



Textura e Quimismo dos Megacristais de Feldspato Potássico do Plúton Granítico Barcelona, Domínio São José do Campestre, Província Borborema, NE do Brasil

Dalton da Silva PINHEIRO¹; Frederico Castro Jobim VILALVA²

Resumo: O Plúton Granítico Barcelona (PGB) localizado na porção nordeste da Província Borborema, a oeste do Domínio São José do Campestre, caracteriza-se pela presença de três fácies, com amplo domínio de granitos porfiríticos com assinatura química cálcio-alkalina de alto K. Os granitos porfiríticos são marcados pela presença de megacristais de feldspato potássico microperthítico com uma variedade de inclusões minerais marcando um zonamento concêntrico. O trabalho apresenta uma caracterização textural e química dos megacristais de Feldspato potássico dos graníticos porfiríticos, além da descrição petrográfica detalhada de suas principais inclusões. Os resultados apontam para um prolongado intervalo de cristalização e arrefecimento magmático relativamente lento, o que exclui a formação dos megacristais por processos subsolidus. O zonamento dos megacristais é marcado pela variação nas quantidades de inclusões minerais dos núcleos para as bordas cristalinas, bem como pela variação nos teores de sódio e bário, refletindo a cristalização concomitante de plagioclásio, quartzo e outras fases que influenciam a partição destes elementos.

Palavras-Chave: Feldspato Potássico, Petrografia, Química Mineral, Plúton Barcelona.

Abstract: *The Barcelona Granitic Pluton (BGP) located in the northeast portion of the Borborema Province, to the west of the São José do Campestre Domain, is characterized by the presence of three distinct petrographic facies, with high-K calc-alkaline porphyritic granites as the dominant lithotypes. They are marked by the presence of microperthitic potassic feldspar megacrysts with a variety of mineral inclusions that define a concentric zoning. This work presents a textural and chemical characterization of the potassic feldspar megacrysts from the porphyritic granites, as well as a detailed petrographic description of their main mineral inclusions. The results point to a prolonged crystallization interval under a relatively slow magma cooling, which preclude megacryst formation by subsolidus processes. Zoning in megacrysts is marked by a variation in the abundance of mineral inclusions from core to crystal rims, as well as varying sodium and barium contents, reflecting the concomitant crystallization of plagioclase, quartz and other phases that control the partition of these elements.*

Keywords: *Potassic Feldspar, Petrography, Mineral Chemistry, Barcelona Pluton*

¹ Graduação em Geologia – Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN

² Departamento de Geologia – Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN

Autor para correspondência: Dalton da Silva Pinheiro

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Campus Universitário, Departamento de Geologia, Lagoa Nova, Natal, RN, CEP 59078-970. E-mail: daltonpinheiro@ufrn.edu.br

Recebido em 29 de Janeiro de 2018 / Aceito em 12 de Junho de 2018.

1. INTRODUÇÃO

A interpretação textural em granitoides é imprescindível na discussão dos processos genéticos e evolutivos do magma de origem. Destarte a correta elucidação dos processos evolutivos suscitados a partir da interpretação das feições texturais, difere as de processos magmáticos *sensu-stricto* dos processos tardi- a pós-magmáticos. Nesse contexto, a origem dos megacristais de feldspato potássico em granitoides gerando a textura porfirítica tem sido motivo de debate entre petrologistas por mais de um século (cf., Johnson & Glazner, 2010), em que a discussão envolve o questionamento do motivo pelo qual magmas composicionalmente semelhantes geram texturas ora equigranulares, ora porfiríticas.

Tradicionalmente, os megacristais de feldspato potássico são interpretados como uma das fases minerais prógonas em magmas félsicos com baixa cristalinidade, sendo, portanto capazes de fluir e se orientar de acordo com o fluxo magmático. Contudo, experimentos clássicos (e.g., Bowen, 1956; Piwinski, 1968; Piwinski & Wyllie, 1968; Whitney, 1975; Clemens & Wall, 1981) apontam o feldspato potássico como uma fase tardia na cristalização do magma. Desta forma alguns autores defendem sua origem em estágios tardios, ainda na presença de líquido (Winkler & Schultes, 1982; Vernon, 1986; Vernon & Paterson, 2008), em condições de supersaturação e baixa nucleação (Swanson, 1977; Fenn, 1977; Paterson *et al.*, 2005). Mais recentemente, alguns trabalhos têm defendido uma origem tardi- a pós-magmática (i.e., subsolidus) do feldspato potássico a partir do “engrossamento” textural (textural coarsening), definido pelo mecanismo da maturação de Ostwald (Ostwald ripening), a partir do

desequilíbrio termodinâmico nos grãos da matriz (Voorhees, 1985) gerando uma espécie de “autofagia mineral”, onde os grãos menores mais instáveis são digeridos no processo.

O estudo e definição da origem dos megacristais de feldspato potássico, se precoce ou tardia é essencial na interpretação da dinâmica e cinemática do magma, podendo se observar, no caso de ser precoce, texturas cumuláticas tais como textura de entelhamento, foliação magmática, e zonas de acumulação. Por outro lado, se a origem for tardia demonstrada pela maturação de Ostwald, as relações texturais primárias não estariam evidentes, podendo ainda indicar uma longa história de cristalização. Porém o mecanismo de maturação de Ostwald pode ainda ocorrer nos estágios finais de cristalização, tendo desta forma o início precoce da cristalização do feldspato potássico e o fim em estágios tardios, podendo ocorrer, ou não, em estado de subsolidus.

A Província Borborema é marcada por um volumoso magmatismo que foi agrupado por Nascimento *et al.* (2015) em seis suítes com características petrográficas e litoquímicas distintas. Dentre estas, a Suíte Cálcio-alcalina de Alto K Porfirítica é a de maior expressão em volume e área. Os granitoides dessa suíte apresentam textura porfirítica bem preservada, com megacristais de feldspato potássico de até 150 mm. Apesar disto, são ainda escassos os estudos relativos à problemática da origem dos megacristais (e.g., Souza, 1985; Galindo, 1988). Neste contexto, toma-se o Plúton Barcelona, como um típico representante da Suíte Cálcio-Alcalina de Alto K, como objeto de investigação da origem de megacristais de Feldspato potássico na Província

Borborema. Para tal, foram avaliados parâmetros texturais e de quimismo dos megacristais de feldspato potássico, observando padrões da trama magmática e possíveis interpretações de transformações pós-magmáticas, inferindo condições de nucleação e crescimento cristalino dos megacristais e suas inclusões.

2. ÁREA; MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Contextualização Geológica

O Plúton Barcelona (Figura 1) é um importante representante do extenso magmatismo Ediacarano a Cambriano que caracteriza a Província Borborema, NE do Brasil. Esse magmatismo é dividido em seis suítes distintas (Nascimento et al., 2014; Nascimento et al., 2015), sendo estas a Suíte Shoshonítica, a Suíte Cálcio-alcalina de Alto K Porfírica, a Suíte Cálcio-alcalina de Alto K Equigranular, a Suíte Alcalina, a Suíte Cálcio-alcalina e a Suíte Alcalina

Charnoquítica. O Plúton Barcelona é um dos maiores corpos da Suíte Cálcio-alcalina de alto K Porfírica que, por sua vez, é a mais expressiva na província.

O Plúton Barcelona corresponde a um corpo granítico de dimensões batolíticas (~240 Km²) localizado na porção leste do estado do Rio Grande do Norte, entre os municípios de Sítio Novo, Santa Cruz, São Tomé, Barcelona, Ruy Barbosa, Riachuelo e Lagoa de Velhos. Aflora na porção nordeste da Província Borborema, intrusivo em rochas gnáissico-migmatíticas do Domínio São José do Campestre (Angelim *et al.*, 2006; Medeiros, 2013; Figura 2). Possui geometria sigmoide e é orientado segundo NE-SW por influência das zonas de cisalhamento Sítio Novo (ZCSN) a leste, e Lajes Pintadas (ZCLP) a oeste, sendo esta última controlada pela Zona de Cisalhamento Picuí-João Câmara (ZCPJ) (Figura 1).

