

Padrões de distribuição de elementos terras-raras nas suítes plutônicas Ediacaranas a Cambrianas no extremo nordeste da Província Borborema, Brasil

Rare-earth distribution patterns on Ediacaran to Cambrian plutonic Suites in the extreme northeast of Borborema Province, Brazil

Dalton da Silva Pinheiro¹ , Dinarte Lucas² , Marcos Antonio Leite do Nascimento¹ , Frederico Castro Jobim Vilalva¹ 

¹Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Geologia, Centro de Ciência Exatas e da Terra, Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, Campus Universitário, Lagoa Nova, 3.000, Caixa Postal 1.502, CEP: 59078-970, Natal, RN, BR (dalton.s.pinhoiro@gmail.com; marcos@geologia.ufrn.br; frederico@geologia.ufrn.br)

²Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geotectônica, São Paulo, SP, BR (dinarte@usp.br)

Recebido em 22 de abril de 2022; aceito em 18 de setembro de 2022.

Resumo

O magmatismo Ediacarano a Cambriano no extremo NE da Província Borborema é representado por seis suítes plutônicas definidas com base em critérios químicos, petrográficos e texturais, sendo estas as suítes Shoshonítica, Calcioalcalina de alto K Porfírica, Calcioalcalina de alto K Equigranular, Calcioalcalina, Alcalina e Alcalina Charnockítica. Este trabalho apresenta e discute os padrões de variação de elementos terras-raras (ETR) para essas suítes, utilizando a abordagem do método de lambda (λ) para obtenção dos coeficientes de forma (*i.e.* $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$) para os padrões de ETR. Os valores médios obtidos para tais coeficientes (notação $\lambda_0/\lambda_1/\lambda_2/\lambda_3$) são: suítes Shoshonítica (5,36/8,68/108,65/-1.438,32), Calcioalcalina de alto K Porfírica (5,34/11,83/141,35/-1.464,81), Calcioalcalina de alto K Equigranular (5,43/9,29/152,15/-1.486,88), Calcioalcalina (4,77/5,44/149,65/-1.383,71), Alcalina (3,85/3,49/174,37/-1.282,47), Alcalina_{Flores} (5,63/4,12/152,31/-1.166,31) e Alcalina Charnockítica (5,60/9,98/128,10/-1.638,25). Os resultados apontam para forte influência no fracionamento de feldspatos nos padrões ETR observados, principalmente no que diz respeito às anomalias de Eu observadas utilizando λ_0 como um marcador de fracionamento. Outros minerais como granada, clino e ortopiroxênio podem apresentar localmente influência sobre os baixos valores de λ_1 e altos valores de λ_3 , enquanto os minerais que particionam álcalis influenciam valores altos de λ_2 .

Palavras-chave: Suítes magmáticas; Coeficientes de forma; Método de Lambda.

Abstract

The Ediacaran to Cambrian magmatism in the extreme NE region of the Borborema Province is represented by six plutonic suites defined based on chemical, petrographic, and textural grounds, namely: shoshonitic, porphyritic high-K calc-alkaline, equigranular high-K calc-alkaline, calc-alkaline, alkaline, and charnockitic alkaline suites. This work discussed the rare earth element (REE) variation patterns for these suites based on the lambda method (λ) to provide the shape coefficients (*i.e.* $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$) of the REE patterns. The average values obtained for such coefficients (notation $\lambda_0/\lambda_1/\lambda_2/\lambda_3$) are: shoshonitic (5.36/8.68/108.65/-1.438.32), porphyritic high-K calc-alkaline (5.34/11.83/141.35/-1.464.81), equigranular high-K calc-alkaline (5.43/9.29/152.15/-1.486.88), calc-alkaline (4.77/5.44/149.65/-1.383.71), alkaline (3.85/3.49/174.37/-1.282.47), alkaline_{Flores} (5.63/4.12/152.31/-1.166.31), and alkaline charnockitic (5.60/9.98/128.10/-1.638.25) suites. Results point to a strong influence of the feldspar fractionation on REE patterns, especially on the Eu anomalies using λ_0 as a fractionation marker. Other minerals such as garnet, clino, and orthopyroxene may have locally played a role on the λ_1 low values and λ_3 high values, while high λ_2 values are influenced by alkali-rich minerals.

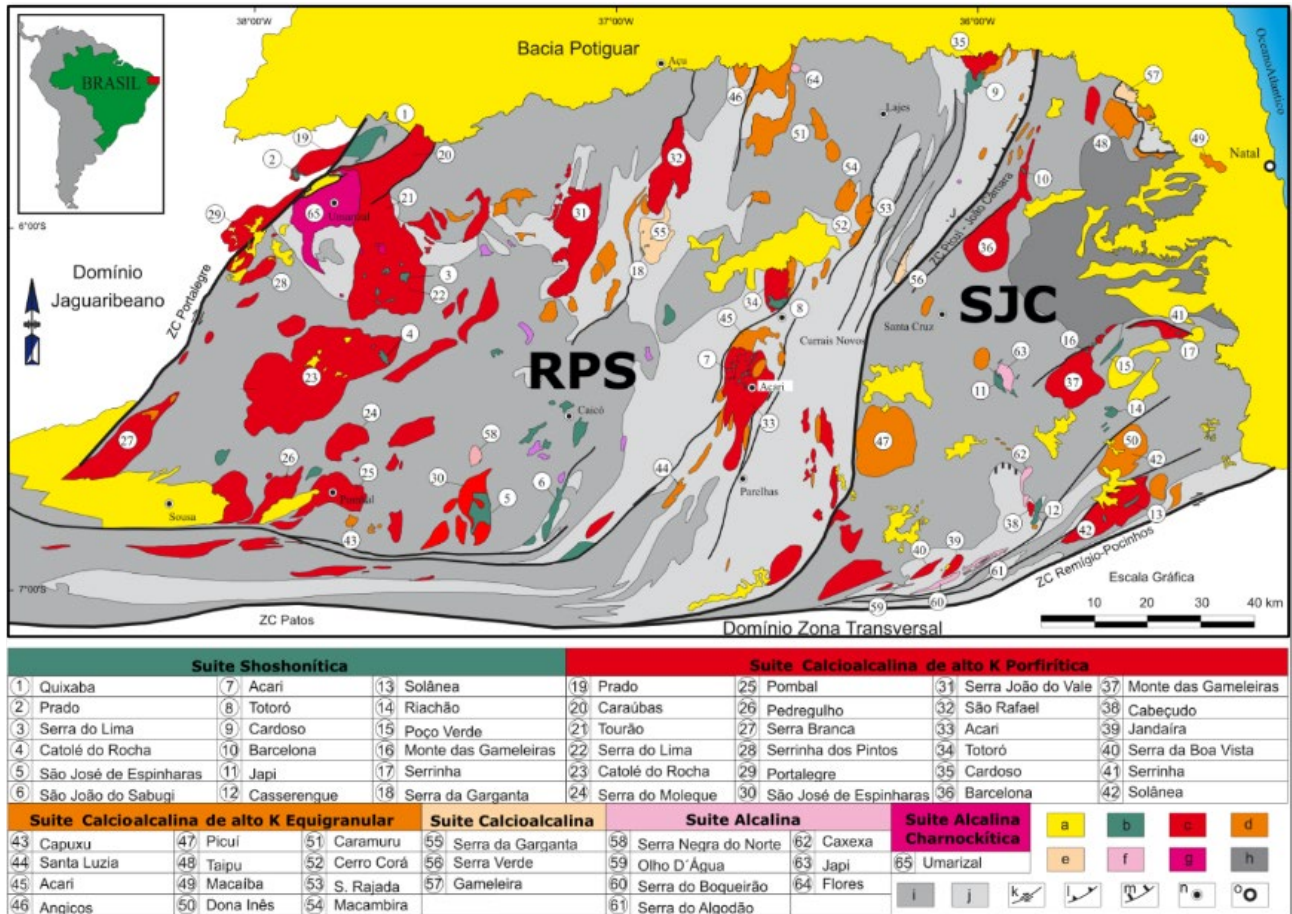
Keywords: Magmatic suites; Shape coefficient; Lambda method.

INTRODUÇÃO

O extremo NE da Província Borborema é marcado a norte do Lineamento Patos pelos domínios Rio Piranhas — Seridó (RPS) e São José do Campestre (SJC), separados pela Zona de Cisalhamento Picuí — João Câmara. Esses domínios apresentam intensa atividade plutônica traduzida por batólitos, *stocks* e diques que mostram características petrográficas, texturais, químicas e geocronológicas distintas (Nascimento et al., 2015; Figura 1). Nesse sentido, esses corpos plutônicos são agrupados em seis Suítes: Shoshonítica (Shos), Calcioalcalina de alto K Porfírica (CalcKP), Calcioalcalina de alto K Equigranular (CalcKEq), Calcioalcalina (Calc), Alcalina (Alc) e Alcalina Charnockítica (AlcCh). Para essas suítes dispõe-se de um bom volume de dados litoquímicos obtidos por trabalhos anteriores (Tabelas 1 e 2), os quais apresentam caracterizações litoquímicas gerais das suítes (e.g.

Sial, 1987; Araújo et al., 1993; Jardim de Sá, 1994; Galindo et al., 1997; Angelim et al., 2006; Nascimento et al., 2015) ou específicas para um tipo de suítes (e.g. Hollanda et al., 2003; Campos et al., 2016; Dalan et al., 2019). Especialmente no que tange aos Elementos Terras Raras (ETR), não há, até o momento, um estudo comparativo entre as diversas suítes, bem como uma investigação individualizada para essas.

As variações e as concentrações dos ETR em rocha-total são importantes ferramentas petrogenéticas no estudo de rochas ígneas, especialmente como traçadores das áreas-fontes e processos de diferenciação magmática envolvidos (Hanson, 1978, 1980; Henderson, 1984; Rollinson e Pease, 2021). Tal como previamente apresentado, a área situada ao longo dos Domínios RPS e SJC tem como importante aspecto a ocorrência de um extenso e volumoso plutonismo granítico *lato sensu*, de idades ediacaranas a cambrianas, agrupado em diferentes suítes (Nascimento et al., 2015) que



ZC: Zona de Cisalhamento; RPS: Rio Piranhas — Seridó; SJC: São José do Campestre; a: coberturas meso-cenozoicas; b: Suite Shoshonítica; c: Suite Calcioalcalina de alto K Porfírica; d: Suite Calcioalcalina de alto K Equigranular; e: Suite Calcioalcalina; f: Suite Alcalina; g: Suite Alcalina Charnockítica; h: Embasamento gnáissico-migmatítico arqueano; i: Embasamento gnáissico migmatítico paleoproterozoico; j: Grupo Seridó; k: Zonas de Cisalhamento transcorrentes neoproterozoicas; l: Zonas de Cisalhamento contracionais e transpressivas neoproterozoicas; m: Zonas de Cisalhamento extensionais neoproterozoicas; n: cidades; o: capital do estado.

Figura 1. Feições geológicas do extremo NE da Província Borborema, com destaque para o magmatismo ediacarano a cambriano (com discriminação das suítes propostas por Nascimento et al., 2015).

Tabela 1. Sumarização dos corpos estudados das suítes Shoshonítica e Calcioalcalina de alto K Porfírica e seus respectivos trabalhos de referência e fonte dos dados utilizados.

Suítes	Corpos estudados	Referências
Shos	Quixaba (9 amostras)	Galindo (1993)
	Catolé do Rocha (3 amostras)	Medeiros et al. (2007)
	Serra do Lima (1 amostra)	Galindo (1993)
	Prado (5 amostras)	Galindo (1993)
	São José do Espinharas (35 amostras)	Gonzalez (1984), Jardim de Sá (1994) e Campos (1997)
	São João do Sabugi (19 amostras)	Jardim de Sá (1994)
	Acari (10 amostras)	Jardim de Sá (1994)
	Totoró (11 amostras)	Jardim de Sá (1994)
	Monte das Gameleiras (7 amostras)	Galindo (1982)
	Serrinha (10 amostras)	Dias (2006)
	Poço Verde (3 amostras)	Dantas (1997)
	Barcelona (1 amostra)	dados cedidos por A.C. Galindo
	Casserengue (9 amostras)	Nascimento (2000)
	Japi (12 amostras)	Hollanda (1998)
	Pitombeira (4 amostras)	Oliveira (2014)
	Serra da Macambira (3 amostras)	Silva (2011)
	Serra do Caramuru (9 amostras)	Macêdo-Filho e Souza (2016)
	Tapuio (4 amostras)	Macêdo-Filho e Souza (2016)
	CalcKP	Tourão (15 amostras)
Caraúbas (6 amostras)		Galindo (1993)
Prado (6 amostras)		Galindo (1993)
Serra do Lima (4 amostras)		Galindo (1993)
Catolé do Rocha (12 amostras)		Medeiros et al. (2007)
São José do Espinharas (8 amostras)		Jardim de Sá (1994) e Campos (1997)
Acari (17 amostras)		Jardim de Sá (1994)
Totoró (3 amostras)		Jardim de Sá (1994)
Barcelona (18 amostras)		Cavalcante (2015)
Serrinha (14 amostras)		Dias (2006)
Monte das Gameleiras (24 amostras)		Galindo (1982) e Antunes et al. (2000)
Japi (6 amostras)		Hollanda (1998)
Serra Boa Vista (8 amostras)		Nascimento (1998)
Jandaíra (4 amostras)		Nascimento (1998)
Cabeçudo (8 amostras)		Nascimento (2000)
Pitombeira (11 amostras)		Oliveira (2014)
Serra da Macambira (3 amostras)		Silva (2011)

Shos: Suíte Shoshonítica; CalcKP: Suíte Calcioalcalina de alto K Porfírica.

carecem de um estudo litoquímico comparativo e detalhado com foco nos ETR. Buscando preencher essa lacuna do conhecimento, o objetivo principal deste trabalho foi realizar, a partir de dados de ETR compilados da literatura, uma análise comparativa entre as suítes magmáticas do RPS e do SJC, tendo como objetivo específico a análise dos padrões de ETR a partir dos coeficientes de forma λ (O'Neill, 2016), identificando as similaridades e as dissimilaridades entre as referidas suítes magmáticas. Dessa forma, este trabalho teve como objetivo principal demonstrar a utilização do método lambda em rochas granitoides do Domínio Rio Grande do Norte destacando a comparação entre os padrões

dos coeficientes das suítes em questão. Outrossim, analisar esses padrões em conjunto com dados de alcalinidade e definir como se dá a influência de minerais formadores de rocha nos coeficientes analisados, bem como de minerais portadores de ETR como elemento principal.

