

UNIVERSIDAD DE LA REPUBLICA

FACULTAD DE AGRONOMIA

MONTEVIDEO - URUGUAY

**ENSAYO DE CLASIFICACION GEOLOGICA
DE LAS ROCAS IGNEAS**

POR

JORGE BOSSI



ENSAYO DE CLASIFICACION GEOLOGICA DE LAS ROCAS IGNEAS¹

JORGE BOSSI²

RESUMEN

Se procura adaptar la clasificación de las rocas ígneas a las observaciones geológicas realizadas en Uruguay y se propone diferenciar el sentido de los términos ígneo y magmático, tradicionalmente aceptados como sinónimos. Ciertas rocas ígneas granudas pueden presentar dualidad de origen: metamórfico y magmático.

Hay que admitir dos mecanismos de formación de magma: *ácido* durante la orogénesis y *básico* por movilización de Sima a través de fracturas de Sial (geoclasas).

Se sugiere el siguiente esquema de clasificación para las rocas ígneas: a) metamórficas; b) magmáticas orogénicas; c) magmáticas no-orogénicas.

Las conclusiones se basan en la descripción de algunas estructuras geológicas uruguayas de "granitos" metamórficos, "granitos" intrusivos y la zona afectada por la tectónica y magmatismo basáltico gondwánico.

SUMMARY

The present work tries to adapt the system of classification of igneous rocks to the geological observations carried out in Uruguay. Its purpose is to differentiate the meaning of the words *igneous* and *magmatic*, both traditionally accepted as synonyms. Some coarse grained igneous rocks may present two origins: metamorphic and magmatic.

1. Trabajo presentado al XIX Congreso Brasileño de Geología en setiembre de 1965, revisado durante 1966 y 1967.

2. Profesor de Geología, Facultad de Agronomía de Montevideo. Profesor de Mineralogía, Facultad de Química de Montevideo.

Two mechanisms of magma formation have to be admitted: *acid*, during orogenesis and *basic* due to Sima mobilization throughout the faults of Sial (geoclasas).

The following classification of igneous rocks is proposed: a) metamorphic rocks; b) orogenic magmatic rocks; c) non-orogenic magmatic rocks.

The conclusions are based on the description of several geological structures of metamorphic and intrusive "granites" and on the survey of the region affected by gondwanic faulting and basaltic magmatism in Uruguay.

CONTENIDO

INTRODUCCION.

ROCAS IGNEAS Y MAGMATICAS.

CLASIFICACION PROPUESTA.

ROCAS IGNEAS MAGMATICAS.

Magmatismo orogénico.

Magmatismo no-orogénico.

Consideraciones finales.

ROCAS IGNEAS METAMORFICAS.

Pertitización de gneiss oligoclásico (Valentines).

"Granito" porfiroblástico (Cuchilla Dionisio).

Procesos de anatexis.

GEOLOGIA DE GRANITOS, GRANODIORITAS Y
CUARZODIORITAS.

CONCLUSIONES.

BIBLIOGRAFIA.

INTRODUCCION

Cada vez que ha sido necesario describir las rocas del zócalo cristalino en el Uruguay, hemos tenido dificultades con la utilización del término "ígneo".

Desde hace algún tiempo estamos convencidos de que gran parte de las confusiones petrológicas provienen del empleo del término "ígneo". Según algunos autores, este término es sinónimo de magmático y, según otros, tiene un sentido más amplio. A esta última acepción nos adherimos en el presente ensayo y pretendemos exponer los argumentos que confirman nuestra

posición. El planteo no pretende ser universal. Las conclusiones se extraen principalmente de las estructuras geológicas observadas en el Uruguay, a lo que se suma la consulta de ciertos autores que exponen con tal claridad sus experiencias, que pueden ser vividas a través de la lectura de sus trabajos.

El motivo central de este ensayo es tratar de superar la tradicional identidad entre *ígneo* y *magmático*.

Clásicamente se definieron las *rocas ígneas* como aquellas formadas a partir de un material fundido (magma); con ese criterio, ígneo y magmático serían sinónimos.

Hoy, la mayoría de los autores aceptan la existencia de por lo menos dos mecanismos de formación para *ciertas* rocas ígneas. Aquí radica el *verdadero problema*. Sólo ciertas rocas ígneas plutónicas tienen dualidad de origen: granitos, granodioritas, cuarzdioritas. Recién cuando se llega a este convencimiento, los problemas petrológicos se pueden plantear con claridad. La confusión actual no ha permitido romper los casilleros de clasificación petrográfica, para adaptarse a la realidad —o aparente realidad— petrológica. Esta confusión tiende a desaparecer a medida que progresan los relevamientos regionales y los hechos sustituyen a las hipótesis.

Nuestra aspiración, es sustituir las clasificaciones exclusivamente petrográficas, que originan ambigüedades, por una clasificación geológica acorde con los hechos naturales y que engloba, por supuesto, la clasificación petrográfica. Los macizos ígneos cambian su naturaleza petrográfica de un lugar a otro y generalmente comprenden rocas de más de una familia. Una clasificación geológica no presentaría tales variaciones.

El caos que está siendo superado actualmente, proviene de las posiciones extremistas. Tanto la escuela que niega la posibilidad de fusión en la corteza como la que sólo acepta la formación de rocas ígneas a partir de magma, tienen cada vez menos adeptos.

Conclusiones como la de REYNOLDS (1950), que describe granófiros formados por vía metasomática, han servido a muchos autores como base científica para negar la formación de rocas a partir de magma. Siguiendo ese criterio, la Petrología se volvería por demás sencilla, pero esas generalizaciones no son legítimas.

Para llegar a la verdad científica es más conveniente admitir limitaciones y aceptar que se desconocen por ahora algunos procesos petrogenéticos. Mientras tanto es posible trabajar con supuestos operacionales, siempre que sean elegidos con habilidad.

En este sentido, las palabras escritas por la propia REYNOLDS (1957) encuadran el problema en sus verdaderos términos. Dice REYNOLDS en la página 379: "The process of fluidization is a

highly efficient mixing process and brings about maximum chemical reaction between gas and solid particles. In the geological counterpart of fluidization, the temperature is sometimes sufficiently high to cause melting". Y en la página 380, continúa: "We are all agreed that melt of granitic composition is formed at some level within the earth crust, because we have visual evidence of its eruption at the earth's surface".

Esta cita resulta altamente significativa, pues señala que una autora de avanzada en el transformismo durante la década 1940-1950, admite en 1957 fusión en la corteza. Acepta implícitamente dos mecanismos para la formación de rocas cristalinas.

ESKOLA (1955) retira su crédito al transformismo como único mecanismo petrológico. MARMO (1956) acepta la existencia de "rocas graníticas" metasomáticas, palingenéticas y magmáticas. Además apoya a WALTON (1955) en el sentido que existen áreas con elementos tales que pueden ser interpretados de manera distinta según los autores.

Ha llegado el momento de intentar la materialización de esas opiniones, procurando una clasificación que respete la geología en primer término.

ROCAS IGNEAS Y MAGMATICAS

Es conveniente insistir en el hecho que lo que actualmente crea la mayor confusión es el término *ígneo*.

Por tradición, ígneo significa evolución a partir de estado fundido, pero la experiencia demuestra que ciertas rocas clasificadas como ígneas no tuvieron su origen a partir de magma.

El mismo término, o un sustituto adecuado, sería de gran utilidad si se usara sólo para indicar procesos de alta temperatura en la corteza, sin que impliquen necesariamente fusión.

