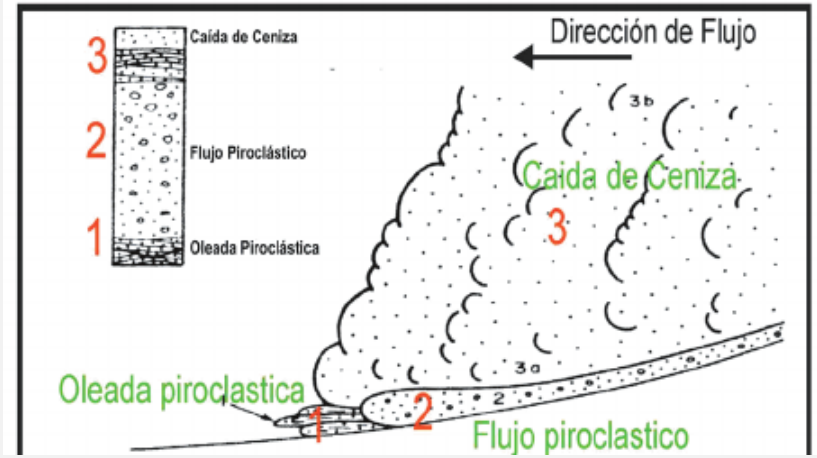


Depósitos de corriente de densidad piroclástica concentrada. A) Facies de flujo piroclástico de bloques y ceniza (volcán Azufral, Colombia). B) Facies de flujo piroclástico de bombas (volcán Cotopaxi, Ecuador). C) Facies de flujo piroclástico de pómez o ignimbrita no soldada (volcán Tuzgle, Argentina). D y E) Facies de fujos piroclásticos de pómez con diferente grado de soldadura (D, Guanacaste, Costa Rica y E. Ignimbrita Vizcachayoc, Argentina). F) Facies de flujo piroclástico de escoria (sector norte del abanico de Lérida, Tolima, Colombia). *Murcia et al., (2013)*

c.2) Surges u oleadas piroclásticas

* Se trata de flujos rápidos y turbulentos, subaéreos, con mezcla de partículas volcánicas y gas.
* Pueden ser de 2 tipos: ***surges secos y calientes***, formados por colapso de una columna eruptiva, encontrándose en la parte basal de las capas de ignimbritas; y ***surges fríos y húmedos***, formados durante erupciones freáticas y freatomagmáticas, por colapso de una columna eruptiva rica en vapor de agua.
* Los depósitos suelen ser delgados y de grano fino, cubriendo la topografía en forma de manto (siendo más potentes en valles y bajos).
* El espesor de las capas y tamaño de grano decrece a medida que nos alejamos del volcán.
* Rasgos distintivos: estratificación planar y entrecruzada.
* En gral. poseen menos de 1 m de espesor.





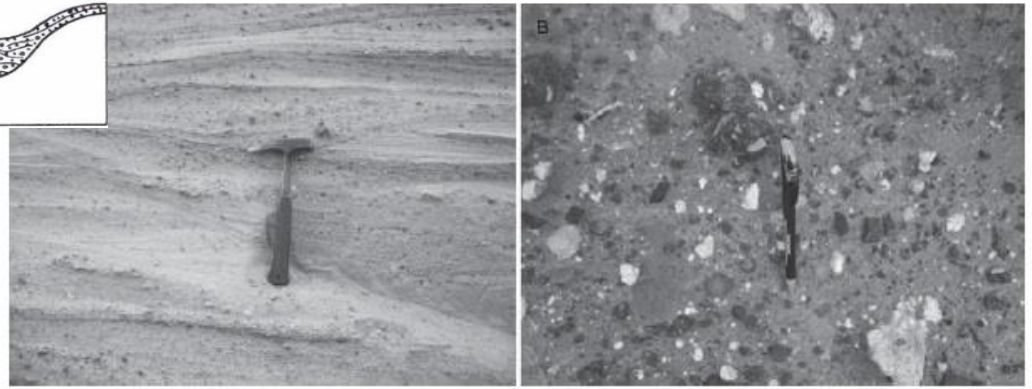
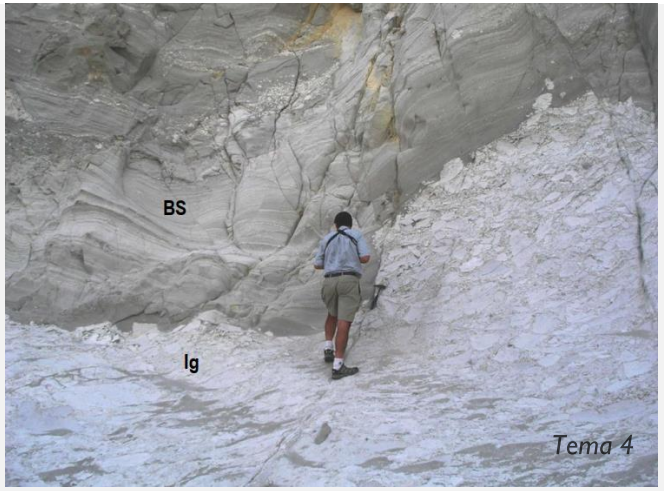
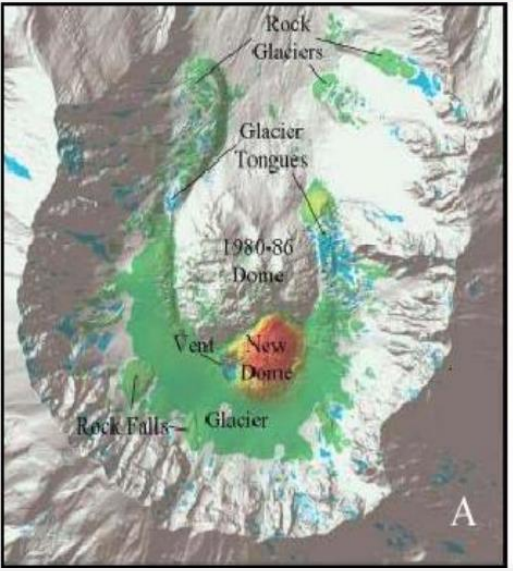
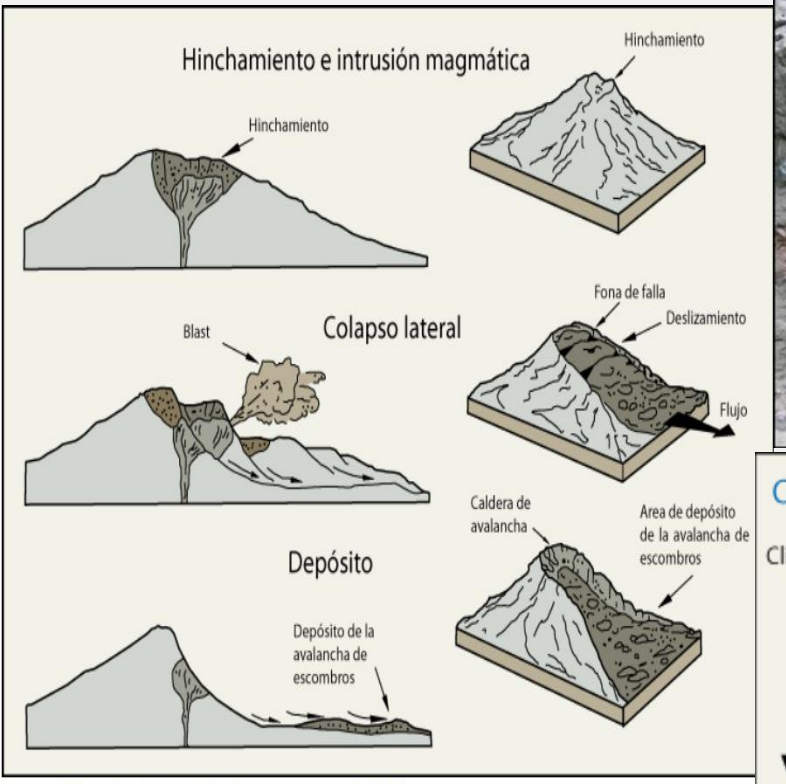


Fig. 4: Depósitos de corriente de densidad piroclástica diluida. A) Facies de oleadas piroclásticas basales (volcán Sotará, Colombia). B) Facies de oleada piroclástica de explosión dirigida (volcán Doña Juana, Colombia).

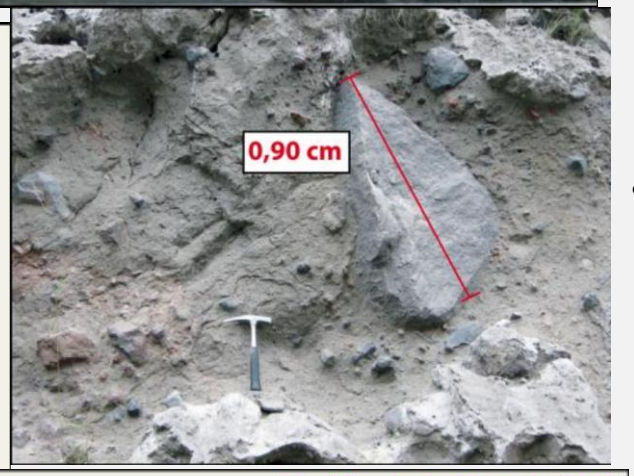


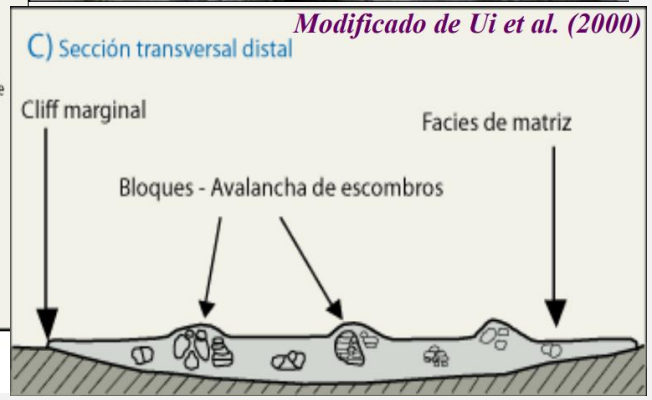
c.3) Deslizamientos volcánicos y avalanchas





Modificado de Leyrit & Meteneat (2000).