MATERIAIS E MÉTODOS

Os dados de ETR analisados fazem parte de uma compilação iniciada por Nascimento et al. (2015) e alimentada com dados de trabalhos posteriores (e.g. Cavalcante, 2015;

Tabela 2. Sumarização dos corpos estudados das suítes Calcioalcalina de alto K Equigranular, Calcioalcalina, Alcalina e Alcalina Charnockítica e seus respectivos trabalhos de referência e fonte dos dados utilizados.

Suítes	Corpos estudados	Referências
CalcKEq	Tourão (1 amostra)	Galindo (1993)
	Caraúbas (2 amostras)	Galindo (1993)
	Prado (4 amostras)	Galindo (1993)
	Serra do Lima (5 amostras)	Galindo (1993)
	Catolé do Rocha (3 amostras)	Medeiros et al. (2007)
	Acarí (5 amostras)	Jardim de Sá (1994)
	Angicos (9 amostras)	Jardim de Sá (1994)
	Picuí (20 amostras)	Silva (1993)
	Barcelona (6 amostras)	Cavalcante (2015)
	Monte das Gameleiras (10 amostras)	Galindo (1982) e Antunes et al. (2000)
	Serrinha (4 amostras)	Dias (2006)
	Japi (12 amostras)	Hollanda (1998)
	Caxexa (9 amostras)	Nascimento (1998)
	Serra Boa Vista (4 amostras)	Nascimento (1998)
	Dona Inês (17 amostras)	McMurry et al. (1987)
	Taipu (14 amostras)	Oliveira (2014)
	Serra da Macambira (17 amostras)	Silva (2011)
	Capuxu (7 amostras)	Medeiros (2008)
	Arruda Câmara (4 amostras)	Medeiros (2008)
	Serra da Rajada (15 amostras)	Costa (2015)
Serra do Caramuru (14 amostras)	Macêdo-Filho e Souza (2016)	
Tapuio (2 amostras)	Macêdo-Filho e Souza (2016)	
Alc	Serra Negra do Norte (14 amostras)	Campos (1997)
	Caxexa (21 amostras)	Nascimento (2000)
	Serra do Boqueirão (4 amostras)	Nascimento (1998)
	Serra do Algodão (7 amostras)	Nascimento (1998)
	Olho D'água (4 amostras)	Nascimento (1998)
	Japi (19 amostras)	Hollanda (1998)
AlcCh	Flores (15 amostras)	Souza (2016)
	Umarizal (13 amostras)	Galindo (1993)
Calc	Serra da Garganta (10 amostras)	Nascimento et al. (2018)
	Gameleira (11 amostras)	Oliveira (2014)
	Serra Verde (10 amostras)	Costa (2009)

CalcKEq: Calcioalcalina de alto K Equigranular; Alc: Alcalina; AlcCh: Alcalina Charnockítica; Calc: Calcioalcalina.

Costa, 2015; Macêdo-Filho e Souza, 2016; Souza, 2016; Nascimento et al., 2018), em que se unificou os dados das seis suítes identificadas no Domínio Rio Grande do Norte (Figura 1 e Tabelas 1 e 2). Inicialmente foram utilizadas as concentrações em partes por milhão (ppm) não normalizadas, em que se observou, sobretudo, o enriquecimento das amostras em ETR totais em relação à crosta e à média dos granitoides, usando a somatória destes para construção de *boxplots* comparativos para as seis suítes analisadas. Posteriormente, esses dados foram normalizados para os valores do condrito de Evensen et al. (1978) para a construção dos tradicionais padrões de ETR. Os dados normalizados foram utilizados ainda para a obtenção dos coeficientes de forma (*i.e.* λ_0 ; λ_1 ; λ_2 ; e λ_3) gerados pelo método lambda

(λ) introduzido por O'Neill (2016; ver também Anenburg, 2020), os quais foram utilizados para geração de *boxplots* e de gráficos comparativos.

De forma geral, os dados referentes aos padrões de ETR são comumente apresentados em um gráfico no qual o eixo das abscissas representa o número atômico dos elementos analisados, e o eixo das ordenadas, as concentrações normalizadas a determinado condrito. Esses dados são apresentados em forma de uma linha, podendo ser decomposta em funções matemáticas, resumidas neste trabalho em funções de primeiro, segundo e terceiro grau (ou senoidal). As funções descritas podem ser representadas como polinômios não ortogonais. Todavia, ao se modificar um dos coeficientes multiplicativos do polinômio (a, b, c e d), a

alteração do componente de terceiro grau (senoidal) afeta a forma dos componentes de segundo e primeiro grau, bem como a modificação do componente de segundo grau afeta o de primeiro. Dessa forma, não se tem polinômios independentes em uma função não ortogonal com a seguinte forma (Equação 1):

$$Y(X) = aX^3 + bX^2 + cX + d \quad (1)$$

Nesse contexto, um polinômio não ortogonal para os padrões de ETR não é o mais adequado a ser utilizado. Alternativamente, foi utilizado um polinômio ortogonal no qual cada polinômio da função é independente como uma nova função, tendo como forma (Equação 2):

$$Y(X) = a + bf_1(X) + cf_2(X) + df_3(X) + [\dots] + nf_n(X) \quad (2)$$

A visualização de padrões ETR em um grande conjunto de dados analíticos é um fator limitante na interpretação por conta da sobrecarga visual desses quando comparados na sobreposição (Anenburg, 2020). Assim, O'Neill (2016) desenvolveu um método de representação gráfica a partir da decomposição em polinômios ortogonais com incrementos f_1, f_2, f_3, f_4, f_n baseados no raio iônico, como uma função normalizadora na forma (Equação 3):

$$\ln([ETR]_N) = \lambda_0 + \lambda_1 f_1 + \lambda_2 f_2 + \lambda_3 f_3 + \lambda_4 f_4 + [\dots] + \lambda_n f_n \quad (3)$$

Os incrementos são os seguintes:

$$\begin{aligned} f_1 &= (r^{3+VIII} - \beta) \\ f_2 &= (r^{3+VIII} - \gamma_1)(r^{3+VIII} - \gamma_2) \\ f_3 &= (r^{3+VIII} - \delta_1)(r^{3+VIII} - \delta_2)(r^{3+VIII} - \delta_3) \\ f_4 &= (r^{3+VIII} - \epsilon_1)(r^{3+VIII} - \epsilon_2)(r^{3+VIII} - \epsilon_3)(r^{3+VIII} - \epsilon_4) \end{aligned}$$

Em que:

$[ETR]_N$: elemento normalizado ao condrito;

λ : coeficiente de forma;

f_n : polinômio ortogonal predefinido para;

r^{3+VIII} : raio iônico de coordenação octaédrica para cátions trivalentes (Shannon, 1976);

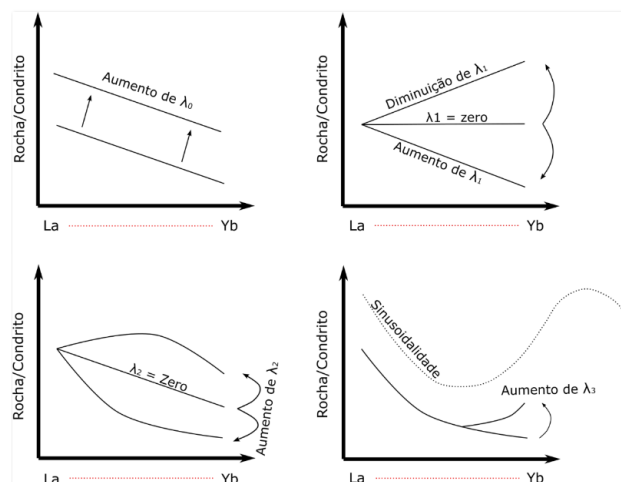
$\beta, \gamma_n, \delta_n$ e ϵ_n : constantes pré-calculadas nas quais a derivação ortogonal da raiz é exposta por Anenburg e Williams (2021).

O fato de os polinômios serem ortogonais garante a independência dos valores dos coeficientes de forma, mesmo que estejam relacionados ao mesmo conjunto de amostras, sendo $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ etc. não correlacionados entre si na função matemática. Dessa forma, é possível afirmar que o método lambda consiste em normalizar por meio de artifícios matemáticos os dados normalizados aos valores do condrito.

A maioria dos padrões de ETR é facilmente representada por quatro ou até menos coeficientes de forma, mas a

relação entre eles não é tão clara. O'Neill (2016) destaca que muitas vezes os gráficos λ_1 versus λ_2 são mais instrutivos, pois demonstram a relação entre a curvatura e a inclinação. Os coeficientes em discussão podem ser equivalentes a parâmetros do gráfico, em termos simples de acordo com o que foi exposto por O'Neill (2016), em que λ_0 representaria a média da abundância de ETR normalizada ao condrito; λ_1 representaria a função de inclinação linear, apontando a razão Elementos Terras Raras leves (ETRL) e Elementos Terras Raras pesados (ETRP); λ_2 representaria a curvatura dada pela função quadrática, que está relacionada ao grau de alcalinidade/conteúdo de sílica da rocha; e λ_3 representaria a inflexão do fim do padrão ou crescimento na influência do ETRP, indicando atuação da função sinusoidal (sinusoidalidade; Figura 2). O método lambda pode ser executado usando os dados suplementares de O'Neill (2016), o pacote denominado Pyrolite (Williams et al., 2020) ou ALambdaR (Anenburg, 2020) e BLambdaR (Anenburg e Williams, 2021). O ALambdaR e o BLambdaR são ferramentas interativas online que permitem o cálculo dos coeficientes de forma lambda. Para o banco de dados utilizado neste trabalho foi utilizado o pacote Pyrolite em ambiente *python* por trabalhar com a entrada de valores de concentração de ETR para gerar o coeficiente lambda de várias amostras simultaneamente.

A justificativa para a utilização do método está relacionada à quantificação de parâmetros visuais que eventualmente não seriam possíveis de serem observados em razão de sua complexidade, como curvatura e sinusoidalidade (Anenburg, 2020). Os parâmetros tradicionais



λ_0 : incremento vertical do gráfico, indicando o conteúdo total de Elementos Terras Raras; λ_1 : inclinação da reta, indicando Elementos Terras Raras leves/Elementos Terras Raras pesados; λ_2 : curvatura do gráfico; λ_3 : sinusoidalidade indicando a deflexão no final do gráfico.

Figura 2. Representação do significado dos coeficientes de forma nos padrões dos gráficos de Elementos Terras Raras normalizados.

de análise de ETR são baseados em razões de elementos (*e.g.*, La_N/Yb_N , Sm_N/Gd_N) ou soma do total de elementos, mas essa prática envolve muitos problemas associados. Por exemplo, ao analisar a razão de ETRL/ETRP, muitos autores utilizam La_N/Yb_N , Ce_N/Yb_N ou La_N/Lu_N de forma que não há padronização. Adicionalmente, ao se analisar a soma, no caso de existirem elementos não detectados, a quantificação do enriquecimento relativo em ETRL ou ETRP seria comprometida. Portanto, o padrão é parcialmente mantido, mas um dos parâmetros seria eventualmente afetado. Anenburg (2020) aponta que a escolha do elemento a ser confrontado pode levar ainda a interpretações enviesadas dependendo da hipótese discutida. Outro aspecto destacado é que como o eixo das ordenadas para padrões de ETR estão em escala logarítmica, a escolha de diferentes elementos costuma causar uma grande diferença nas proporções.