La tendencia actual es diferenciar los términos *ígneo* y *magmático*, tomados como sinónimos durante mucho tiempo. El primer paso ha sido dado por JUNG-ROQUES (1938) que diferenciaron *granitos de anatexis* y *granitos circunscriptos*. Otro paso importante es la expresión "granitos y granitos" introducida por READ (1948). Finalmente, algunos autores de lengua inglesa crearon el término "igneous-like" con el que designan granitos, granodioritas y cuarzodioritas formadas sin evidencia de fusión masiva (WAHLSTROM, 1955).

La petrografía por sí sola, es generalmente incapaz de descifrar el verdadero origen de un "granito", metamórfico o magmático. La solución inequívoca surge de su estructura geológica, pues todo "granito" formado por proceso metamórfico aparece rodeado por una extensa zona de migmatitas. Los "granitos"

magmáticos por su parte tienen borde neto, aureola de contacto y provocan fuerte tectónica en las rocas circundantes.

Considerando el conjunto de las rocas, la clasificación geológica sería:

Rocas sedimentarias.	ectinitas,	
Rocas metamórficas	{ migmáticas,	
	{ "granitos"	
Rocas magmáticas	{ orogénicas	ROCAS ÍGNEAS
	{ no orogénicas	

Este esquema destaca la diferencia que se propone aquí entre rocas *ígneas* y *magmáticas*.

A modo de conclusión, las rocas ígneas comprenden todas las rocas magmáticas más los "granitos metamórficos". El término "*granito metamórfico*" es sinónimo de "*granito de anatexis*" (RAGUIN, 1946), de *autóctono* (READ, 1955) y de *catagranitos* (DE WAARD, 1951).

Clasificación propuesta

Se propone dividir las rocas ÍGNEAS en *metamórficas* y *magmáticas*, lo que se adaptaría a las observaciones geológicas.

La clasificación tradicional con base petrográfica sigue siendo válida, pues se forman en la naturaleza todas las rocas que concibe el proceso magmático. Pero en esta clasificación los granitos, granodioritas y cuarzodioritas metamórficos están reunidos con los magmáticos.

Para llegar a una clasificación más acorde con los procesos naturales, es menester alejarse de los principios petrográficos y tomar como base conceptos geológicos que, aunque no sean tan estrictos ni rigurosos, se adaptan mejor a las observaciones.

La geoquímica de un macizo metamórfico es diferente de la de un macizo magmático de la misma familia petrográfica y por consiguiente son distintas sus posibilidades económicas.

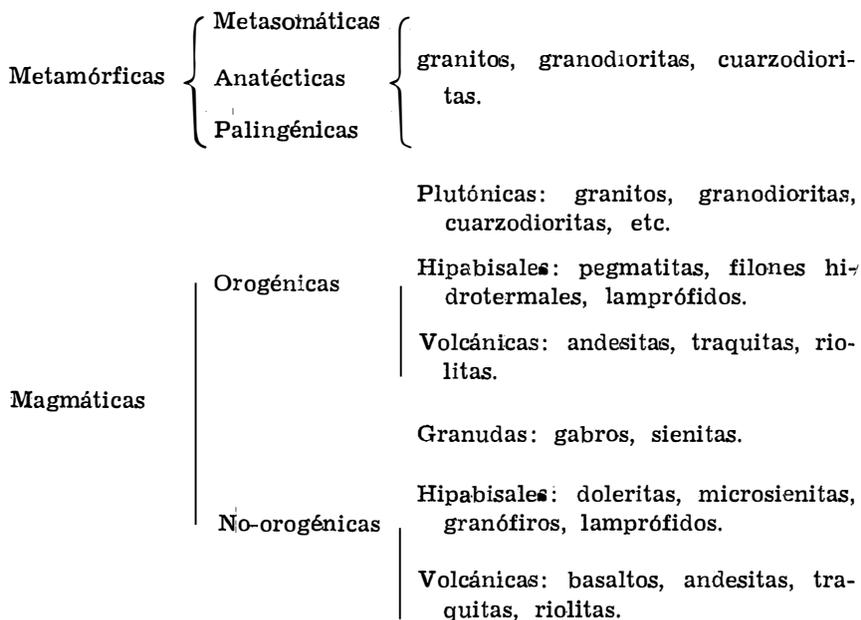
MARMO (1958) y GUIMARAENS (1964) exponen criterios petrográficos para diferenciarlos, en base a la relación textural de la microclina. Pero el último autor citado, señala que la

petrografía es el único recurso para identificar un proceso metamórfico cuando no se encuentran pruebas de campo de las relaciones geológicas.

Cuando las rocas ígneas se observan en su ambiente natural, deben ser clasificadas en *metamórficas* y *magmáticas*, sustituyendo así el concepto de que todas las rocas ígneas se forman por cristalización de magma, por el concepto de que algunas rocas consideradas ígneas, pueden tener también otro mecanismo de formación. El estudio geológico entre la roca ígnea y las litologías que la rodean, permite establecer ciertos vínculos entre la roca resultante y la historia natural de su origen.

Se propone, de acuerdo con ello, el siguiente esquema de

Clasificación geológica de las rocas ígneas



Es necesario señalar que el criterio de esta clasificación es geológico, por lo que pueden aparecer dentro de las rocas magmáticas no-orogénicas, otras familias además de las señaladas, pero de acuerdo a la experiencia del autor, formarán siempre masas de volumen despreciable.

Se describirá con cierto detalle cada uno de los grandes grupos de la nueva clasificación. Corresponde definir primeramente las **ROCAS ÍGNEAS MAGMÁTICAS** y sus dos subgrupos:

OROGÉNICAS y NO-OROGÉNICAS. Luego definir las ROCAS ÍGNEAS METAMÓRFICAS. Cada subgrupo será ilustrado con un ejemplo, preferentemente del Uruguay en los casos conocidos.

ROCAS ÍGNEAS MAGMÁTICAS

Son las que se forman por cristalización de una masa fundida, de viscosidad media o baja y que posee la propiedad de desplazarse en la corteza, siguiendo el camino de menor presión.

El problema petrogenético actual es, no la existencia de magma, sino su mecanismo de formación. En el consenso general se admiten dos teatros naturales donde se puede producir fusión en la corteza o próximo a ella:

- a) focos de composición eutéctica dentro de las zonas graníticas de las fajas orogénicas (magma orogénico);
- b) ascensos de Sima o Manto a través de fracturas que atraviesan el Sial (magma no-orogénico).

Los magmas generados en estas condiciones son totalmente diferentes en composición, volumen, mecanismo de fusión, etc. Se acepta entonces la existencia de dos tipos de magma como punto de partida para formar todas las *rocas ígneas magmáticas*. El magma orogénico es ácido, de composición granítica o próximo a ella. El magma no-orogénico es basáltico.

Magmatismo orogénico

En cada ciclo orogénico se desarrollan dos niveles esencialmente diferentes: infraestructura y superestructura (WEGMANN, 1955). En la infraestructura se producen movilizaciones iónicas y una fuerte tendencia a la homogeneización a partir de los sedimentos y zócalo cristalino primitivos. En la superestructura sólo se produce metamorfismo. En cada orogénesis se producen intrusiones en los metamorfitos y erupciones volcánicas en superficie. Esto es prueba suficiente de la formación de magma.

