

Análise de correspondências de litogeoquímica de vulcanismos cenozoicos na porção setentrional da Província Borborema, Brasil

Correspondence Analysis in lithogeochemical relationships of Cenozoic volcanism in Borborema Province – NE Brazil

Luiza Silva Werneck¹ , Christiano Magini^{1,2} , Ana Rita Gonçalves Neves Lopes Salgueiro² 

¹Programa de Pós-Graduação em Geologia, Departamento de Geologia, Universidade Federal do Ceará - UFC, Campus do Pici, Bloco 912, CEP 60455-760, Fortaleza, CE, BR (luiza.werneck@gmail.com; magini2005@hotmail.com)

²Departamento de Geologia, Universidade Federal do Ceará - UFC, Fortaleza, CE, BR (geo.ritasalgueiro@gmail.com)

Recebido em 11 de janeiro de 2017; aceito em 30 de agosto de 2018

Resumo

A correlação litogeoquímica entre amostras é geralmente realizada por meio de gráficos predefinidos na literatura ou de análises bivariadas entre cada um dos elementos analisados. Aplicar uma análise multivariada nos dados geoquímicos de um conjunto de amostras, que são multivariadas por natureza, permite tratar esses dados em um espaço dimensional reduzido, compreendendo assim os processos de comportamento dos indivíduos. A análise fatorial das correspondências (AFC) propicia ainda comparar indivíduos (linhas) e variáveis (colunas) quantitativas ou qualitativas de um conjunto de dados no mesmo espaço e de forma simétrica. Neste trabalho, a AFC de um conjunto de análises geoquímicas de amostras de rochas vulcânicas de idades cenozoicas da porção setentrional da Província Borborema relacionou a nova ocorrência vulcânica da cidade de Fortaleza ao vulcanismo alcalino de Fernando de Noronha (FN), distinguindo-os do vulcanismo Macau principalmente devido ao empobrecimento relativo em elementos terras raras (ETR). O método permitiu também distinguir similaridades geoquímicas entre Fortaleza e FN, tais como valores maiores de Na₂O, K₂O, Al₂O₃, TiO₂, P₂O₅ e CaO₂ e menores de SiO₂ e MgO relativamente às rochas do vulcanismo Macau. Os elementos traço Rb, Nb, Th e Ga se correlacionam e aumentam ou diminuem juntos para cada um dos vulcanismos, enquanto Sr e Ba comportam-se inversamente ao conjunto Cr e Ni.

Palavras-chave: Vulcanismo alcalino; Geomatemática; Análise multivariada.

Abstract

The lithogeochemical correlation among samples generally uses pre-defined graphs in the literature or bivariate analysis for each of the elements analyzed. Applying a multivariate analysis to the geochemical data of a set of samples, which are naturally multivariate, allows to deal with these data in a reduced dimensional space, thus understanding the behavioral processes of individuals. Correspondence Analysis (CA) also permits comparing individuals (rows) and quantitative or qualitative variables (columns) of a set of data in the same workspace and in a symmetrical way. In this paper, the CA of a set of geochemical analyzes of Cenozoic volcanic rocks of the Borborema Province's Northern portion correlated a newly discovered volcanic occurrence at Fortaleza to Fernando de Noronha's alkaline volcanism, distinguishing itself from the volcanism of Macau, mainly due to its relative depletion in Rare Earth Elements. The method also allowed to distinguish some geochemical similarities between rocks from Fortaleza and Fernando de Noronha, such as higher values of Na₂O, K₂O, Al₂O₃, TiO₂, P₂O₅ and CaO₂, and smaller of SiO₂ e MgO relatively to those of Macau Volcanism. Trace elements like Rb, Nb, Th and Ga are correlated, and their values increase or decline together on each volcanism, while Sr and Ba have an inverse behavior of Cr and Ni.

Keywords: Alkaline volcanic; Geomathematics; Multivariate analysis.

INTRODUÇÃO

Assim como outras técnicas de análise multivariada, a análise fatorial de correspondência (AFC) objetiva correlacionar amostras de diferentes lugares testando sua cogeneticidade. Essa correlação pretende delimitar os eixos de inércia da nuvem de pontos dos indivíduos, permitindo ainda a representação simultânea das amostras e de suas propriedades em um espaço conjunto a partir de uma transformação simétrica das linhas (indivíduos) e colunas (variáveis) (Valençon, 1982; Pereira e Sousa, 1988; Hair et al., 2009).

Dados geoquímicos são multivariados por natureza (Mellinger, 1984). As relações entre esses elementos químicos são interdependentes, podendo haver ou não covariância e cogeneticidades. Os dados litogeoquímicos são plotados em diagramas de classificação litológica, tectônica e isotópica (Irvine e Baragar, 1971; Le Maitre, 1976, 2002; Cox et al., 1979; Gill, 2010) a fim de estabelecer relações genéticas entre as amostras através de diagramas binários, ternários ou *spider plots*.

Em uma AFC, a proximidade da projeção dos resultados em planta indica o nível de associação entre as linhas e as colunas; sua única exigência é que os dados a serem trabalhados componham uma matriz retangular de entradas não negativas (Hair et al., 2009). É uma técnica utilizada em vários ramos de investigação, inclusive nas Ciências da Terra: seu uso mais comum é para avaliação da contaminação ambiental (Salgueiro et al., 2008; Ferreira da Silva et al., 2013). Seu emprego no contexto litogeoquímico teve início na década de 1980 (Valençon, 1982; Mellinger, 1984), entretanto sua aplicação não é usual.

O modelo ativo em uma AFC, assim como em outros métodos de análise fatorial, encontrará o sistema de eixos que melhor ajusta a nuvem de pontos das variáveis ativas, permitindo, dessa maneira, diminuir a dimensão do espaço com perda mínima de informação (Howarth e Sinding-Larsen, 1983). Esse processo se dá a partir da matriz disjuntiva completa dos dados. Já a chamada projeção suplementar funciona como uma ferramenta gráfica, que permite projetar as variáveis sobre os eixos de inércia sem que seus valores contribuam para a construção deles (Mellinger, 1984).

Entende-se por explicação a contribuição de certas variáveis para a formação de um dado eixo. As contribuições absolutas explicam o modelo ativo, e cada eixo é explicado pelas propriedades (ou pelos indivíduos), cuja contribuição absoluta é mais importante. Sua relevância para um dado eixo deve ser superior a $100/p$, em que p é o número de modalidades (Salgueiro et al., 2013). Quando alguma variável é colocada como suplementar, sua contribuição passa a ser relativa. Pode haver uma avaliação de como a modalidade em suplementar se comporta frente ao modelo a partir do valor de sua

contribuição relativa, mas essa é uma ferramenta puramente comportamental.

A possibilidade de correlacionar um número X de variáveis (elementos químicos) de amostras com diferentes origens e, durante esse processo, não perder o controle dessa origem motivou este trabalho. Seu objetivo principal é identificar as similaridades entre as amostras de uma ocorrência vulcânica subafiorante recém-descoberta na cidade de Fortaleza (CE) e amostras de diferentes vulcanismos da Província Borborema Setentrional. Com base na análise multivariada por AFC, foi realizado um mapeamento perceptual entre as relações geoquímicas dessas amostras, visando diminuir o número de variáveis para um menor número de dimensões nas quais essas variáveis foram correlacionadas.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

A Província Borborema (Almeida et al., 1977) é um cinturão orogênico edificado no Neoproterozoico (Arthaud et al., 2008), que presenciou, durante o Meso-Cenozoico, pelo menos três vulcanismos de idades distintas nos estados do Rio Grande do Norte e Ceará (Almeida, 2006; Almeida et al., 1988; Mizusaki et al., 2002). Essas atividades vulcânicas estariam relacionadas ao processo de separação da América do Sul e África, culminando na formação do Oceano Atlântico (Mizusaki e Thomaz Filho, 2004).

