



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

JAQUELINE MESQUITA DE AQUINO

**PROVÍNCIA ALCALINA DE FORTALEZA, CEARÁ, BRASIL: PETROGRAFIA,
GEOQUÍMICA E POTENCIAL COMO REMINERALIZADOR DE SOLOS**

FORTALEZA

2019

JAQUELINE MESQUITA DE AQUINO

PROVÍNCIA ALCALINA DE FORTALEZA, CEARÁ, BRASIL: PETROGRAFIA,
GEOQUÍMICA E POTENCIAL COMO REMINERALIZADOR DE SOLOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade de Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Geologia. Área de concentração: Geodinâmica e Recursos Minerais.

Orientador: Prof. Dr. Gabriel Valentim Berni
Coorientador: Prof. Dr. Christiano Magini

FORTALEZA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- A669p Aquino, Jaqueline Mesquita de.
Província Alcalina de Fortaleza, Ceará, Brasil : petrografia, geoquímica e potencial como
remineralizador de solos / Jaqueline Mesquita de Aquino. – 2019.
102 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Programa de Pós-Graduação
em Geologia, Fortaleza, 2019.
Orientação: Prof. Dr. Gabriel Valentim Berni .
Coorientação: Prof. Dr. Christiano Magini.
1. Província alcalina. 2. Geoquímica. 3. Rochagem. I. Título.

CDD 551

JAQUELINE MESQUITA DE AQUINO

PROVÍNCIA ALCALINA DE FORTALEZA, CEARÁ, BRASIL: PETROGRAFIA,
GEOQUÍMICA E POTENCIAL COMO REMINERALIZADOR DE SOLOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade de Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Geologia. Área de concentração: Geodinâmica e Recursos Minerais.

Aprovada em ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Gabriel Valentim Berni (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Haroldo Monteiro Lima
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Julius Blum
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

A minha avó e meu pai, Aldenora e Evilásio.

AGRADECIMENTOS

"O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001."

Ao Departamento de Geologia/UFC, em especial ao LAGETEC e ao LME.

Aos meus orientadores, Prof. Dr. Gabriel Valentim Berni e Prof. Dr. Christiano Magini, por terem aceitado participar desse trabalho e principalmente pela paciência nos campos e nas correções dos artigos. Tive muita sorte em tê-los como meus orientadores, pois certamente não só contribuíram para essa dissertação, mas também para minha formação como geóloga.

À Embrapa Agroindústria Tropical, ao Dr. Men de Sá Moreira e aos funcionários do Laboratório de Solos por todo o apoio e, em especial, ao Dr. Carlos Alberto Kenji Taniguchi, a quem sou eternamente grata, pois tornou possível a pesquisa e o artigo sobre rochagem, sempre se colocando à disposição, com muita paciência e generosidade transmitiu seu conhecimento.

Agradeço também a Campo&Cia, em nome do Geol. Pedro Sérgio Goes e do Prof. Ariston Araújo Cajaty, pessoas a quem devo muito por todo o apoio, suporte e oportunidades de aprendizado que recebo desde a minha graduação. Reconheço que a ajuda dessas pessoas tem sido fundamental para minha formação profissional.

Aos professores Dra. Irani Clezar, Dr. Haroldo Monteiro e Julius Blum por terem aceitado participar das bancas de qualificação e defesa, contribuindo assim com a pesquisa. Ao Prof. Dr. Afonso Rodrigues de Almeida, responsável direto pelo meu interesse por rochas ígneas e, nesse trabalho, contribuiu muito com a petrografia e geoquímica.

Aos professores por quem tenho grande admiração e gratidão por tudo que aprendi com eles: Dra. Lucilene dos Santos e Dr. Clóvis Vaz Parente, ambos contribuíram muito para minha formação profissional, através de ideias, ensinamentos e, principalmente, despertando o meu interesse pela petrografia.