Para melhor visualização dos dados, estes foram incorporados a um gráfico tipo *boxplot*. Para melhor entendimento do gráfico, entende-se por quartil um valor que divide igualmente o conjunto de dados em quatro partes iguais, ou seja, essas partes são 1/4 da amostra total (Figura 3). Sendo assim, um conjunto de dados tem três quartis formando no *boxplot* a base da “caixa”, a mediana e a tampa da “caixa” (Figura 3). Outro elemento presente no gráfico são as hastes que definem os limites das partes inferiores e superiores, representando, dessa forma, 1/4 dos dados abaixo e 1/4 dos dados acima da “caixa” (Langford, 2006). Os *outliers* (representados por losangos) são valores discrepantes da base de dados, e os círculos vazados representam a média de todo o conjunto de dados (Figura 3).

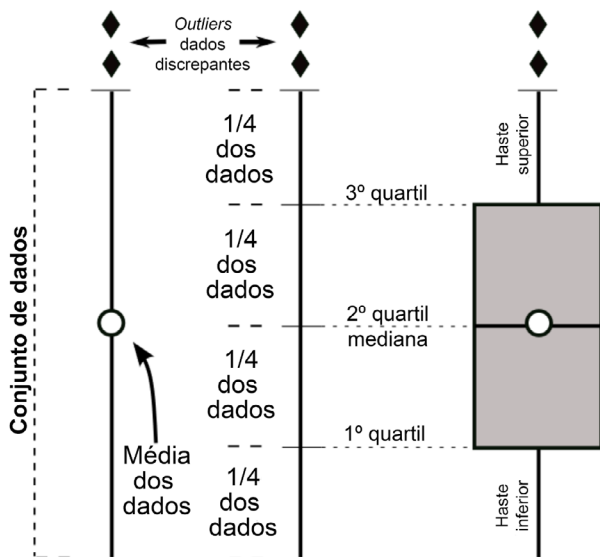


Figura 3. Representação esquemática dos elementos estatísticos de um *boxplot*.

CONTEXTUALIZAÇÃO GEOLÓGICA

O extremo NE da Província Borborema é delimitado pela Zona de Cisalhamento Patos (ao sul), pela Zona de Cisalhamento Portalegre (a oeste) e pelas rochas sedimentares da Bacia Potiguar, nas porções leste e norte. Essa região é subdividida em dois domínios principais: RPS e SJC. Ambos os domínios são compostos de um embasamento gnáissico de idade arqueana a paleoproterozoica, sobrepostas a seqüências metassedimentares relacionadas ao Grupo Seridó, com eles afetados por um volumoso plutonismo datado do Ediacarano ao Cambriano (Nascimento et al., 2015).

A primeira classificação com referência às rochas plutônicas ediacaranas a cambrianas na Província Borborema baseou-se no contexto tectônico e foi proposta por Almeida et al. (1967), classificando assim os granitoides em sin-tectônicos e tardi-tectônicos. A evolução na classificação dessas rochas ocorreu com trabalhos que aprofundaram o estudo em aspectos petrográficos e estruturais (Brito Neves e Pessoa, 1974; Jardim de Sá et al., 1981). Estudos mais detalhados de classificação litoquímica foram conduzidos por diversos autores (*e.g.* Sial, 1987; Araújo et al., 1993; Jardim de Sá, 1994; Galindo et al., 1997; Ferreira et al., 1998; Hollanda, 1998; Nascimento, 1998, 2000) que organizaram os granitoides de forma sistemática de acordo com aspectos litoquímicos e petrográficos.

Nascimento et al. (2015) definiram seis suítes (Figura 1), especificamente para os Domínios RPS e SJC, de acordo com os aspectos químicos, petrográficos (Tabela 3) e geocronológicos: Suítes Shos (gabros, dioritos a quartzo-monzonitos); Suítes CalcKP (monzo a sienogranitos porfíricos); Suítes CalcKEq (monzo a sienogranitos equigranulares); Suítes Calc (granodioritos a tonalitos); Suítes Alc (álcali-feldspato granitos e subordinadamente sienogranitos a quartzo-álcali-feldspato-sienitos) e Suítes AlcCh (quartzo mangerito a charnockito).

ELEMENTOS TERRAS RARAS NAS SUÍTES MAGMÁTICAS

O estudo do padrão de distribuição e caracterização dos ETR é relevante para as discussões relacionadas à origem e ao fracionamento das rochas estudadas. Isso se deve ao fato de os ETR estarem amplamente dispersos nas rochas e a estabilidade ser elevada, permitindo a manutenção de padrões de distribuição nas rochas, mesmo quando submetidas a processos metamórficos e/ou magmáticos. Outra característica inerente aos ETR que os torna extremamente úteis nos estudos petrogenéticos é a similaridade química desses elementos. Suas estruturas de elétrons de valência são análogas, e os raios catiônicos variam quadraticamente de La^{+3} a Lu^{+3} em razão da contração dos ETR (Seitz et al., 2007; Raymond

Tabela 3. Características gerais das suítes magmáticas ediacaranas a cambrianas nos domínios Rio Piranhas – Seridó e São José do Campestre.

Suítes	Caracterização química	Mineralogia	Litologia
Shoshonítica	SiO ₂ = 47,38–65,71% K ₂ O + Na ₂ O = 4,32–10,76% CaO = 2,87–8,89% ΣETR = 93,7–823,34 ppm La _N /Yb _N = 8,20–80,79 Eu/Eu* = 0,53–2,05	P = [K-feldspato, plagioclásio (<i>oligoclásio</i>) augita, diopsídio; hiperstênio, hornblenda (Fe-edenita - hastingsita), biotita]; A = [titanita, magnetita/ilmenita; zircão, apatita]	Gabros, dioritos a quartzo-monzonitos
Calcioalcalina de alto K Porfírtica	SiO ₂ = 62,35–76,09% K ₂ O + Na ₂ O = 7,24–10,55% CaO = 0,77–3,84% ΣETR = 152,31–919,17 ppm La _N /Yb _N = 7,38–165,39 Eu/Eu* = 0,35–1,05	P = [K-feldspato, plagioclásio (<i>oligoclásio</i>), quartzo, hornblenda (Fe-edenita - hastingsita), biotita]; A = [titanita, allanita, epidoto, zircão, apatita, magnetita/ilmenita, turmalina]	Monzogranitos a sienogranitos de textura porfírtica
Calcioalcalina de alto K Equigranular	SiO ₂ = 64,55–75,40% K ₂ O + Na ₂ O = 7,78–9,83% CaO = 0,63–2,68% ΣETR = 134,1–856,21 ppm La _N /Yb _N = 5,80–175,41 Eu/Eu* = 0,19–0,84	P = [K-feldspato, plagioclásio (<i>oligoclásio</i>), quartzo, hornblenda (Fe-edenita - hastingsita), biotita]; A = [titanita, allanita, epidoto, zircão, apatita, magnetita/ilmenita]	Monzogranitos a sienogranitos de textura equigranular
Calcioalcalina	SiO ₂ = 60,5–72,8% K ₂ O + Na ₂ O = 5,62–9,35% CaO = 1,08–4,5% ΣETR = 53,95–249,72 ppm La _N /Yb _N = 6,50–39,60 Eu/Eu* = 0,45–2,15	P = [plagioclásio (<i>andesina</i>), quartzo, K-feldspato, biotita, anfibólio]; A = [titanita, allanita, epidoto, apatita, zircão, opacos (?)]	Granodioritos a tonalitos
Alcalina	SiO ₂ = 67,71–74,87% Na ₂ O + K ₂ O = 8,26–11,72% CaO = 0,16–1,81% ΣETR _{Outros} = 22,80–120,66 ppm ΣETR _{Flores} = 122,50–554,40 ppm La _N /Yb _N Outros = 4,12–54,30 La _N /Yb _N Flores = 4,59–30,52 Eu/Eu* _{Outros} = 1,22–2,95 Eu/Eu* _{Flores} = 0,24–0,52	P = [plagioclásio (<i>albita</i>), quartzo, egirina-augita, Na-augita, hedenbergita, riebeckita, granada]; A = [titanita, apatita, zircão, allanita, magnetita/ilmenita]	Álcali-feldspato granito e sienogranitos a quartzo-álcali-feldspato sienito subordinados
Alcalina Charnockítica	SiO ₂ = 63,62–75,06% Na ₂ O + K ₂ O = 8,62–10,36% CaO = 1,11–2,30 ΣETR = 208,32–678,71 ppm La _N /Yb _N = 12,46–61,75 Eu/Eu* = 0,41–1,24	P = [plagioclásio (<i>oligoclásio</i>), quartzo, faialita, Fe-hiperstênio, hedenbergita, Fe-edenita, biotita]; A = [zircão, apatita, allanita, magnetita/ilmenita]	Quartzo-mangeritos a charnoquitos

P: mineralogia principal; A: mineralogia acessória; ETR: Elementos Terras Raras.

Fonte: dados conforme exposto por Nascimento et al. (2015) e trabalhos posteriores: Cavalcante (2015), Costa (2015), Macêdo-Filho e Souza (2016), Souza (2016) e Nascimento et al. (2018).

et al., 2010). Sob condições típicas, com exceção de Eu e Ce, os ETR ocorrem como cátions trivalentes na maioria dos minerais, com uma mudança regular nos raios iônicos (para ETR trivalentes) na coordenação octaédrica de 1,03 Å para La e 0,86 Å para Lu (Shannon, 1976). Assim, há preferência pela entrada desses elementos em sítios iônicos com raio próximo a 1,0 Å.

A aplicação de parâmetros relacionados aos ETR em problemas petrogenéticos está centrada na evolução de rochas ígneas, em que processos como fusão parcial de material cristal ou mantélico, cristalização fracionada e/ou mistura de magmas estão envolvidos (Henderson, 1984). Nesse sentido, os processos evolutivos de um magma podem ser interpretados por meio dos padrões de fracionamento de ETR.

Portanto, o uso de fracionamento de ETR para os dados analisados, ainda utilizando a abordagem clássica, será expresso pela razão dos elementos normalizados: ETR total (La_N/Yb_N e Ce_N/Yb_N), ETRL (La_N/Sm_N) e ETRP (Gd_N/Lu_N).

Os ETR são classificados como pertencentes ao grupo dos lantanídeos (Grupo 3). São principalmente trivalentes, embora possam também apresentar-se bi- ou tetravalentes em sistemas naturais (e.g. Eu^{+2} e Ce^{+4}). O entendimento das condições *redox*, especialmente para o Eu, é essencial para rastrear alguns processos evolutivos na cristalização das rochas estudadas. Isso é explicado pelo fato de que, em um ambiente oxidante, o Eu^{+2} se transforma em Eu^{+3} . Drake e Weill (1975) sugerem a relação Eu^{+2}/Eu^{+3} em feldspatos para estabelecer condições *redox* na forma definida por Drake (1975) pela Equação 4:

$$\log fO_2 = -4 \log ([Eu^{+2}] / [Eu^{+3}]) + A \quad (4)$$

Em que:

A: uma constante definida;

Eu^{+2} e Eu^{+3} : as concentrações de Eu divalente e trivalente, respectivamente, medidos no magma ou no plagioclásio.

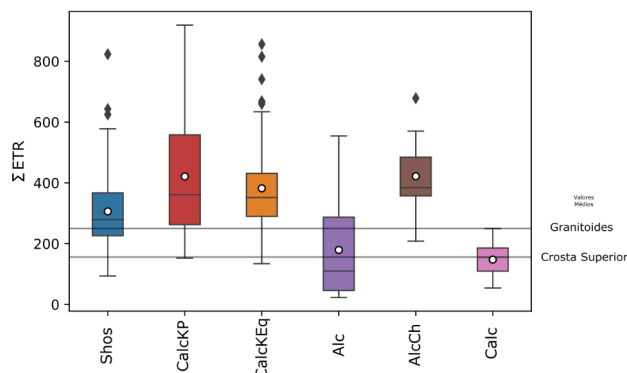
Assim, o feldspato não retém Eu no sítio de Ca^{+2} e, conseqüentemente, há uma diminuição no conteúdo de Eu.

Um aspecto importante na interpretação dos padrões de ETR é a distribuição dos conteúdos nos minerais e sua capacidade de afetar a concentração nas rochas. Para isso, é possível analisar essas variações observando o coeficiente de partição (Kd) dos minerais presentes. Assim, pode-se destacar como principais aspectos: a influência da granada, dos clinopiroxênios e do zircão no favorecimento do fracionamento dos ETRP em relação aos ETRL; a influência da allanita, da titanita e da apatita no fracionamento dos ETRL em relação aos ETRP; anomalias negativas de Eu, que podem indicar fracionamento ou fusão parcial de feldspatos, ao passo que anomalias positivas podem estar relacionadas ao fracionamento ou fusão parcial de hornblenda, piroxênios, granada e apatita ou ao baixo fracionamento de feldspatos.

As concentrações médias de ETR em diferentes rochas e reservatórios mais relevantes para os fins deste trabalho incluem a média da crosta superior (156 ppm; Taylor e McLennan, 1985) e em granitoides (250 ppm; Herrmann, 1970), os quais são comparados, na Figura 4, com os teores verificados para as diferentes suítes magmáticas dos Domínios RPS e SJC.