O vulcanismo Rio Ceará-Mirim (Gomes et al., 1981; Martins et al., 1989), cujas idades variam de 145 a 120 Ma, é de afinidade toleítica, ocorre em um *trend* E-W na borda sul da Bacia Potiguar, além de inúmeras ocorrências dique-formes no embasamento. O vulcanismo Serra do Cuó tem natureza toleítica a moderadamente alcalina, ocorre na borda sul da Bacia Potiguar e na Bacia Ceará, com idades entre 83 e 93 Ma (Oliveira, 2000). No Rio Grande do Norte, o vulcanismo Macau, de afinidade alcalina, ocorre como corpos de direção E-W alinhados em *trend* aproximadamente N-S, tanto na porção emersa quanto na submersa da Bacia Potiguar, com idade variando entre 45 e $7,1 \pm 0,1$ Ma (Mizusaki et al., 2002; Oliveira, 1998; Silveira, 2006; Knesel et al., 2011). Restrito ao Estado do Ceará está o vulcanismo Messejana (Almeida et al., 1988; Vandoros e Oliveira, 1968), também de afinidade alcalina, que forma um alinhamento E-W com o Arquipélago de Fernando de Noronha (FN) e tem idades entre 44 e 29,9 Ma. Esses dois últimos estariam relacionados à atividade mantélica anômala associada a reajustes de falhas da Plataforma Sul-Americana (Almeida, 1986; Almeida, 2006; Almeida et al., 1988; Gomes et al., 1981; Mizusaki et al., 2002; Rodrigues, 1976; Schobbenhaus et al., 1984).

As amostras analisadas foram provenientes de três furos de sondagem da obra do Metrô de Fortaleza e estão a uma profundidade média de 30 metros. A distribuição dos furos e dados geofísicos permitem inferir ao corpo uma morfologia tabular na forma de soleira (Werneck e Magini, 2017).

A primeira etapa do trabalho envolveu a compilação de análises geoquímicas de rochas vulcânicas da região setentrional da Província Borborema (Figura 1). Os dados geoquímicos do corpo vulcânico subafiorante em Fortaleza, que difere petrográfica e geoquimicamente do vulcanismo Messejana (Werneck e Magini, 2017), foi comparado com dados de outros vulcanismos da região existentes na literatura (Guimarães et al., 1982; Rao e Sial, 1972; Lopes, 2002; Silveira, 2006; Ngonge et al., 2016).

Métodos

Um conjunto de 182 amostras de rochas vulcânicas foi classificado a partir do Diagrama TAS (Le Bas et al., 1986), como mostrado na Figura 2, incluindo-se as três amostras do basanita subafiorante de Fortaleza. Do total das amostras, 41 foram classificadas como basanita e seguiram para a AFC, das quais

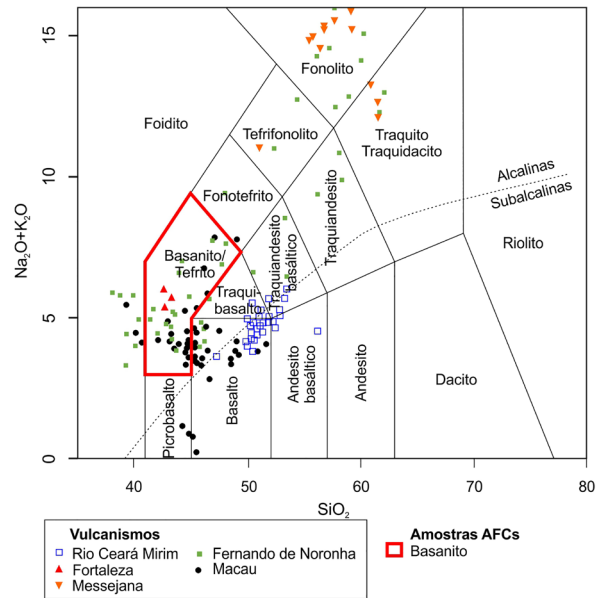
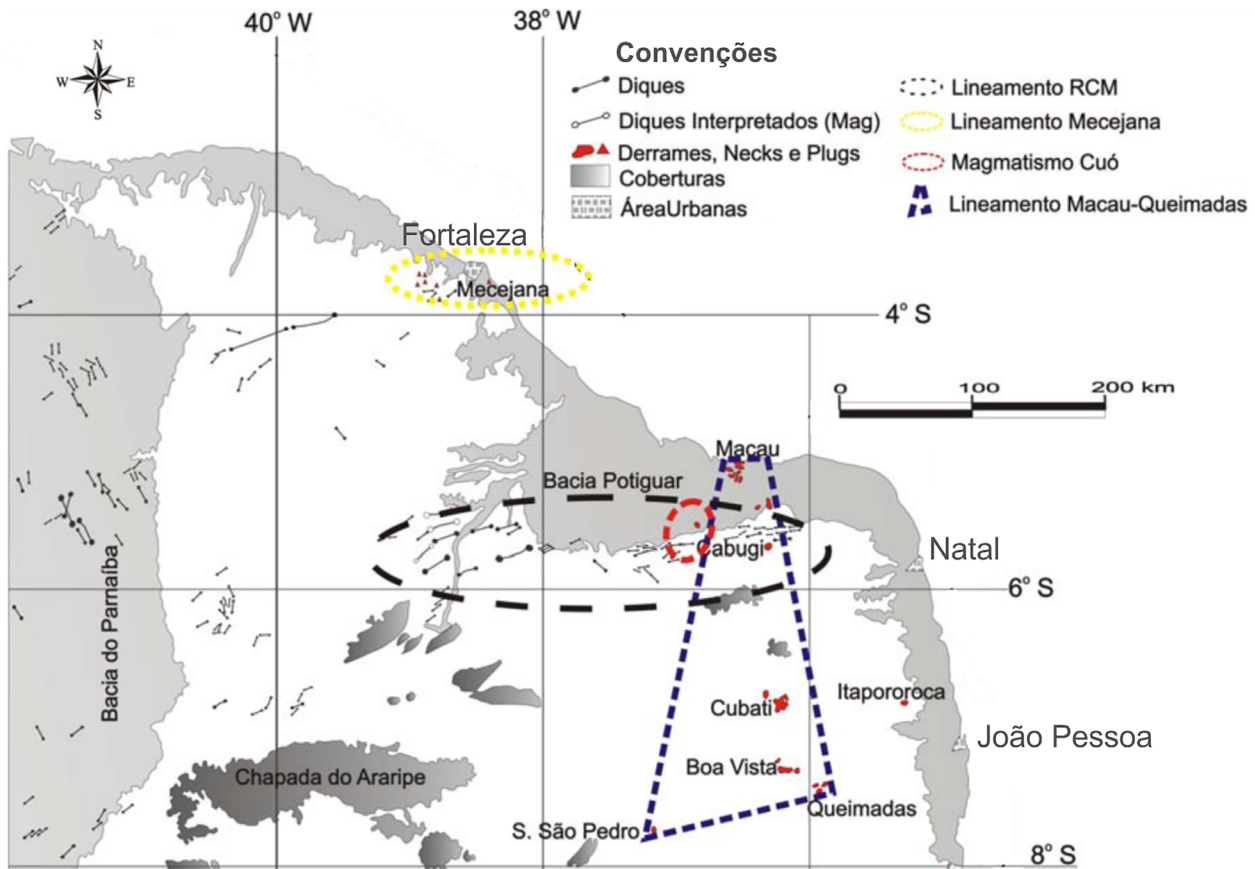


Figura 2. Diagrama de classificação TAS (Le Bas et al., 1986) com a representação de 182 amostras de vulcânicas cenozoicas da região setentrional da Província Borborema.



Fonte: modificado de Silveira (2006).