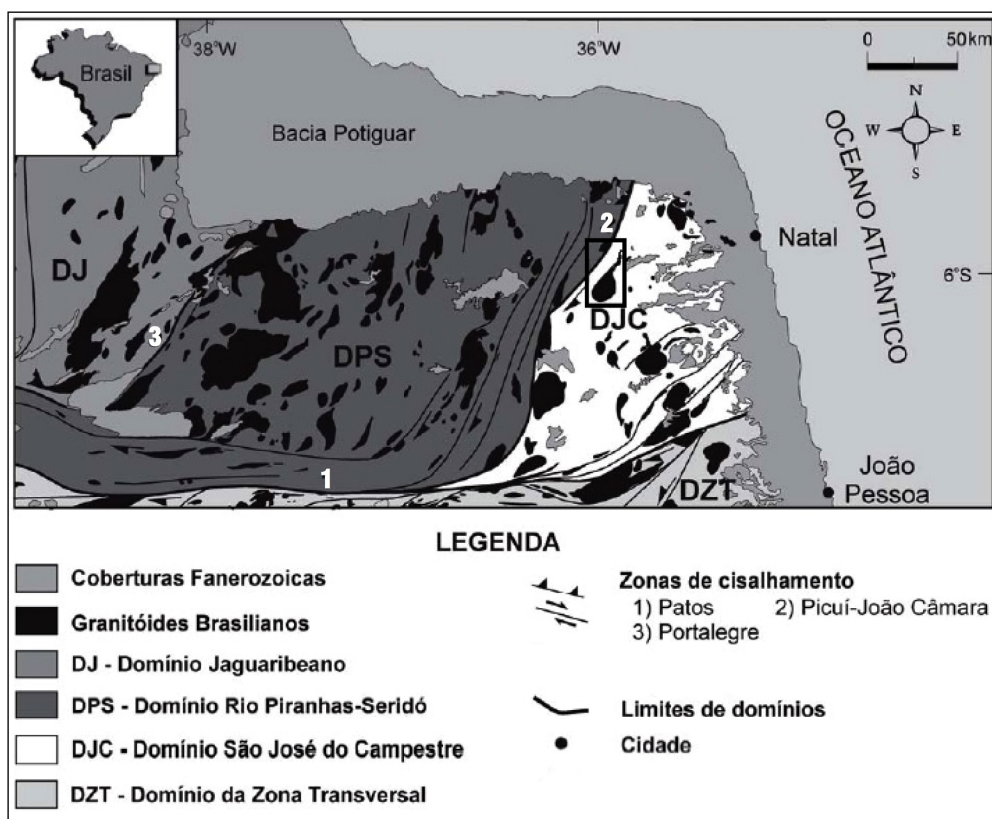


Figura 1: Mapa geológico simplificado da área de estudo com destaque para o PGB. Compilado de Medeiros (2004) e Cavalcante (2015).

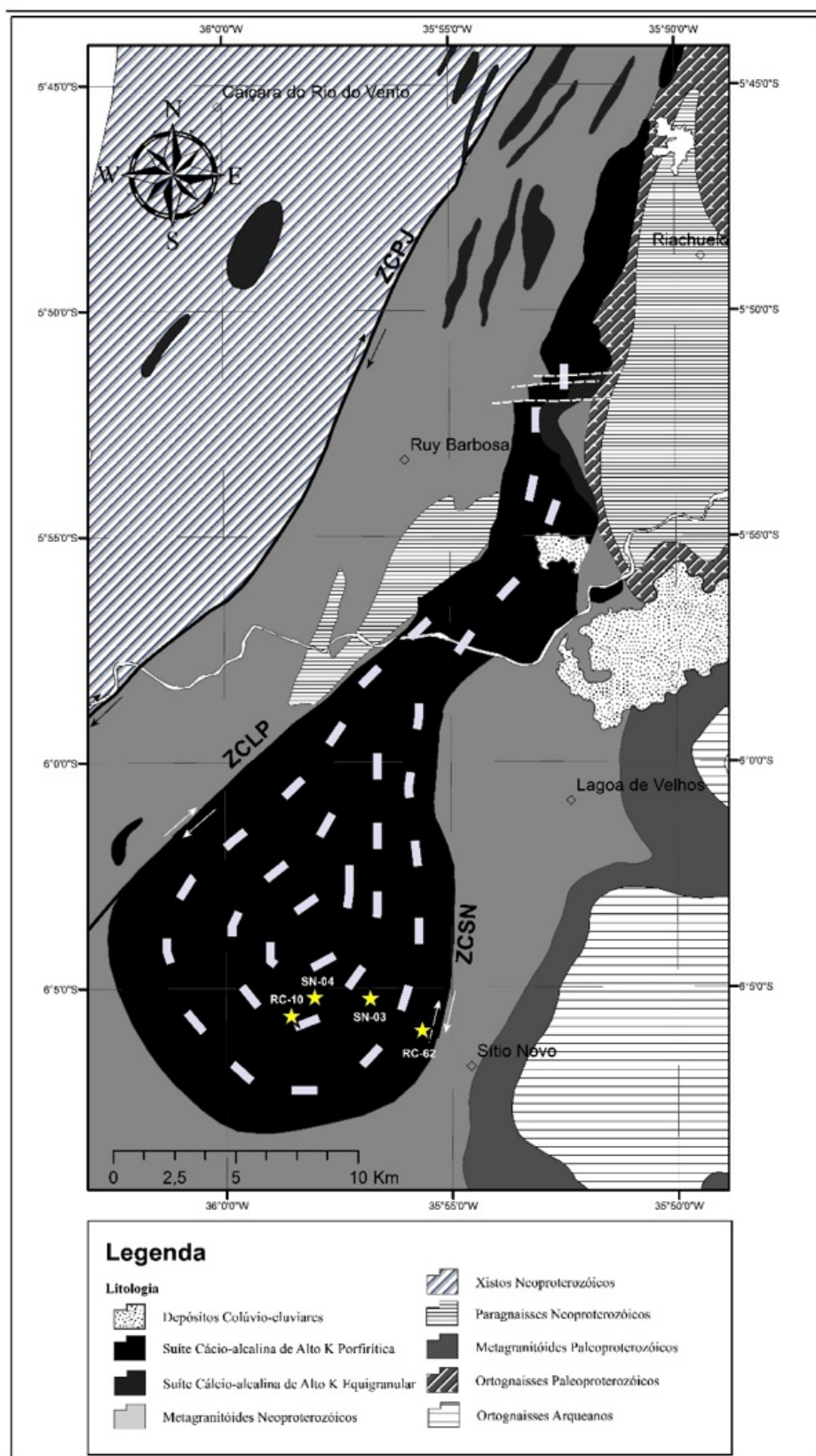


Figura 2: Arcabouço geológico simplificado dos Domínios Rio Piranhas-Seridó e São José do Campestre, com ênfase no PGB. Modificado de Medeiros (2004).

Três fácies podem ser reconhecidas no Plúton Barcelona: (1) fácies granítica porfirítica, (2) fácies microgranítica, e (3) fácies diorítica/quartzo-diorítica (Cavalcante, 2015). A fácies porfirítica é a mais importante e de maior expressão volumétrica (>95% do total do corpo). É formada por biotita monzogranitos porfiríticos, leucocráticos ($7 < M < 23\%$; Cavalcante *et al.*, 2014), de granulação média a grossa, tendo como característica principal a ocorrência de megacristsais de feldspato potássico zonados e texturas típicas de fluxo magmático, tais como foliação magmática (e.g., Seaman, 2000; Vernon & Collins, 2011; Figura 3A), imbricação (tiling;

Figura 4D) e cumulos (clusters; Figura 4B), possuindo em algumas regiões textura pegmatítica (Figura 3D). As fácies diorítica/quartzo diorítica e microgranítica não possuem expressão volumétrica passível de cartografia, porém são muito importantes na interpretação dos processos de gênese e evolução do magma. São representadas por enclaves máficos e schlierens geralmente orientados segundo o fluxo magmático (Figura 3C), com texturas em mingling e mixing (Cavalcante, 2015) (Figura 3B). A fácies microgranítica inclui biotita granodioritos equigranulares, leucocráticos ($M \sim 9\%$), de granulação fina, que representam a mistura entre os magmas da fácies (1) e (2) (Figura 3B).



Figura 3: Feições texturais e estruturais associadas à fácies granítica porfirítica. (A) Foliação magmática penetrativa marcada por cristais de Feldspato potássico orientados. (B) Mistura de magmas entre as fácies granítica porfirítica e microgranítica. (C) Enclave máfico orientado segundo o fluxo magmático representando schlieren. (D) Textura pegmatítica caracterizada por grande volume de Feldspato potássico, além de quartzo e biotita subordinados em granito porfirítico.