À Profa. Dra. Ignez de Pinho Guimarães, quem tenho como inspiração pela excelente profissional, que transmite seu conhecimento com generosidade, entusiasmo e dedicação. Sou muito grata tamanha sua colaboração a esta pesquisa.

As amigas e geólogas Ana Flávia Cavalcante e Amanda Peixoto por toda a paciência que tiveram comigo e, claro, literalmente pela força na preparação de amostras.

Ao geólogo Caio César Fernandes que contribuiu desde o nascimento do projeto, com os campos, com a preparação de amostras e com os dados geofísicos.

“O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis.” (José de Alencar)

RESUMO

A recente descoberta do basanita subaflorante na cidade de Fortaleza, reascendeu o interesse pelo magmatismo da Província Alcalina de Fortaleza, sobretudo por sua relação genética com o vulcanismo do arquipélago Fernando de Noronha e porque a ocorrência de vulcânicas máficas não era bem documentada para esse evento. A presente pesquisa realiza uma reavaliação da extensão da província e a avaliação do potencial das rochas alcalinas para processos de rochagem. A reavaliação da província foi realizada a partir da interpretação de uma composição ternária de dados gamaespectrométricos, análises petrográficas e análises de geoquímica de rocha total. Um total de cinco novas ocorrências de rochas alcalinas foram identificadas. A província é caracterizada por intrusões e extrusões de rochas subsaturadas em sílica, fortemente sódicas, com nefelina modal e/ou normativa e rara sodalita. As rochas félsicas são predominantemente constituídas por fonólitos afíricos a glomeroporfiríticos, frequentemente com textura traquítica, enquanto os membros máficos descritos variam de basanitos microporfiríticos a glomeroporfiríticos, identificados principalmente na região de Caucaia, como pequenos diques que cortam as rochas encaixantes proterozoicas do Complexo Ceará. Adicionalmente, um nefelina sienito e uma brecha vulcanoclástica foram identificados na região de Tucunduba, ambos não cartografados em trabalhos anteriores. Para os testes de rochagem, foram testados três litotipos através de ensaios de lixiviação com extração ácida e do teste de incubação em laboratório, onde a brecha vulcanoclástica destaca-se, principalmente, como uma fonte natural do micronutriente Mn, enquanto os fonólitos são inviáveis ao manejo agrícola em razão do caráter sódico.

Palavras-chave: Província alcalina. Geoquímica. Rochagem.

ABSTRACT

The recent discovery of the subsurface basanite of Fortaleza, restored the interest in the magmatism of the Fortaleza Alkaline Province, because of its genetic relation with the volcanism of the Fernando de Noronha archipelago, and because the occurrences of mafic volcanics were not well documented for this event. This research does a reassessment of the extension of the province and evaluates the potential of the volcanic rock for stonemeal proposes. The Extent of the Fortaleza Alkaline Province was re-evaluated based on the interpretation of a ternary composition of gamma-spectrometric data, petrographic analyzes and whole-rock geochemistry. A total of five alkaline bodies were identified in addition to those which were already mapped. This igneous event is characterized by intrusions and extrusions which are strongly sodic, silica-subsaturated rocks, containing modal and/or normative nepheline, besides rare sodalite. The felsic rocks are mainly constituted by aphyric to glomeroporphyritic phonolites, often with trachytic texture, whereas the mafic members described vary from microporphyritic to glomeroporphyritic basanites, identified mainly in the region of Caucaia, as small dikes that cut the Proterozoic rocks of the Ceará Complex. Additionally, a nepheline syenite and a volcanoclastic breccia were identified in the Tucunduba region, both of which were not mapped in previous works. For the stonemeal proposes, three lithotypes were tested through leaching tests with acid extraction and laboratory incubation test. The volcanoclastic breccia stands out mainly as a natural source of the micronutrient Mn, while the phonolites are not useful for agricultural management because of the sodic character.