Suíte Shoshonítica (Shos)

Os dados de ETR para as rochas nesse conjunto mostram enriquecimento dos ETR (93,70 – 823,34 ppm; média 306,17 ppm) em comparação com as médias da crosta superior e de granitoides (Figura 4). As rochas da Suíte



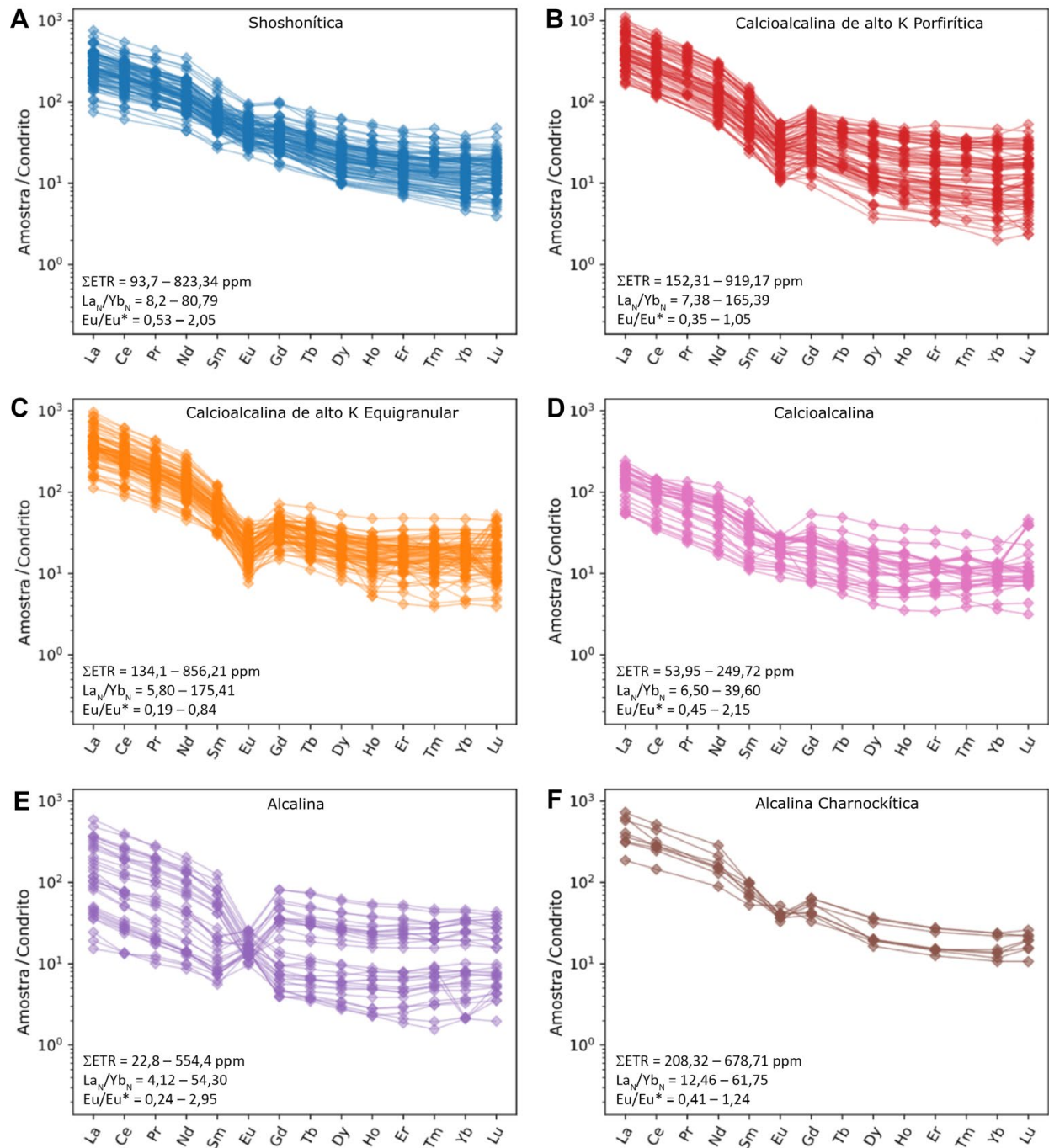
Shos: Suíte Shoshonítica; CalcKP: Suíte Calcioalcalina de alto K Porfírica; CalcKEq: Suíte Calcioalcalina de alto K Equigranular; Alc: Suíte Alcalina; AlcCh: Suíte Alcalina Charnockítica; Calc: Suíte Calcioalcalina.

Figura 4. Teores totais (em ppm) de Elementos Terras Raras das seis suítes pesquisadas em gráficos do tipo *boxplot* indicando a variabilidade fora dos quartis superiores e inferiores. Análises caracterizadas como *outliers* são indicadas como losangos pretos, enquanto os valores médios para cada suíte são representados por círculos brancos. As linhas horizontais representam a média da Crosta Superior (Taylor e McLennan, 1985) e de granitoides (Herrmann, 1970) para fins comparativos.

Shos mostram um padrão de distribuição regular de ETRL e ETRP (Figura 5), com elevada abundância de ETRL e menor de ETRP. As razões La_N/Sm_N (2,31 – 8,59) indicam o fracionamento relativo de ETRL, ao passo que as razões Gd_N/Lu_N (1,57 – 6,32) indicam o fracionamento de ETRP. Os padrões de ETR normalizados ao condrito registram um declive suave, com razões de La_N/Yb_N (8,20 – 80,79) e Ce_N/Yb_N (6,23 – 54,99) confirmando o enriquecimento relativo dos ETRL em relação aos ETRP. Apresentam anomalias de Eu negativas (e menos frequentemente positivas) fracas a moderadas ($Eu/Eu^* = 0,53 – 2,05$), negativas e positivas menos frequentes.

Suíte Calcioalcalina de alto K Porfírica (CalcKP)

Os dados de ETR para as rochas da Suíte CalcKP apresentam enriquecimento em ETR (152,31 – 919,17 ppm; média 421,04 ppm) em relação à crosta superior e à média de granitoides (Figura 4). As rochas da Suíte CalcKP demonstram um padrão de distribuição regular de ETRL e ETRP, com maior abundância de ETRL e menor de ETRP (Figura 5). As razões La_N/Sm_N (3,79 – 10,96) apontam para o fracionamento de ETRL. As razões de La_N/Yb_N (7,38 – 165,39) e Ce_N/Yb_N (4,93 – 117,94) reforçam o enriquecimento relativo dos ETRL sobre os ETRP. Os resultados são similares aos padrões de ETR observados para a Suíte Shos, indicando um fracionamento moderado. O conjunto CalcKP mostra anomalias negativas moderadas de Eu ($Eu/Eu^* = 0,35 – 1,05$).



ETR: Elementos Terras Raras.

Figura 5. Padrões dos Elementos Terras Raras normalizados ao condrito de Evensen et al. (1978) para as suítes estudadas: (A) Shoshonítica; (B) Calcioalcalina de alto K Porfírica; (C) Calcioalcalina de alto K Equigranular; (D) Calcioalcalina; (E) Alcalina; (F) Alcalina Charnockítica. Dados compilados dos autores conforme Tabelas 1 e 2.

Suíte Calcioalcalina de alto K Equigranular (CalcKEq)

Os dados de ETR para as rochas da Suíte CalcKEq revelam um enriquecimento relativo (134,10 – 856,21 ppm; média

382,06 ppm) em comparação aos dados da crosta superior e à média dos granitoides (Figura 4). Os padrões de ETR para essa suíte demonstram similaridade com aqueles da Suíte CalcKP, apontando para um enriquecimento relativo de ETRL em relação aos ETRP (Figura 5), com razões La_N/Yb_N /

Sm_N entre 3,45 e 10,17, La_N/Yb_N entre 5,80 e 175,41 e Ce_N/Yb_N entre 4,60 e 111,44. Registram ainda anomalias negativas bem marcadas de Eu ($Eu/Eu^* = 0,19 - 0,84$).

Suíte Calcioalcalina (Calc)

Os dados de ETR para a Suíte Calc mostram teores semelhantes (53,95 – 249,72 ppm; média 147,50 ppm) em relação à crosta superior e valores empobrecidos quanto à média de granitoides (Figura 4). Os padrões normalizados ao condrito (Figura 5) registram o enriquecimento relativo de ETRL sobre ETRP, porém com inclinação mais suave quando comparado às suítes discutidas anteriormente, com razões de La_N/Yb_N e Ce_N/Yb_N entre 6,50 – 39,60 e 4,35 – 24,07, respectivamente. Anomalias negativas de Eu ($Eu/Eu^* = 0,45 - 2,15$) são também registradas para a Suíte Calc.

Suíte Alcalina (Alc)

A Suíte Alc foi subdividida em dois grupos de padrões discriminativos de ETR. O primeiro é definido pelo *stock* Flores (Figura 1), enquanto o segundo agrupa os demais corpos contidos nessa suíte, tal como ilustra a Figura 1. Os dados de ETR do *stock* Flores mostram algum enriquecimento em ETR (122,50 – 554,40 ppm; média 320,19 ppm) em relação à crosta superior e à média de granitoides, e apresenta teor de ETR superior ao observado nos demais corpos dessa suíte (Figura 4). Estes são caracterizados por teores de ETR abaixo das concentrações médias da crosta superior e granitoides (22,80 – 120,66 ppm; média 61,96 ppm).

Devido ao fato de as rochas do *stock* Flores apresentarem maior enriquecimento do que o segundo grupo, o padrão normalizado aparece com uma ligeira elevação no gráfico. No entanto, ambos os grupos definem a mesma tendência de inclinação, de onde podemos reivindicar uma distribuição regular de ETRL e ETRP, com enriquecimento relativo dos ETRL sobre os ETRP (Figura 5). Além disso, as razões La_N/Sm_N do Flores (3,42 – 7,23) são bastante semelhantes às observadas nos demais corpos (2,10 – 7,90), indicando fracionamento de ETRL. Os dados das razões Gd_N/Lu_N também são semelhantes para o *stock* Flores (0,91 – 2,98) e para os outros corpos dessa suíte (0,76 – 2,20), caracterizando o fracionamento de ETRP. Assim, tem-se, em linhas gerais, o mesmo formato de declive. No entanto, o *stock* Flores é mais deslocado quando comparado a outros na mesma suíte. Consequentemente, o padrão absoluto, agora representado por razões de La_N/Yb_N (4,59 – 30,52) e Ce_N/Yb_N (3,37 – 20,50), para o Flores, e La_N/Yb_N (4,12 – 54,30) e Ce_N/Yb_N (2,93 – 36,18), para os outros, apresenta fracionamento fraco a moderado. As rochas do *stock* Flores apresentam anomalias negativas de Eu ($Eu/Eu^* = 0,24 - 0,52$), enquanto os demais corpos apresentam anomalias positivas ($Eu/Eu^* = 1,22 - 2,95$).

Suíte Alcalina Charnockítica (AlcCh)

Os teores de ETR da Suíte AlcCh são relativamente enriquecidos (208,32 – 678,71 ppm; média 421,90 ppm) em relação à crosta superior e à média dos granitoides (Figura 4). Os padrões normalizados ao condrito, de forma semelhante às demais suítes, apontam para um enriquecimento relativo dos ETRL em relação aos ETRP, com La_N/Yb_N entre 12,46 e 61,75 e Ce_N/Yb_N entre 9,67 e 43,73 (Figura 5). As anomalias de Eu ($Eu/Eu^* = 0,41 - 1,24$) são pouco expressivas, sendo principalmente negativas, embora algumas amostras registrem anomalias positivas.