Figura 1. Localização dos vulcanismos meso-cenozoicos da Província Borborema.

17 são do vulcanismo FN, 21, do vulcanismo Macau e três, do corpo subaflorante de Fortaleza (Documento Suplementar). A origem de cada indivíduo entra na análise como uma variável qualitativa e é colocada como variável suplementar na AFC.

Foram utilizados apenas os elementos químicos comuns a todas as 41 amostras (Tabela 1), totalizando 35 variáveis,

Tabela 1. Participação das variáveis quantitativas e qualitativas utilizadas nas três análises fatoriais de correspondências.

Variáveis	AFC 1	AFC 2	AFC 3		
Quantitativas					
%	SiO ₂	X	X	O	
	TiO ₂	X	X	O	
	Al ₂ O ₃	X	X	O	
	Fe ₂ O ₃	X	X	O	
	FeO	X	X	O	
	MnO	X	X	O	
	MgO	X	X	O	
	CaO	X	X	O	
	Na ₂ O	X	X	O	
	K ₂ O	X	X	O	
	P ₂ O ₅	X	X	O	
	ppm	Ba	X	O	X
		Rb	X	O	X
		Sr	X	O	X
		Y	X	O	X
Zr		X	O	X	
Nb		X	O	X	
Th		X	O	X	
Ga		X	O	X	
Ni		X	O	X	
V		X	O	X	
Cr		X	O	X	
Co		X	O	X	
La		X	O	X	
Ce		X	O	X	
Nd		X	O	X	
Sm	X	O	X		
Eu	X	O	X		
Gd	X	O	X		
Dy	X	O	X		
Ho	X	O	X		
Er	X	O	X		
Yb	X	O	X		
Lu	X	O	X		
Qualitativas					
Localização/ Origem	Fort	O	O	O	
	FNor	O	O	O	
	Mac	O	O	O	

AFC: análise fatorial de correspondência; X: variável ativa; O: variável suplementar; ppm: partes por milhão; Fort: Fortaleza; FNor: Fernando de Noronha; Mac: Macau.

sendo 34 quantitativas e uma qualitativa, subdividida em três modalidades intrínsecas de localização.

Neste trabalho, foram realizadas três AFCs — na primeira, somente a variável de localização foi colocada como suplementar. Para Mellinger (1984), os padrões de variação dos dados devem ser investigados separadamente para elementos maiores e para traços, sendo esse princípio testado nas outras duas AFCs. Na segunda AFC, as variáveis relativas aos elementos traço foram colocadas em suplementar, ou seja, os elementos maiores foram as variáveis ativas e os fatores relativos a esses dados exibem as variações mineralógicas entre as amostras. Já na terceira AFC, as variáveis que entraram como suplementar foram as relativas aos elementos maiores. Assim, os elementos traço foram as variáveis ativas que criaram um modelo que pôde fornecer informações a respeito da variação do elemento traço como elemento de substituição em um mineral, a partir de sua relação com as variáveis suplementares, ilustrando sua relação na assinatura geoquímica de processos geológicos. As participações de cada uma das variáveis nas AFCs podem ser acompanhadas na Tabela 1.

As AFCs foram realizadas no Programa Andad (versão 7.12), e o próprio *software* gera a matriz disjuntiva completa, seguindo as predefinições das modalidades definidas. Em todas as análises, as variáveis foram divididas em duas modalidades de igual frequência (valores maiores e valores menores), a fim de garantir o equilíbrio entre as modalidades.

RESULTADOS

Conforme mostrado na Figura 2, a vulcânica de Fortaleza cai no campo dos basanitos, portanto este foi critério para a escolha das outras amostras que também fariam parte das AFCs. Os outros vulcanismos que também têm amostras que caem nesse campo são Macau e FN.

AFC 1: todos os elementos ativos, localização como suplementar

Na primeira AFC, foram retidos quatro eixos que representam 98,36% de explicação dos dados. O eixo 1 contém 90,77% de explicação, enquanto 2, 3 e 4 têm, respectivamente, 5,76, 1,27 e 0,56% de explicação. Apenas as variáveis de localidade entraram como suplementar nessa análise, ou seja, são as variáveis que estão sendo testadas no modelo e não contribuíram efetivamente para a construção dos eixos. A Tabela 2 apresenta quais variáveis ativas são explicadas em cada um desses eixos. Duas variáveis ativas, Sr e Zr, não estão explicadas pelos eixos retidos.

Em relação às variáveis que compõem o eixo 1 (Tabela 2), sua porção positiva 1 é composta principalmente

das modalidades de menor valor, com exceção do Co. As variáveis em suplementar, quando projetadas no gráfico (Figura 3A), nos mostram que a parte positiva do eixo 1 tem contribuição relativa (Tabela 3) somente de Macau, enquanto a parte negativa recebe forte contribuição relativa das modalidades de maior valor de Fortaleza e FN, exceto para a variável Co. As contribuições relativas das variáveis em suplementar nessa primeira análise estão fortemente relacionadas ao eixo 1, como pode ser observado na Tabela 3.

Tabela 2. Relação de variáveis que contribuíram para cada um dos eixos retidos.

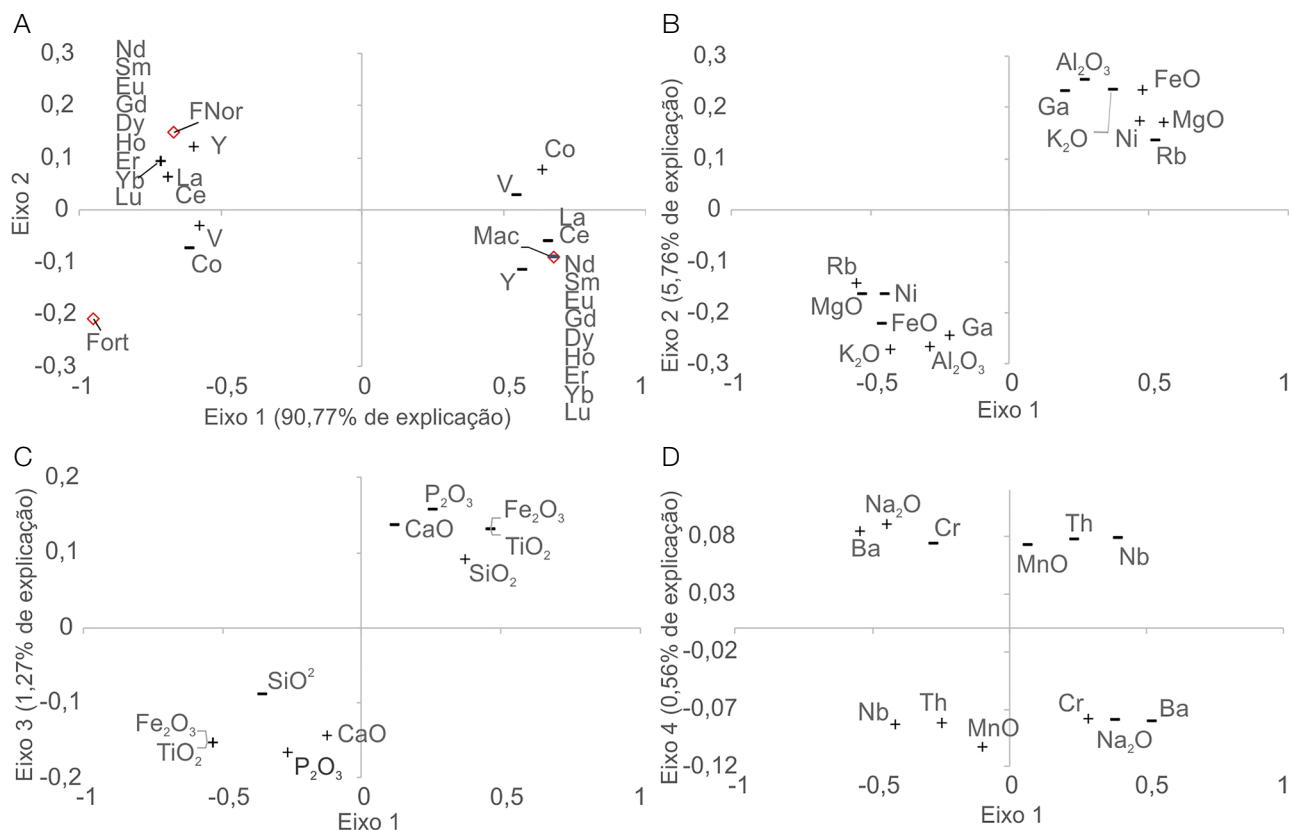
Eixo	Variável	Explicação
Eixo 1	Nd; Sm; Eu; Gd; Dy; Ho; Er; Yb; Lu; La; Ce; Co; Y; V	90,77 %
Eixo 2	Al ₂ O ₃ ; K ₂ O; FeO; Ga; Ni; MgO; Rb	5,76 %
Eixo 3	P ₂ O ₅ ; TiO ₂ ; Fe ₂ O ₃ ; CaO; SiO ₂	1,27 %
Eixo 4	MnO; Na ₂ O; Ba; Nb; Th; Cr	0,56 %