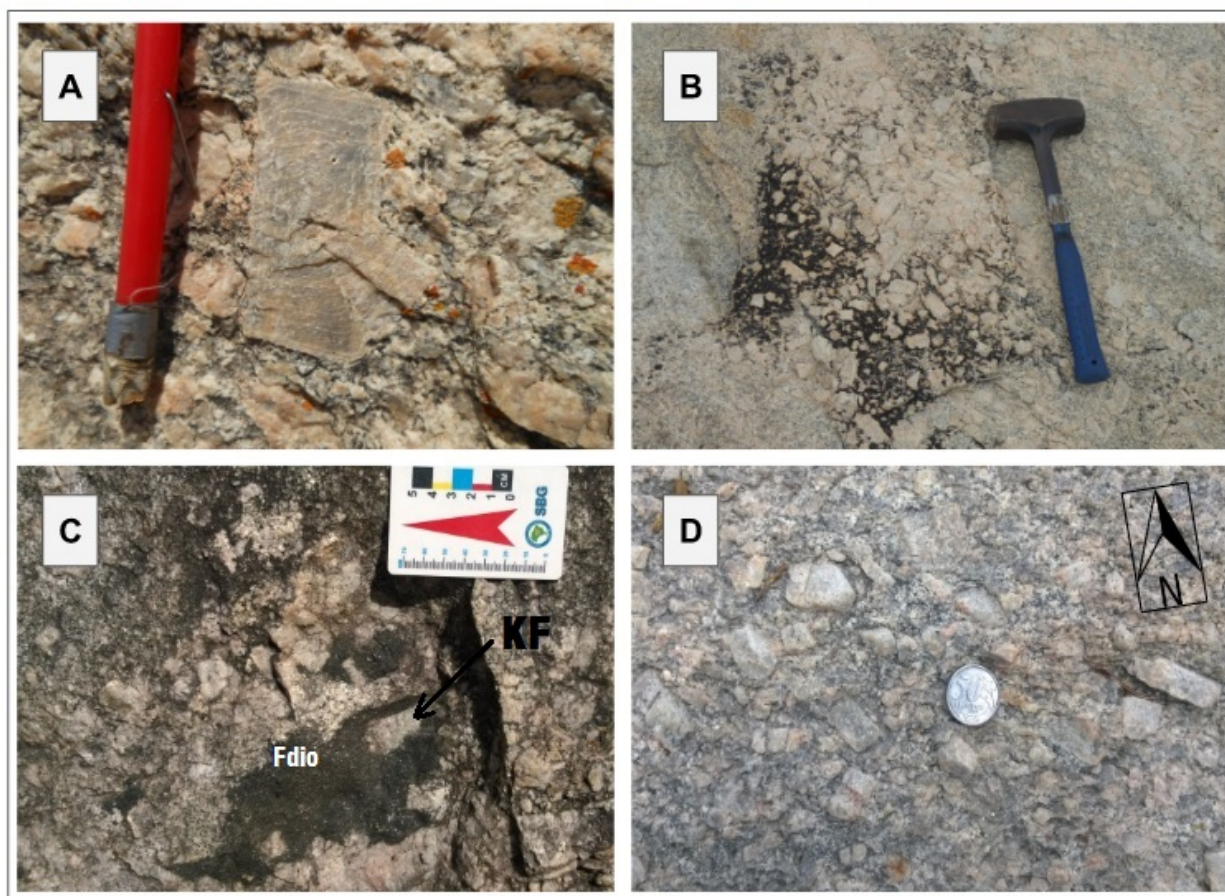


Figura 4: Feições texturais macroscópicas da fácies granítica porfirítica do Plúton Barcelona. (A) Cristal euédrico de Feldspato potássico mostrando zonamento concêntrico definido pelo arranjo alinhado de inclusões (plagioclásio \pm quartzo) (B) Cumulato de megacristais de Feldspato potássico sem orientação preferencial em biotita sienogranito porfirítico. (C) enclave máfico-intermediário (autólito) associado à pequenos cumulatos englobando cristal de Feldspato potássico. (D) Textura de imbricação (tiling) dos megacristais de Feldspato potássico demonstrando sentido do fluxo em biotita sienogranito do Plúton Barcelona.

2.2 Material e Métodos

O presente trabalho é baseado no estudo petrográfico detalhado de amostras de mão e seções delgadas selecionadas da fácies porfirítica do Plúton Barcelona, em conjunto com análises químicas semi-quantitativas de cristais selecionados de Feldspato potássico.

Os estudos petrográficos foram conduzidos nas dependências do Laboratório de Microscopia Estudantil do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Deu-se ênfase à caracterização textural detalhada dos megacristais de

feldspato potássico, suas inclusões, padrões de zonamento e relação com os demais minerais máficos e félsicos da matriz dos granitos porfiríticos do Plúton Barcelona.

Análises químicas semi-quantitativas (EDS) foram realizadas três seções delgado-polidas representativas dos granitos porfiríticos do Plúton Barcelona. Foram analisados megacristais e cristais da matriz de feldspato potássico. Algumas análises complementares foram também realizadas em cristais de plagioclásio inclusos nos megacristais e da matriz.

Utilizou-se o detector EDS Oxford X-ACT acoplado à microsonda eletrônica Shimadzu EPMA-1720H do Laboratório de Caracterização de Resíduos Sólidos, Núcleo de Processamento Primário e Reuso de Água Produzida e Resíduos (NUPPRAR) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). Utilizou-se uma voltagem do feixe de elétrons de 20 kV. Análises quantitativas WDS em megacristais do Plúton Barcelona obtidas por Cavalcante *et al.* (2014) foram incorporadas ao banco de dados e utilizadas como guias durante as análises EDS. A interferência entre as linhas Ba L α e Ti K α foi controlada pela inspeção visual cuidadosa dos picos adquiridos.

A fórmula estrutural do feldspato potássico foi calculada com base em 32 oxigênios, de acordo com Deer *et al.* (2013).

3 RESULTADOS

3.1 Petrografia

3.1.1 Megacristais de Feldspato Potássico

Macroscopicamente, os megacristais de feldspato potássico do Plúton Barcelona apresentam-se subédricos a euédricos, brancos a rosados, com comprimentos médios entre 2,0 e 6,0 cm e valores máximos de ~9,0 – 10,0 cm. É comum a ocorrência de zonamentos composicionais, marcados por inclusões de plagioclásio, biotita e outros minerais máficos em zonas internas (Figura 4A), dispostos paralelamente às faces cristalinas (Figuras 5A, 5C e 5D). Os cristais foram analisados em pontos contemplando as zonas composicionais (Figura 5B). Texturas de imbricação (tiling) (Figura 4D), cumulatos (Figura 4B) e rapakivi (Cavalcante *et al.*, 2014) são relativamente comuns. Os megacristais aparecem ora orientados por fluxo magmático nas partes internas do plúton, ora por deformação junto às bordas do

plúton e em zonas de cisalhamento locais.

Ao microscópio, os megacristais mostram hábitos alongados e tabulares, com bordas irregulares e micropertitas dos tipos filete e vênula. São comuns as geminações do tipo Albita-Periclínio e do tipo Carlsbad, esta última mais comum nos cristais de hábito tabular. Os cristais mostram um zonamento composicional oscilatório marcado por inúmeras inclusões de quartzo, plagioclásio, biotita, hornblenda e titanita, dispostos ao longo de zonas internas concêntricas e paralelas às arestas das faces (010), (110), (101) e (001), em ordem de significância, o que dá aos megacristais um aspecto poiquilítico. Há a alternância de zonas internas ricas em inclusões com porções mais límpidas (Figura 5C) e, em linhas gerais, as bordas cristalinas concentram maior quantidade de inclusões em comparação às porções mais centrais dos megacristais. Allanita, apatita e minerais opacos ocorrem ocasionalmente como inclusões, porém sem marcar o zonamento. Epidoto, muscovita e clorita são produtos de alteração hidrotermal. Intercrescimentos granofíricos e mirmequíticos são comuns junto às bordas dos megacristais (Figura 6A).

3.2 Inclusões nos Megacristais

3.2.1 Plagioclásio

Inclusões de plagioclásio são as mais comuns nos megacristais de feldspato potássico do Plúton Barcelona. Concentram-se, juntamente com quartzo (+ minerais máficos em menor proporção), ao longo de zonas internas concêntricas nos megacristais, alternadas com regiões de baixa densidade de inclusões. Aparecem alinhados, como cristais subédricos a euédricos, de hábito tabular (Figura 6B), com comprimentos