El mecanismo de formación puede surgir de combinar las experiencias de BOWEN y TUTTLE (1950) y CHAYES (1952). El estudio estadístico de más de 500 granitos formados en el corazón de áreas metamórficas, pone en evidencia que la gran mayoría de ellos poseen una composición que tiene su punto de fusión entre 720 y 760° C. en el diagrama de equilibrio del sistema $KAlSi_3O_8 - NaAlSi_3O_8 - SiO_2$ en presencia de vapor de agua. Durante el desarrollo del ciclo orogénico, se producen hundi-

mientos que colocan las rocas a temperaturas entre 600 y 700° C. según el gradiente geotérmico. Según TURNER-VERHOOGEN (1963) por simple hundimiento no se produce fusión. Pero no es imposible un suministro adicional de calor que resulte del flujo térmico interno cuando encuentra una zona de baja conductividad calorífica.

El magma originado en estas condiciones es ácido, pues los materiales fundidos son ricos en $\text{Si}^{++++}\text{Al}^{+++}\text{K}^{+}\text{Na}^{+}$. Cuando cristalice respetará las "series de reacción de BOWEN" y en consecuencia generará rocas ácidas: granitos alcalinos, granodioritas, pegmatitas graníticas, filones de cuarzo, riolitas. Su fusión será favorecida por la presencia de sulfuros y elementos volátiles, y en consecuencia arrastrará estos elementos hasta los niveles de su cristalización.

Se pueden formar rocas más básicas sólo por asimilación de iones $\text{Ca}^{++}\text{Mg}^{++}\text{Fe}^{++}$ durante su intrusión, ya que en el ambiente donde se forman hay escasez de estos elementos. Como ejemplo de formación de rocas mesosilícicas a partir de un magma orogénico puede servir el lacolito de los alrededores de la villa 25 de Mayo (Isla Mala), Florida, Uruguay (BOSSI-FERNÁNDEZ-ELIZALDE, 1965). El área se utilizará también para ejemplificar los rasgos fundamentales que permiten reconocer geológicamente un macizo ígneo magmático.

El emplazamiento se produjo en metamorfitos epizonales. Se trata de una granodiorita intrusiva en una formación hemimetamórfica compuesta por pizarras carbonosas, filitas, cuarcitas grafitosas, calizas y prasinitas.

La estructura general se caracteriza por buzamientos próximos a la vertical y rumbos variables entre N40E y N80E que determinan un arco, cuya concavidad, invadida por la granodiorita, mira hacia el NW.

La intrusión desarrolló rocas típicas de contacto: pizarras nodulosas, cornubianitas, escarnitas a diópsido. En el contacto granodiorita-cuarcita, se desarrolla textura bandeada con trama cuarcítica y aporte granítico que constituyen verdaderos "gneiss de inyección". Estos no se diferencian de las embrechitas cinteadas en muestra de mano: se reconocen por tener un desarrollo extremadamente limitado.

El macizo ígneo presenta dos tipos de roca dominante: tonalita y diorita. La roca más extendida es una tonalita hornblendo-biotítica de grano medio. En el norte del área, se desarrolla la diorita cuarzosa distribuida groseramente según una banda de rumbo N80E y una potencia variable entre 200 y 500 m. (ver fig. 1).

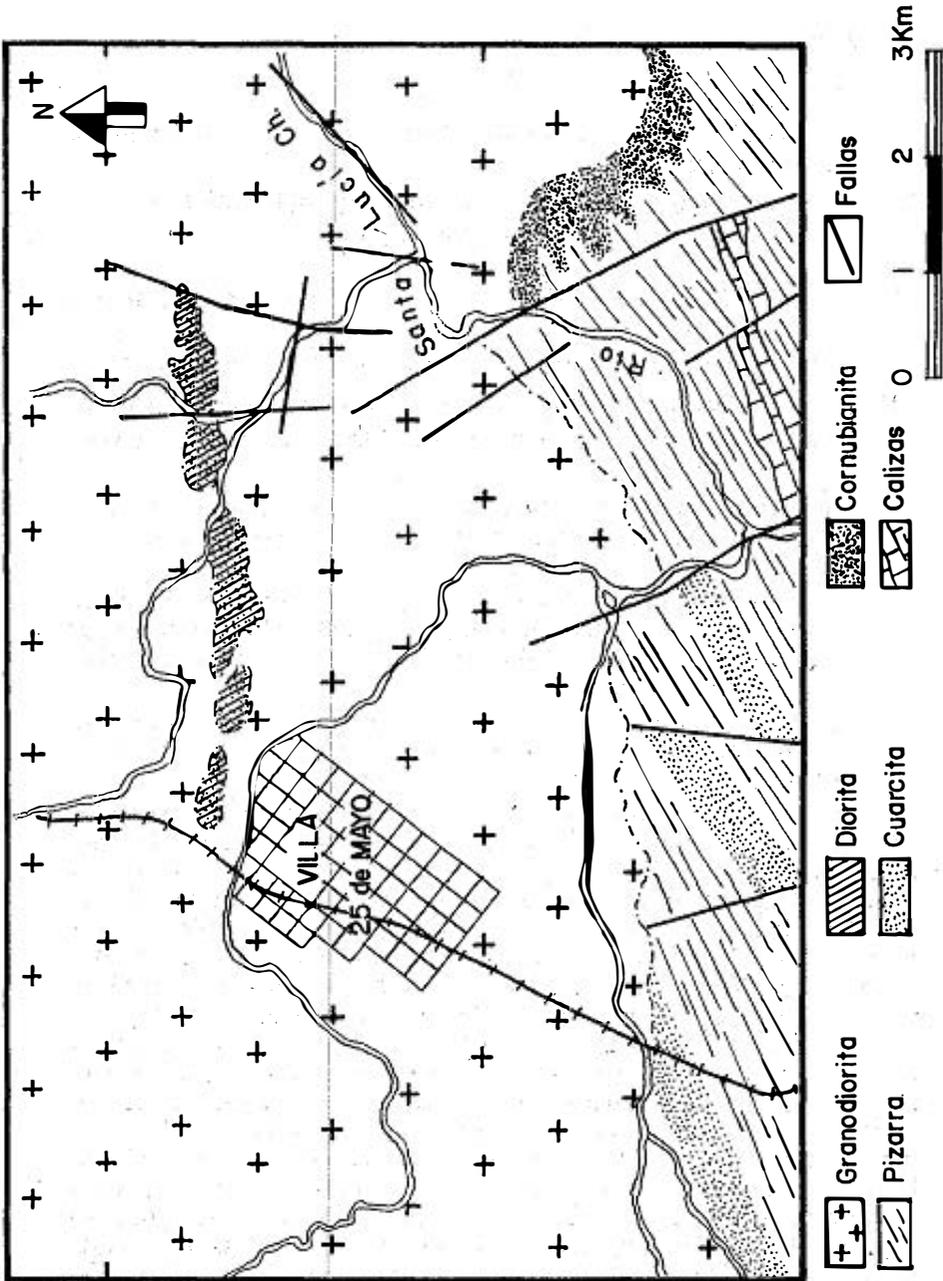


FIG. 1.—Carta geológica de los alrededores de Villa 25 de Mayo.

El origen magmático de la tonalita se apoya en los siguientes hechos:

- a) desarrollo de típicas rocas de contacto;
- b) aparición de bloques de pizarra nodulosa dentro de la masa ígnea;
- c) grano pequeño en las proximidades del contacto;
- d) evidencias de inyección forzada:

- enclaves orientados según el rumbo de dichos metamorfitos,
- alineación paralela al rumbo de dichos metamorfitos,
- texturas de inyección en el contacto con cuarcitas,
- bandas de metamorfitos interdigitadas con la granodiorita,
- estructuras gnéissicas asociadas a las dioritas cuarzosas y con el rumbo de los metamorfitos de caja.