Essas associações indicam forte correlação entre si dos elementos terras raras (ETRs) de menor concentração relativa com as amostras provenientes do vulcanismo Macau. De maneira oposta, as amostras do vulcanismo FN estão correlacionadas às modalidades dos maiores valores de ETR. As amostras de Fortaleza também se correlacionam com as modalidades de maior valor dos ETRs.

Os ETRs, assim como os elementos traço Y e V, têm suas modalidades de menor valor correlacionadas aos indivíduos de Macau, enquanto, para o Co, são as modalidades de maior valor. A recíproca é verdadeira para as amostras de FN e Fortaleza.

Tabela 3. Contribuição relativa das variáveis suplementares de localização.

Variável	Eixo 1	Eixo 2	Eixo 3	Eixo 4
Fort	0,855383	0,041727	0,000196	0,008688
FNor	0,938783	0,04665	0,002584	0,00048
Mac	0,979585	0,017524	0,00198	0,000005



+: Modalidades dos maiores valores; -: Modalidades dos menores valores e losangos vermelhos; =: variáveis suplementares.

Figura 3. Modalidades de variáveis ativas que contribuem para cada um dos eixos retidos na análise fatorial de correspondência 1: (A) planos fatoriais F1/F2, eixo 1 com 90,77% de explicação e a representação das suplementares Fort, FNor e Mac; (B) planos fatoriais F1/F2, eixo 2 com 5,76% de explicação; (C) plano fatorial F1/F3, eixo 3 com 1,27% de explicação; (D) plano fatorial F1/F4, 0,56% de explicação no eixo 4.

Os maiores valores de FeO, MgO e Ni, segundo essa divisão em modalidades, estão relacionados à parte positiva do eixo 2, assim como os menores valores de Al₂O₃, K₂O, Ga e Rb (Figura 3B). Da mesma forma, os valores mais baixos daquelas variáveis e os mais altos destas estão relacionados à porção negativa do eixo 2 (Figura 3B).

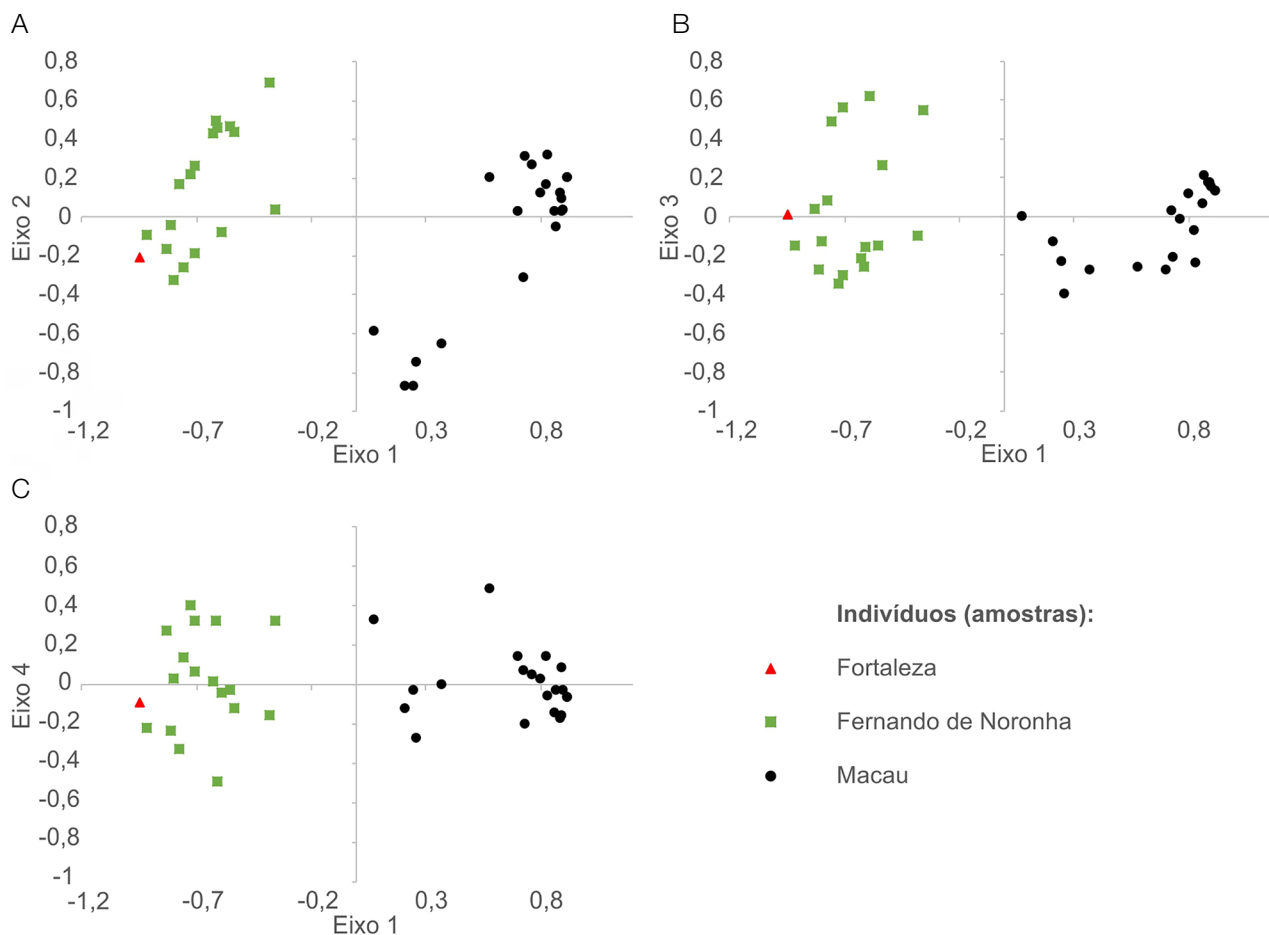
Nesse conjunto de dados, as modalidades de variáveis ativas que contribuem negativamente para o eixo 3 (Figura 3C) são os maiores valores de P₂O₅, TiO₂ e Fe₂O₃ e os menores de SiO₂ e CaO, enquanto as modalidades opostas contribuem para a porção positiva desse eixo.

Em relação ao eixo 4, as modalidades de menor valor de Th, Nb, Cr e MnO estão relacionadas a sua porção positiva, assim como a modalidade dos maiores valores de Na₂O e de Ba. Já à sua porção negativa estão relacionadas as modalidades de maior valor Th, Nb, Cr e MnO e valores mais baixos de Na₂O e Ba (Figura 3D).