Modificado de Ui et al. (2000)

- ***Deslizamientos:*** movimientos en masa de los materiales sin que éstos pierdan su coherencia; deformación a lo largo de un plano.
- Pero, si el movimiento pendiente abajo continúa, el material puede perder cohesión y transformarse en un movimiento rápido de bloques y otros sedimentos, con escasa o nula participación de agua, denominado ***avalancha de detritos***.
  - Se desarrollan de forma similar a otros ambientes, pero alcanzan dimensiones enormes, movilizando varios km^3 de roca en un solo evento.
- Se desencadenan por la desestabilización de las laderas (por ej. shocks sísmicos, aumento en la pendiente, deformación lenta alrededor de emplazamientos de cuerpos subvolcánicos, etc.).
- Transportan bloques de cientos de metros. Las superficies de sus acumulaciones muestran un relieve muy irregular, cuyo núcleo se compone de los bloques mayores, rodeados por bloques menores y materiales más finos.
  - Distribución caótica de los sedimentos.

c.4) Depósitos de Lahares

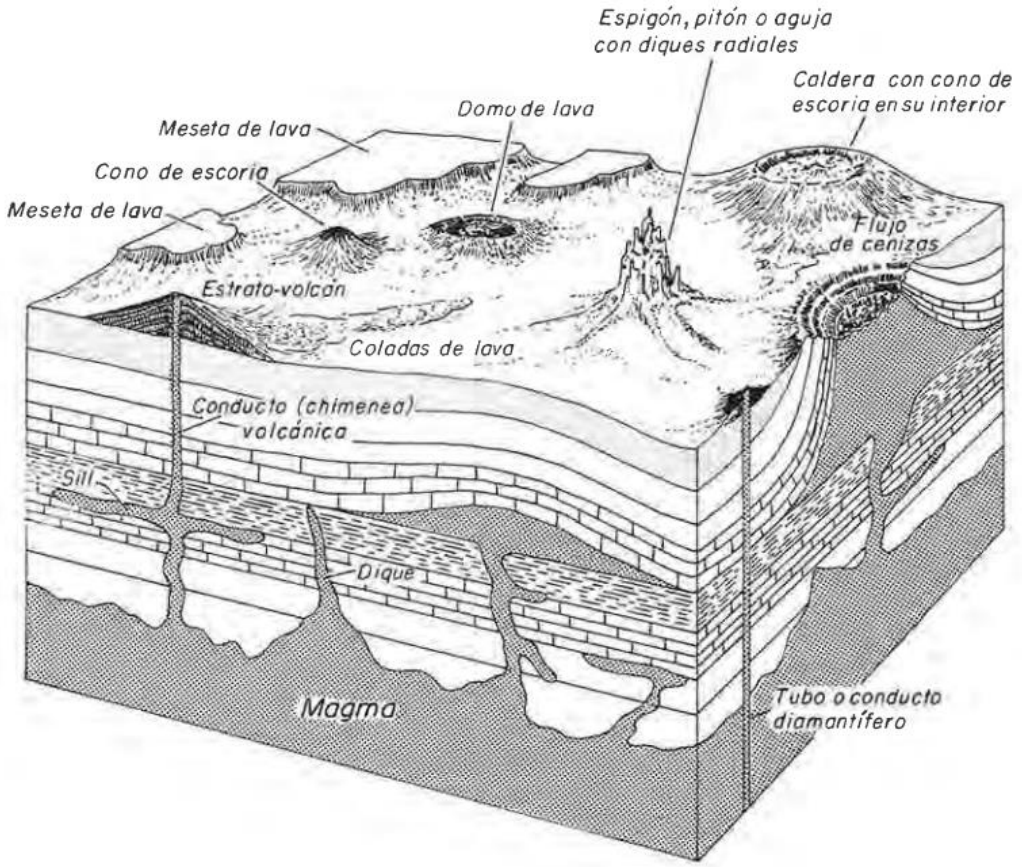
* Los ***lahares*** son flujos compuestos de una mezcla de agua y detritos volcánicos no consolidados, producidos en las laderas con pendientes de alto grado de los aparatos volcánicos.
* Pueden producirse casi en simultáneo a las erupciones.
* El agua puede provenir de lagos dentro de los cráteres o bien de la fusión de hielo/nieve por flujos piroclásticos. Pueden ser calientes, cuando el flujo piroclástico entra a un lago o río.
* Los no asociados a erupciones se forman gracias a grandes lluvias sobre depósitos no consolidados, o por ruptura de endicamientos a causa de depósitos volcánicos.
* Muestran: mala selección, fábrica matriz-sostén, capa basal con gradación inversa, proyección de bloques por la parte superior del banco, y formación de barra de bloques paralelas a la dirección de flujo.
* Comunes en ambientes de estratovolcanes.
* Acumulaciones de decenas de metros.

MORFOLOGÍAS ASOCIADAS A LOS VOLCANES

Clasificación de los volcanes y sus morfologías asociadas (según Rittmann, 1963).

TIPO DE MAGMA	ACTIVIDAD TIPO	CANTIDAD DE MAGMA PRODUCIDO (pequeña → grande)			
Fluido muy cálido, básico	Efusivo	Flujo de lava	Domos exógenos	Domos basálticos y escudos volcánicos	Islandiano / Hawaiano
Crece la viscosidad, contenido en gas y acidez (alta proporción de sílice)	Mixto	Conos de escorias con flujo	Estratovolcanes		Campos volcánicos con múltiples domos
		Conos de tefra suelta con flujo grueso			
		Domos endógenos (domo tapón o cúmulo volcánico)	Ruptura de domos endógenos con fluidos de lava gruesa		
Viscoso, relativamente frío, ácido	Explosivo	*Maars* de tefra	*Maars* con murallas o anillo	Colapsos y calderas de explosión	Capas de ignimbritas
Extremadamente viscoso, abundantes cristales	Explosivo altamente gaseoso	*Maars* gaseosos	Cráteres explosivos		

Fuente: de Pedraza-Gilsanz (1996)



* Volcanes de Lava básica

Al ser lavas más fluidas y sus emisiones más rápidas, las coladas dan lugar a volcanes con escasa pendiente. Se destacan los **volcanes escudo** (shield volcanoes), de laderas convexas muy suaves, con pendientes menores a 5° (por ej. Mauna Loa, Kilauea).

También se diferencian morfologías como **domos de lava** y **conos de lava**, con mayor convexidad que los volcanes escudo (no resulta fácil distinguir entre ellos dos).

Los **campos o plataformas** derivan de coladas lávicas, con corrientes ("ríos" de lava) superpuestas en una masa continua o individualizadas, dando lugar a resaltes, canales y "retorcimientos" (pahoehoe), los cuales luego de enfriarse sufren hundimientos y vaciados, generando tubos o conductos de cierto paralelismo con los cársticos.

Domo de lava

Campos de lava

www.rodrigonunezbuj.com
© RODRIGONÚÑEZBUJ

*Volcanes de Lava ácida

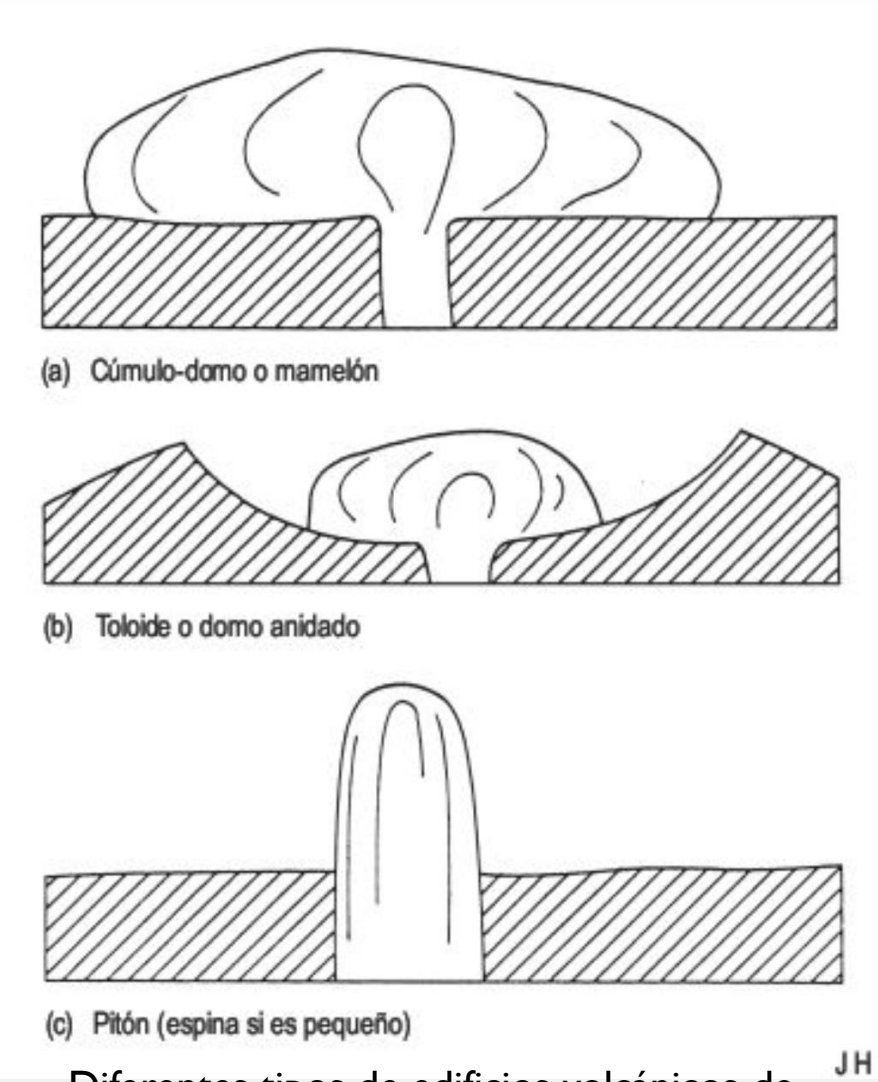
Cuando la lava sale del conducto se expande, formando un domo convexo llamado **cúmulo-domo** o **mamelón**, cuyos diámetros son mucho mayores que los conductos de salida, y que poseen un "caparazón" o costra producida por la lava viscosa al enfriarse, y que a medida que crece se va fracturando.