La formación de diorita se debe a la asimilación de rocas dolomíticas. La distribución geológica lo prueba claramente, pues su estructura coincide con las bandas calcáreas intercaladas entre los metamorfitos de caja.

Se entiende que éste es el mecanismo más probable que permite formar rocas básicas en la evolución de los magmas orogénicos.

Las intrusiones de este origen son generalmente granodioríticas. Pueden resultar rocas más básicas por asimilación como recién se vio y rocas más ácidas por diferenciación. En Santa Teresa, Uruguay, existe un macizo de granito porfiroide, inyectado en filitas con estructura discordante. La roca inicial es una granodiorita de grano medio, todavía observable en los bordes del macizo. En la parte central, el enfriamiento fue más lento y se conservaron soluciones residuales enriquecidas en Si^{++++} Al^{+++} K^+ . En la última fase de la evolución, cristalizan porfiroblastos de microclina a partir de esa solución y transforma la roca en un granito calco-alcalino. La cristalización de microclina se realiza sobre la granodiorita ya solidificada. El mecanismo, expuesto en este caso con total claridad, puede ser utilizado para explicar la formación de granitos porfiroblásticos por metamorfismo. Así como en el caso de Santa Teresa, la roca soporte es una granodiorita magmática ya cristalizada, nada cambia si la roca es un gneiss formado por metamorfismo. La procedencia del aporte siálico posterior es lo único que diferencia ambos mecanismos.

Magmatismo no-orogénico

Esta actividad magmática se manifiesta en zonas rígidas de la corteza, con total independencia de los procesos orogénicos. El ejemplo más llamativo lo constituye sin duda el derrame basáltico del final del Gondwana.

En todos los casos el magma es basáltico y está asociado a profundas fracturas en la corteza: "geoclasas" según GUIMARAENS (1964).

Según KENNEDY (1933) se originan dos tipos principales de magma basáltico: uno más básico, que al cristalizar genera *oceanita*, y otro de composición menos básica que origina *toleíta*. Ambas rocas serían los primeros términos formados y por diferenciación evolucionan a magmas más ácidos.

El citado autor establece dos series fundamentales:

Oceanita → andesita → alcalinitos.
Toleíta → andesita → riolita.

Este magma parece originarse en el Sima o en el Manto subcrustal, por fusión y ascenso a través de las geoclasas. Es necesario explicar la fusión intermitente de masas inicialmente sólidas. La asociación constante de derrames no-orogénicos con fracturas profundas del Sial, indica el camino de las investigaciones. El Sima o el Manto, inicialmente sólidos, pasarían a estado de fusión ante una brusca liberación de la presión que soportan.

Las experiencias de YODER (1952) demostraron que el punto de fusión del basalto aumenta con la presión a razón de 10° C./1.000 bars. En la figura 2 se reúne esta curva con la distribución aproximada de temperaturas corticales en océanos y continentes. Una brusca disminución isotérmica de la presión traslada el sistema desde el punto A (o desde el A' según los casos) hasta el punto B en que se logra la fusión del basalto. El Manto y el Sima se encuentran en cada punto a una temperatura superior a la de su punto de fusión a la presión atmosférica, pero inferior a la del punto de fusión a la presión reinante.

TURNER-VERHOOGEN (1963) estiman que el calor necesario para fundir las masas de basalto es sólo el 2% del total irradiado hasta la superficie por destrucción de elementos radiactivos. Existiendo calor suficiente, las *geoclasas* resultan ser una explicación científicamente satisfactoria.

El Uruguay brinda un magnífico ejemplo de magmatismo no-orogénico al final del Gondwana. A lo largo de enormes fracturas y en el fondo de profundas fosas tectónicas, se derrama

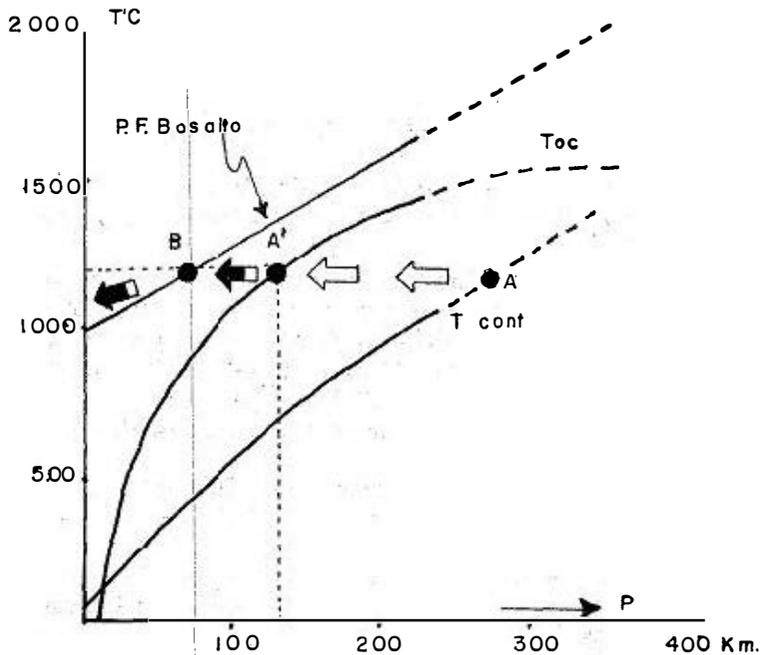


FIG. 2.—Diagrama que muestra la evolución de las condiciones de temperatura y presión del material simático al producirse fracturas que atraviesan la costra externa.

basalto en la primera etapa. Este desequilibrio tectónico continúa y a través de los basaltos iniciales se derraman riolitas alimentadas por filones de granófiros. El basalto es espilitico en el SE y toleítico en el NW. Constituye el 95% del total de lava derramada. Las diferenciaciones ácidas forman pequeñas masas que llaman la atención por su morfología (cerros Aequita, Marmarajá, del Aguila..., sierras San Miguel, de los Ajos...), pero realmente representan una ínfima porción del volumen total.

Consideraciones finales

En todas estas rocas se cumplen las premisas de la teoría magmática. El orden de cristalización sigue la regla de ROSENBUSCH. Las masas ascienden por fracturas a consecuencia de la baja viscosidad.

De este modo se forman todas las "rocas ígneas" comprendidas en los cuadros de clasificación petrográfica.

Se ponen de manifiesto fenómenos de diferenciación, asimilación y endoexomorfismo.

ROCAS ÍGNEAS METAMORFICAS

Estas rocas se forman exclusivamente en la raíz de los geosinclinales. Petrográficamente están constituidas por rocas granudas cuarzosas: granitos, granodioritas y cuarzodioritas. En Petrología es común designarlas como "granitos" en sentido lato. Se denominan genéricamente "granitos" aunque en realidad son principalmente granodioritas (MARMO, 1956).

Según los datos de SIMONEN (1948) los iones Na^+ - Ca^{++} dominan sobre K^+ . La plagioclasa es generalmente oligoclasa (An_{20-35}) y el feldespato K^+ es microclina desarrollada en la fase final (MARMO, 1956).

El origen de estas rocas es por *granitización* en el sentido de READ (1948), es decir, por transformación en "granito" de rocas cristalinas preexistentes.

En este ensayo serán llamadas "granitos metamórficos".