Nos planos fatoriais em que estão representadas as correlações entre os indivíduos (Figura 4), destaca-se o distanciamento dos indivíduos de Macau em relação aos demais. Apesar de alguma dispersão ao longo dos eixos, indivíduos do mesmo grupo, geralmente, estão próximos entre si, e os indivíduos de Fortaleza são mais correlacionáveis com os de FN do que com os de Macau. É claro também que os indivíduos de Fortaleza são tão correlacionáveis entre si que são sempre projetados no mesmo ponto.

AFC 2: elementos maiores ativos, traço e localização como suplementar

Na segunda AFC realizada, apenas com os elementos maiores ativos e todas as outras variáveis em suplementar, foram retidos somente dois eixos, com o total de 90,10% de



Triângulo: amostras de Fortaleza; quadrados: amostras de Fernando de Noronha; círculos: amostras de Macau.

Figura 4. Planos fatoriais com as projeções dos indivíduos: (A) plano fatorial F1/F2; (B) plano fatorial F1/F3; (C) plano fatorial F1/F4.

explicação, sendo 71,14% desta no eixo 1 e 18,96% no 2. A Tabela 4 apresenta quais variáveis ativas contribuem para cada um dos eixos retidos. A variável Al_2O_3 , apesar de ter maior contribuição absoluta no eixo 1, também apresenta boa contribuição para o 2 e, por isso, foi analisada nos dois eixos. As variáveis ativas MnO e Na_2O não estão explicadas nesses eixos, estando, respectivamente, em 3 e 4, nos quais não podem ser satisfatoriamente correlacionadas com outras variáveis e, portanto, não terão seus planos fatoriais apresentados.

Nessa segunda análise, a parte positiva do eixo 1 é composta das modalidades de maior valor de FeO (Fe^{2+}) e MgO e pelas modalidades de menor valor de K_2O , TiO_2 , Fe_2O_3 (Fe^{3+}) e Al_2O_3 , dentro desse conjunto de dados. A porção negativa desse eixo é composta das modalidades opostas às supramencionadas, como pode ser observado na Figura 5A.

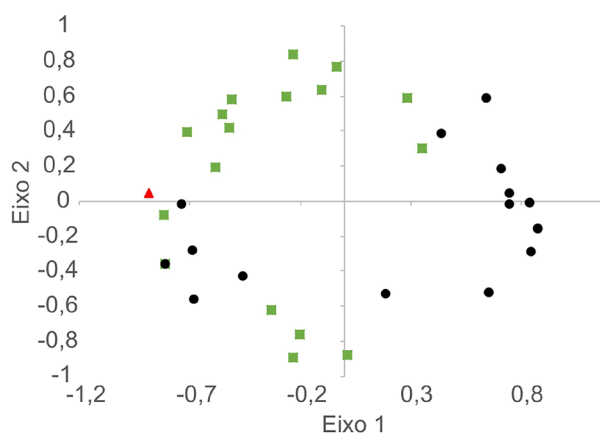
Todas as variáveis suplementares são projetadas no eixo 1. Pode-se dizer que todas as variáveis colocadas em suplementar nessa AFC têm contribuição relativa no eixo 1. As de localização, Fort e FNor, correlacionam-se mais à porção negativa desse eixo, enquanto Mac o faz com sua porção positiva.

Tabela 4. Relação de variáveis que contribuíram para cada um dos eixos retidos na segunda análise fatorial de correspondência.

Eixo	Variável	Explicação
Eixo 1	FeO ; MgO ; K_2O ; TiO_2 ; Fe_2O_3 ; Al_2O_3	71,14 %
Eixo 2	SiO_2 ; Al_2O_3 ; CaO ; P_2O_4	18,96 %

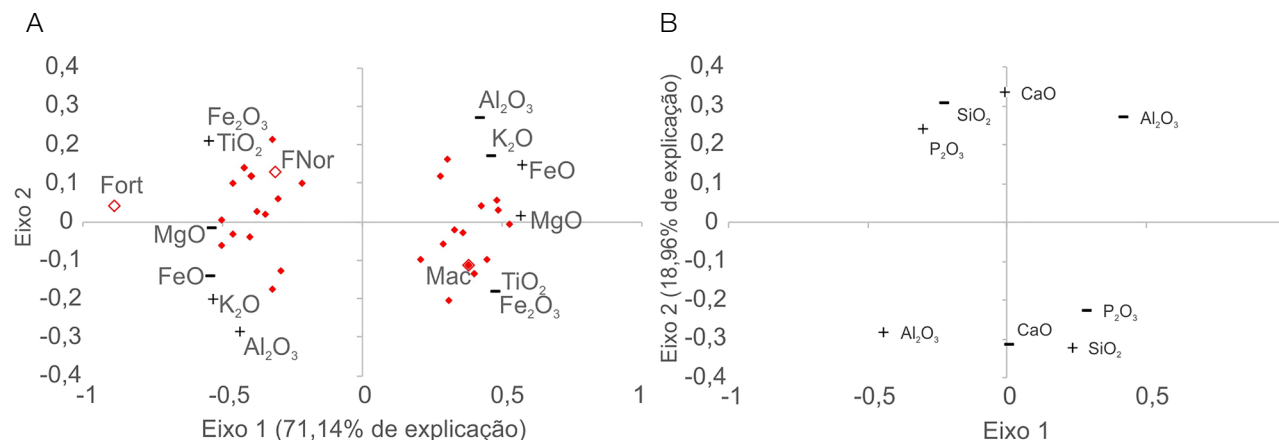
Os maiores valores de CaO e P_2O_5 e os menores valores de SiO_2 e Al_2O_3 , segundo essa divisão em modalidades, estão relacionados à parte positiva do eixo 2 (Figura 5B). Da mesma forma, os valores mais baixos daquelas variáveis e os mais altos destas estão associados à porção negativa do eixo 2 (Figura 5B).

A projeção dos indivíduos dessa AFC mostra a formação de quatro subgrupos (Figura 6), dois para Macau e dois para FN. Os indivíduos de Fortaleza, além de permanecerem sempre juntos, representados pelo mesmo ponto, continuam associados aos de FN.



Triângulos: amostras de Fortaleza; quadrados: amostras de Fernando de Noronha; círculos: amostras de Macau.

Figura 6. Planos fatoriais com a projeção dos indivíduos da segunda análise fatorial de correspondência.



+: modalidades dos maiores valores; -: modalidades dos menores valores; losangos vermelhos cheios: elementos traço (suplementares); losangos vazados: variável de localização (suplementares).

Figura 5. Plano fatorial F1/F2 com as modalidades de variáveis ativas que contribuem para cada um dos eixos retidos na análise fatorial de correspondência: (A) 71,14% de explicação no eixo 1 e a representação das variáveis suplementares explicadas no eixo 1 e (B) eixo 2 com 18,96% de explicação.