Cuando en el cráter de un gran volcán se halla un cúmulo-domo o mamelón, se le denomina **domo anidado** o **toloide**. A veces, la estructura domática puede ascender por empuje del magma infrayacente dejando una orla lateral que le separa del resto del volcán.

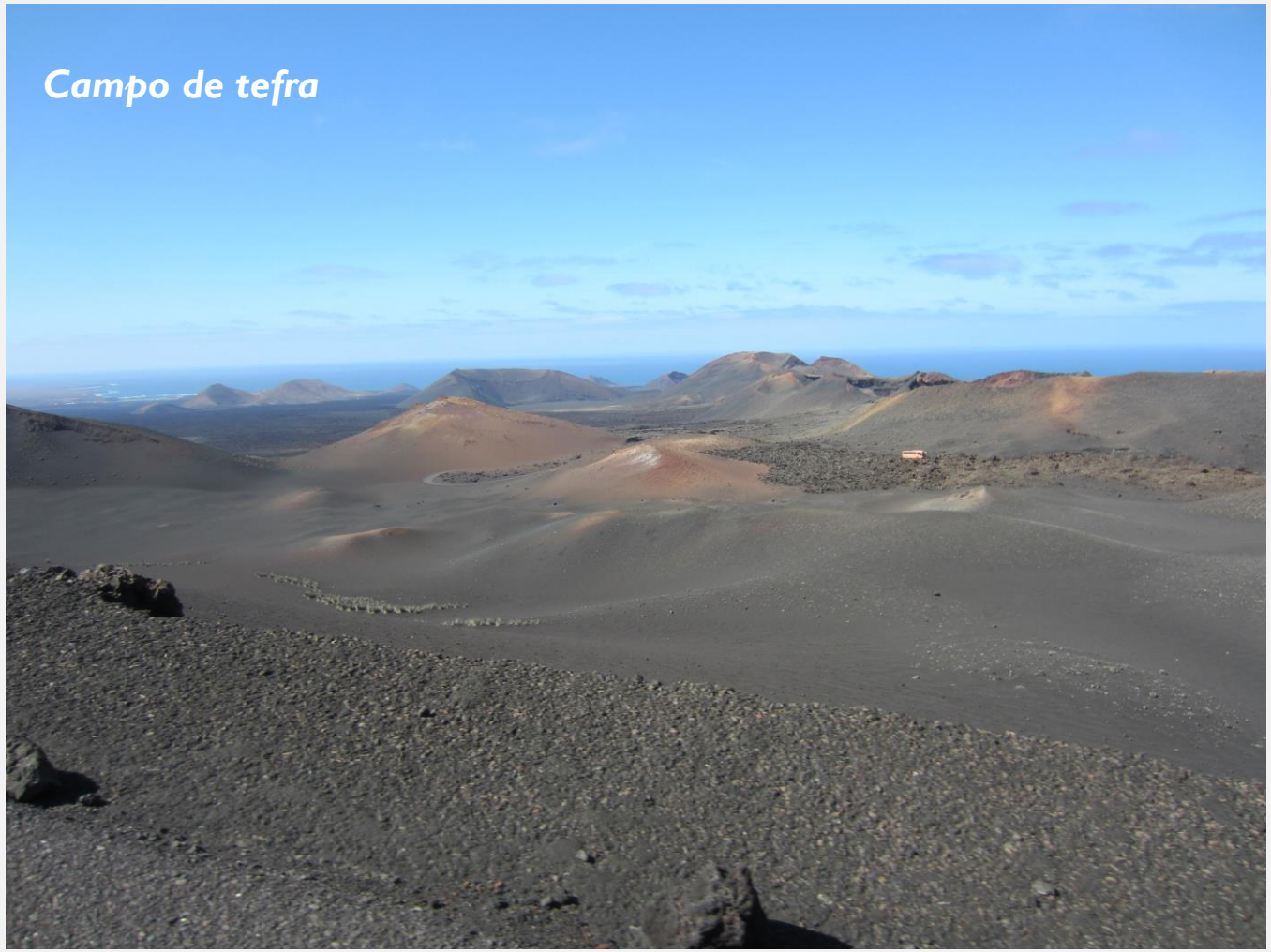
Los **pitones** (plugs) o **agujas** son masas de lava semi-sólida que rellenan la chimenea de un volcán. Esta lava puede ser empujada por el magma infrayacente como un pistón. Están construidos por columnas de lavas sub-verticales y pueden alcanzar varios cientos de metros de altura, creciendo rápidamente y en conexión con explosiones, para finalmente destruirse.

También pueden existir **campos** o **plataformas** a partir de formaciones con tefra. Suelen estar algo alejadas del centro emisor, y son consecuencia de la sedimentación piroclástica procedente de erupciones altamente explosivas.

Domo anidado.
Fuente: https://www.researchgate.net/publication/317416379_Evaluacion_del_potencial_turistico_de_geomorfositios_del_Parque_Nacional_Volcan_Poas/figures?lo=1



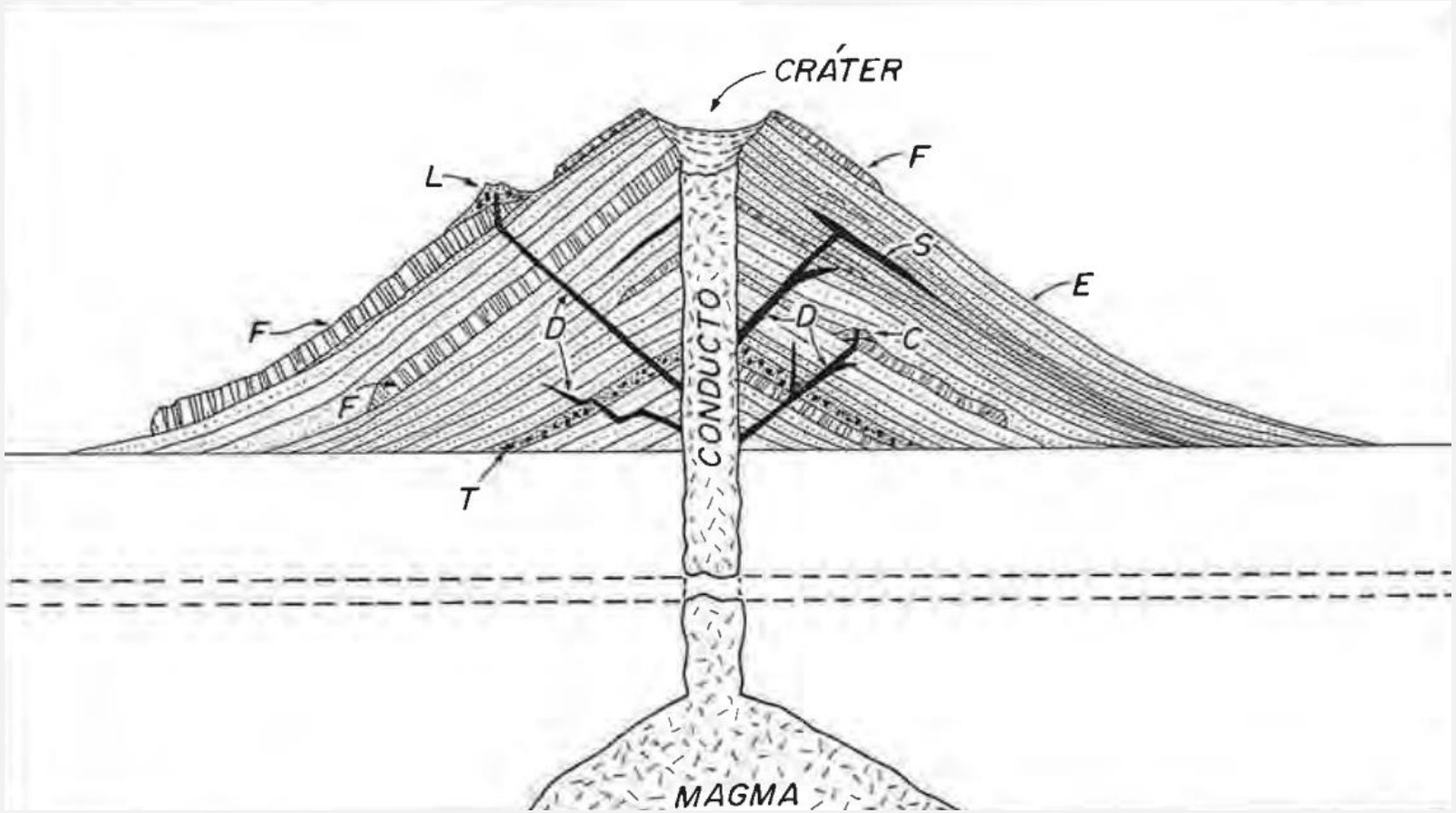
Diferentes tipos de edificios volcánicos de lava ácida (*Ollier, 1969 en Gutierrez-Elorza, 2008*).



* Estratovolcanes

Constituyen una de las morfologías más espectaculares del mundo. Se forman por sucesivas erupciones de lavas y piroclastos. Debido a su complejidad y larga evolución se les suele llamar **volcanes compuestos** o **poligenéticos** (Schmincke, 2004). Su altura es muy variable, pero sí resulta significativa la altura del punto de emisión (en relación con su tamaño) en el comienzo de la formación del futuro estratovolcán. Se suelen formar por erupciones centrales o de tipo poli-orificio en los flancos (ej. Etna).