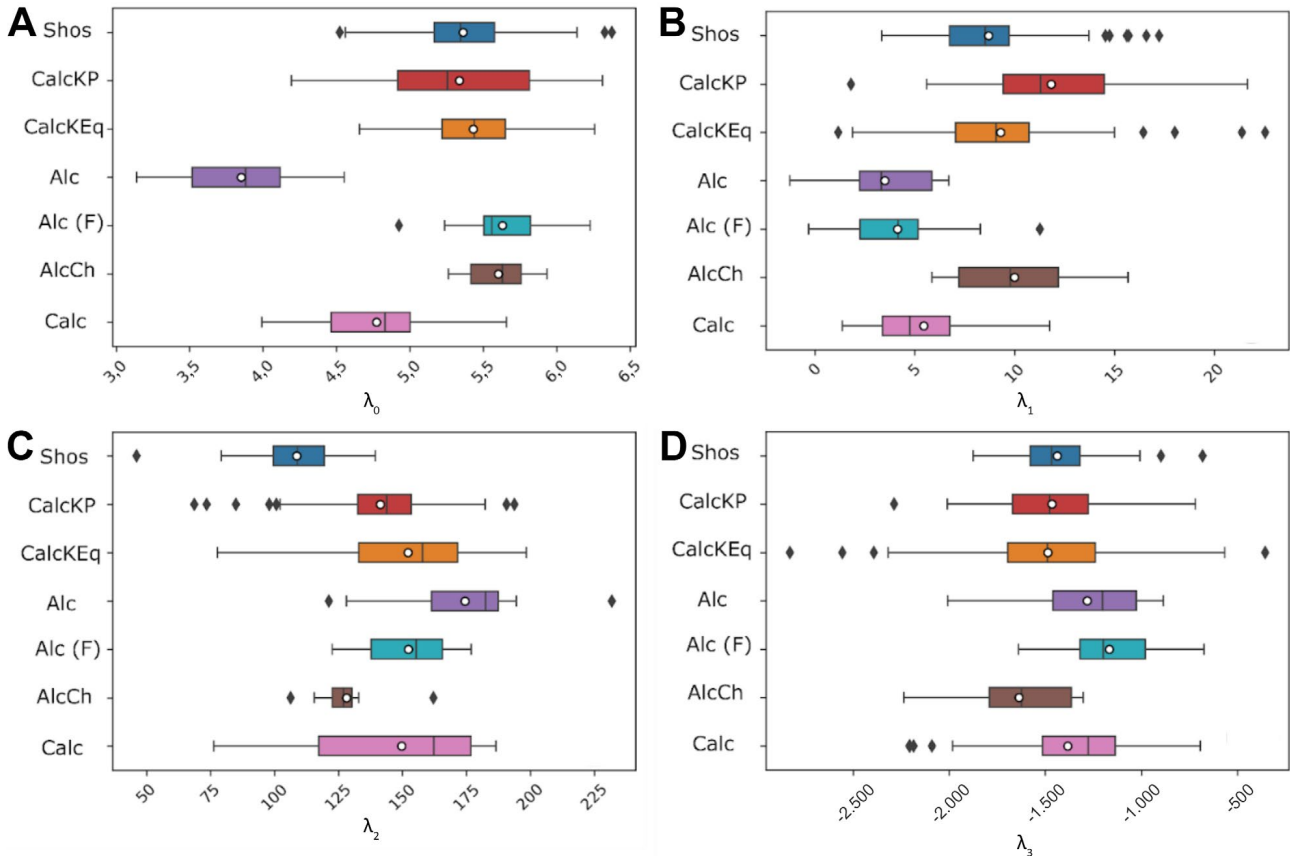
COEFICIENTES DE FORMA: COMPORTAMENTO E IMPLICAÇÕES

As seis suítes analisadas são representadas por quatro coeficientes de forma que serão úteis para avaliar as semelhanças e/ou dissimilaridades à luz dos ETR e para discutir a evolução dessas rochas nos domínios RPS e SJC.

O primeiro aspecto observado é aquele vinculado ao coeficiente λ_0 , que se relaciona aos conteúdos totais de ETR (Figura 6A). Esse coeficiente revela para a Suíte Alc (exceto *stock* Flores) concentrações muito baixas (média 3,85) quando comparadas com as demais suítes. Por sua vez, o *stock* Flores se diferencia por apresentar um ligeiro enriquecimento relativo (média 5,63). A Suíte Calc (média 4,77) apresenta leve empobrecimento relativo em ETR, porém com valores de λ_0 superiores aos observados na Suíte Alc. A Suíte AlcCh (média 5,60) apresenta valores muito semelhantes ao Flores e às outras Suítes, com valores médios para Shos de 5,36; para CalcKP de 5,34; e para CalcKEq de 5,43.

O coeficiente λ_1 (Figura 6B) traduz a inclinação de uma função de primeira ordem (*i.e.*, linear) para a razão ETRL/ETRP, apontando o fracionamento desses elementos. Portanto, valores mais altos de λ_1 representarão maiores concentrações de ETRL em relação aos ETRP (*i.e.*, enriquecimento relativo ETRL/ETRP). Valores acima de zero representam uma inclinação positiva, enquanto valores abaixo de zero representam uma inclinação negativa. Porém, o que se observa é uma inclinação positiva na maioria das amostras e a caracterização destas situa-se em torno de maiores e menores valores positivos. O conjunto de amostras com valores médios mais elevados está relacionado com a Suíte CalcKP (média 11,83), enquanto as suítes Shos (média 8,68), CalcKEq (média 9,29) e AlcCh (média 9,98) têm valores próximos entre si, e são ligeiramente menores que CalcKP. As suítes Calc (média 5,44) e Alc (média 3,49), incluindo o *stock* Flores (média 4,12), mostram os valores mais baixos de λ_1 (Figura 6B).

O coeficiente relacionado à curvatura λ_2 apresenta para a Suíte Shos (média 108,65) os menores valores para o



Shos: Suíte Shoshonítica; CalcKP: Suíte Calcioalcalina de alto K Porfírica; CalcKEq: Suíte Calcioalcalina de alto K Equigranular; Alc: Suíte Alcalina; Alc (F): Suíte Alcalina_{FLORES}; AlcCh: Suíte Alcalina Charnockítica; Calc: Suíte Calcioalcalina.

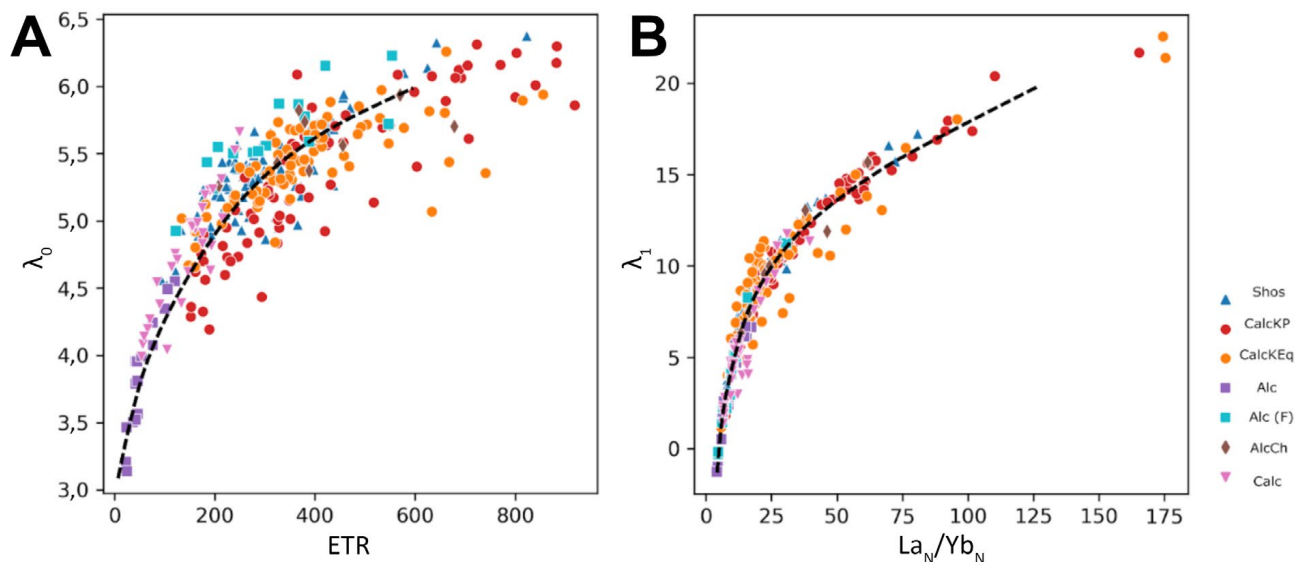
Figura 6. Coeficientes de forma das seis suítes discutidas em gráficos *boxplots* indicando a variabilidade das informações fora dos quartis superiores e inferiores. As informações *outlier* são representadas por pontos em forma de losango, enquanto a informação da média está representada por pontos em forma de círculo. (A) Coeficiente λ_0 ; (B) coeficiente λ_1 ; (C) coeficiente λ_2 ; e (D) coeficiente λ_3 .

conjunto de amostras. Esse aspecto é congruente ao observado no gráfico usual (Figura 5). Os valores médios (média 149,65) são bastante semelhantes aos observados nas suítes CalcKEq (média 152,15) e CalcKP (média 141,35) e no *stock* Flores (média 152,31). Adicionalmente, os demais *plútons* da Suíte Alc apresentam valores mais altos (média 174,37), enquanto a Suíte AlcCh apresenta valores mais baixos (média 128,10; Figura 6C).

Os valores de λ_3 representam a inflexão no final gráfico, aqui entendido como variação das concentrações de ETRP. Para as suítes Shos (média -1.438,32), CalcKP (média -1.464,81) e CalcKEq (média -1.486,88) os valores são muito parecidos. Já para a Suíte Alc (média -1.282,47; média Flores -1.166,31) e Calc (média -1.383,71) ocorrem valores mais altos, enquanto para a Suíte AlcCh (média -1.638,25) os valores são ligeiramente mais baixos. Contudo, é importante salientar que para λ_3 a variação é bem menos expressiva quando comparada aos coeficientes de forma citados anteriormente. Tal variação nos traz subsídios para discutir

a influência da mineralogia na concentração desses elementos (Figura 6D).

Os coeficientes λ_0 e λ_1 são facilmente correlacionados com o aumento nos teores de ETR durante a evolução magmática (Figura 7A) e com razão ETRL/ETRP (Figura 7B; aqui compreendido como La_N/Yb_N), respectivamente; essa última uma indicação do enriquecimento relativo de ETRL em relação a ETRP. Para testar essa afirmação, o coeficiente λ_0 foi confrontado com a somatória de ETR totais não normalizados, enquanto a variação do coeficiente λ_1 foi verificada em relação à razão La_N/Yb_N . O produto aponta para uma correlação logarítmica positiva. Isso ocorre pois os valores dos coeficientes obtidos no método lambda (λ) se baseiam no raio iônico dos ETR que diminuem de forma quase logarítmica em direção aos ETRP, enquanto o método clássico admite o número atômico que cresce de forma linear. Os demais coeficientes não apresentaram correlações significativas com parâmetros petrológicos e/ou evolutivos. Todavia, é possível se



Shos: Suíte Shoshonítica; CalcKP: Suíte Calcioalcalina de alto K Porfírica; CalcKEq: Suíte Calcioalcalina de alto K Equigranular; Alc: Suíte Alcalina; Alc (F): Suíte Alcalina_{FLORES}; AlcCh: Suíte Alcalina Charnockítica; Calc: Suíte Calcioalcalina.

Figura 7. Efeito da correlação positiva não linear (logarítmica) entre os coeficientes de forma e parâmetros geológicos frequentemente utilizados. (A) Correlação entre o coeficiente λ_0 e o conteúdo de Elementos Terras Raras totais em ppm; (B) correlação entre o coeficiente λ_1 e a razão de La_N/Yb_N .

discutir nuances ao se comparar os coeficientes de forma das suítes analisadas.

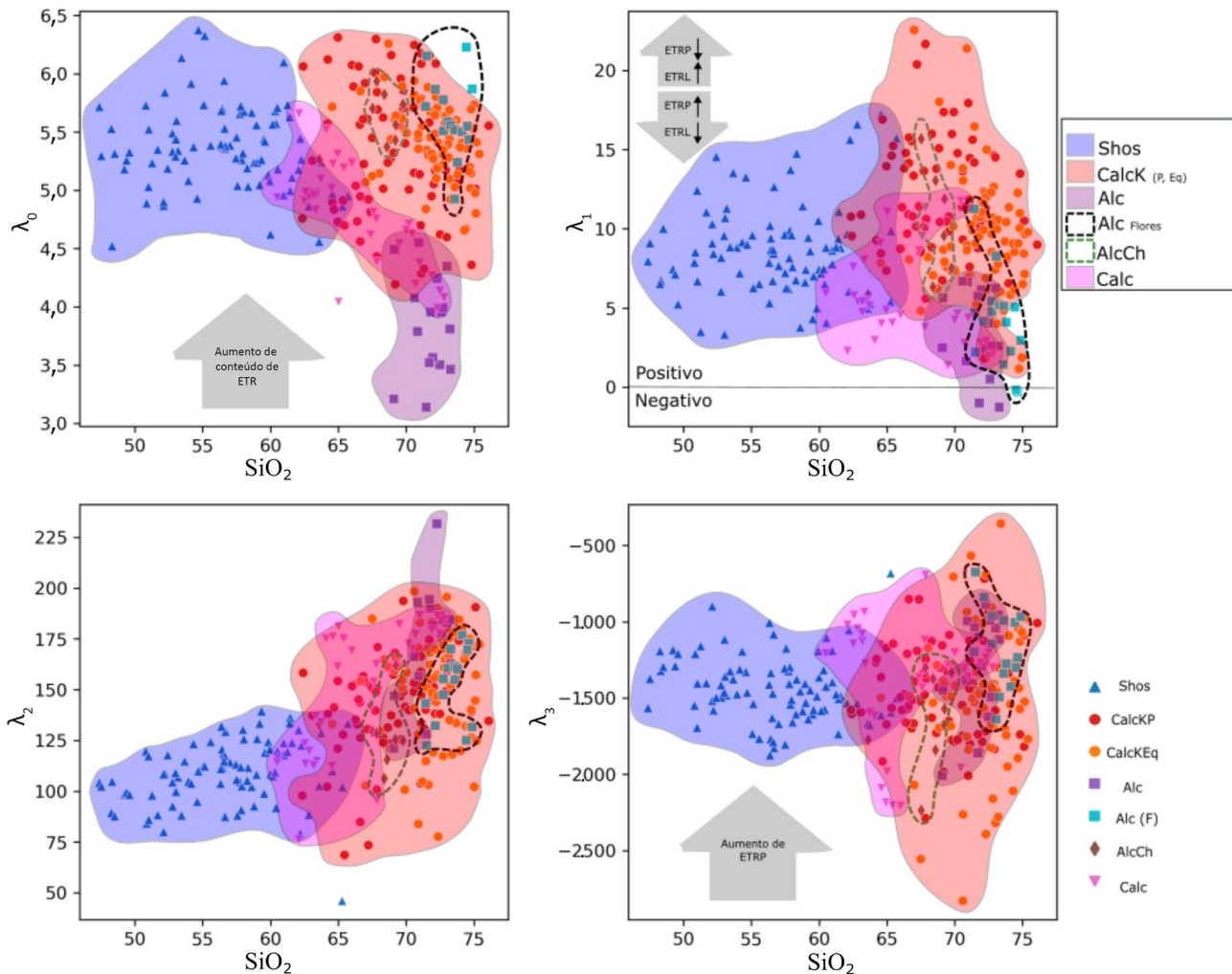
Intuitivamente, na tentativa de correlacionar os coeficientes de forma com processos evolutivos envolvidos para essas rochas, os teores de SiO_2 em rocha-total (% em peso) foram confrontados com diferentes coeficientes lambdas. Os resultados de SiO_2 e alcalinidade são apresentados nas Figuras de 8 a 10 e apontam para uma correlação incipiente entre a curvatura e o conteúdo de SiO_2 (Figuras 8 e 10A). Isso também é observado quando se compara os coeficientes ao índice de alcalinidade (MALI, do inglês *Modified Alkali-Lime Index*) de Frost et al. (2001) — $Na_2O + K_2O - CaO$ (Figuras 9 e 10B) —, sugerindo forte influência dos feldspatos alcalinos, a julgar pelo grande volume destes nas diferentes suítes.