AFC 3: elementos traço ativos, maiores e localização como suplementar

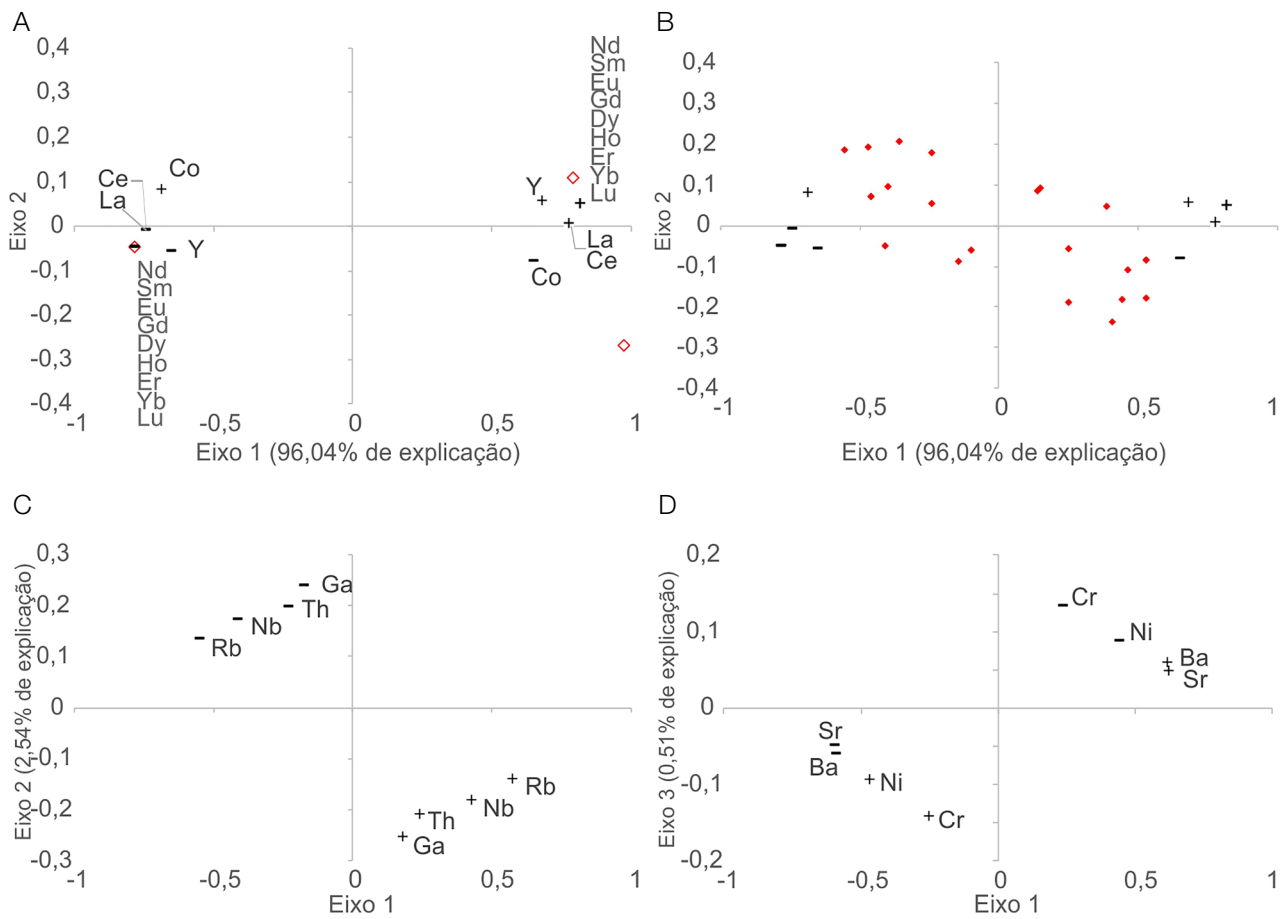
A terceira AFC coloca os elementos traço como variáveis ativas e os maiores juntamente com as localizações como suplementares. Nessa análise, foram retidos três eixos com o total de explicação de 99,09%, sendo 96,04% de explicação no eixo 1, 2,54% no 2 e 0,51% no 3. A Tabela 5 mostra quais variáveis contribuem para cada um desses três eixos e Zr e V não são explicadas em nenhum desses eixos.

Em relação ao eixo 1 da terceira AFC, as modalidades de maior valor de ETRs e do elemento traço Y e dos menores valores de Co, desse conjunto de dados, estão relacionadas a sua porção positiva. À sua porção negativa estão relacionadas as modalidades de menor valor de ETR e Y e dos valores mais altos de Co (Figura 7A).

Todas as variáveis em suplementar têm contribuição relativa com o eixo 1. Quando elas são projetadas no plano fatorial F1/F2 (Figura 7B), é possível perceber que somente Macau tem contribuição relativa negativa do eixo 1, já FN e Fortaleza têm contribuição relativa na porção positiva do eixo 1. Também fica claro que as relações encontradas entre

Tabela 5. Relação de variáveis que contribuíram para cada um dos eixos retidos na terceira análise fatorial de correspondência.

Eixo	Variável	Explicação
Eixo 1	Lu; Nd; Sm; Eu; Gd; Dy; Ho; Er; Yb; Lu; La; Ce; Co; Y;	96,04 %
Eixo 2	Ga; Th; Nb; Rb	2,54 %
Eixo 3	Cr; Ni; Ba; Sr	0,51 %



+: modalidades dos maiores valores; -: modalidades dos menores valores; losangos vermelhos cheios: elementos maiores (suplementares); losangos vazados: variável de localização (suplementares).

Figura 7. Planos fatoriais com as modalidades de variáveis ativas que contribuem para cada um dos eixos retidos na análise fatorial de correspondência 3: (A) 96,04% de explicação no eixo 1 e projeção das suplementares de localização; (B) projeção dos elementos maiores (suplementares) no eixo 1; (C) 2,54% das variáveis ativas contribuem no eixo 2; (D) 0,51% das variáveis ativas colaboram para o eixo 3.

as modalidades dos elementos maiores se mantêm quando estes estão como variáveis suplementares.

Para o eixo 2, as modalidades de variáveis ativas desse conjunto de dados que contribuem em sua porção positiva (Figura 7C) são os menores valores de Ga, Th, Nb e Br, e suas modalidades de maiores valores contribuem para a porção negativa desse eixo. Em relação ao 3, as modalidades dos maiores valores de Ba e Sr e os menores de Cr e Ni contribuem para sua porção positiva, enquanto as modalidades opostas o fazem para sua porção negativa (Figura 7D).

Os planos fatoriais nos quais são representados os indivíduos (Figura 8) da terceira AFC mostram novamente uma divisão entre os de Macau e os demais. Os de Fortaleza também continuam mais próximos aos de FN e, dentro do conjunto Fortaleza, seus indivíduos continuam projetados no mesmo ponto.

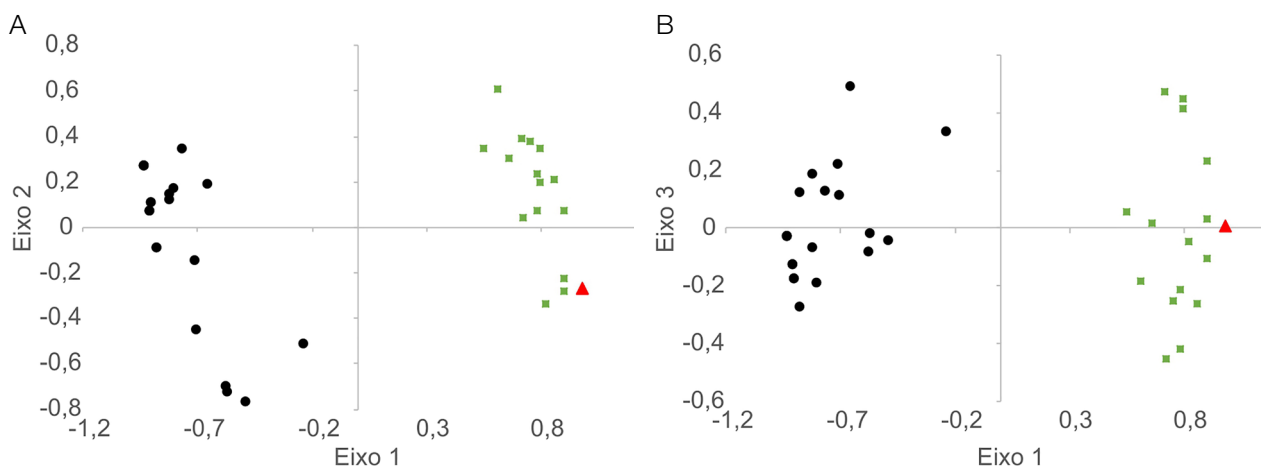
DISCUSSÃO

Embora nem todos os valores de ETRs estejam representados pelo mesmo ponto, eles têm comportamento muito similar no mesmo eixo, o que reflete suas propriedades químicas bastante parecidas (Gill, 1996). Nas três AFCs, os valores maiores dos ETRs correlacionam-se aos maiores valores do elemento traço Y, que, em sua forma iônica 3^+ , tem o mesmo raio iônico do Ho^{3+} (Gill, 1996). Em todas as AFCs, o eixo 1 das variáveis suplementares (Mellinger, 1984) mostra que Macau se enquadra no modelo das modalidades de menor valor de ETR. Já FN se correlaciona com as modalidades dos maiores valores de ETR. As amostras do vulcanismo em Fortaleza, apesar de também estarem relacionadas às modalidades de maiores valores de ETRs, também estão

influenciadas pela modalidade alta de V e pela baixa de Co. Essas correlações são reforçadas principalmente na AFC 3. Em termos geoquímicos, essa correlação de Macau com o eixo 1 e as modalidades que o constituem indica que as rochas desse vulcanismo são mais empobrecidas em elementos ETR com relação aos outros dois.