Las etapas de erupción alternan con las de quietud, en las cuales el volcán está sometido a los procesos erosivos y a la dinámica externa. Cuando posteriormente ocurre otra erupción, las coladas discurren por los barrancos generados por la erosión fluvial previa, modificando los cursos fluviales de forma sustancial. Algunos ejemplos de este tipo de volcanes: Teide (España), Popocatepetl (México), Licancabur (Chile), Vesubio (Italia).



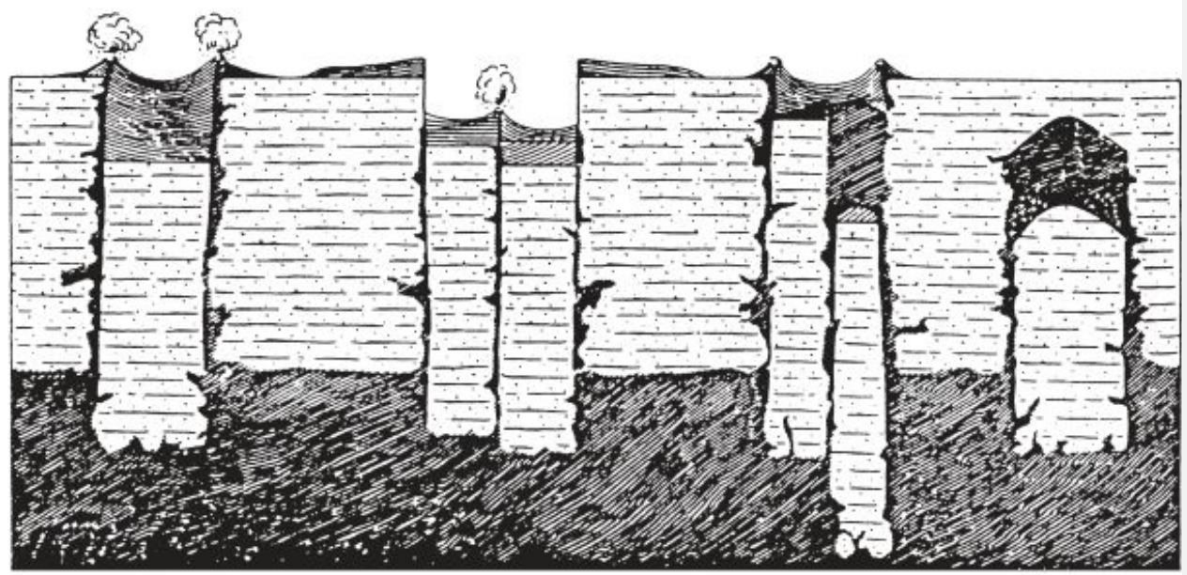
Estructura de un estratovolcán, según Macdonald (1972) compuesto por: **E,** sucesivas acumulaciones de escoria (punteado); **T**, sucesivas capas de tefra (punteado denso); **F,** lava (rayado oblicuo); **C,** antiguo como de ceniza fosilizado; **S,** sill; **D,** diques; **L,** cono lateral a partir de un dique. Fuente: de Pedraza (1996)

* Calderas

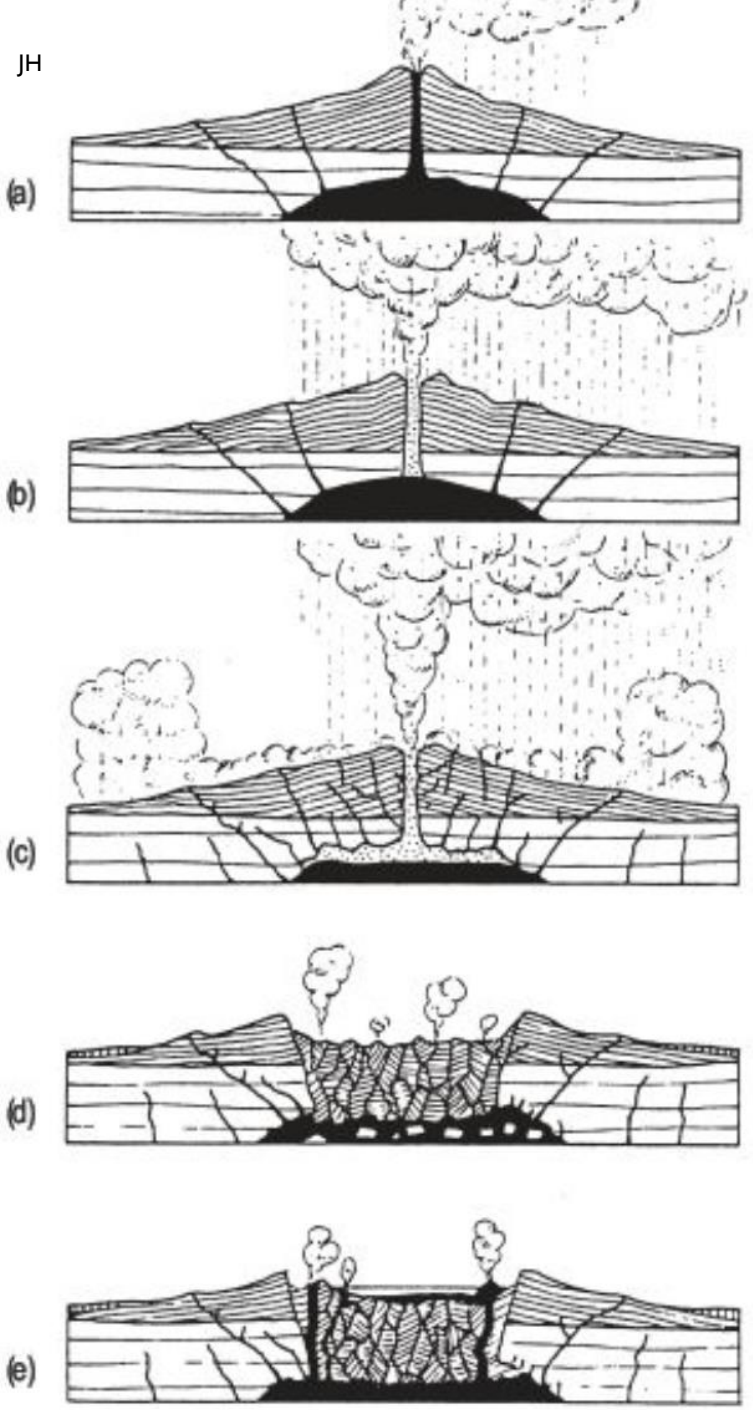
Ciertos volcanes tienen una depresión profunda circular o elíptica en la cumbre, mucho mayor que un cráter normal, dando la impresión de que una gran explosión hizo desaparecer el techo del cono. Estas grandes depresiones se originan normalmente por colapso y se conocen como **calderas**. Las paredes de las calderas suelen ser de pendiente vertical a subvertical y el fondo se sitúa a varios cientos de metros. La mayor caldera conocida en la de Yellowstone, con 60 km de diámetro.

Los principales elementos estructurales y morfológicos de las calderas son: límites netos, pared interna, fallas de borde (si existen), fondo estructural, relleno intercaldera (ignimbritas y deslizamientos), y cámara magmática infrayacente.

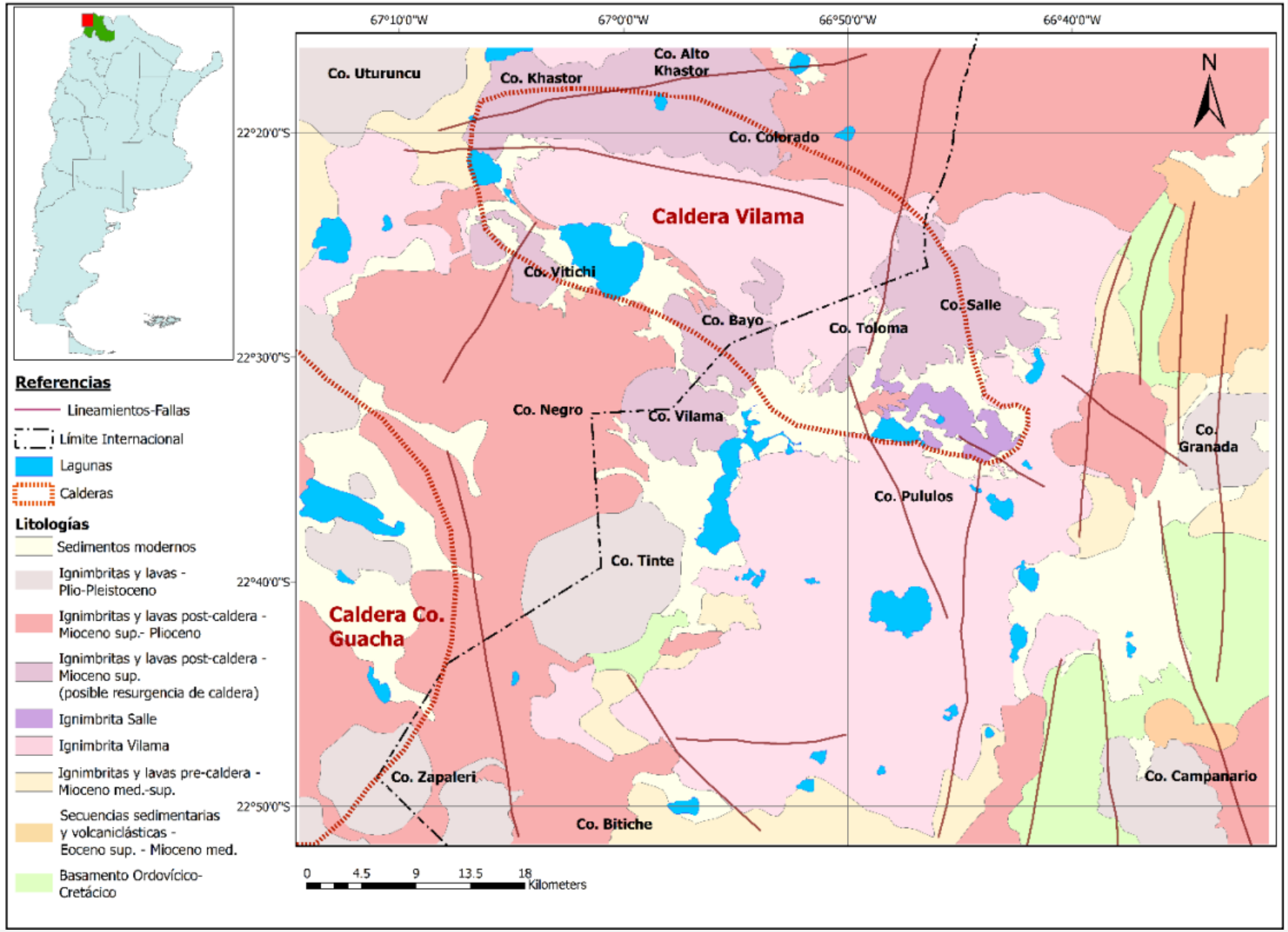
Se cree que muchas calderas se formaron durante una gran erupción de grandes volúmenes de material piroclástico, que conllevó a un rápido vaciamiento de la cámara magmática y posterior colapso del techo. A las morfologías así formadas se las conocen como **calderas de subsidencia** o **calderas tipo Glencoe**, y se parecen a un pistón subsidente dentro de un cilindro. Los **diques anulares** son la expresión geológica del cilindro. Otro modelo de formación surgió de la erupción del Krakatoa en 1883, donde un gran colapso convirtió la isla (Indonesia) en tres pequeños islotes, concéntricos con respecto al lugar de máxima subsidencia, y desaparecieron las 2/3 partes de la misma. El momento de máxima actividad se manifestó por una serie de erupciones plinianas y peleanas, que emitieron cenizas hasta la estratósfera. Luego, la cámara magmática se hundió rápidamente y el magma ascendió hasta cerca del margen de la caldera, y los colapsos generaron devastadores tsunamis. En 1927 surgió en el centro de la caldera un nuevo volcán (Anak Krakatau) como consecuencia de erupción submarina que generó una nueva isla. A este modelo se le denomina **caldera tipo Krakatoa** o **caldera tipo Crater-Lake** (éste último a partir de la caldera Crater-Lake en Oregon, EE.UU).