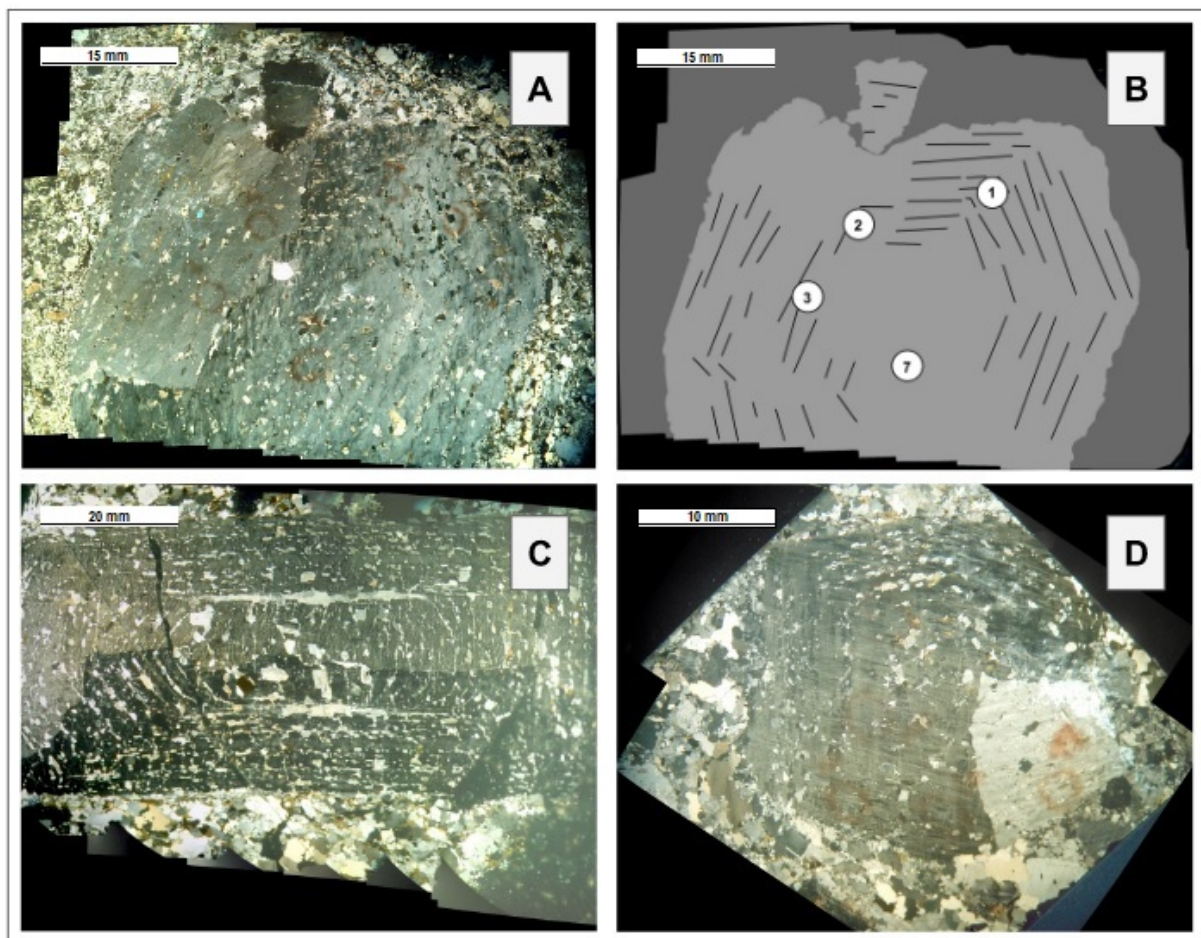


Figura 5: Fotomicrografias de cristais de Feldspato potássico sob polarizadores cruzados (90°). (A) Zonação marcada por inclusões em seção basal. (B) Croqui esquemático da fotomicrografia em (A) marcando a zonação e os pontos de análise química no cristal. (C) Zonação marcada por inclusões em seção transversal. (D) Zonação marcada por inclusões em seção basal menor. As inclusões são principalmente de plagioclásio e quartzo, além de biotita, anfibólio e acessórios subordinados.

médios entre 0,5 e 1,0 mm e máximos de ~2,2 mm, sendo significativamente menores que os cristais de plagioclásio da matriz (~5,0 – 25,0 mm). Em ambos os casos correspondem a oligoclásio, com teores de An em torno de 22 – 24%, obtidos a partir das análises químicas via EDS. As inclusões apresentam geminações polissintéticas e feições de instabilidade no contato com o feldspato potássico, o que gera bordas mais albitizadas na maioria dos grãos (cf., Cavalcante et al., 2014). No processo de albitização pode ocorrer ainda uma segunda geração de geminação

no plagioclásio, sendo o gêmeo formado nas bordas do cristal. Nesse processo os eixos cristalográficos – e consequentemente a geminação – são invertidos (Figura 6C), caracterizando o processo de syntaxia. As inclusões mostram ainda saussuritização avançada nos núcleos mais cálcicos (Figura 6D).

3.2.2 Quartzo

Assim como o plagioclásio, inclusões de quartzo são abundantes em especial nas regiões intermediárias dos megacristais de feldspato potássico. Aparecem como grãos anédricos de até

1,0 mm, predominantemente com formas arredondadas e ameboides, raramente em contato com plagioclásio. Quando ocorrem junto às bordas dos megacristais, os grãos de quartzo mostram extinção ondulante e orientam-se paralelamente às faces cristalinas do feldspato potássico. Eventualmente, observa-se a extinção sincrônica, onde vários grãos de quartzo se extinguem ao mesmo tempo (Figuras 7A e 7B), denotando cristalização simultânea.

3.2.3 Biotita

A biotita é o terceiro tipo de

inclusão mais comum nos megacristais de feldspato potássico. Aparece como lamelas e placas finas, subédricas, com ~1,0 mm de comprimento. Apresentam padrão pleocroico em tons de marrom a amarelo. O processo de cloritização é mais visível nas seções que evidenciam as faces (100) e (010) da biotita. Minerais opacos podem substituir a biotita por completo, gerando pseudomorfos. Em geral, as inclusões de biotita estão orientadas de acordo com o alongamento dos megacristais e são mais frequentes junto às suas regiões mais periféricas.

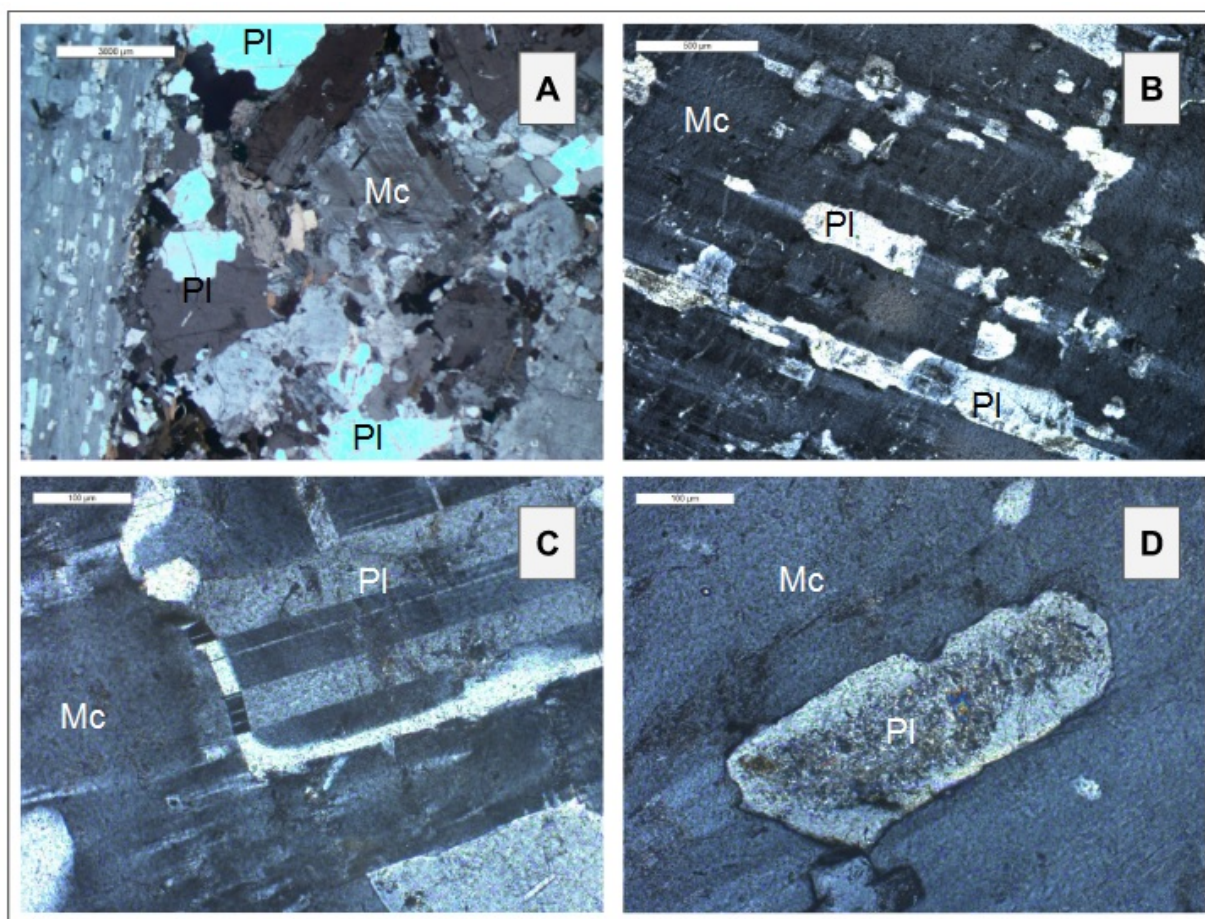


Figura 6: Fotomicrografias representativas de aspectos texturais dos plagioclásios e da matriz sob polarizadores cruzados (90°). (A) Afinamento textural da matriz e texturas granofírica e mirmequítica próximo ao megacristal (à esquerda) e zonação marcada pelas inclusões orientadas segundo a face do Feldspato potássico. (B) Cristais subédricos de plagioclásio inclusos orientados. (C) Plagioclásio com borda apresentando inversão cristalina (syntaxia). (D) Plagioclásio apresentando processo de saussuritização. PI = plagioclásio, Mc = microclínio.

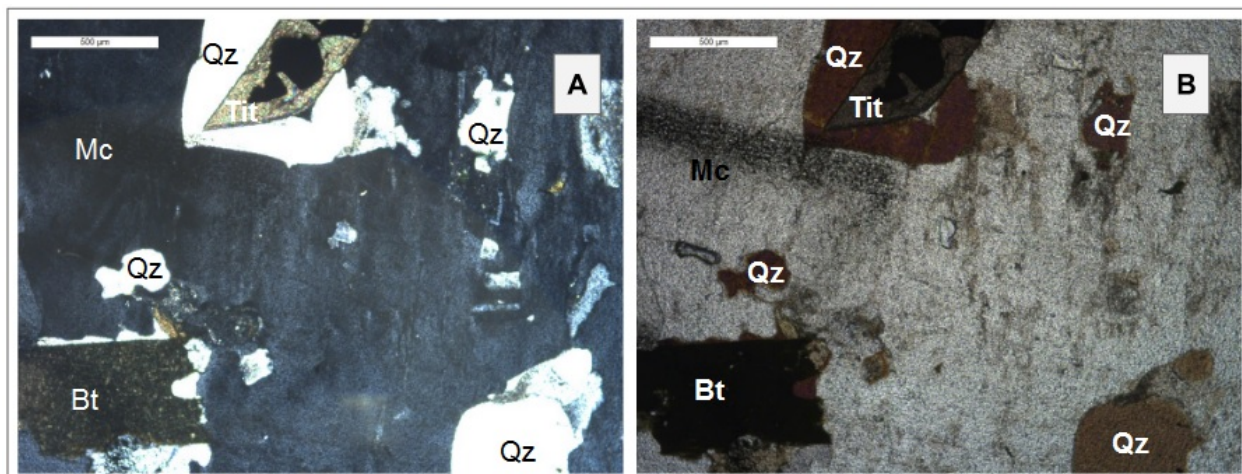


Figura 7: Fotomicrografias representativas de aspectos texturais das inclusões. (A) Cristais anédricos de quartzo e cristais euédricos de biotita e titanita inclusos vistos sob polarizadores cruzados (90°). (B) Mesma seção com polarizadores oblíquos (45°), evidenciando sincronia ótica dos cristais de quartzo. Tit = titanita, Bt = biotita, Qz = quartzo.