Na AFC 1, as correlações dos valores mais altos de FeO (Fe^{2+}), MgO e Ni com as modalidades de mais baixo valor de Al_2O_3 e Ga e dos álcalis K_2O e Rb, nesse conjunto de dados, indicam que, nos indivíduos cujos teores são altos em uma dessas associações, os teores serão relativamente mais baixos na outra associação. Sendo FeO (Fe^{2+}), MgO e Ni formadores da olivina (Gill, 2010; Walther, 2009) e Al_2O_3 , Ga, K_2O e Rb constituintes dos feldspatos (Gill, 1996), observa-se que as rochas com mais olivina terão menos feldspatos. Essas relações permanecem na AFC 2, na qual os elementos maiores são colocados como variáveis ativas.

A correlação entre CaO e P_2O_5 está relacionada à cristalização de apatita, que é um mineral acessório relativamente comum de ser cristalizado em magmas básicos alcalinos (Gill, 1996). Elementos como Th e Nb fazem parte do chamado grupo *high field strength* (Walther, 2009), ou seja, têm carga iônica alta (4^+) e podem estar se substituindo em alguma fase mineral. A correlação entre Cr e Ni, ambos metais de transição, observada na AFC 3 também ocorre na primeira análise, apesar de não ser tão forte. Os elementos Ba e Sr se correlacionam na AFC 3, ambos são fortemente eletropositivos (2^+) e bastante reativos, podendo substituírem-se em diversos minerais (Walther, 2009; Gill, 1996). O Ba pode entrar na estrutura de K-feldspatos e biotita, enquanto o Sr acompanha o Ca em maiores quantidades nos plagioclásios e em menor quantidade nas apatitas. As modalidades que formam o eixo 4 na AFC 1 mostram uma semelhança em



Triângulo: amostras de Fortaleza; quadrados: amostras de Fernando de Noronha; círculos: amostras de Macau.

Figura 8. Planos fatoriais com a projeção dos indivíduos da análise fatorial de correspondência 3.

termos de contribuição absoluta, o que não implica em uma relação geoquímica para todas as variáveis.

Na projeção dos indivíduos da AFC 2, foram formados dois subgrupos de FN e dois de Macau (Figura 6). Essa subdivisão é atribuída à variação mineralógica dentro de cada uma dessas unidades (Mellinger, 1984). Na projeção dos indivíduos na AFC 1, apenas a localização é colocada como suplementar, enquanto na AFC 3 os elementos maiores também o são. Tanto a AFC 1 como a 3 sugerem uma maior semelhança entre os vulcanismos Fortaleza e FN.

Os indivíduos de Fortaleza sempre são projetados no mesmo ponto, o que indica a forte correlação entre as amostras de um mesmo corpo, comprovando a baixa variabilidade química das amostras e sua forte homogeneidade mineralógica e química.

CONCLUSÕES

As AFCs realizadas permitiram constatar que as amostras do vulcanismo subaflorante de Fortaleza se correlacionam mais com as do de FN do que com as do Macau, embora, no Diagrama TAS, as 41 amostras tenham sido classificadas como basanitos. Portanto, o tratamento estatístico permite que sejam identificadas pequenas variações internas dentro de um conjunto de rochas classificadas como iguais pela geoquímica convencional.

A possibilidade de comparação de dados quantitativos (análises químicas) e qualitativos relativos à procedência das amostras permitiu relacionar características que geralmente não podem ser cotejadas entre si de forma trivial e direta. Além disso, a AFC possibilitou a redução de um universo de 35 variáveis para poucos eixos em cada uma das análises (4, 2 e 3). Destaca-se também a perspectiva para o mapeamento do comportamento de elementos traço em minerais acessórios que são vistos como ótimos indicadores petrogenéticos.

Os dados analisados no tratamento estatístico realizado confirmam aplicabilidade da AFC como um bom método de correlação de dados litogeoquímicos, permitindo relacionar os diversos elementos de uma análise química e mapear seu comportamento em diferentes grupos rocha. Seu relativo baixo custo e sua representação gráfica simples são importantes vantagens do método, entretanto sua aplicação não isenta o uso dos diagramas clássicos de classificação no processo de identificação e caracterização petrogenética.

REFERÊNCIAS

Almeida, F.F.M. (1986). Distribuição regional e relações tectônicas do magmatismo póspaleozóico no Brasil. *Rev. Bras. Geociências*, 16, 325-349.

Almeida, F. F. M. (2006). Ilhas oceânicas brasileiras e suas relações com a tectônica atlântica. *Terræ Didática*, 2(1), 3-18.

Almeida, F. F. M., Carneiro, C. D. R., Machado Júnior, D. L., Dehira, L. K. (1988). Magmatismo pós-Paleozóico no Nordeste Oriental do Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, 18(4), 451-462.

Almeida, F. F. M., Hasui, Y, Brito Neves, B. B., Fuck, R. A. (1977). Províncias estruturais brasileiras. *VIII Simpósio de Geologia do Nordeste*, 363-391. Campina Grande: SBG/ Núcleo Nordeste.

Arthaud, M. H., Caby, R., Fuck, R. A., Dantas, E. L., Parente, C. V. (2008). Geology of the Northern Borborema Province, NE Brazil and its Correlation with Nigeria, NW Africa. *Geological Society, Special Publication*, 294, 49-67. <https://doi.org/10.1144/SP294.4>

Cox, K. G., Bell, J. D., Pankhurst, R. J. (1979). *The Interpretation of Igneous Rock*. Londres: Allen & Unwin. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-3373-1>

Ferreira da Silva, E., Freire Ávila, P., Salgueiro, A. R., Candeias, C., Garcia Pereira, H. (2013). Quantitative-spatial assessment of soil contamination in S. Francisco de Assis due to mining activity of the Panasqueira mine (Portugal). *Environmental Science and Pollution Research*, 20, 7534-7549. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-1495-2>

Gill, R. (1996). *Chemical fundamentals of geology*. 2ªed. Londres: Chapman & Hall.

Gill, R. (2010). *Igneous Rocks and Processes: A Practical Guide*. Chichester: Wiley-Blackwell. <https://doi.org/10.1002/gj.1320>

Gomes, J. R. C., Gatto, C. M. P. P., Souza, G. M. C., Luz, D. S., Pires, J. L., Teixeira, W., Franca, F. A. B., Cabral, E. M. A., Menor, E. A., Monteiro, N., Barros, M. J. G., Ribeiro, E. G., Lima, E. A., Fonseca, R. A. (1981). Geologia. In: PROJETO RADAMBRASIL. *Folhas SB.24/25 Jaguaribe e Natal: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra (27-300)*. Rio de Janeiro: Ministério de Minas e Energia/Secretaria Geral.