SEDERHOLM, en 1913, definió anatexis como el fenómeno de granitización regional que se produce por metasomatismo generalizado que provoca la formación de una masa plástica poseyendo algunos caracteres magmáticos y con capacidad de movimiento.

En este ensayo se acepta que no existe necesidad de que el macizo adquiera movilidad magmática para lograr su homogeneización. La simple adición de elementos químicos con agencia de fluidos intergranulares puede provocar la desaparición de todo resto de estructura orientada en adecuadas condiciones de presión.

El término "granito metamórfico" cobra sentido sólo como término geológico. A escala del afloramiento puede no ser diferenciable de un granito magmático. Geológicamente pueden definirse con seguridad, pues aparecen rodeados de extensas áreas migmáticas que gradualmente pierden la esquistosidad.

La formación de "granitos" metamórficos puede operarse por tres procesos: metasomatismo, anatexis, palingénesis. La experiencia en Uruguay se limita a granitos metasomáticos y en ese campo se han reconocido dos mecanismos principales:

- a) pertitización de gneiss bajo control tectónico;
- b) crecimiento de porfiroblastos de microclina sobre la primitiva trama granodiorítica o gnéissica.

Ambos procesos se realizan en fase sólida, por acción de fluidos que aportan los iones granitizantes en solución acuosa.

Este es, sin duda, uno de los temas petrológicos más controvertidos, por lo que no se nos escapa la necesidad de presentar con cierto detalle los datos que soportan nuestra hipótesis.



FIG. 3.—Foto aérea y carta geológica de la cuenca del Arroyo Valentines (Florida, Uruguay). Escala: 1/50.000. Referencias: 1: Cuarzita piroxeno-magnética. 2: Migmatitas homogéneas. 3: Granito. 4: Fallas. Las letras A hasta E, refieren los lugares de donde fueron extraídas las muestras de la figura 4.

Se toman dos áreas detalladamente estudiadas en Uruguay:

VALENTINES en el Dpto. de Florida y CUCHILLA DIONISIO en el Dpto. de Treinta y Tres. Los casos de anatexis no han sido reconocidos con absoluta seguridad en Uruguay. Las experiencias de KRANCK-OJA (1960) y TUTTLE-BOWEN (1953) permiten sospechar algunos casos posibles, pero aún no han sido estudiados.

Cuenca del Arroyo Valentines

El subsuelo de la cuenca del Arroyo Valentines está constituido por rocas metamórficas catazonales que recibieron aporte microclínico durante su plegamiento. Los gneisses oligoclásicos se transformaron en granito calcoalcalino en el corazón de los pliegues (véase fig. 3).

El crecimiento migmático de microclina determina estructuras diferentes según el tipo de roca y su ubicación en los pliegues. En las *piroxenitas* y *cuarcitas magnetíticas* la feldespatización es muy débil: sólo crecen algunos feldespatos y se forman lentes esporádicos de pegmatitas en cuyos bordes, difusos, recrystalizan los minerales de la roca trama. En los gneiss, la feldespatización manifiesta su máxima intensidad. Se forman migmatitas homogéneas en los flancos y granitos en el corazón de los pliegues.

Esta área ha sido excepcional, pues permitió ver con toda claridad el proceso de transformación gneiss \rightarrow granito. Se forma granito cuando la roca pierde esquistosidad y eso se logra en el corazón de los pliegues por crecimiento peritético de microclina sobre la primitiva oligoclasa.

La intensidad de migmatización fue seguida petrográficamente (fig. 4). En las zonas migmáticas la oligoclasa y microclina aparecen como cristales separados, desarrollándose mirmequititas en los bordes de la plagioclasa (ver fig. 4 B). En las áreas graníticas, la peritita cordada es el feldespato dominante.

Entre ambos extremos es posible hallar todos los términos intermedios:

- 1) En una primera etapa la microclina penetra como delgados dedos por fracturas de la oligoclasa o engloba cristales quebrados de plagioclasa (fig. 4 A y B).
- 2) En una etapa más avanzada se pueden observar microclina y oligoclasa en los extremos de un mismo cristal; algunas cuerdas de la plagioclasa comienzan a esbozarse acentro del feldespato potásico (fig. 4 D).

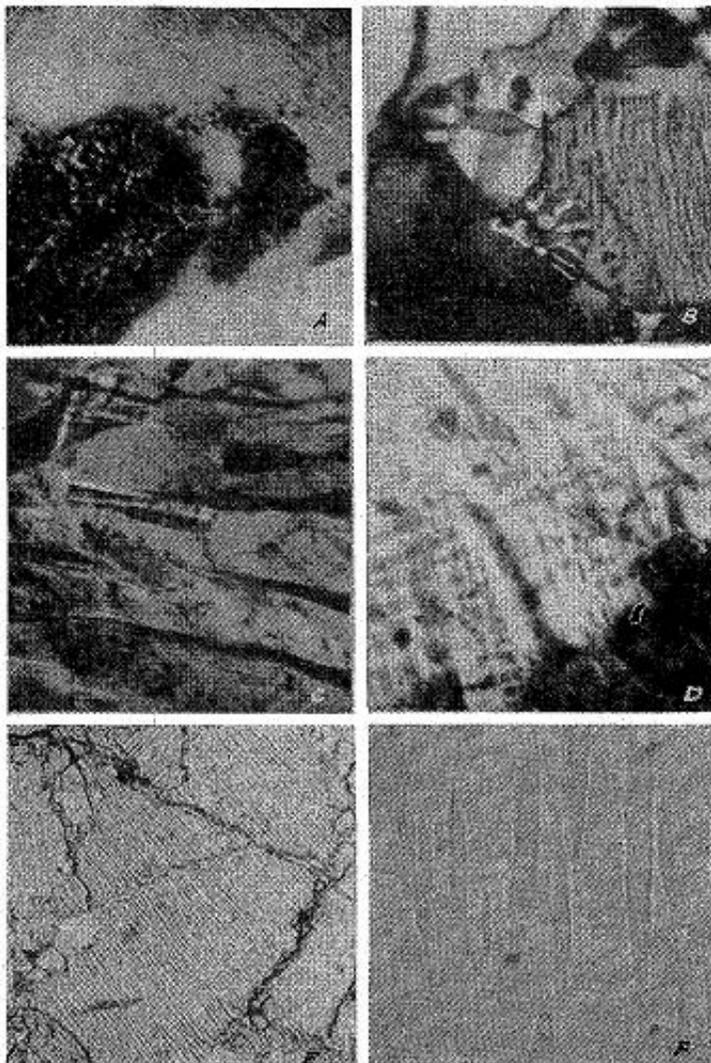


FIG. 4.— Microfotografías de muestras seleccionadas ubicadas en los puntos señalados en la figura 3. A: Cristal de oligoclasa quebrado, englobado por microclina ($N+$, $\times 50$). B: Mirmequita desarrollada en el contacto del cristal de oligoclasa con microclina invasora ($N+$, $\times 50$). C: "Dedos" de microclina recortando un cristal de oligoclasa del gneiss primitivo ($N+$, $\times 50$). D: Cuerdas de oligoclasa dentro de microclina más joven. Las cuerdas de oligoclasa tienen la misma orientación que el resto del cristal que se observa en el extremo inferior derecho de la figura ($N+$, $\times 250$). E: Cristales de pertita cordada vistos en caras de la zona (001) ($LN \times 50$). F: Cuerdas de oligoclasa dentro de un cristal de microclina visto según la cara 010 ($LN \times 400$). La microclina no desarrolla macla de periclina visible. Los husos de plagioclasa se distinguen del huésped por la diferencia en índice de refracción.