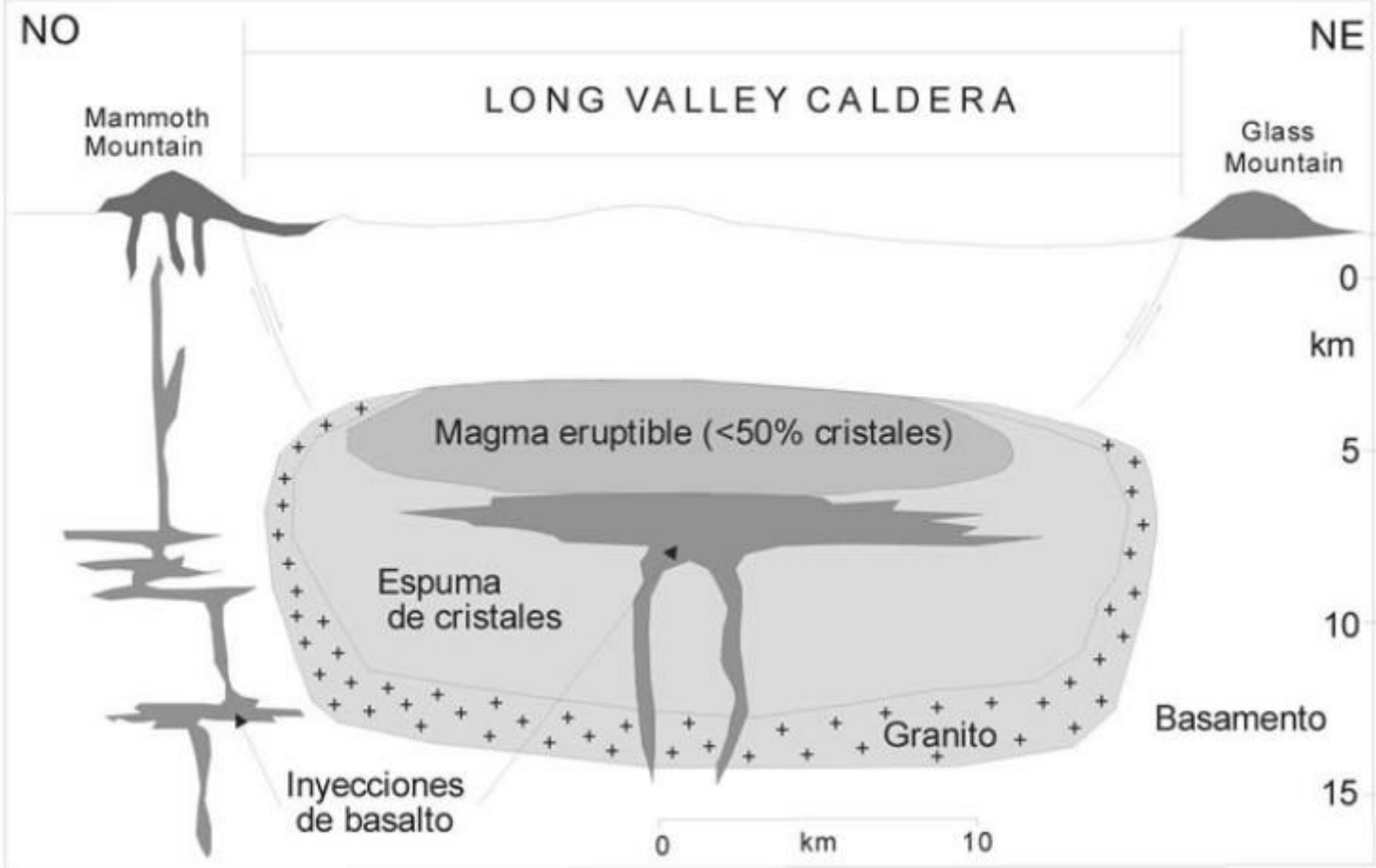
Caldera de subsidencia. A la izquierda, las erupciones tienen lugar a favor de las estructuras anulares. En el segundo desde la izquierda, continúan las erupciones a partir de un conducto central después de formarse la caldera (Bailey y Maule, 1960 en Gutiérrez-Elorza, 2008).



Etapas de formación de la caldera Crater-Lake Oregon. **a)** Explosiones ligeras. **b)** incremento de la actividad. **c)** Momento álgido de las erupciones plinianas y peleanas; el magma se hunde bajo el techo de la cámara magmática. **d)** Colapso del cono en la cámara magmática. **e)** Nuevas erupciones del fondo de la caldera, cerca del borde (Williams, 1941 en Gutiérrez-Elorza, 2008)



Mapa Geológico del Sistema Lacustre de Vilama y alrededores. Se destaca el límite estimado que abarcó de la caldera Vilama dentro del sistema. *Mapa realizado en base a los trabajos de: Soler et al. (2007), Fracchia (2009) y Fracchia et al. (2010)*



Esquema de la Caldera Long Valley, mostrando el volumen de material eruptible. (Modificado de Bachmann y Bergantz 2008). *Fuente: http://www.insugeo.org.ar/libros/misc_18/04.htm*

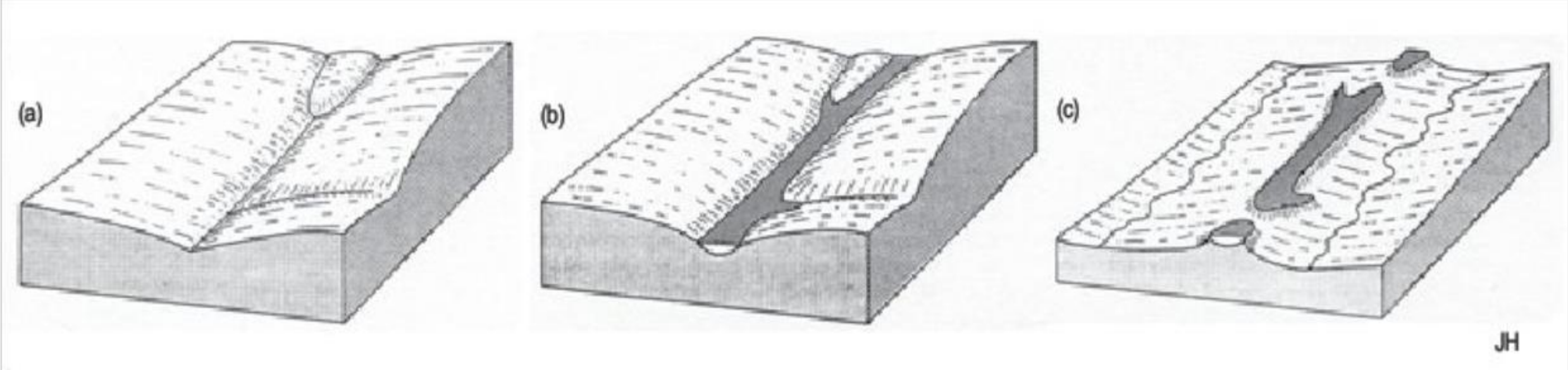
Algunas calderas silíceas se encuentran agrupadas formando **complejos de calderas**, como por ej, San Juan Mountains (Colorado, EE.UU), donde se reconocen 18 calderas formadas entre 22 y30 Ma. Las calderas se superponen entre sí, y algunas pareen estar anidadas, por lo que resulta difícil saber dónde comienzan una y acaba la otra.