3.2.4 Hornblenda

Inclusões de hornblenda são menos frequentes e tendem a se concentrar junto às porções mais externas dos megacristais. Os cristais mostram pleocroísmo em tons de verde escuro claro, são euédricos, com hábito prismático e possuem comprimento máximo de ~1,5 mm. Assim como a biotita, muitos dos cristais de hornblenda estão orientados paralelamente às faces dos megacristais, em camadas concêntricas que marcam o zonamento oscilatório dos feldspatos.

3.2.5 Outras Inclusões

Os megacristais de feldspato potássico apresentam comumente inclusões ocasionais de minerais não marcadores de zonação, dispostos de forma aleatória no interior dos megacristais. Incluem principalmente titanita, apatita e allanita, todos com formas euédricas e comprimentos entre 0,2 mm e 0,6 mm. Inclusões de magnetita e ilmenita de granulação muito fina (~0,1 mm) são mais raras (Figuras 8A e 8B).

3.3 Aspectos Texturais da Matriz

A matriz dos granitos porfíricos

Plúton Barcelona possui textura inequigranular de granulação fina a média (<1,0 a 3,0 mm), com diminuição relativa do tamanho dos cristais nas proximidades dos megacristais de feldspato potássico. A mineralogia é composta essencialmente por oligoclásio (21 – 40%), quartzo (17 – 40%) e feldspato potássico (28 – 40%), além de biotita (2,5 – 22%) como máfico principal. Os principais minerais acessórios são hornblenda, titanita, allanita, apatita e minerais opacos. Clorita, epidoto e muscovita são fases secundárias/hidrotermais associadas à biotita, hornblenda e feldspatos.

4. QUÍMICA MINERAL

Foram obtidas análises químicas semi-quantitativas (EDS) para três megacristais de feldspato potássico, bem como de cristais de matriz, provenientes de diferentes amostras do Plúton Barcelona (Figura 2). Análises quantitativas (WDS) obtidas por Cavalcante *et al.* (2014) para a amostra RC-10 foram adicionadas ao banco de dados e interpretadas em conjunto. Os resultados são apresentados nas Tabelas 1 e 2.

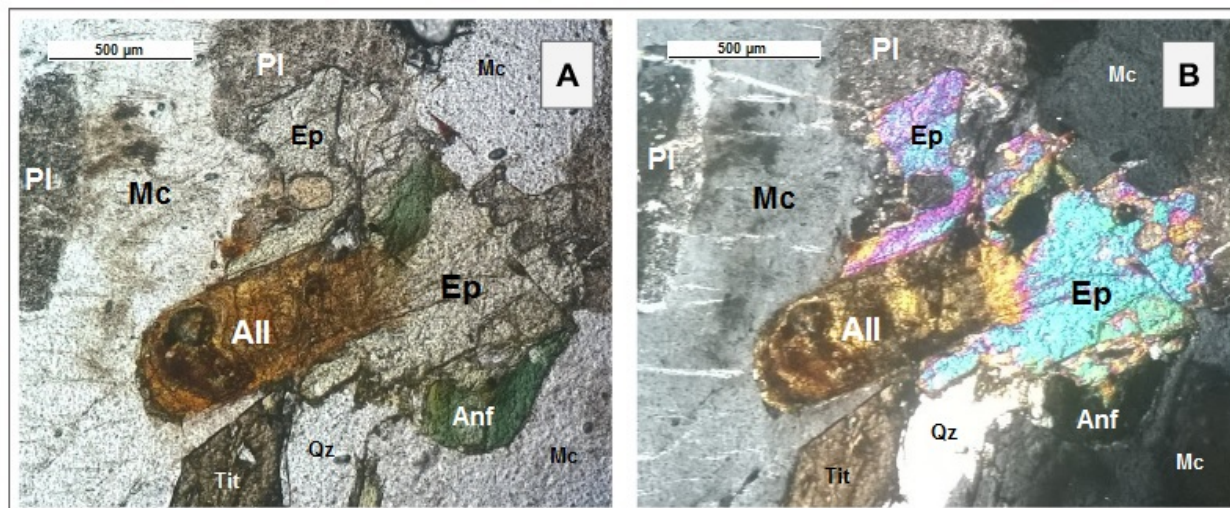


Figura 8: Fotomicrografias representativas de aspectos texturais das inclusões. (A) Cristais inclusos não marcadores de zonação sob polarizadores paralelos. (B) Mesma seção a polarizadores cruzados (90°). Mc = microclina, Pl = plagioclásio, Tit = titanita, Anf = anfibólio, All = allanita, Ep = epidoto.

Tabela 1: Análises químicas EDS nos megacristais de feldspato potássico de granitos porfíricos do Plúton Barcelona. Localização das análises: b = borda; i = zona intermediária; n = núcleo dos megacristais.

Amostra	RC-62				SN-4A2			SN-3.2			
	Megacristal 1				Megacristal 2			Megacristal 3			
Análise	1-b	2-i	3-i	7-n	1-b	2-i	3-n	2-b	2.2-b	3-n/i	4-n
SiO ₂ (% peso)	63,79	64,46	64,01	64,20	64,35	64,83	65,03	64,38	64,23	65,02	63,67
Al ₂ O ₃	18,76	18,38	18,54	18,71	18,67	18,65	18,76	18,46	18,51	18,85	19,32
CaO	0,46	0,11	0,11	0,21	0,05	0,07	0,07	0,09	0,10	0,12	0,31
BaO	1,23	0,80	0,73	0,95	0,86	0,26	0,34	0,63	0,43	0,35	1,04
Na ₂ O	1,07	0,70	0,54	0,86	0,91	1,02	1,15	0,85	0,76	0,86	0,86
K ₂ O	14,68	15,56	16,06	15,08	15,17	15,18	14,64	15,59	15,97	14,80	14,80
Total	99,99	100,01	99,99	100,01	100,01	100,01	99,99	100,00	100,00	100,00	100,00
Si (cpfu)	11,860	11,961	11,911	11,908	11,927	11,959	11,967	11,943	11,923	11,964	11,811
Al	4,111	4,020	4,066	4,090	4,078	4,055	4,069	4,036	4,050	4,088	4,224
Ca	0,092	0,022	0,022	0,042	0,010	0,014	0,014	0,018	0,020	0,024	0,062
Ba	0,090	0,058	0,053	0,069	0,062	0,019	0,025	0,046	0,031	0,025	0,076
Na	0,386	0,252	0,195	0,309	0,327	0,365	0,410	0,306	0,274	0,307	0,309
K	3,482	3,683	3,812	3,568	3,587	3,572	3,437	3,689	3,782	3,474	3,502
Σ Cátions	20,019	19,996	20,059	19,986	19,991	19,983	19,922	20,037	20,079	19,882	19,983
Ab (% mol.)	10	6	5	8	8	9	11	8	7	8	8
An	2	1	1	1	0	0	0	0	0	1	2
Or	88	93	95	91	91	90	89	92	93	91	90

As composições do feldspato potássico do Plúton Barcelona são relativamente homogêneas, variando entre Or86Ab13An1 e Or95Ab5An<1 (% mol.; Tabela 1). Os teores de BaO variam entre 0,26 e 1,23% em peso (Ba: 0,02 – 0,09 cpfu). Verifica-se uma variação

composicional entre os megacristais e destes com os cristais da matriz, em especial quanto a sódio e bário (Tabela 2). Dentre os megacristais, a diminuição em suas dimensões máximas (e.g., de 6,0–8,0 cm a 2,0 cm) é acompanhada pelo aumento aparente nos teores médios

Tabela 2: Análises químicas EDS e WDS realizadas em megacristais e cristais de feldspato potássico da matriz de granitos porfíricos do Plúton Barcelona. Localização das análises: b = borda, n = núcleo cristalino. Análises WDS (Cavalcante et al., 2014): 1 a 7.