- 3) En el estado más avanzado se produce la pertita cordada por crecimiento epitáxico de la microclina sobre la oligoclasa. La orientación es tal, que conduce a que coincidan las mallas planas similares de ambos minerales y las cuerdas se desarrollan groseramente paralelas al eje cristalográfico "c" de la microclina (fig. 4 E y F).

Merece la pena señalar que estas etapas coinciden en sus grandes líneas con las encontradas por HEIER (1955) en la formación de "mesopertitas" en gneisses de metamorfismo profundo. No es nuevo, pues, el hallazgo de esa sucesión de texturas. Nuestra contribución consiste en haber descifrado el control tectónico que gobierna la formación de estas pertitas.

Desde el punto de vista físico-químico el mineral aportado durante la migmatización es microclina, cuya relación molar K^+/Na^+ es 3.30.

Localmente se forma anortoclasa ($2V = 60$), pero la mayoría de los cristales tienen el Na^+ pertítico en finas venillas sin orden.

Esta granitización se verificó a nivel de mesozona inferior y se produjo en presencia de agua, pues la augita es parcialmente recristalizada a hornblenda.

El control tectónico en la granitización se pone de manifiesto, pues en los flancos, la microclina y la oligoclasa se mantienen en cristales individuales, mientras en el corazón de los pliegues se forman pertitas cordadas.

Este mecanismo parece explicar satisfactoriamente el fenómeno de granitización producido en focos aislados, descrito en tantas partes del mundo.

Las conclusiones del estudio de la cuenca del Arroyo Valentines parecen ser válidas para muchos otros casos similares, como los gneiss catametamórficos de HEIER (1955) y la recristalización del gneiss plagioclásico en Montevideo descrito por WALTHER (1948).

- a) La estructura anatética se logró si evidencias de fusión. La migmatización se produce por invasión K^+ que cristaliza como microclina.
- b) Esta invasión K^+ afecta sólo débilmente las piroxenitas y cuarcitas magnetíticas del área, cuya distribución sirve para marcar la primitiva estructura.
- c) En el corazón de cada pliegue se forma granito a partir de gneiss oligoclásico, por crecimiento de microclina sobre la oligoclasa, determinando pertitas de textura cordada.

El granito porfiroblástico de Cuchilla Dionisio

El área estudiada ocupa alrededor de 900 km² en la región central del Dpto. de Treinta y Tres. En líneas generales existe un macizo granítico en la parte central rodeado por migmatitas homogéneas. La esquistosidad, bien marcada en las zonas marginales, se pierde gradualmente hacia la región central.

En el extremo occidental, las migmatitas son embrechitas cinteadas, con trama constituida por gneiss hornblendo-biotítico y el aporte está representado por venillas de cuarzo y microclina débilmente pertítica. Ya a unos 3 km. hacia el este, la roca va perdiendo esquistosidad paralelamente con un aumento en el tamaño y concentración de los porfiroblastos de microclina de forma ovoide. Unos 3 km. más hacia el este comienzan a aparecer cristales automorfos, pero todavía orientados. Finalmente, en la propia Cuchilla Dionisio, estos fenoblastos se distribuyen al azar y resulta así un granito porfiroide sin orientación (véase fig. 5).

Los fenoblastos de microclina débilmente pertítica han crecido sobre una trama de oligoclasa (An₂₅), cuarzo y biotita. Esta mineralogía es idéntica a la de las embrechitas de los bordes.

Petrográficamente se certifica que la formación del granito de Cuchilla Dionisio responde sólo a una ordenación textural isotropa de los fenoblastos de aporte.

La textura final no se diferencia del granito porfiroide de Santa Teresa, de origen magmático, antes descrito. En este caso hay suficiente evidencia de una actividad final de fluidos acuosos con K⁺ Si⁺⁺⁺⁺ B⁺⁺⁺ F⁻ OH⁻. Bien podría asignarse un proceso similar para el "granito metamórfico" de Cuchilla Dionisio.

Procesos de anatexis

Algunos de los trabajos presentados al Congreso Internacional de 1960 defienden la tesis de la posibilidad de refusión en la corteza sin que el magma generador abandone su cámara.

KRANCK-OJA (1960) realizaron estudios experimentales de anatexis granítica a partir de granitos y grauwacas. Llegan a la conclusión que ciertas texturas especiales se formarían por este proceso: cristales aciculares alrededor de biotita y coronas quelifíticas. Asimismo las estructuras geológicas en diapiro estarían vinculadas especialmente a este proceso de fusión masiva.

LACY (1960) estima que el magma granítico se genera en el Sial entre 28 y 30 km. de profundidad, a 925° C., según TUTTLE-BOWEN (1958). La posibilidad de fusión depende del contenido en agua.