También se reconocen **calderas de escudos basálticos**, como en los volcanes de las Islas Hawaii, Islandia, Isla de la Reunión y Galápagos. Se forman por colapso de la cumbre a modo pistón, tras la emisión de grandes cantidades de lava, con lo que el techo de la cámara magmática pierde soporte y se hunde. Son menos profundas que antes descritas.

Formas volcánicas resultantes de la erosión

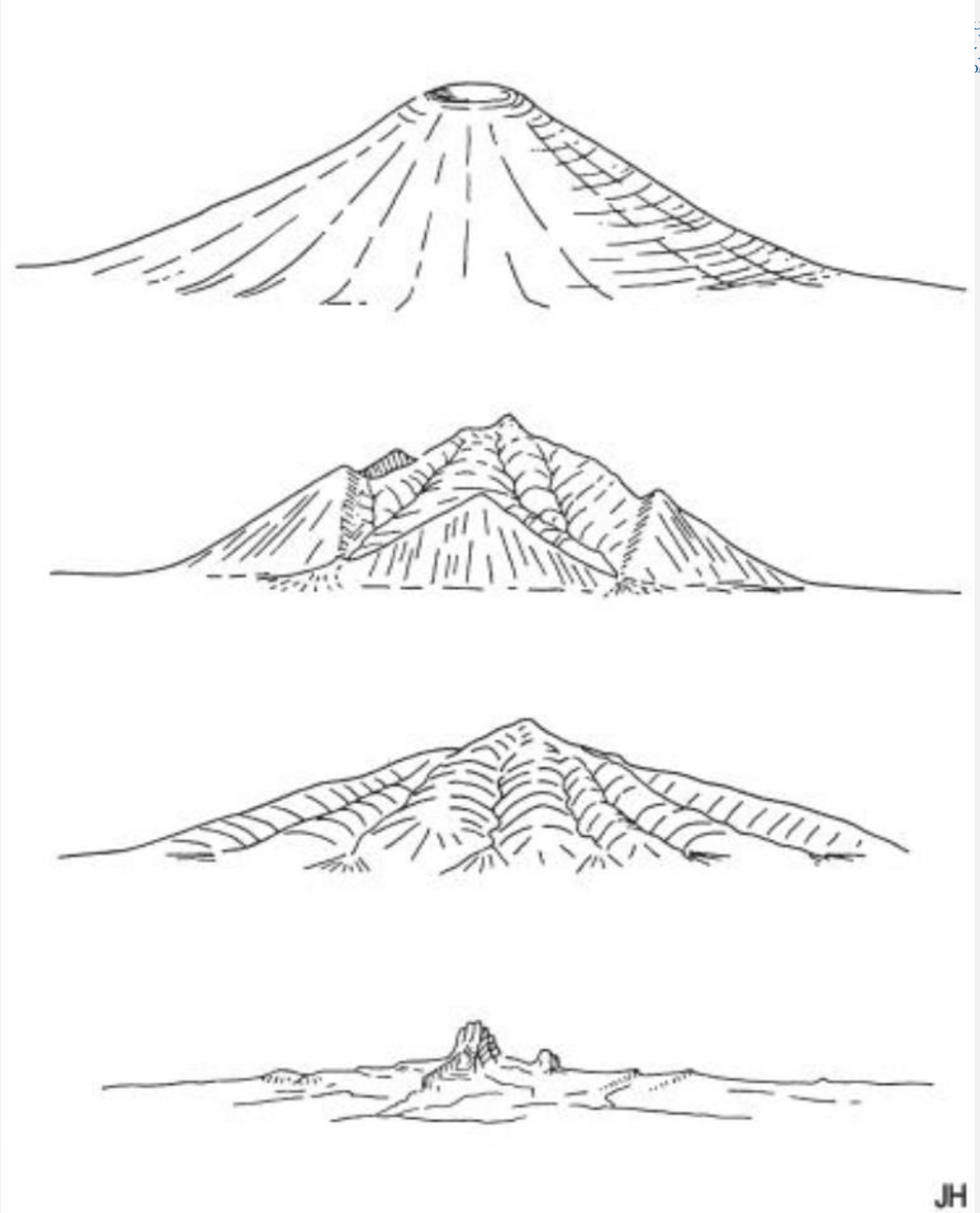
La erosión rebaja paulatinamente la superficie terrestre. Si un volcán está extinto, con el tiempo se puede convertir en una superficie de erosión plana. Los procesos de meteorización que afectan a las rocas volcánicas son iguales a aquellos que afectan a las demás rocas, aunque la intensidad y naturaleza de ciertos procesos estará asociada a las distintas condiciones morfoclimáticas.

La erosión fluvial en las laderas de los volcanes puede producir profundas **gargantas** y **valles**, junto con **barrancos** de hasta cientos de metros. Si la actividad del volcán continúa, los ríos puede resultar endicados, formándose **lagos**. Cuando cesa el flujo de lavas, por debajo de ellas se pueden encontrar rocas más fácilmente erosionables. La socavación del río, junto con otros procesos de la dinámica externa, elaboran un relieve en el que las partes elevadas son lavas resistentes (ej. basalto), y por lo tanto se produce una **inversión del relieve**.



Inversión del relieve (Ollier, 1969 en Gutiérrez-Elorza, 2008).

Los conos de piroclastos pueden ser tan porosos que el agua se infiltra por completo, y no sufren erosión hídrica. En conos antiguos, la arcilla de meteorización rellena los poros y se produce el **abarrancamiento de las laderas**. Cerca del cráter hay menos erosión (porque la cuenca de aporte es muy pequeña), en las zonas medias la erosión es máxima debido a la mayor pendiente, y en las partes bajas es menor. En la zona distal se deposita material en **abanicos aluviales**. Los interfluvios entre los barrancos están constituidos por **crestas agudas**; al paisaje con ambas geoformas se le conoce como ***varillaje de sombrilla,*** que no suele permanecer intacto por mucho tiempo. En los estratovolcanes y macizos, hay un mayor control estructural por las capas más resistentes de lava, que pueden dar lugar a valles de escarpadas laderas.
Cuando los barrancos principales son activos en un cono volcánico, éstos se ensanchan y profundizan. En la parte inferior los valles están espaciados y se desarrollan grandes facetas triangulares, que se denominan ***planezes***. La continua erosión, termina rebajando el cono hasta acabar en un conjunto de diques y pitones que representan el ***esqueleto del volcán***.



Etapas de erosión de un volcán. *Fuente: Gutiérrez-Elorza, 2008.*

Relieves Graníticos

Conjunto de fisonomías características de las rocas ígneas intrusivas. Corresponden a asociaciones de formas derivadas y peni-originales, debidas a la acción del modelado sobre material plutónico. El máximo desarrollo tiene lugar en rocas cristalinas poliminerales, pero las más frecuentes son las cuarzo-feldespático-micáceas y granudas, es decir las granitoideas.

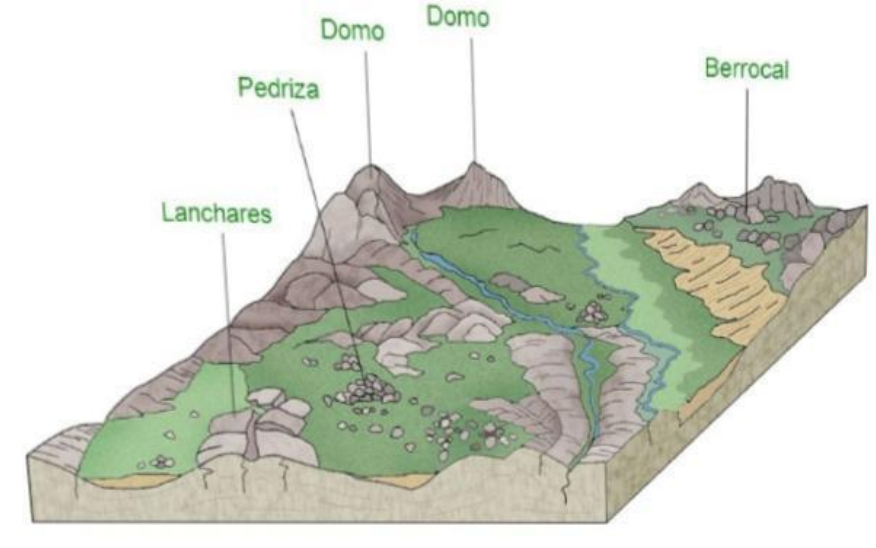
Estos relieves proceden de modelados diferenciales, consecuentes a una meteorización y erosión selectivas: la primera define los rasgos característicos, siendo su modalidad química o descomposición; la segunda se limita a desmantelar la porción alterada.