Amostra	RC-10							SN-3.2		
K-feldspato	Megacristais							Matriz		
Cristal ID	P-188	P-190	P-192	P-189	P-185	P-170		KF-1 mtz	KF-2 mtz	KF-3 mtz
Análise	1-n	2-n	3-n	4-b	5-b	6-n	7-n	8-n	9-n	10-n
SiO ₂ (% peso)	63,83	63,87	64,37	64,34	64,89	64,35	64,35	64,71	65,70	64,41
Al ₂ O ₃	18,18	18,63	18,46	18,47	18,48	18,63	18,63	18,36	19,05	18,58
CaO	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,02	0,02	0,09	0,17	0,17
BaO	0,42	0,80	0,72	0,46	0,42	0,73	0,73	0,34	0,45	0,49
Na ₂ O	0,73	0,83	0,69	0,80	0,87	0,77	0,77	0,98	1,37	0,83
K ₂ O	16,06	16,00	16,08	15,89	16,13	16,01	16,01	15,52	13,25	15,52
Total	99,22	100,13	100,32	99,98	100,79	100,51	100,51	100,00	99,99	100,00
Si (cpfu)	11,951	11,883	11,935	11,939	11,951	11,910	11,910	11,972	11,999	11,932
Al	4,012	4,085	4,034	4,039	4,011	4,064	4,064	4,004	4,100	4,056
Ca	0,000	0,000	0,000	0,004	0,000	0,004	0,004	0,018	0,033	0,034
Ba	0,031	0,058	0,052	0,033	0,030	0,053	0,053	0,025	0,032	0,036
Na	0,265	0,299	0,248	0,288	0,311	0,276	0,276	0,352	0,485	0,298
K	3,836	3,797	3,803	3,761	3,790	3,780	3,780	3,663	3,087	3,667
ΣCátions	20,094	20,123	20,073	20,066	20,093	20,086	20,086	20,033	19,737	20,023
Ab (% mol.)	6	7	6	7	8	7	7	9	13	7
An	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Or	94	93	94	93	92	93	93	91	86	92

de Na₂O ($0,79 \pm 0,23$ a $0,85 \pm 0,12\%$) e diminuição de BaO ($0,93 \pm 0,22$ a $0,59 \pm 0,23\%$; Tabela 1). Por sua vez, os cristais de feldspato potássico da matriz possuem teores médios maiores de Na₂O ($1,06 \pm 0,28$ % em peso) e menores de BaO ($0,43 \pm 0,08$ %) quando comparados aos megacristais (Figura 9, Tabela 2).

Variações composicionais núcleo-borda para um mesmo megacristal são também identificadas para Na e Ba (Figura 9). Em linhas gerais, há uma diminuição inicial nos teores desses elementos do núcleo em direção às regiões mais externas dos megacristais (intermediárias), seguida por um aumento

abrupto junto às suas bordas. Os megacristais das amostras SN-4A e RC-10 mostram um comportamento ligeiramente distinto, com diminuição de sódio no primeiro caso, e bário no segundo junto às bordas cristalinas.

Análises químicas complementares foram também realizadas em cristais de plagioclásio inclusos nos megacristais de feldspato potássico e dispersos na matriz dos granitos porfíricos do Plúton Barcelona. Os resultados mostram composições relativamente homogêneas, variando entre oligoclásio ($An_{21}Ab_{78}Or_1$) a andesina ($An_{32}Ab_{67}Or_2$). O teor médio de anortita é semelhante entre cristais

inclusos (An_{25}) e dispersos na matriz (An_{24}). A composição mais cálcica analisada corresponde a um cristal incluído em megacristal da amostra SN-4A. Esta inclusão está em uma posição mais periférica em relação ao megacristal, possuindo composição semelhante aos grãos da matriz, de forma similar ao verificado por Cavalcante *et al.* (2014).

4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O Plúton Barcelona é caracterizado pela predominância de rochas graníticas com textura porfirítica. Johnson *et al.* (2006) sugerem que a textura porfirítica em granitos é resultado de refusão de cristais instáveis e maturação textural, apontando para uma história prolongada de resfriamento. Os megacristais de feldspato potássico do Plúton Barcelona são hospedeiros de inclusões de várias fases mineralógicas distintas, sendo plagioclásio e quartzo as mais comuns, fato também observado em outros corpos graníticos da Província Borborema, tais como os Plútons Acari (Souza, 1985) e Monte das Gameleiras (Galindo, 1988).

Em escala macroscópica observam-se megacristais zonados essencialmente euédricos (Figura 4A), o que evidencia uma cristalização progressivamente lenta. Ademais, apresentam geminação simples, uma feição típica de megacristais ígneos, sendo raros em porfiroblastos (Vernon e Paterson, 2008). Texturas ligadas à movimentação do magma, como foliação penetrativa (Figura 3A) e textura de imbricação (Figura 4D) podem ser observadas no Plúton Barcelona, tais como observadas por Galindo (1988) no Plúton Monte das Gameleiras, o que corrobora a presença dos megacristais de feldspato potássico no magma em condições *suprasolidus*. A alta densidade de megacristais em algumas áreas do plúton confere à rocha zonas de acumulação (ou *clusters*; Figura 3B), geradas no processo de *synneusis* (Vance, 1969). Essas zonas de acumulação demonstram a movimentação dos cristais no magma (Vernon & Paterson, 2008).

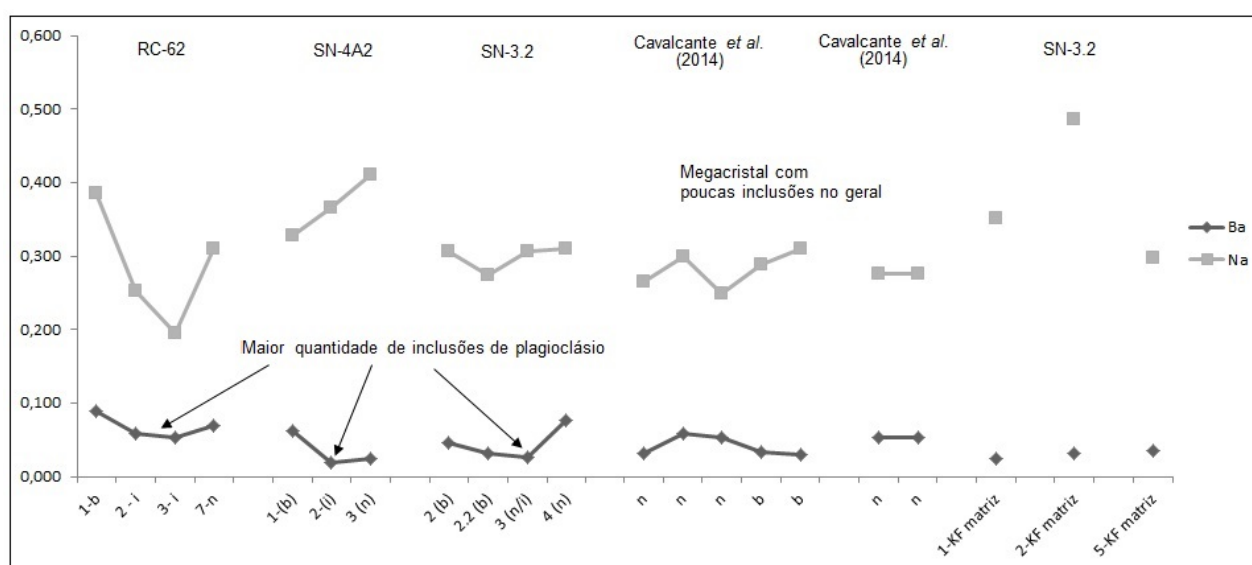


Figura 9: Diagrama de química mineral apresentando variações de BaO e Na₂O para megacristais de Feldspato potássico e cristais da matriz.

Feições microscópicas como microfraturas e truncamento da zonação, observadas também por Souza (1985) no Plúton Acari, podem ser consequência do choque entre megacristais devido à movimentação por fluxo magmático, como apontam Paterson *et al.* (2005) e Vernon & Paterson (2008). Além de texturas de mingling e mixing envolvendo megacristais que apontam para mistura de magmas já com a presença dos cristais de feldspato potássico. Pode-se destacar ainda o aparecimento de zonas de acumulação associadas a enclaves máficos do tipo autólitos, evidenciando uma equivalência de viscosidade do magma rico em megacristais e do magma mais máfico rico em minerais mais densos (Paterson *et al.*, 2005), onde os megacristais presentes no fluido no momento da acumulação se chocam e remobilizam o líquido rico em minerais máficos para a vizinhança (Figura 4C).

Na matriz do granito porfirítico do Plúton Barcelona, um aspecto pertinente a se considerar é a diminuição da granulação de seus minerais nas áreas circunvizinhas aos megacristais de feldspato potássico. Esse tipo de trama pode ser interpretado como uma desestabilização dos cristais de plagioclásio e quartzo em estado de subarrefecimento próximo ao ponto eutético, nos estágios finais da evolução textural do magma. Ademais, texturas de mesostasis do tipo mirmequitas são identificadas junto às bordas dos megacristais como agregados de cristais diminutos de plagioclásio com contatos em ângulos de 120°. Tais texturas corroboram a cristalização em equilíbrio eutético, bem como sugerem a atuação de fluidos ricos em H₂O e CO₂ (*cf.*, Cavalcante *et al.*, 2014; Vernon, 2004).

Os megacristais de feldspato potássico do Plúton Barcelona

apresentam zonamento concêntrico marcado pela concentração de inclusões (principalmente de plagioclásio) alinhadas aos seus contornos externos. Situação semelhante é descrita em outros granitos porfiríticos da Província Borborema por Sousa (1985) e Galindo (1988). Vernon (2004) destaca o arranjo concêntrico das inclusões, paralelo às faces de megacristais euédricos como feição típica de cristalização magmática. Neste caso, as linhas concêntricas internas marcam os limites prévios do megacristal durante seu crescimento (*e.g.*, Moore & Sisson, 2008).