Segundo Sanematsu et al. (2009), o enriquecimento em ETR está diretamente ligado a episódios de fracionamento, uma vez que a tendência é que esses elementos se concentrem no magma como elementos incompatíveis no processo de diferenciação. Com base nessa afirmação e nos dados expostos nas Figuras 5 e 6, sabendo que λ_0 corresponde ao componente ligado ao conteúdo de ETR total, é possível afirmar que as rochas pertencentes à Suíte Alc (com exceção do *stock* Flores, com comportamento oposto) são comparativamente menos fracionadas. Outro aspecto importante é relativo ao enriquecimento/empobrecimento dos ETRL e dos ETRP representado pelo λ_1 , com valores mais baixos representando a concentração dos ETRP enquanto valores mais altos indicam maiores concentrações de ETRL em relação aos ETRP. Esse aspecto é melhor observado na

Figura 5, na qual as Suítes Alc e Calc apresentam valores mais baixos, enquanto as demais registram valores relativamente mais altos. A mesma feição é observada no gráfico de λ_3 , que representa valores mais altos como indicativo de enriquecimento de ETRP.

Para discutir esse tópico, é importante citar os padrões dos ETR nos minerais formadores dessas rochas, pois muito do que se observa nos coeficientes de forma estão relacionados diretamente a esse aspecto. McLennan (2018) e Rollinson e Pease (2021) expõem os padrões de ETR de alguns minerais (Figura 11), no que fica fácil de observar as relações de ETRL, ETRP, anomalias de Eu sendo essas positivas ou negativas e concentração de ETR totais. Além disso, é importante destacar que a presença de minerais acessórios portadores de ETR influenciam nos padrões dos coeficientes. Dessa forma, a utilização do método lambda pode auxiliar na identificação de concentrações anômalas de minerais como xenotima, monazita, cebaíta, bastnaesita etc., que influenciam sobretudo valores de λ_0 . Dessa forma, valores anômalos desse coeficiente pode significar a ocorrência desses minerais.

Sabendo-se que valores baixos de λ_1 refletem preferencialmente a entrada de ETRP em comparação aos ETRL no sistema, e que λ_3 reflete a inflexão na área do gráfico que representa os ETRP, destacando assim os valores mais altos como representantes de maior influência dos ETRP no gráfico, é possível fazer um paralelo entre o significado desses gráficos com os padrões de ETR dos minerais citados. Dessa forma, valores mais altos de λ_1 refletem maior influência de feldspatos, olivina, biotita e hornblenda, enquanto



ETR: Elementos Terras Raras; ETRP: Elementos Terras Raras pesados; ETRL: Elementos Terras Raras leves; Shos: Suíte Shoshonítica; CalcKP: Suíte Calcioalcalina de alto K Porfírica; CalcKEq: Suíte Calcioalcalina de alto K Equigranular; Alc: Suíte Alcalina; Alc (F): Suíte Alcalina_{FLORES}; AlcCh: Suíte Alcalina Charnockítica; Calc: Suíte Calcioalcalina.

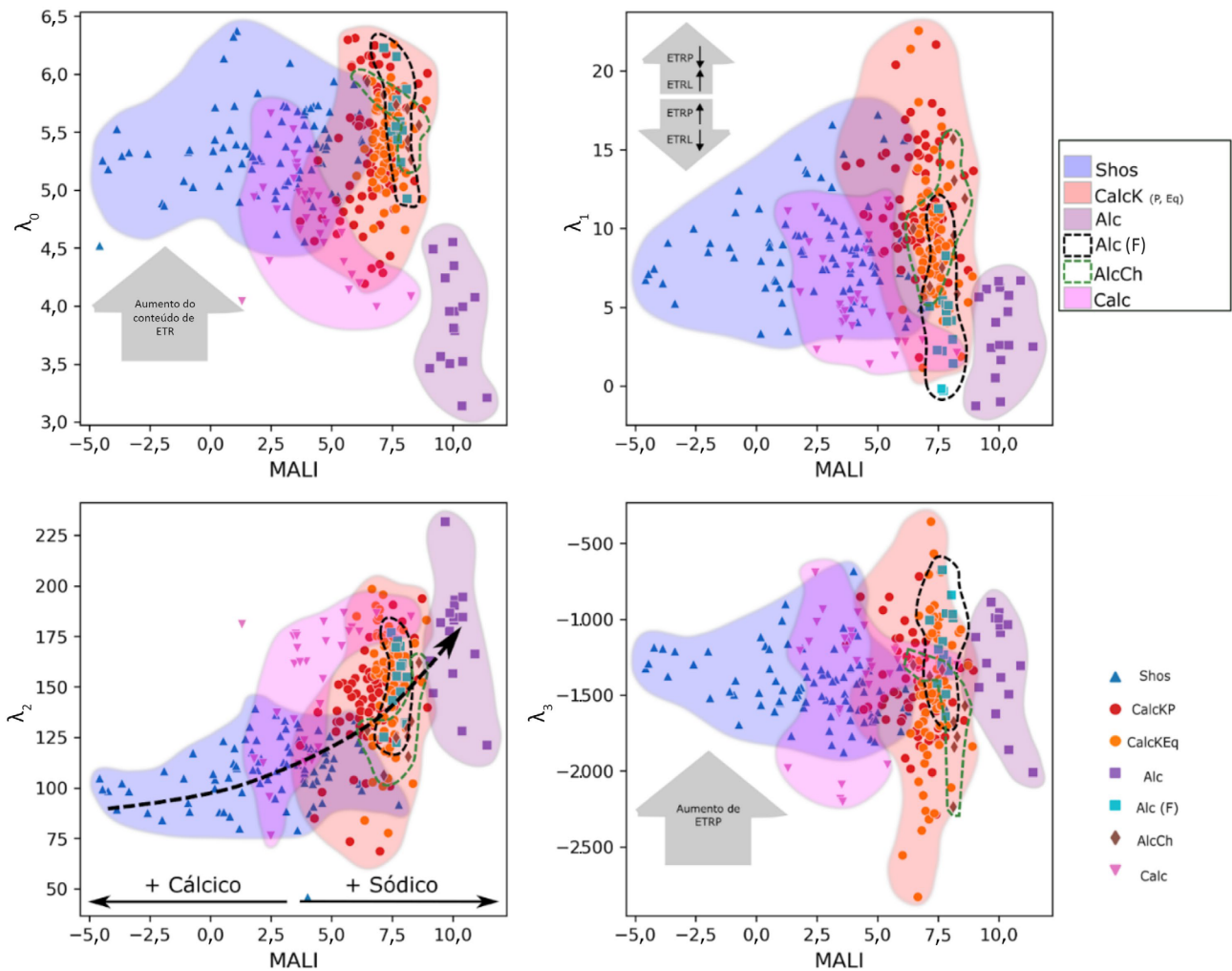
Figura 8. Cruzamento dos dados de SiO_2 (% em peso) confrontados com os coeficientes de forma para as seis suítes plutônicas investigadas.

valores mais baixos refletem maior influência de ortopiroxênio, clinopiroxênio e granada. Esses últimos refletem ainda valores mais altos de λ_3 , influenciando no enriquecimento de ETRP observado. É possível fazer um paralelo, considerando os minerais das suítes expostos na Tabela 3, na qual se destaca a ocorrência de feldspatos em todas as suítes, porém com composições modais distintas. É possível apontar para a Suíte Alc que a ocorrência de granada do tipo andradita e de clinopiroxênios cálcicos e sódico-cálcicos, bem como a ausência de biotita, influenciam nos baixos valores de λ_1 e nos altos valores de λ_3 . Já para a Suíte AlcCh a presença de olivina faialita e biotita atenua essa característica. A Suíte Shos apresenta características similares para os coeficientes λ_1 e λ_3 observados para as suítes CalcKP e CalcKEq (nas quais biotita e hornblenda são os máficos principais).

Contudo, a presença de orto e clinopiroxênios influencia nos valores levemente menores de λ_1 e nos maiores de λ_3 .

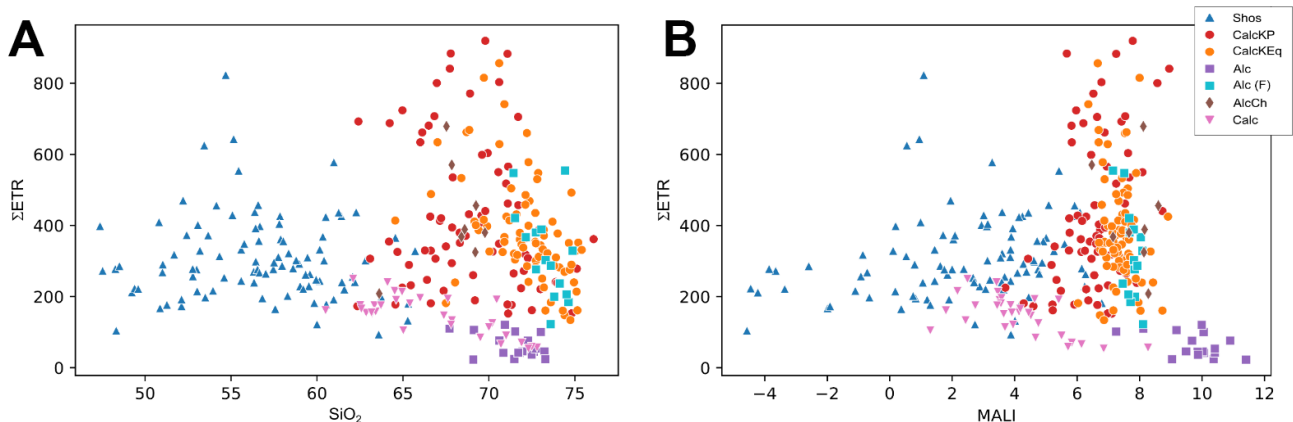
Alguns minerais acessórios presentes nas suítes, como allanita, titanita, apatita e zircão, apesar de terem concentrações modais muito baixas, influenciam os padrões dos coeficientes de forma. A presença de allanita influencia em valores maiores de λ_0 e λ_1 , já a presença de zircão influencia em valores menores de λ_1 . Minerais como apatita, titanita e ilmenita que têm enriquecimento nos ETR médios vão influenciar em valores relativamente maiores de λ_2 e menores de λ_1 .