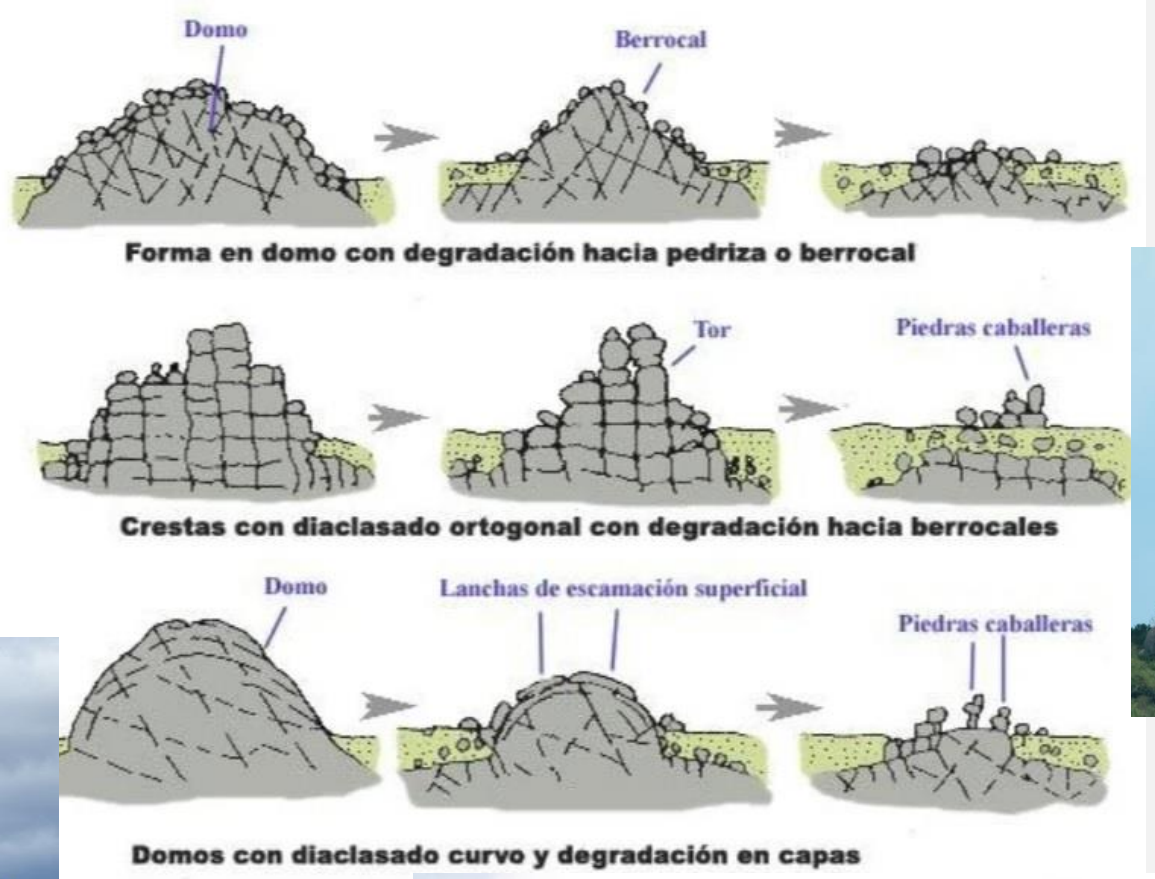
En un clima con suficiente calor y humedad, la alteración en las rocas graníticas llega a ser total y depende de tres variables:
- *Composición.* Controla la modalidad del proceso y su velocidad a partir, no tanto del quimismo global como de la mineralogía.
- *Textura.* Favorece o dificulta el proceso, pues la resistencia a la meteorización química será mayor cuanto mejor sea el ajuste entre los cristales, es decir, más idiomorfa y, por tanto, menos granuda y porosa.
- *Fisuración.* Condiciona la progresión de la meteorización hacia niveles subsuperficiales: cuanto menor sea la fracturación y diaclasado, mayor será el espaciado entre roturas y menor la permeabilidad secundaria.

Según interactúen esas variables, aparecen franjas, zonas y macizos arenizados, junto a otras áreas con granito fresco. **Arenización,** término utilizado en un sentido descriptivo más que genético, indica un material granítico alterado y no movilizado, es decir, un saprolito que se comporta como una arena ligeramente compactada. Este material, denominado también ***grus***, es muy vulnerable a la erosión pluvial y fluvial. El modelo más completo para explicar la génesis de relieves graníticos considera dos etapas: meteorización diferencial y posterior denudación selectiva o lavado de la alteración; corresponde a la **doble planación**.

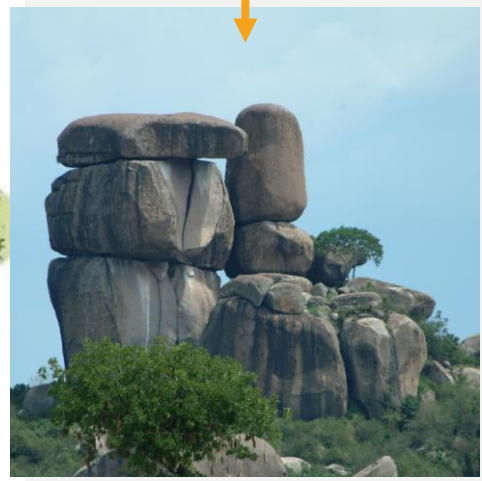
Esquema aplicado al Sistema Central español, presentando las morfologías más comunes en paisajes graníticos y la relación con sus factores genéticos. Basado en Pedraza (1978), y Pedraza *et al.* (1989). *Fuente: de Pedraza (1996).*

TIPO / Carácter indicativo	ALTERACIÓN GENERALIZADA (arenización)	TORS Y LANCHARES (bolos sobre zonas arenizadas y lanchas)	PEDRIZAS (berrocal degradado)	BERROCAL (domos degradados)	DOMOS (cupuliformes y campaniformes)	CRESTONES Y CRESTAS
Diaclasado dominante	No reconocible	Horizontal	Ortogonal (curvo y radial) abierto	Ortogonal (curvo y radial) casi cerrado	Curvo dando lanchas	Vertical, dando paredes
Fracturación	Muy densa en todo el dominio	Discontinua	Discontinua	Sólo en los bordes	Sólo en los bordes	Sólo en los bordes
Tipo de granitoide (mineralógico) (*)	Biotítico de grano grueso	Biotítico de grano grueso	Todos	Todos	Poco biotítico de grano medio y/o porfídico	Grano fino y diques
Textura más propensa (*)	Granuda	Granuda	Ligeramente apretada	Apretada	Apretada	Apretada
Capacidad para la penetración de agua y aparición de manantiales (*)	Alta, roca porosa	Media, en bordes	Media, porosidad selectiva a favor de las discontinuidades del diaclasado	Media - baja, porosidad selectiva a favor del diaclasado más abierto	Baja o nula	Baja o nula
Capacidad para el desarrollo edáfico y productivo	Alta, buen desarrollo de suelos en todo el dominio	Media, desarrollo discontinuo de suelos y vegetación	Media a baja, desarrollo de suelos y vegetación en diaclasas abiertas	Baja, a favor de las diaclasas	Muy baja, sólo en algún diaclasado algo abierto	Muy baja, sólo a favor de algún diaclasado horizontal
Grado evolutivo ideal (*)	Relieve muy evolucionado (senil)	Relieve bastante evolucionado (senil)	Relieve bastante evolucionado (maduro)	Relieve evolucionado (maduro)	Relieve poco evolucionado (juvenil)	Relieve poco evolucionado (juvenil)
Alteración meteórica	Total	Alta, pero discontinua	Alta, muy discontinua	Baja y discontinua	Muy baja	Muy baja

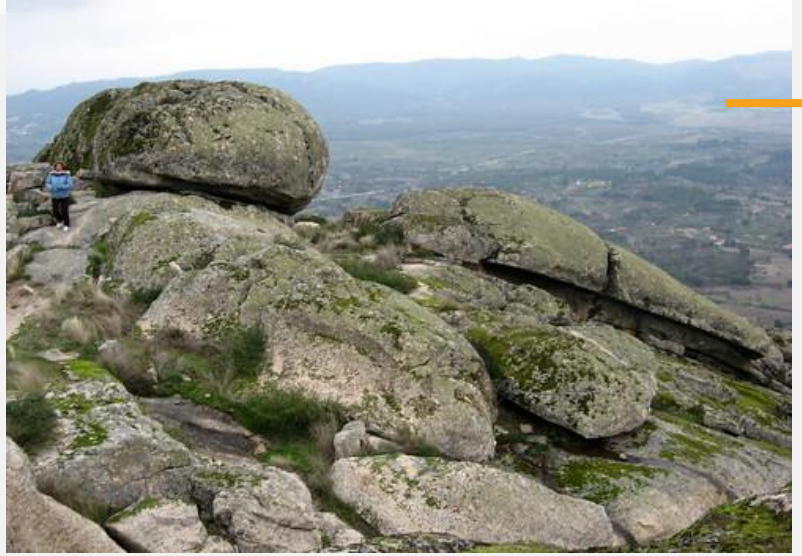




Tor



Berrocal



Rocas ballena

Directamente asociadas a estos procesos aparecen en superficie una serie de morfologías que, dadas sus dimensiones, suelen denominarse ***formas mayores***; son: ***domos, crestones, berrocales y pedrizas, lanchares, bolos y arenizaciones residuales***. **Domo** o ***bornhardt*** y **crestón,** representan las formas primarias en un paisaje granítico y su origen muestra clara relación con el diaclasado: el curvo dará formas dómicas, uno vertical tenderá a crestones, y la interferencia entre ambos propiciará el desarrollo progresivo de berrocales.

Todo relieve granítico exhumado, al iniciar su evolución en condiciones subaéreas pasa por una serie de etapas que, según una escala ideal, le conducen sucesivamente desde formas dómicas o crestas, a **berrocales, pedrizas, lanchares** (frecuentemente son el flanco o techo de un domo parcialmente exhumado, o en proceso de exhumación), **acumulaciones de bolos,** bolos dispersos y **zonas arenizadas** en franjas preferenciales o superficies más amplias. Dada su particular fisonomía, algunas formas reciben nombres peculiares; así ocurre con ***tors*** o pequeños berrocales aislados, las formas acastilladas o ***crestas***, domos en "***dorso de ballena"***, etc.