Os cristais de plagioclásio inclusos nos megacristais são composicionalmente similares àqueles encontrados na matriz. A trama das inclusões revela o processo de sintaxia, que evidencia a instabilidade do plagioclásio na presença do feldspato alcalino. O processo é caracterizado pela inversão da geminação e a formação de bordas mais sódicas nos plagioclásios. A interpretação para esse tipo de feição em plagioclásios inclusos indica a cristalização do plagioclásio anterior ao processo de inclusão. No decorrer do processo de inclusão, os grãos de plagioclásio interrompem seu processo de crescimento. Como consequência, os grãos da matriz apresentam comprimento médio superior aos inclusos. Hibbard (1965) e Vernon (1986) destacam ainda a forma euedral dos cristais de plagioclásio inclusos como indicativo de crescimento cristalino no líquido antes de sua incorporação pelos megacristais. O processo de nucleação do feldspato potássico, neste caso, ocorre já com a presença de plagioclásio nos estágios iniciais de sua cristalização.

As inclusões de quartzo raramente apresentam contato com cristais de plagioclásio, o que descaracteriza uma possível explicação genética por

desestabilização metassomática do feldspato potássico, que geraria plagioclásio residual na vizinhança do feldspato potássico. Os raros cristais de quartzo próximos a cristais de plagioclásio têm hábito alongado e se dispõem seguindo os planos cristalográficos do feldspato potássico, tomando o eixo cristalográfico 'c' como referência, marcando, desta forma, a zonação. O mesmo padrão é observado para as inclusões de plagioclásio, biotita e hornblenda. Esta feição pode ser interpretada como um rearranjo da trama, desenvolvida pelo processo de inclusão lenta desses minerais em condições suprasolidus. Já os cristais de quartzo arredondados possuem gênese elucidada por uma variedade de explicações. Por exemplo, Porto Júnior (2002) destaca três principais explicações para gênese desta feição, sendo a primeira por fusão parcial gerando cristais residuais menores; a segunda por englobamento de mineral primário pelo megacristal no processo de crescimento cristalino (suprasolidus); e a terceira como sendo produto de co-precipitação de quartzo e feldspato potássico. Para o Plúton Barcelona, a segunda hipótese parece mais viável, com a nucleação do quartzo em momentos subsequentes ao aparecimento do feldspato potássico, sendo o quartzo englobado a posteriori durante o crescimento cristalino. Contudo, alguns cristais de quartzo localizados mais ao centro dos megacristais podem ter sua gênese explicada pela terceira hipótese: i.e., pela co-precipitação de quartzo e feldspato potássico nos estágios iniciais de cristalização, em que formas irregulares refletem a competição química entre cristais de quartzo e feldspato potássico em crescimento simultâneo (Vernon & Paterson, 2008).

A maioria dos megacristais de

feldspato potássico estudados apresentam zonamento composicional para sódio e bário. Para o último em especial, os padrões são variáveis. Nos megacristais onde a quantidade de inclusões (principalmente plagioclásio e quartzo) é menor, registra-se um zonamento normal, com diminuição de Ba em direção às bordas cristalinas. Contudo, nos megacristais onde a concentração de inclusões é mais expressiva, verifica-se primeiramente um zonamento normal do núcleo em direção às zonas intermediárias dos cristais, seguido por um zonamento inverso junto às bordas cristalinas, com aumento expressivo nas concentrações de Ba. Esse padrão de zonamento acompanha a variação na quantidade de inclusões de plagioclásio e quartzo para um mesmo megacristal: os núcleos e bordas, com teores maiores de Ba, possuem igualmente menor quantidade de inclusões do que as zonas intermediárias, onde os teores de Ba são mais baixos (Figuras 9 e 10).

Long & Luth (1986) demonstram que a variação nos teores de Ba em megacristais de feldspato potássico de granitoides da região de Dixon-Penasco, Novo México (EUA) é influenciada pela maior ou menor cristalização de fases minerais como plagioclásio e quartzo que tendem a influenciar a partição do Ba, aumentando seus teores nos líquidos residuais, bem como pela temperatura e teores de H₂O no magma. Quando feldspato potássico cristaliza-se em magmas graníticos na ausência de outras fases minerais, bário é incorporado preferencialmente neste mineral, o que provoca um zonamento normal. A cristalização de quantidades significativas de plagioclásio em paralelo ao feldspato potássico tende a aumentar a concentração de Ba nos líquidos

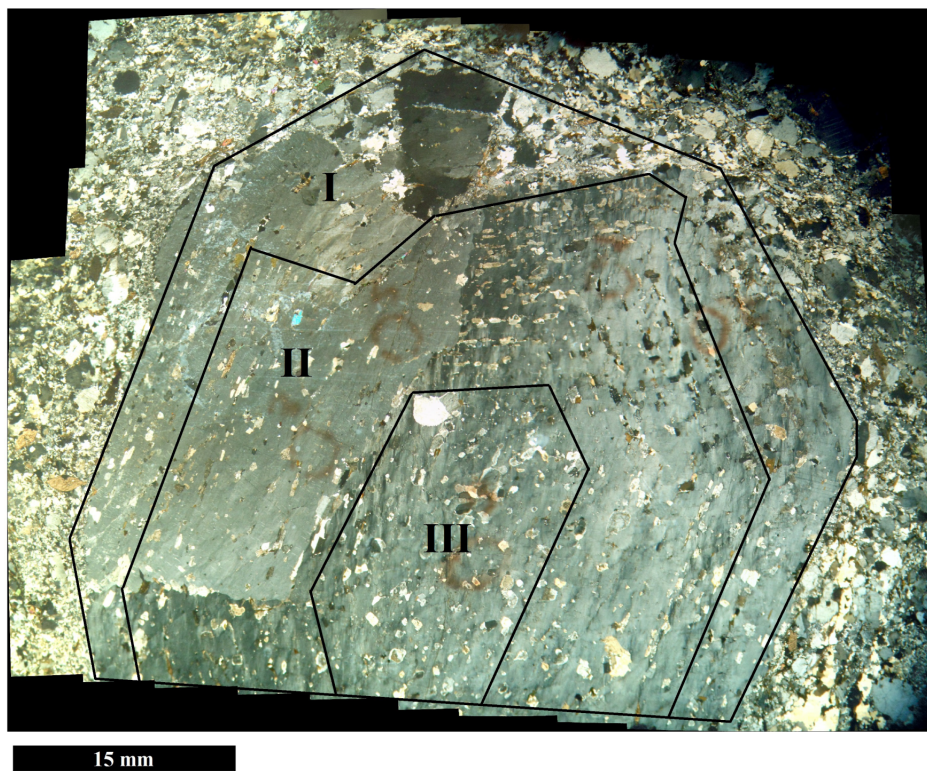


Figura 10: Fotomicrografia de um megacristal de Feldspato potássico demonstrando zonação de densidade de inclusões de plagioclásio. Zona I é caracterizada como de baixa densidade de inclusões no geral; zona II é caracterizada como de alta densidade de inclusões de plagioclásio; e a zona III é caracterizada como de densidade intermediária de plagioclásio e outros minerais.

residuais. Como consequência tem-se a geração de zonamento inverso no Feldspato potássico. Adicionalmente, Cox *et al.* (1996) definiram, com o uso de catodoluminescência, zonas concêntricas em megacristais de feldspato potássico do granito subsolvus Shap (Inglaterra) em que o núcleo possui distribuição oscilatória do número atômico, a zona intermediária, de menor número atômico e mais espessa, com maior quantidade de inclusões de plagioclásio, e a zona mais externa com maior número atômico. A zonação concêntrica reflete a substituição do potássio por elementos menores ou traços (e.g., Ba, Rb, Sr, Cs e Pb) durante o estágio inicial do crescimento. Desta forma, interpreta-se que o desenvolvimento dos megacristais de feldspato potássico do Plúton Barcelona e a geração dos padrões de

zonamento observados são influenciados pela cristalização concomitante de quantidades significativas de plagioclásio que são englobados pelos megacristais durante seu crescimento cristalino.

Por fim, diante das evidências observadas, verifica-se que os megacristais de feldspato potássico do Plúton Barcelona obedecem à sequência de cristalização mineral descrita pelos modelos clássicos realizados de Bowen (1956), Piwinskii (1968), Piwinskii & Wyllie (1968), Whitney (1975) e Clemens & Wall (1981).

5. CONCLUSÕES

De acordo com as informações apresentadas e discutidas neste artigo, é possível concluir que:

1. O Plúton Barcelona é um corpo de dimensões batolíticas que engloba três

fácies petrográficas distintas: a fácies granítica porfirítica, a fácies microgranítica, e a fácies diorítica/quartzo-diorítica, sendo a fácies granítica porfirítica a principal.

2. O granito porfirítico é marcado pela presença de megacristais de feldspato potássico euédrico com zonação marcada por inclusões de plagioclásio \pm quartzo orientadas segundo as faces cristalinas dos megacristais. Outros minerais como biotita, hornblenda, titanita, apatita e allanita aparecem como inclusões menos abundantes, não marcadoras de zonação.

3. Os megacristais de feldspato potássico possuem composição homogênea variando entre $Or_{86}Ab_{13}An_1$ e $Or_{95}Ab_5An_{<1}$ (% mol.), apresentando variação composicional nos teores de BaO e Na_2O da borda para o núcleo do cristal. Quando comparados com cristais da matriz, apresentam teores de BaO mais baixos e Na_2O mais altos.