Guimarães, I. P., Sial, A. N., Silva Filho, A. F. (1982). Petrologia e geoquímica da província alcalina terciária Fortaleza, Ceará. *XXXII Congresso Brasileiro de Geologia*, 577-588. Salvador: SBG.

Hair, J. F. J., Black, W. C., Babin, B. J., Anderson, R. E., Tatham, R. L. (2009). *Análise multivariada de dados*. 6ª ed. Porto Alegre: Bookman.

- Howarth, R. J., Sinding-Larsen, R. (1983). Multivariate analysis, in Handbook of exploration geochemistry. In: G. J. S. Govett (Ed.), *Statistics and data analysis in geochemical prospecting*. Amsterdam: Elsevier. v. 2.
- Irvine, T. N., Baragar, W. R. A. (1971). A Guide to the Chemical Classification of the Common Volcanic Rocks. *Canadian Journal of Earth Science*, 8, 523-548. <https://doi.org/10.1139/e71-055>
- Knesel, K. M., De Souza, Z. S., Vasconcelos, P. M., Cohen, B. E., Silveira, F. V. (2011). Young volcanism in the Borborema Province, NE Brazil, shows no evidence for a trace of the Fernando de Noronha plume on the continent. *Earth and Planetary Science Letters*, 302, 38-50. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.11.036>
- Le Bas, M. J., Le Maitre, R. W., Streckeisen, A., Zanettin, B. (1986). A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal of Petrology*, 27, 745-750. <https://doi.org/10.1093/petrology/27.3.745>
- Le Maitre, R. W. (1976). The chemical variability of some common igneous rocks. *Journal of Petrology*, 17, 589-598. <https://doi.org/10.1093/petrology/17.4.589>
- Le Maitre, R. W. (2002). Igneous rocks – a classification and glossary of terms. In: R. W. Le Maitre, A. Streckeisen, B. Zanettin, M. J. Le Bas, B. Bonin, P. Bateman. *Recommendations of the IUGS subcommission on the Systematics of Igneous Rocks*. Cambridge. (2nd ed.). Cambridge: University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511535581.001>
- Lopes, R. P. (2002). *O vulcanismo do Arquipélago de Fernando de Noronha, PE: química mineral e geoquímica*. Tese (Doutorado). São Paulo: Programa de Pós-Graduação Mineralogia e Petrologia – USP. <https://doi.org/10.11606/T.44.2002.tde-17092013-095935>
- Martins, G., Bellieni, G., Comin-Chiaramonti, P., Melfi, A. J., Macedo, M. H. F., Piccirillo, E. M. (1989). O enxame de diques máficos mesozóicos Rio Ceará-Mirim -Nordeste do Brasil. *Workshop Diques Máficos Pré-Cambrianos do Brasil*, 257. São Paulo: PROJETO PICG, IUGS-UNESCO.
- Mellinger, M. (1984). Correspondence analysis in the study of lithochemical data: general strategy and the usefulness of various data-coding schemes. *Journal of Geochemical Exploration*, 21, 455-469. [https://doi.org/10.1016/0375-6742\(84\)90067-0](https://doi.org/10.1016/0375-6742(84)90067-0)
- Mizusaki, A. M. P., Thomaz Filho, A. (2004). O magmatismo pós-paleozóico no Brasil. In: V. Mantesso-Neto, A. Bartorelli, C. D. R. Carneiro, B. B. Brito Neves (Eds.). *Geologia do Continente Sul Americano: Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*, 471-486. São Paulo: Beca.
- Mizusaki, A. M. P., Thomaz Filho, A., Milani, E. J., Césero, P. (2002). Mesozoic and Cenozoic igneous activity and its tectonic control in the northeastern region of Brazil, South America. *Journal of South America Earth Sciences*, 15, 183-198. [http://ib.adnxs.com/seg?add=1&redir=http%3A%2F%2Fdx.doi.org%2F10.1016%2FS0895-9811\(02\)00014-7](http://ib.adnxs.com/seg?add=1&redir=http%3A%2F%2Fdx.doi.org%2F10.1016%2FS0895-9811(02)00014-7)
- Ngonge, E. D., Hollanda, M. H. B. M., Archanjo, C. J., Oliveira, D. C., Vasconcelos, P. M. P., Muñoz, P. R. M. (2016). Petrology of continental tholeiitic magmas forming a 350-km-long Mesozoic dyke swarm in NE Brazil: Constraints of geochemical and isotopic data. *Lithos*, 258-259, 228-252. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2016.04.008>
- Oliveira, D. C. (2000). New data on the relative-age and petrochemistry of the Magmatic Cuó event (Potiguar Basin; Northeast Brazil). *XXXI International Geological Congress*. Rio de Janeiro: SBG/Núcleo Sudeste.
- Oliveira, J. F. (1998). *Contribuições dos métodos geofísicos (magnetometria, gravimetria e eletrorresistividade) à geologia da região metropolitana de Fortaleza*. Dissertação (Mestrado). Fortaleza: Programa de Pós-Graduação em Geologia – UFC.
- Pereira, H. G., Sousa, A. J. (1988). *Análise de dados para o tratamento de quadros multidimensionais*. Disponível em: <<http://biomonitor.ist.utl.pt/~ajsousa/AnalDadosTratQuadMult.html>>. Acesso em: 20 nov. 2016.
- Rao, A. B., Sial A. N. (1972). Observations on alkaline plugs near Fortaleza city. Ceará State, Brazil. *XXIV International Geological Congress*, 14, 56-60. Montreal.
- Rodrigues, M. F. B. (1976). *Rochas basálticas do Rio Grande do Norte e Paraíba*. Dissertação (Mestrado). São Paulo: Departamento de Mineralogia e Petrologia do Instituto de Geociências – USP. <https://doi.org/10.11606/D.44.1976.tde-25082015-144716>
- Salgueiro, A. R., Machado, M. J., Barriandos, M., Pereira, H. G., Benito, G. (2013). Flood magnitudes in the Tagus River (Iberian Peninsula) and its stochastic relationship with daily North Atlantic Oscillation since mid-19th Century. *Journal of Hydrology*, 502, 191-201. <http://ib.adnxs.com/seg?add=1&redir=http%3A%2F%2Fdx.doi.org%2F10.1016%2Fj.jhydrol.2013.08.008>

- Salgueiro, A. R., Pereira, H. G., Rico, M. T., Benito, G., Díez-Herreo, A. (2008). Application of correspondence analysis in the assessment of Mine Tailings Dam breakage risk in the Mediterranean Region. *Risk Analysis*, 28, 13-23. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2008.00998.x>
- Schobbenhaus, C., Campos, D. A., Derze, G. R., Asmus, H. E. (1984). *Geologia do Brasil: texto explicativo do mapa geológico do Brasil e da área de ocorrência incluindo depósitos minerais, escala 1:2.500.000*. Brasília: Ministério de Minas e Energia/DNPM.
- Silveira, F. V. (2006). *Magmatismo cenozoico da porção central do Rio Grande do Norte, NE do Brasil*. Tese (Doutorado). Natal: Programa de Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica – UFRN.
- Valençon, F. (1982). The Use of Correspondence Analysis in Geochemistry. *Mathematical Geology*, 14(4), 331-342. <https://doi.org/10.1007/BF01032594>
- Vandoros, P., Oliveira, M. A. F. (1968). Sobre o fonólito de Mecejana, Ceará. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 40(2), 203-206.
- Walther, J. V. (2009). *Essentials of Geochemistry*. Sudbury: Jones & Bartlett.
- Werneck, L. S, Magini, C. (2017). Avaliação petrológica e geoquímica do basanita subaflorante no Município de Fortaleza (CE) e sua correlação com o vulcanismo de Fernando de Noronha, Brasil. *Revista de Geologia*, 30(2), 149-173.