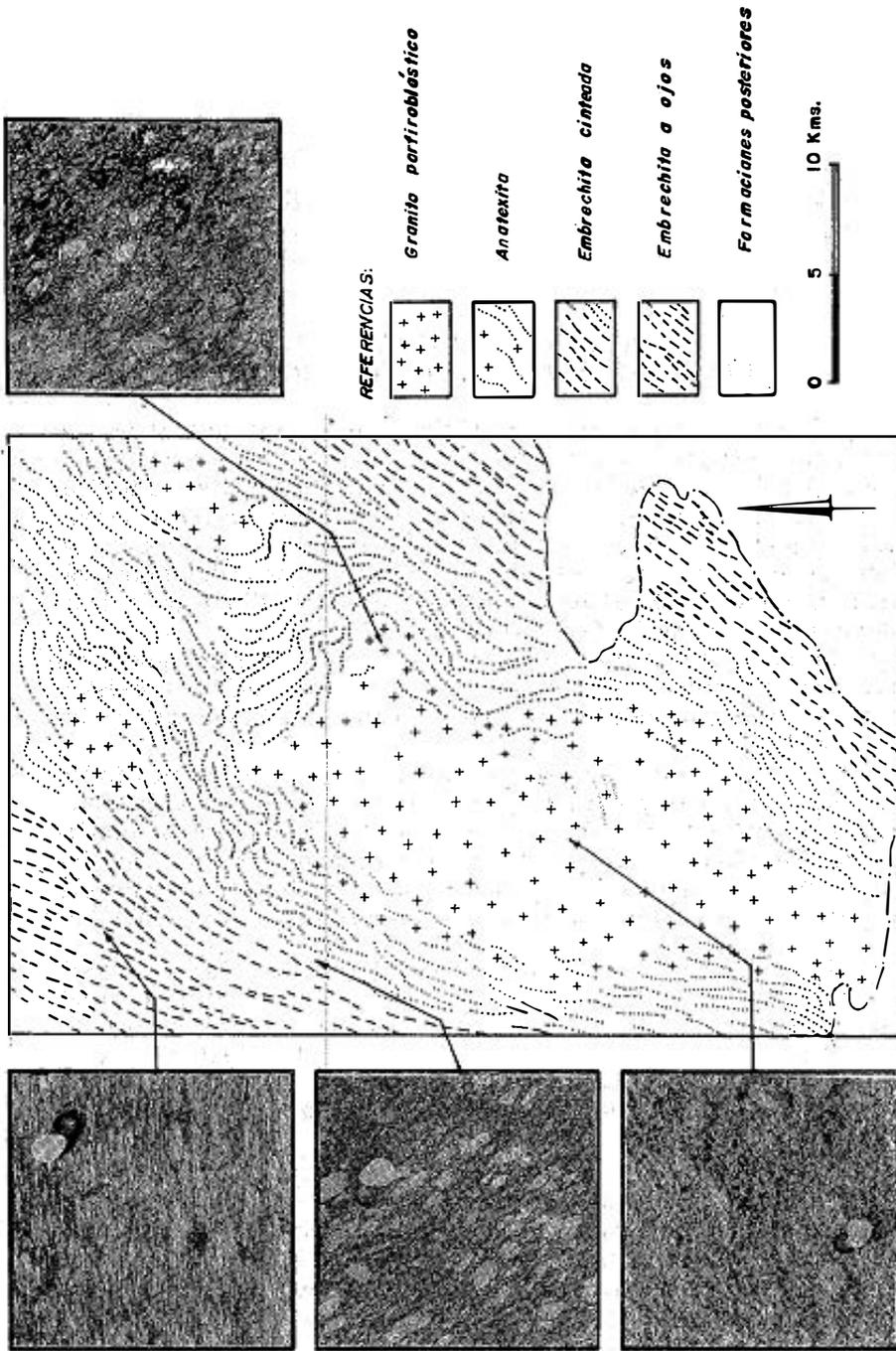


FIG. 5.—Carta geológica de un tramo de la Cuchilla Dionisio (Treinta y Tres, Uruguay). La zona granítica constituye la región más elevada. Las fotos muestran las texturas de las rocas cuya ubicación es señalada por las flechas.

Si el líquido granítico no es expulsado por presiones orogénicas, se provocará su lenta migración y difusión, lo que trae aparejado la formación de migmatitas y granitos.

En Uruguay no existe hasta el presente ningún estudio que demuestre procesos de anatexis. Las pertitas cordadas del área de Valentines antes descrita, son interpretadas por I. M. DE SÁENZ (1965), como formadas a partir de una fase ternaria homogénea $\text{Na}^+ - \text{K}^+ - \text{Ca}^{++}$, lo que podría llevar a pensar en un caso de anatexis, pero el estudio fue sólo fragmentario, sin datos de campo y con muestras de procedencia dudosa.

GEOLOGIA DE GRANITOS, GRANODIORITAS Y CUARZODIORITAS

La actual experiencia geológica indica que las rocas de estas familias pueden formarse tanto a partir de magmas generados en la orogénesis como por metamorfismo metasomático. A su vez es claro que el origen no puede descifrarse a escala del afloramiento o de la muestra de mano. La diferencia se basa en la estructura geológica y en rasgos texturales petrográficos que en ciertos casos favorables permiten dilucidar la dualidad (MARMO, 1958; GUIMARAENS, 1964).

Lo expuesto permite separar por lo menos dos grandes grupos geológicamente diferentes. Para muchos autores existen también procesos mixtos que hacen crear un tercer grupo intermedio.

Desde el punto de vista *petrológico* no son utilizables todas las clasificaciones propuestas, pues existen diferencias de detalle en los mecanismos de formación de los "granitos" metamórficos. Por ejemplo, no existe verdadera anatexis en todos los casos, tal vez, ni siquiera en la mayoría de ellos. Es preferible entonces, usar cualquiera de las cuatro clasificaciones siguientes:

a)	sincinemáticos	tardicinemáticos	postcinemáticos	ESKOLA (1932), MARMO (1958).
b)	catagranitos		epigranitos	DE WAARD (1951).
c)	autóctonos	para-autóctonos	intrusivos	READ (1955).
d)	sinmetamórficos.	sintectónicos	post-tectónicos	DIDIER-ROQUES (1960).

Desde el punto de vista *geológico*, en cambio, es posible mantener una clasificación más simple, que sea suficientemente conocida y que contemple la mayoría de los hechos hasta ahora observados. Por eso se propone aquí mantener la división entre *granitos metamórficos* y *granitos circunscriptos*.

BOSSI: ROCAS ÍGNEAS

La terminología sobre granitos, granodioritas y cuarzodioritas es muy extensa, pero gran parte de los términos son sinónimos o tienen significado muy aproximado. La verdad es que, variando los términos usados, la mayoría de los autores aceptan la existencia de "granitos y granitos", expresión que se hizo famosa desde READ (1948). Los términos utilizados pueden agruparse en columnas de significado semejante:

1	2	3	Autores
granitos de anatexis		circunscriptos	RAGUIN (1946).
pretectónicos	sintectónicos	post-tectónicos	TERMIER-TERMIER (1956).
sincinemáticos	tardicinemáticos	post-cinemáticos	ESKOLA (1932), MARMO (1958).
sinmetamórficos	sintectónicos	post-tectónicos	DIDIER-ROQUES (1960).
autóctonos	para-autóctonos	intrusivos	READ (1955).
catagranitos		epigranitos	DE WAARD (1951).

Las rocas de la *columna (1)* se presentan siempre con forma geológica de batolito y ocupan la parte central de una extensa zona metamórfica, rodeada de migmatitas. Serán llamados *granitos metamórficos* en este ensayo.

El mecanismo de formación es por plutonización metamórfica, cuyo resultado es la tendencia a la homogeneización que, por otra parte, es raramente lograda. Difieren los procesos de detalle. Se pueden reconocer tres tipos principales de granitización:

- a) por crecimiento desordenado de fenoblastos de microclina sobre un paleosoma generalmente más básico;
- b) por anatexis verdadera, con refusión sin abandonar la cámara magmática;
- c) por pertitización de la oligoclasa de los gneisses, ocasionado por avance de soluciones K^+ .

Todos los macizos graníticos reunidos en esta columna, formados por cualquiera de los mecanismos de detalle citados, presentan las siguientes características:

- 1) las rocas "graníticas" se encuentran sólo en zonas limitadas, siendo excepcional que la textura se mantenga isotropa en áreas muy extensas;

- 2) frecuentemente aparecen relictos de piroxenitas, cuarcitas, anfibolitas o micaesquistos con estructura agmática en plena zona granítica;
- 3) los granitos porfiroblásticos ocupan áreas relativamente más extensas que los formados por pertitización, ya que estos últimos responden a control tectónico local. Los formados por verdadera refusión anatética también ocupan áreas limitadas.

Los granitos de la *columna* (2) tienen características intrusivas a pesar que su origen es por homogeneización metamórfica. En general han sufrido sólo una débil movilización. Una de las características más salientes es que presentan simultáneamente las propiedades de masas intrusivas y de macizos formados en sitio.

Se pueden citar algunos ejemplos de los más llamativos:

ESKOLA (1949) señala que a medida que la granitización se intensifica, los domos gnéissicos pasan gradualmente a masas magmáticas que pueden tener estructura de lacolitos o de facolitos.

READ (1955) ejemplifica unos granitos *para-autóctonos* con la interpretación de KAUTSKY (1946-47) de las rocas graníticas caledonianas del norte de Escandinavia. Estas rocas en Suecia constituyen el basamento Precambriano recubierto en discordancia por sedimentos Eopaleozoicos. Hacia el W, este basamento es primero mecánicamente deformado, luego metasomáticamente recristalizado y finalmente movilizado como granitos intrusivos en los mismos sedimentos Eopaleozoicos metamorfiados que cubren el basamento en Suecia.

Los granitos de la *columna* (3) son típicamente magmáticos. Recortan en discordancia las rocas circundantes, producen aureolas de contacto, están rodeados de fracturas en las que se introducen filones derivados de la masa principal y tienen inclusiones de las rocas circundantes o de bloques de rocas magmáticas correspondientes a una primera etapa de cristalización.