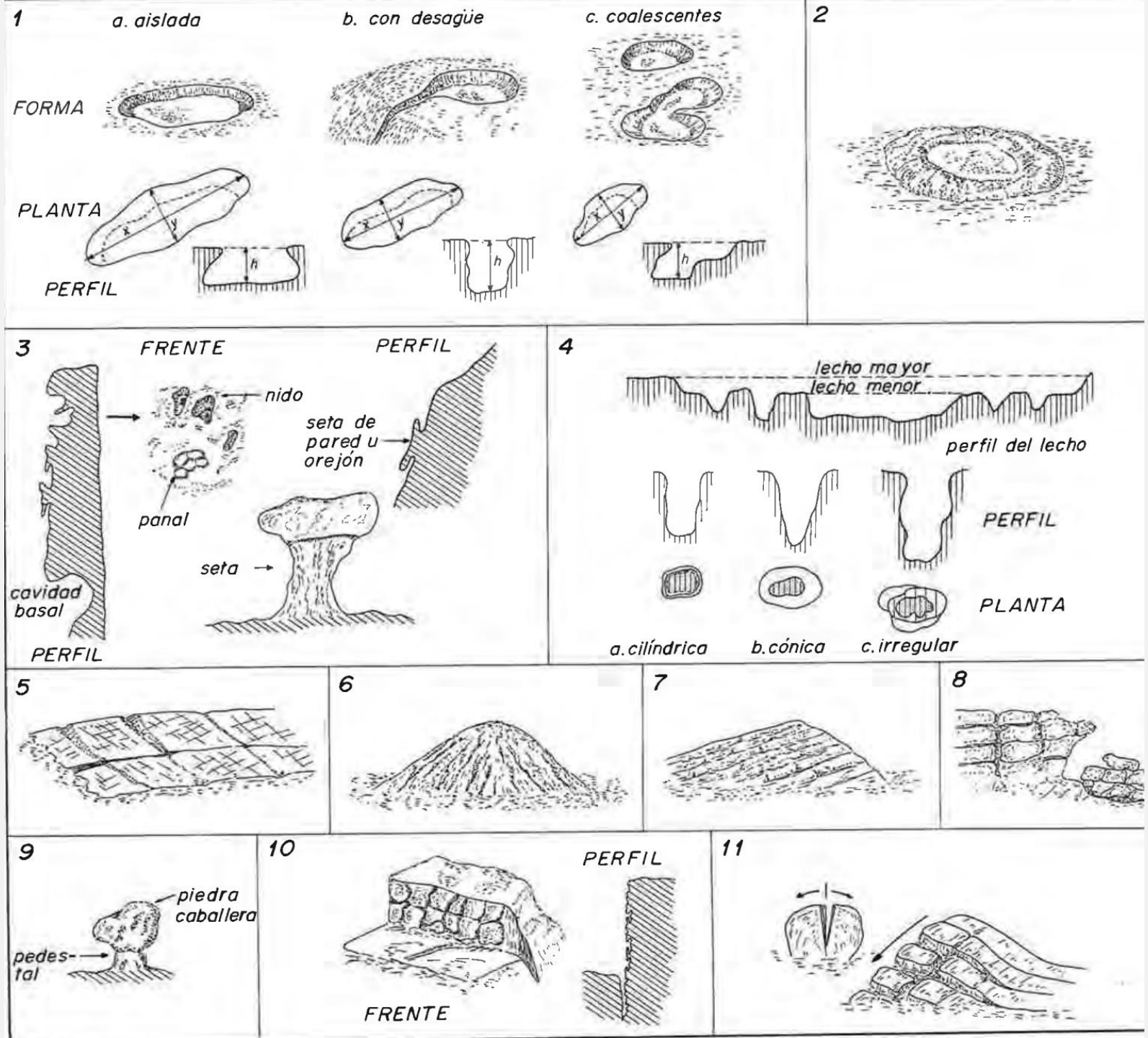
Junto a las morfologías mayores aparecen otras en detalle, genéticamente variadas. Unas se forman en ambiente subaéreo, otras proceden del subcutáneo y al aflorar en superficie acabarán degradándose; por último, también hay formas mixtas, pues inician su génesis bajo la superficie y terminan de hacerlo una vez son exhumadas. Todas ellas suelen agruparse bajo la denominación genérica de *formas menores,* resumidas en el siguiente cuadro.

FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIVERSIDAD NACIONAL DE JUJUY

Formas graníticas menores, basadas en la morfología del sistema central español. *Fuente: de Pedraza (1996)*

DENOMINACIÓN	CARÁCTER	GEOMETRÍA
Pila o pilancón no fluvial Llamadas también: *gnamma* y *rock basin* en Australia (Twidale, 1982); *cadolle* o *cassolete* en Cataluña (Vilaplana, 1987); *pias* en Galicia (Vidal Romaní, 1984)	Hendiduras sobre lanchas graníticas horizontales o subhorizontales. Suelen ser poco profundas, con carácter ovoide o esférica y raramente cónicas; de dimensiones centimétricas, pueden llegar a métricas en su eje mayor. Se forman por retenciones de agua en irregularidades de la roca que implican una meteorización-desagregación concentrada. El origen de esas irregularidades está en procesos de carga diferencial (Vidal Romaní, 1984); la evolución posterior es una desagregación granular y vaciado de los productos por el rebose del agua, lo cual va favoreciendo su profundización (Pedraza *et al.*, 1989). En general $x>y$, aun cuando puede ser $x \approx y$, pero siempre $h<<x$ ó y.	1
Aros de piedra *Rock doughnuts*	Resaltes anulares con una depresión interior. Aparecen asociados a pilas o pilancones, ya que suelen originarse a partir de esas formas mediante una inversión evolutiva, al haberse endurecido las paredes por exudaciones y precipitados de meteorización.	2
Tafonis o tafonización	El término «*taffoni*», cavidad en corso, se aplica a hendiduras producidas por meteorización en las paredes inclinadas de diferentes tipos litológicos. Son consecuencia de «escurrideras» o humedad concentrada que, en las rocas graníticas, producen desagregaciones selectivas. Así se originan oquedades o nidos, resaltes en panal, concavidades basales, extraplomos, incluso cuevas; es frecuente también la formación de «tormos» o setas. Su génesis es similar a los pilancones, es decir, desagregación meteórica, pero en paredes inclinadas.	3
Marmitas de gigante Llamadas también **pilas o pilancones fluviales**	Son de geometría similar a pilas o pilancones no fluviales, si bien éstas se sitúan en el lecho fluvial. Tienen su origen en la generación de flujos helicoidales durante las crecidas y el consiguiente desgaste abrasivo de la pared, producido por la removilización del material que yace en el lecho de la depresión; también pueden asociarse a la «cavitación». Su morfología tiende a ser cónica o cilíndrica y de mayor profundidad que los pilancones no fluviales. En general $x \approx y \approx h$ ó $h>>x \approx y$.	4
Pavimentos	Planos o lanchas de gran regularidad (similares a los pulidos), aunque con múltiples discontinuidades de pequeñas diaclasas que los compartimentan, y donde crece vegetación herbácea. Su pendiente es muy escasa.	5
Canalones, acanaladuras	Regueros y canalillos, paralelos o subparalelos, de profundidad centimétrica a decimétrica, y formados sobre paredes inclinadas a similitud de aquéllos que aparecen en los lapiaces de rocas carstificables. En materiales graníticos, su origen se asocia a fenómenos de desagregación selectiva por escorrentía pluvial o nivo-pluvial.	6
Paraestratificación	Diaclasado paralelo o subparalelo a la superficie (lajamiento), muy regular y de espaciado constante, que confiere a ciertos macizos graníticos un aspecto «similar» al de una roca estratificada.	7
Extraplomos	Paredes o techos generados por desplome de bloques, dejando resaltes o viseras.	8
Piedras caballeras y pedestales	Conjunto rocoso en el cual destaca un bloque aislado o piedra caballera, sobre otro más o menos nítido que le sirve de base o pedestal.	9
Agrietamientos pseudopoligonales	Superficies endurecidas sobre las que aparecen discontinuidades o grietas formando un enrejado. Pueden asociarse a planos de diaclasado, donde se produjo una transformación de los minerales por rozamiento.	10
Bloques separados	Porciones de roca que, mediante un ligero deslizamiento o pérdida de sustentación, se separan entre sí o del conjunto rocoso general. El movimiento es a favor de discontinuidades, normalmente el diaclasado.	11

Formas graníticas menores, basadas en la morfología del sistema central español (Continuación). *Fuente: de Pedraza (1996)*



Bibliografía

Coira, B., Caffe, P., Ramirez, A., Chayle, W., Díaz, A., Rosas, S., Pérez, A., Pérez, B., Orozco, O., Martínez, M., 2004. Hoja Geológica 2366-I/2166-III, Mina Pirquitas. Provincia de Jujuy. (No. Boletín N°269), Programa Nacional de Cartas Geológicas de la República Argentina. Buenos Aires.

Coira, B., Caffe, P., Mahlburg Kay, S., Díaz, A., Ramírez, A., 1996. Complejo volcanico Vilama – Sistema caldérico del Cenozoico superior en Puna, Jujuy, in: XIII Congreso Geológico Argentino, Actas. Buenos Aires, p. 17.

De Pedraza-Gilsanz J. (1996) *Geomorfología. Principios, métodos y aplicaciones.*, Editorial Rueda.

Fracchia, D., 2009. Volcanismo postcolapso de la caldera Vilama , Mioceno superior , Mecanismos eruptivos y Petrogénesis. Facultad de Ciencias Naturales y Museo. Univesidad Nacional de La Plata.

Fracchia, D., Polo, L., Caffe, P., Coira, B., 2010. Redefinición estratigráfica de la Ignimbrita Pululus (Puna Norte): Implicancias volcanológicas y metalogenéticas. Rev. la Asoc. Geol. Argentina 66, 271–281

Gutiérrez-Elorza M. (2008) *Geomorfología.*, Pearson Educación S.A.

Soler, A., Otero, N., Rosell, M., Carrey, R., Domènech, C., n.d. Isótopos de la molécula del agua, Grup de Mineralogia Aplicada i Geoquímica de Fluids. Dep. Cristal·lografia, Mineralogia i Dipòsits Minerals, Facultat de Geologia, Universitat de Barcelona. Barcelona.

Soler, M., Caffe, P, Coira, B, Onoe, A., Kay, S., 2007. Geology of the Vilama caldera: A new interpretation of a large-scale explosive event in the Central Andean plateau during the Upper Miocene. J. Volcanol. Geotherm. Res. 164, 27–53. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2007.04.002

Soler, M., Caffe, P., Coira, B., Onoe, A., 2005. La caldera Vilama y el complejo caldérico Eduardo Avaroa, Puna Argentina - Altiplano Boliviano, en: XVI Congreso Geológico Argentino. pp. 673–678.