Outro aspecto importante a se considerar são as anomalias de Eu registradas nos diagramas da Figura 5. Em linhas gerais, anomalias negativas indicariam fracionamento ou fusão parcial de feldspatos, enquanto anomalias positivas estão associadas ao fracionamento ou fusão parcial de



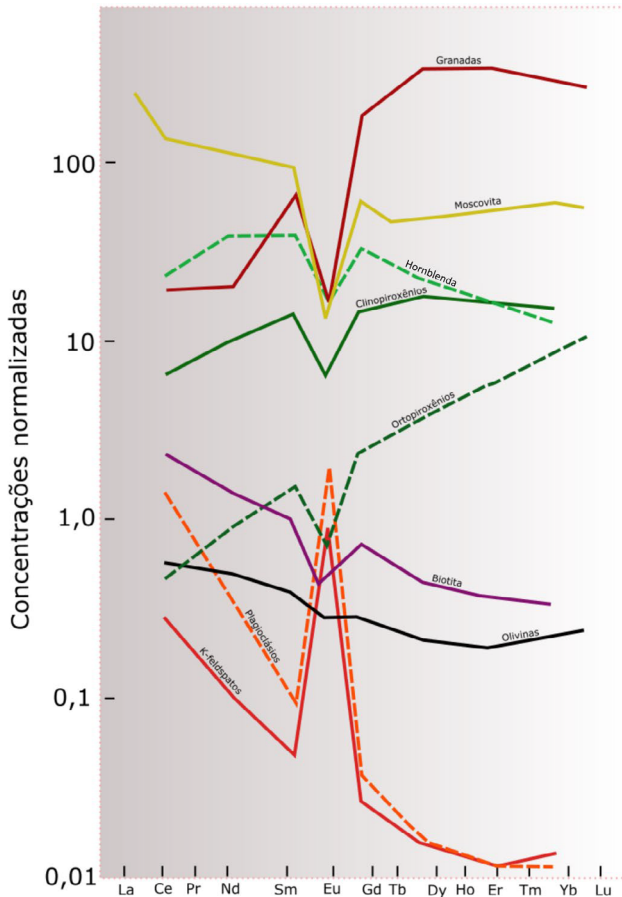
ETR: Elementos Terras Raras; ETRP: Elementos Terras Raras pesados; ETRL: Elementos Terras Raras leves; Shos: Suíte Shoshonítica; CalcKP: Suíte Calcioalcalina de alto K Porfírica; CalcKEq: Suíte Calcioalcalina de alto K Equigranular; Alc: Suíte Alcalina; Alc (F): Suíte Alcalina_{FLORES}; AlcCh: Suíte Alcalina Charnockítica; Calc: Suíte Calcioalcalina.

Figura 9. Cruzamento dos dados do índice MALI ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{CaO}$) confrontados com os coeficientes de forma para as seis suítes plutônicas investigadas.



ETR: Elementos Terras Raras; Shos: Suíte Shoshonítica; CalcKP: Suíte Calcioalcalina de alto K Porfírica; CalcKEq: Suíte Calcioalcalina de alto K Equigranular; Alc: Suíte Alcalina; Alc (F): Suíte Alcalina_{FLORES}; AlcCh: Suíte Alcalina Charnockítica; Calc: Suíte Calcioalcalina.

Figura 10. Diagramas confrontantes da soma dos Elementos Terras Raras e do conteúdo de (A) SiO_2 e (B) MALI.

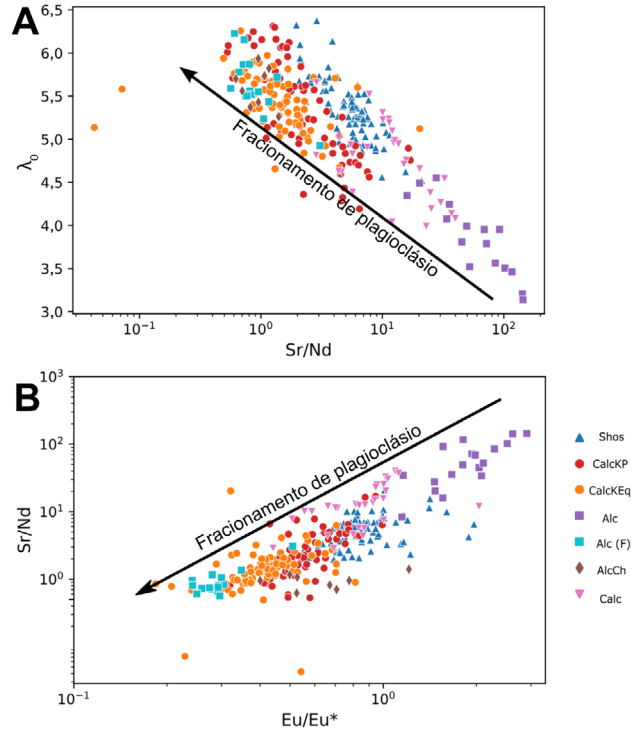


Fonte: adaptado de McLennan (2018); e Rollinson e Pease (2021).

Figura 11. Padrões de Elementos Terras Raras normalizados dos principais minerais formadores de rocha.

hornblenda e granada (*i.e.* considerando que esses minerais seriam as últimas fases do processo de cristalização e os primeiros a se fundirem no sistema em questão). Para Dalan et al. (2019), as anomalias positivas de Eu observadas nos granitos da Suíte Alc não são comuns e podem ocorrer em razão do fracionamento de plagioclásio na fonte, das altas condições de fugacidade de oxigênio ou ainda relacionada a altas concentrações de Sr e Ba.

As condições de fugacidade observadas por Dalan et al. (2019) para os corpos da Suíte Alc separadamente explicariam as anomalias positivas de Eu típicas dessa suíte ($\log fO_2 = 1 < \Delta_{QFM} < 2,1$) e as anomalias negativas para o *stock* Flores ($\log fO_2 = \Delta_{QFM}$ próximo a zero). Contudo, condições semelhantes de fO_2 são registradas por Campos et al. (2016) para a Suíte CalcKP ($\log fO_2 = -1 < \Delta_{QFM} < 1,9$), cujos granitos são caracterizados por anomalias negativas de Eu. Outra característica pertinente é do teor de Sr, o qual é fortemente compatível com o plagioclásio. Dessa forma, a hipótese mais aceitável seria a de fracionamento de feldspatos influenciando na anomalia negativa de Eu (Figura 12).



Shos: Suíte Shoshonítica; CalcKP: Suíte Calcioalcalina de alto K Porfírica; CalcKEq: Suíte Calcioalcalina de alto K Equigranular; Alc: Suíte Alcalina; Alc (F): Suíte Alcalina_{FLORES}; AlcCh: Suíte Alcalina Charnockítica; Calc: Suíte Calcioalcalina.

Figura 12. Representação de fracionamento de plagioclásio nas seis suítes analisadas: (A) coeficiente de forma λ_0 versus Sr/Nd, em que valores mais altos de λ_0 representam maior grau de fracionamento; e (B) Sr/Nd versus Eu/Eu* (cf. Hafnadóttir, 2014), em que valores mais baixos de ambos os parâmetros representam rochas com plagioclásios mais fracionados.

Na análise do diagrama Sr/Nd versus Eu/Eu* (Figura 12B) fica claro o incremento do grau de fracionamento para as seis suítes estudadas e o *stock* Flores. A mesma sequência é evidenciada no diagrama que relaciona Sr/Nd com o coeficiente de forma λ_0 , indicando uma correlação direta entre o grau de fracionamento de plagioclásio e o aumento desse coeficiente (Figura 12A). Dessa forma, a Suíte Alc (excetuando-se o *stock* Flores) é a menos fracionada, e as suítes Shos e Calc representam um mesmo campo de fracionamento, sendo este de intermediário a pouco fracionado, enquanto as suítes CalcKP, AlcCh e CalcKEq representam o grupo intermediário a muito fracionado; por fim, as amostras do *stock* Flores correspondem ao extremo com maior grau de fracionamento.

O conjunto de amostras considerado neste trabalho pode também ser estudado com base no grau de alcalinidade (Figura 9). Uma vez que a classificação de Nascimento et al. (2015) para essas suítes adotada neste trabalho se baseia em conceitos que tangenciam essa característica, optou-se por comparar o índice MALI ($Na_2O + K_2O - CaO$) com os

coeficientes de forma. Em linhas gerais, o termo mais alcalino (Suíte Alc), além do já discutido, apresentou λ_1 com valores mais baixos. Na Suíte Calc é possível observar uma correlação direta do índice MALI com o coeficiente λ_2 , bem como deste com SiO_2 . Dessa forma, valores mais altos de λ_2 seriam influenciados pela maior demanda de minerais que particionam álcalis no sistema.

CONCLUSÕES

Este artigo apresenta um estudo comparativo e integrado da litoquímica de ETR para as suítes graníticas ediacaranas/cambrianas nos Domínios RPS e SLC, Província Borborema. A análise dos ETR baseou-se nos coeficientes de forma λ dos padrões normalizados ao condrito, o que permitiu destacar pontos de difícil visualização com o uso dos tradicionais padrões normalizados ao condrito. As principais conclusões são as seguintes:

- As suítes Shos, CalcKP, CalcKEq e AlcCh apresentam enriquecimento em ETR observado tanto pelo coeficiente de forma λ_0 quanto pela SETR não normalizados. Já a Suíte Calc apresenta leve empobrecimento e a Suíte Alc apresenta forte empobrecimento em relação à média dos granitoides e da crosta superior;
- As rochas do *stock* Flores (Suíte Alc) destacam-se como grupo à parte por terem características muito distintas das demais rochas da Suíte Alc, com forte enriquecimento em ETR e anomalias negativas de Eu, sendo o oposto do que é observado nos demais corpos da Suíte Alc. Para este corpo, observa-se que o índice de alcalinidade e coeficientes e padrões de ETR mostram-se bastante similares aos das rochas das suítes calcioalcalinas de alto K, sugerindo que as rochas do mencionado *stock* sejam agrupadas na Suíte CalcKEq;
- Rochas com granada e piroxênio pertencentes à Suíte Alc tiveram os valores de λ_1 e λ_3 influenciados por esses minerais, com diminuição de λ_1 e aumento de λ_3 ;
- Rochas portadoras de feldspatos, biotita e hornblenda influenciaram no aumento dos valores de λ_1 ;
- As anomalias de Eu observadas, assim como λ_0 , estão intimamente ligadas ao grau de fracionamento a que essas rochas foram submetidas. A Suíte Alc tem menor grau de fracionamento de plagioclásio, as suítes Shos e Calc de baixo a intermediário, as suítes CalcKP, CalcKEq e AlcCh apresentam grau intermediário a alto, enquanto as rochas do *stock* Flores apresentam alto grau de fracionamento, mostrando novamente comportamento oposto ao que é observado nos demais corpos da suíte;
- A alcalinidade das rochas, bem como a presença de feldspatos alcalinos ou plagioclásio cálcico, influenciam λ_2 , com as rochas mais cálcicas, como as da Suíte Shos, apresentando menores valores de λ_2 ;

- Minerais acessórios influenciam os padrões dos coeficientes, em que allanita influencia no aumento dos valores de λ_0 e λ_1 , enquanto a presença de zircão influencia na diminuição dos valores de λ_1 ;
- Minerais como apatita, titanita e ilmenita, que têm enriquecimento nos ETR médios, influenciam em valores relativamente maiores de λ_2 e menores de λ_1 ;
- O uso dos coeficientes de forma é uma ferramenta que pode auxiliar na identificação de minerais portadores de ETR, como elemento principal, sobretudo quando estes se apresentarem com composição modal anômala.

REFERÊNCIAS

- Almeida, F. F. M., Leonardos Jr., O. H., Valença, J. (1967). Review on granitic rocks of northeast South America. *IUGS/ UNESCO Symposium*. Proceeding... Recife: Geological Documentation. 41 p.
- Anenburg, M. (2020). Rare earth mineral diversity controlled by REE pattern shapes. *Mineralogical Magazine*, 84(5), 629-639. <https://doi.org/10.1180/mgm.2020.70>
- Anenburg, M., Williams, M. J. (2021). Quantifying the Tetrad Effect, Shape Components, and Ce–Eu–Gd Anomalies in Rare Earth Element Patterns. *Mathematical Geosciences*, 54, 47-70. <https://doi.org/10.1007/s11004-021-09959-5>
- Angelim, L. A. A., Nesi, J. R., Torres, H. H. F., Medeiros, V. C., Santos, C. A., Veiga Jr., J. P., Mendes, V. A. (2006). *Geologia e recursos minerais do estado do Rio Grande do Norte - Escala 1:500.000*. Texto explicativo dos mapas geológicos e de recursos minerais do estado do Rio Grande do Norte. Recife: SGB-CPRM - Serviço Geológico do Brasil. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/10234>. Acesso em: 7 nov. 2023.
- Antunes, A. F., Galindo, A. C., Alves da Silva, F. C., Jardim de Sá, E. F., Souza Lima, R. F. (2000). Magmatismo Granítico de Afinidade Subalcalina/Monzonítica no Maciço São José de Campestre, Província Borborema (NE do Brasil): O Exemplo do Plúton de Monte das Gameleiras. *Geochimica Brasiliensis*, 14(1), 51-69. Disponível em: <https://www.geobrasiliensis.org.br/geobrasiliensis/article/view/166/pdf>. Acesso em: 15 set. 2023.
- Araújo, J. M. M., Trindade, R. I., Galindo, A. C., Souza, Z. S., Jardim de Sá, E. F. (1993). Características petrográficas preliminares do granito Serra do Algodão (Barra de Santa Rosa-PB): um plutão alcalino na região do Seridó. *XV Simpósio de Geologia do Nordeste*. Anais... Recife: SBG-Núcleo NE. 13, p. 101-103.