4. Cristais plagioclásio inclusos nos megacristais e dispersos na matriz mostram composições semelhantes e homogêneas, variando entre $An_{21}Ab_{78}Or_1$ e $An_{32}Ab_{67}Or_2$.

5. A forma dos cristais de plagioclásio inclusos e sua disposição em relação ao megacristal hospedeiro indicam cristalização anterior ao processo de inclusão, que, por sua vez, é controlado pelo processo de crescimento cristalino do feldspato potássico.

6. A cristalização dos megacristais de feldspato potássico evoluiu de forma lenta, finalizando próximo ao ponto eutético. O processo de cristalização evoluiu em condições suprasolidus, com o magma ainda capaz de fluir, resultando em texturas de fluxo magmático, embricamento e cumulos de megacristais.

7. O desenvolvimento dos megacristais de feldspato potássico do Plúton

Barcelona e a geração dos padrões de zonamento observados, em especial para o bário, são influenciados pela cristalização concomitante de quantidades significativas de plagioclásio que são englobados pelos megacristais durante seu crescimento cristalino.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Pró-Reitoria de Graduação da UFRN (PROGRAD) pela concessão de bolsa de iniciação científica a DS Pinheiro. Agradecimentos especiais a Rogério Cavalcante (NANA-CPRM) pelo fornecimento de seções delgadas, análises químicas minerais e material de apoio. Os autores agradecem ainda aos revisores da Revista de Geologia (UFC) pelos apontamentos e sugestões que ajudaram a aprimorar a primeira versão do texto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANGELIM, L. A. A., NESI, J. R., TORRES, H. H. R., MEDEIROS, V. C., SANTOS, C. A., VEIGA JÚNIOR, J. P., MENDES, V. A. 2006. Geologia e Recursos Minerais do Estado do Rio Grande do Norte. Recife: CPRM. 119p.
- BOWEN, N. L. 1928. The evolution of the igneous rocks. London: Princeton Press. 332p.
- CAVALCANTE, R., GALINDO, A. C., SILVA, F. C. A., SOUZA, R. F. 2014. Química mineral e condições de cristalização do Plúton Granítico Barcelona, extremo nordeste da Província Borborema, Nordeste do Brasil. Pesquisas em Geociências, 41 (3): 257-272.
- CAVALCANTE, R. 2015. Petrologia e geologia estrutural do Plutão Granítico Barcelona, Província Borborema, NE do Brasil. PPGG/UFRN, Natal,

- Dissertação, 145p.
- CLEMENS, J. D., WALL, V. J. 1981. Origin and crystallization of some peraluminous (S-type) granitic magmas. *Canadian Mineralogist* 9: 111-131.
- COX, R. A., DEMPSTER, T. J., BELL, B. R., ROGERS, G. 1996. Crystallization of the Shap Granite; evidence from zoned K-feldspar megacrysts. *J. Geol. Soc. London* 153(4): 625-635.
- DEER, W. A., HOWIE, R. A., ZUSSMAN, J. 2013. An introduction to the rock-forming minerals. London, Mineralogical Society, 498p.
- FENN, P. M. 1977. The nucleation and growth of alkali feldspars from hydrous melts. *Canadian Mineralogist* 15: 135-161.
- GALINDO, A. C. 1988. Origem dos megacristais de Feldspato potássico do granito de Monte das Gameleiras, Rio Grande do Norte/Paraíba, Brasil. *Revista Brasileira de Geociências* 18: 417-423.
- HIBBARD, M. J. 1965. Origin of some alkali-feldspar phenocrysts and their bearing on petrogenesis. *Am. J. Sci.*, 263: 245-261.
- JOHNSON, B. R., GLAZNER, A. F., COLEMAN, D. S. 2006. Significance of K-feldspar megacryst size and distribution the Tuolumne Intrusive Suite, California. *Geological Society of America, Abstracts with Programs* 38: 93.
- JOHNSON, B. R., GLAZNER, A. F. 2010. Formation of K-feldspar megacrysts in granodioritic plutons by thermal cycling and late-stage textural coarsening. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 159: 599-619.
- LONG, P. E., LUTH, W. C. 1986. Origin of K-feldspar megacrysts in granitic rocks; implications of a partitioning model for barium. *Am. Mineral* 71(3-4):367-375.
- MEDEIROS, V. C. 2004. Evolução Geodinâmica e Condicionamento Estrutural dos Terrenos Piancó-Alto Brígida e Alto Pajeú, Domínio da Zona Transversal, NE do Brasil. Natal. Tese, Programa de Pós-graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 200p.
- MEDEIROS, V. C. 2013. Geologia da Província Mineral Seridó. I SEMINÁRIO DAS PROVÍNCIAS METALOGENÉTICAS BRASILEIRAS: A Província de W-Au Seridó. Serviço Geológico do Brasil, CPRM, Currais Novos-RN. CD. Pag. 2-35.
- MOORE, J. G., SISSON, T. W. 2008. Igneous phenocrystic origin of K-feldspar megacrysts in granitic rocks from the Sierra Nevada batholith. California. *Geological Society of America. Geosphere*. 4: 2; p. 387-400.
- NASCIMENTO, M. A. L., SOUZA, Z. S., GALINDO, A. C. 2002. Textura granofírica nas rochas do granito do Cabo de Santo Agostinho, província magmática do cabo, Bacia de Pernambuco (nordeste do Brasil): implicações geodinâmicas. *Revista de Geologia*, 15: 101-107.
- NASCIMENTO, M. A. L., MEDEIROS, V. C., GALINDO, A. C. 2008. Magmatismo Ediacarano a Cambriano no Domínio Rio Grande do Norte, Província Borborema, NE do Brasil. *Estudos Geológicos*, 18(1): 4-29.
- NASCIMENTO, M. A. L., GALINDO, A. C., MEDEIROS, V. C. 2014. Ediacaran to Cambrian magmatic suites in the Rio Grande do Norte domain, extreme Northeastern Borborema Province (NE of Brazil): Current knowledge. *Journal of South American Earth Sciences*, 1-19.
- NASCIMENTO, M. A. L., GALINDO, A. C., MEDEIROS, V. C. 2015. Ediacaran to

- Cambrian magmatic suites in the Rio Grande do Norte domain, extreme Northeastern Borborema Province (NE of Brazil): Current knowledge. *Journal of South American Earth Sciences*, 58: 281-299.
- PATERSON, S. R., VERNON, R. H., ZÁK, J. 2005. Mechanical instabilities and accumulations of K-feldspar megacrysts in granitic magma, Tuolumne Batholith, California, USA. In: Köhn, D. (Ed.), *General Contributions 2005. Journal of the Virtual Explorer, Electronic Edition 18, Paper 11441-8142*.
- PIWINSKII, A. J. 1968. Experimental studies of igneous rock series, central Sierra Nevada Batholith, California. *Journal of Geology* 76: 548–570.
- PIWINSKII, A. J., WYLLIE P. J. 1968. Experimental studies of igneous rock series; a zoned pluton in the Wallowa Batholith, Oregon. *Journal of Geology* 76(2): 205–234.
- PORTO Jr., R. 2002. Inclusões em megacristais de microclina em granitos, Complexo Granítico Pedra Branca, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. *Revista Universidade Rural: Série Ciências Exatas e da Terra, Rio de Janeiro*, 21: 37-47.
- SEAMAN, S. J. 2000. Crystal clusters, feldspar glomerocrysts, and magma envelopes in the Atascosa Lookout lava flow, southern Arizona, USA: records of magmatic events. *Journal of Petrology*, v. 41, 693-716.
- SOUZA, Z. S. 1985. Os megacristais de Feldspato potássico do granito Dente de Cavalo de Acari (RN). *Boletim do DG-CCE/UFRN* 9: 38–53. 1985.
- STRECKEISEN, A. L. 1976. To each plutonic rock its proper name. *Earth Science Reviews*, 12: 1-33.
- SWANSON, S. E. 1977. Relation of nucleation and crystal-growth rate to the development of granitic textures. *American Mineralogist* 62: 966–978.
- VANCE, J. A. 1969. On synneusis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 24: 7-29.
- VERNON, R. H. 1986. K-feldspar megacrysts in granites; phenocrysts, not porphyroblasts. *Earth Science Reviews* 23: 1–63.
- VERNON, R. H. 2004. *A practical guide to rock microstructure*. Cambridge, Cambridge University Press.
- VERNON, R. H., Paterson, S. R. 2008. How late are K-feldspar megacrysts in granites? *Lithos* 104: 327–336.
- VERNON, R. H., Collins, W. J. 2011. Structural criteria for identifying granitic cumulates. *J. Geol.* 119: 127-142.
- VOORHEES, P. W. 1992. Ostwald ripening of two-phase mixtures. *Annual Review of Materials Science*, 22, 197-215.
- WINKLER H. G. F., SCHULTES H. 1982. On the problem of alkali feldspar phenocrysts in granitic rocks. *Neues Jahrbuch fuer Mineralogie*. 12:558–564.
- WHITNEY, J. A. 1975. The effects of pressure, temperature, and XH₂O on phase assemblages in four synthetic rock compositions. *Journal of Geology* 83: 1–31.