Estos granitos tienen forma geológica de *facolitos* cuando se inyectan durante la fase tectónica, o de *lacolitos* cuando su intrusión es post-tectónica.

Desde el punto de vista geoquímico se han enriquecido en K^+ y las plagioclasas aparecen en cantidad subordinada. El feldespato K^+ es generalmente ortosa, puede ser microclina, pero no es el último mineral en cristalizar, sino que a veces desarrolla automorfismo y el cuarzo es xenomorfo.

Aquí se incluyen casi exclusivamente los macizos originados en proceso magmático orogénico.

CONCLUSIONES

De los temas abordados en el presente ensayo, se extraen ciertas conclusiones principales que pasamos a exponer:

1) Es imprescindible distinguir geológicamente entre los términos "ígneo" y "magmático", pues el uso ha ido incluyendo dentro del grupo ígneo, rocas que no se formaron a partir de magma.

2) Es necesario efectuar una clasificación geológica de las ROCAS ÍGNEAS, siendo posible ensayar la siguiente:

- Rocas ígneas: I) metamórficas;
 II) magmáticas:
 a) orogénicas,
 b) no-orogénicas.

3) Las rocas ígneas metamórficas se formarían por tres procesos principales:

- metasomatismo*, por aporte de iones en solución, dándose dos procesos fundamentales:
 - perritización, por avance de soluciones K^+ sobre gneises oligoclásicos,
 - crecimiento de porfiroblastos desordenados sobre paleosoma de composición generalmente más básica que el "granito" resultante;
- anatexis*, originada por fusión sin removilización de la masa fundida en la raíz de los geosinclinales;
- palingenesis*, por refusión generalizada, que es en general mucho menos probable.

4) Existirían evidencias geológicas suficientes como para aceptar dos mecanismos principales de formación de magma:

- a) magma *ácido* por fusión de rocas en el corazón del geosinclinal durante el proceso orogénico;
- b) magma *básico* por liberación de presión de las rocas del Sima o del Manto; esta liberación de presión sería originada por grandes fracturas que atraviesan el Sial o la Corteza (geoclasas de GUIMARAENS).

5) Se acepta que los granitos, granodioritas y cuarzdioritas se pueden formar por dos procesos naturales: cristalización de magma y metamorfismo metasomático.

6) Conviene que por el momento los esquemas generalizantes sean de la mayor sencillez posible para poder llegar con éxito a una clasificación geológica de utilidad universal.

BIBLIOGRAFIA

- BOSSI, J.; FERNANDEZ, A. y ELIZALDE, G. (1965).—Predevoniano en el Uruguay. *Bol. Fac. de Agr. Montevideo*, 78.
- BOWEN, N. and TUTTLE, O. (1950).—The System $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8\text{-KAlSi}_3\text{O}_8\text{-H}_2\text{O}$. *Jour. Geol.*, 58: 489-511.
- CHAYES, F. (1952).—*Annual Report of the Director of the Geophysical Laboratory*, 151-52. *Carnegie Inst. Wash. Year Book*, pág. 41.
- DE WAARD, D. (1951).—Tectonics of the Barr - Andlan Pluton in the Northern Vosges, France. *Jour. Geol.*, 59: 498-502.
- DIDIER, J. et ROQUES, M. (1960).—Nature des enclaves dans les différents types de granites du Massif Central Français. *Intern. Geol. Congress Proc.*, 21 (14): 194-215.
- ESKOLA, P. (1932).—On the origin of granitic magmas. *Min. pet. Mitt.*, 42: 455-481.
- (1949).—The problem of Mantled Gneiss Domes. *Geol. Soc. London, quart. Jour.*, 104: 411-476.
- (1955).—About the granite problem and some Masters of the study of granite. *Compt. rendu - Soc. Geol. Finlande*, XXV: 125-144.
- GUIMARAENS, D. (1964).—*Geología do Brasil*. Dpto. Nac. Prod. Min., Mem. Nº 1. Río de Janeiro, Brasil.
- HEIER, K. S. (1955).—The formation of feldspar perthites in highly metamorphic gneisses. *Norsk geol. tidss.*, 35: 87-91.
- JUNG, J. et ROQUES, M. (1938).—Les Schistes cristallins du Massif Central. *Ser. Carte Géol. France, Bull.* 39 (197): 120-148.
- KAUTSKY, G. (1946).—Neue Gesichtspunkte zu einigen Nordskandinavischen Gebirgsproblemen. *Geol. Fören. Stockholm Förh.*, 68: 589-610.
- (1947).—*Ibid*, 69: 108-110.
- KENNEDY, W. Q. (1933).—Trends of differentiation in basaltic magmas. *Am. Jour. Sci.*, 25: 139-256.
- KRANCK, E. H. and OJA, R. V. (1960).—Experimental studies of anatexis. *Intern. Geol. Congress Proc.*, 21 (14): 16-29.
- LACY, E. D. (1960).—Melts of granitic composition: Their structure, properties and behaviour. *Intern. Geol. Congress Proc.*, 21 (14): 7-15.
- MARMO, V. (1956).—On the emplacements of granites. *Am. Jour. Science*, 254: 479-492.
- (1958).—Orthoclase and microcline granite. *Am. Jour. Science*, 256: 360-364.
- RAGUIN, E. (1946).—*Geologie du granite*. Ed. Masson, Paris.
- READ, H. H. (1948).—Granites and Granites. Gilluly ed. *Geol. Soc. Am. Mem.*, 28: 1-19.
- (1955).—Granite series in mobile belts. *Geol. Soc. Am., Special Paper*. 62. 400-420

BOSSI: ROCAS ÍGNEAS

- REYNOLDS (1950).—The transformation of Caledonian granodiorite to Tertiary Granophyre on Slieve Gullion, N. Ireland. *Intern. Geol. Congress*, 28: 20-30.
- (1957).—Granite: Some tectonic, Petrological and Physico-Chemical Aspects. *Geol. Mag.*, 95: 378-396.
- SAENZ, I. M. DE (1965).—Origin of ternary film and string perthites from an Uruguayan migmatite. *Schweiz. Min. Petr. Mitt.*, 45.
- SIMONEN, A. (1948).—On the Petrochemistry of the Intracrustal Rocks in the Svecofennidic. *Com. Geol. Finlande*, Bull. 141, Helsinki.
- TERMIER, H. et TERMIER, G. (1956).—*Traité de Géologie. L'Évolution de la Lithosphère. I: Petrogenèse*. Ed. Masson et Cie., Paris.
- TURNER, F. J. y VERHOOGEN, J. (1963).—*Petrología ígnea y metamórfica*. Ed. Omega, Barcelona.
- TUTTLE, O. and BOWEN, N. (1958).—Origin of granite in the light of experimental studies in the System $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ - KAlSi_3O_8 - SiO_2 - H_2O . *Geol. Soc. América*, Mem. Nº 74.
- WAHLSTROM, W. (1955).—*Theoretical Igneous Petrology*. Ed. Wiley & Sons, N. Y.
- WALTHER, K. (1948).—El basamento cristalino de Montevideo. *Bol. Inst. Geol. Uruguay*, 33.
- WALTON, H. (1955).—The Emplacement of Granite. *Am. Jour Science*, 253: 1-18.
- YODER, H. S. (1952).—Change in melting point of diopside with pressure. *Jour. Geol.*, 60: 564-574.