- Brito Neves, B. B., Pessoa, R. J. R. (1974). Considerações sobre as rochas graníticas do nordeste oriental. *XXVIII Congresso Brasileiro de Geologia*. Porto Alegre: SBG. 4, p. 143-157.
- Campos, B. C. S., Vilalva, F. C. J., Nascimento, M. A. L., Galindo, A. C. (2016). Crystallization conditions of porphyritic high-K calc-alkaline granitoids in the extreme northeastern Borborema Province, NE Brazil, and geodynamic implications. *Journal of South American Earth Sciences*, 70, 224-236. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2016.05.010>
- Campos, T. F. C. (1997). *Geoquímica de Rochas Granitoides e Seus Minerais do Batólito da Serra Negra do Norte-RN e Rio Espinharas-PB, Nordeste do Brasil*. Tese (Doutorado). Porto Alegre: Instituto de Geociências - UFRGS.
- Cavalcante, R. (2015). *Petrologia e geologia estrutural do Plutão Granítico Barcelona, Província Borborema, NE do Brasil*. Dissertação (Mestrado). Natal: Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica - UFRN. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/21062>. Acesso em: 15 set. 2023.
- Costa, A. P. (2015). *Petrologia e geocronologia U-Pb do plúton granítico Serra da Rajada, porção central do Domínio Rio Piranhas – Seridó, NE do Brasil*. Dissertação (Mestrado). Natal: Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica - UFRN. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/21054>. Acesso em: 15 set. 2023.
- Costa, L. S. (2009). *Petrologia do Plúton Granítico Serra Verde, porção leste do Domínio Seridó*. Dissertação (Mestrado). Natal: Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica - UFRN. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/18781>. Acesso em: 15 set. 2023.
- Dalan, C. A., Vilalva, F. C. J., Nascimento, M. A. L. (2019). Reavaliação das condições de cristalização de granitos alcalinos ediacaranos dos domínios Rio Piranhas-Seridó e São José do Campestre, Província Borborema, NE-Brasil. *Geologia USP. Série Científica*, 19(1), 129-152. <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v19-149112>
- Dantas, E. L. (1997). *Geocronologia U-Pb e Sm-Nd de Terrenos Arqueanos e Paleoproterozóicos do Maciço Caldas Brandão, NE do Brasil*. Tese (Doutorado). Rio Claro: Instituto de Geociências e Ciências Exatas - UNESP.
- Dias, L. G. S. (2006). *Caracterização Geológica, Geoquímica e Geocronológica da Suítes Plutônica Neoproterozóica da Região de Serrinha, Porção Centro-leste do Maciço São José de Campestre, Sudeste do Rio Grande do Norte*. Dissertação (Mestrado). Natal: Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica - UFRN. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/18839>. Acesso em: 15 set. 2023.
- Drake, M. J. (1975). The oxidation state of europium as an indicator of oxygen fugacity. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 39(1), 55-64. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(75\)90184-2](https://doi.org/10.1016/0016-7037(75)90184-2)
- Drake, M. J., Weill, D. F. (1975). Partition of Sr, Ba, Ca, Y, Eu²⁺, Eu³⁺, and other REE between plagioclase feldspar and magmatic liquid: An experimental study. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 39(5), 689-712. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(75\)90011-3](https://doi.org/10.1016/0016-7037(75)90011-3)
- Evensen, N. H., Hamilton, P. J., O’Nions, R. K. (1978). Rare earth abundances in chondritic meteorite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 42(8), 1199-1212. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(78\)90114-X](https://doi.org/10.1016/0016-7037(78)90114-X)
- Ferreira, V. P., Sial, A. N., Jardim de Sá, E. F. (1998). Geochemical and isotopic signature of Proterozoic granitoids in terranes of the Borborema structural province, northeastern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 11(5), 439-455. [https://doi.org/10.1016/S0895-9811\(98\)00027-3](https://doi.org/10.1016/S0895-9811(98)00027-3)
- Frost, B. D., Barnes, C. G., Collins, W. J., Arculus, R. J., Ellis, D. J., Frost, C. D. (2001). A geochemical classification for granitic rocks. *Journal of Petrology*, 42(11), 2033-2048. <https://doi.org/10.1093/petrology/42.11.2033>
- Galindo, A. C. (1982). *Estudo Petrológico do Corpo Granítico de Monte das Gameleiras (RN-PB)*. Dissertação (Mestrado). Recife: Pós-Graduação em Geociências - UFPE.
- Galindo, A. C. (1993). *Petrologia dos Granitoides Brasileiros da Região de Caraúbas-Umarizal, oeste do Rio Grande do Norte*. Tese (Doutorado). Belém: Pós-Graduação em Geociências - UFPA. Disponível em: <https://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/7662>. Acesso em: 15 set. 2023.
- Galindo, A. C., Dall’Agnol, R., McReath, I., Leterrier, J., Nascimento, M. A. L. (1997). Granitóide Quixaba: um magmatismo monzonítico (shoshonítico) no extremo oeste da Faixa Seridó. *XVII Simpósio de Geologia do Nordeste*. Anais... Fortaleza: SBG-Núcleo NE. 15, p. 268-272.
- Gonzalez, M. G. B. (1984). *Geologia e Petrologia da Região de Serra Negra do Norte (RN-PB)*. Dissertação (Mestrado). Belém: Pós-Graduação em Geociências - UFPA. Disponível em: <https://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/15001>. Acesso em: 15 set. 2023.

- Hafnadóttir, M. Ó. (2014). *Understanding igneous processes through zircon trace element systematics: prospects and pitfalls*. Dissertação (Mestrado). Lund: Lund University. Disponível em: <https://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordId=4252112&fileId=4252144>. Acesso em: 15 set. 2023.
- Hanson, G. N. (1978). The Application of trace elements to petrogenesis of igneous rocks of granitic composition. *Earth and Planetary Science Letters*, 38(1), 26-43. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(78\)90124-3](https://doi.org/10.1016/0012-821X(78)90124-3)
- Hanson, G. N. (1980). Rare earth elements in petrogenetic studies of igneous systems. *Annual Review Earth and Planetary Sciences*, 8, 371-406. <https://doi.org/10.1146/annurev.ca.08.050180.002103>
- Henderson, P. (1984). *Rare Earth Element Geochemistry* (2nd ed.). Amsterdam: Elsevier.
- Herrmann, A. G. (1970). Yttrium and lanthanides. In: Wedepohl, K. H. (ed.). *Handbook of Geochemistry*. Berlin/Heidelberg/Nova York: Springer.
- Hollanda, M. H. B. M. (1998). *Mecanismos de Alojamentos de Magmas Granitoides: Exemplo do Plúton de Japi (RN)*. Tese (Doutorado). Natal: Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica - UFRN. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/18763>. Acesso em: 15 set. 2023.
- Hollanda, M. H. B. M., Pimentel, M. M., Jardim de Sá, E. F. (2003). Assinaturas metassomáticas relacionadas à subdução paleoproterozoica no manto litosférico abaixo do NE do Brasil: interferências a partir de elementos traço e composições isotópicas de Sr-Nd-Pb de rochas ígneas neoproterozoicas de alto K. *Journal of South American Earth Sciences*, 14, 885-900.
- Jardim de Sá, E. F. (1994). *A Faixa Seridó (Província Borborema, NE do Brasil) e o seu significado Geodinâmico na cadeia Brasileira/Pan-Africana*. Tese (Doutorado). Brasília: Instituto de Geociências - UnB.
- Jardim de Sá, E. F., Legrand, J. M., McReath, I. (1981). Estratigrafia de rochas granitoides na região do Seridó (RN-PB) com base em critérios estruturais. *Revista Brasileira de Geociências*, 11, 50-57.
- Langford, E. (2006). Quartiles in Elementary Statistics, *Journal of Statistics Education*, 14(3). <https://doi.org/10.1080/10691898.2006.11910589>
- Macêdo-Filho, A. A., Souza, Z. S. (2016). Geoquímica do magmatismo Ediacarano Serra do Caramuru, NE da Província Borborema, RN, Brasil. *Geologia USP. Série Científica*, 16(3), 117-142. <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v16i3p117-142>
- McLennan, S. M. (2018). Lanthanide rare earths. In: White, W. M. (ed.). *Encyclopedia of Geochemistry*. Cham: Springer. p. 792-799. https://doi.org/10.1007/978-3-319-39312-4_96
- McMurry, J., Long, L. E., Sial, A. N. (1987). Evolution of a heterogeneous, continentally derived granite: Dona Inês pluton northeastern Brazil. *Journal of Geology*, 95(1), 107-117. <https://doi.org/10.1086/629109>
- Medeiros, V. C. (2008). *Geologia e Recursos Minerais da Folha Sousa SB.24-X-A*. Escala 1:250.000. Estados da Paraíba, Rio Grande do Norte e Ceará. Recife: CPRM – Serviço Geológico do Brasil.
- Medeiros, V. C., Galindo, A. C., Nascimento, M. A. L., Freire, A. G. (2007). Geologia, petrografia e idade do Batólito de Catolé do Rocha (RN-PB), porção W do Domínio Rio Grande do Norte da Província Borborema. *Revista de Geologia*, 20, 219-230.
- Nascimento, M. A. L. (2000). *Petrologia do Magmatismo Tardi-brasiliano no Maciço São José de Campestre (RN-PB), com Ênfase no Plúton Alcalino Caxexa*. Dissertação (Mestrado). Natal: Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica - UFRN. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/18752>. Acesso em: 15 set. 2023.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2014.09.008>
- Nascimento, M. A. L., Medeiros, V. C., Archanjo, C. J. (2018). Plúton Serra da Garganta como registro de magmatismo cálcio-alcalino no Domínio Rio Piranhas – Seridó, NE da Província Borborema. *Pesquisa em Geociências*, 45(1), 1-27. <https://doi.org/10.22456/1807-9806.85638>
- Nascimento, R. S. C. (1998). *Petrologia dos Granitoides Brasileiros associados à Zona de Cisalhamento Remígio-Pocinhos (PB)*. Dissertação (Mestrado). Natal: Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica - UFRN. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/18762/1/RielvaSCN.pdf>. Acesso em: 15 set. 2023.
- Oliveira, M. T. D., Nascimento, M. A. L., Galindo, A. C. (2014). Definição de Suítes magmáticas em corpos ediacaranos no extremo NE da Província Borborema (Estado do Rio Grande do Norte): exemplos dos plútons Pitombeira, Taipu e Gameleira. *Geologia USP. Série Científica*, 14(4), 61-80. <https://doi.org/10.5327/Z1519-874X201400040004>

- O'Neill, H. S. C. (2016). The smoothness and shapes of chondrite-normalized rare earth element patterns in basalts. *Journal of Petrology*, 57(8), 1463-1508. <https://doi.org/10.1093/petrology/egw047>
- Raymond, K. N., Wellman, D. L., Sgarlata, C., Hill, A. P. (2010). Curvature of the lanthanide contraction: An explanation. *Comptes Rendus Chimie*, 13(6-7), 849-852. <https://doi.org/10.1016/j.crci.2010.03.034>
- Rollinson, H., Pease, V. (2021). Using Trace Element Data. In: Rollinson, H., Pease, V. (eds.). *Using Geochemical Data: To Understand Geological Processes*. Cambridge: Cambridge University Press. P. 96-156. <https://doi.org/10.1017/9781108777834.007>
- Sanematsu, K., Murakami, H., Watanabe, Y., Duangsurigna, S., Siphandone, V. (2009). Enrichment of rare earth elements (REE) in granitic rocks and their weathered crusts in central and southern Laos. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, 60(11-12), 527-558. <https://doi.org/10.9795/bullgsj.60.527>
- Seitz, M., Oliver, A. G., Raymond, K. N. (2007). The lanthanide contraction revisited. *Journal of the American Chemical Society*, 129(36), 11153-11160. <https://doi.org/10.1021/ja072750f>
- Shannon, R. D. (1976). Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides. *Acta Crystallographica*, A32, 751-767. <https://doi.org/10.1107/S0567739476001551>
- Sial, A. N. (1987). Granitic rocks in northeast Brazil. *1st International Symposium Granites Association Mineralization*. Proceedings... Expanded Abstract. 1, p. 61-69.
- Silva, D. R. V. (2011). *Petrologia do plúton serra da Macambira, neoproterozoico da faixa Seridó, província Borborema (NE do Brasil)*. Dissertação (Mestrado). Natal: Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica - UFRN. Disponível em: https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/18817/1/Dissertacao_DaltonSilva_2011.pdf. Acesso em: 15 set. 2023.
- Silva, M. R. R. (1993). *Petrographical and Geochemical Investigations of Pegmatites in the Borborema Pegmatitic Province of Northeastern Brazil*. Tese (Doutorado). Geowissenschaften, Fak: Ludwig-Maximilians-Universitat.
- Souza, V. O. (2016). *Magmatismo granítico na porção central do domínio Rio Piranhas-Seridó, Província Borborema: geologia e petrologia do Stock Flores (RN)*. Dissertação (Mestrado). Natal: Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica - UFRN. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/21578>. Acessado em: 15 set. 2023.
- Taylor, S. R., McLennan, S. M. (1985). *The Continental Crust: Its Composition and Evolution [M]*. Oxford: Blackwell Scientific Publications. 312 p.
- Williams, M., Schoneveld, L., Mao, Y., Klump, J., Gosses, J., Dalton, H., Bath, A., Barnes, S. (2020). Pyrolite: Python for geochemistry. *Journal of Open Source Software*, 5(50), 2314. <https://doi.org/10.21105/joss.02314>