Keywords: Alkaline province. Geochemistry. Stonemeal.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Localização das principais ocorrências alcalinas e vias de acesso	15
Figura 2	– Alinhamento da Província Alcalinas de Fortaleza com a zona de fratura oceânica de Fernando de Noronha	17
Figura 3	– Síntese do contexto geológico regional da região onde afloram as rochas alcalinas de Fortaleza	19
Figura 4	– Composição RGB dos dados gamaespectrométricos e interpretação	28
Figura 5	– Geologia da Província Alcalina de Fortaleza	32
Figura 6	– Modo de ocorrência das rochas vulcânicas alcalinas de Fortaleza	33
Figura 7	– Textura das rochas alcalinas de Fortaleza	35
Figura 8	– Textura da brecha vulcanoclástica da Província Alcalina de Fortaleza	37
Figura 9	– Fotomicrografias dos fonólitos sob luz transmitida com nicóis paralelos (<i>PPL</i>)	41
Figura 10	– Fotomicrografias dos basanitos sob nicóis paralelos (<i>PPL</i>)	43
Figura 11	– Fotomicrografias dos nefelina sienitos com nicóis paralelos (<i>PPL</i>) e MEV – EDS	46
Figura 12	– Fotomicrografias do nefelina sienito com nicóis cruzados (<i>XPL</i>) e paralelos (<i>PPL</i>) e BSE – SEM	48
Figura 13	– Fotomicrografias da brecha vulcanoclásticas com nicóis cruzados (<i>XPL</i>) e paralelos (<i>PPL</i>)	50
Figura 14	– Diagrama R1 vs. R2 para rochas plutônicas	53
Figura 15	– Diagrama de TAS para amostras das rochas alcalinas vulcânicas de Fortaleza, de outros eventos magmáticos alcalinos do Brasil e da Província Alcalina de Balcones (EUA)	54
Figura 16	– Diagramas de variação de Harker para amostra de rochas alcalinas de Fortaleza	56
Figura 17	– Diagrama álcalis vs. sílica, em porcentagem de peso	57

Figura 18	– Diagrama com número de Mg vs. Ni	57
Figura 19	– Diagramas de variação para elementos menores e traço vs. Zr	58
Figura 20	– Diagramas <i>spiders</i> normatizados por condrito para amostras da Província Alcalina de Fortaleza	59
Figura 21	– Discriminação de ambiente tectônico para basanitos	61
Figura 22	– Região de ocorrência da Província Alcalina de Fortaleza e local da coleta de amostras	67
Figura 23	– Fotomicrografias e imagens MEV – EDS do nefelina sienito	73
Figura 24	– Fotomicrografias e imagens MEV – EDS do fonólito microporfirítico	75
Figura 25	– Fotomicrografias da brecha vulcanoclástica	77
Figura 26	– Efeito das doses sobre o pH e interação entre a disponibilidade de P disponível e a dose aplicada	84
Figura 27	– Modelo de regressão ajustado a interação entre a dose da rocha e a disponibilidade do cátion.....	85
Figura 28	– Desdobramento do modelo de regressão para os micronutrientes Cu, Fe, Mn e Zn	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Elementos maiores, menores, traço e norma CIPW das rochas alcalinas de Fortaleza	52
Tabela 2 – Coordenadas UTM das ocorrências alcalinas testadas como remineralizadores de solos.....	68
Tabela 3 – Teores totais dos elementos nos litotipos da Província Alcalina Fortaleza	77
Tabela 4 – Teores dos elementos presentes nos extratos dos litotipos e do produto comercial após o teste de lixiviação	81
Tabela 5 – Atributos químicos do solo em função da aplicação de rochas da Província Alcalina de Fortaleza, calcário e do produto comercial	83
Tabela 6 – Disponibilidade de micronutrientes e elementos potencialmente tóxicos no solo em função da aplicação das rochas alcalinas de Fortaleza, do calcário e do produto comercial	86

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Justificativa	13
1.2	Objetivos	14
1.3	Localização e acesso da Província Alcalina de Fortaleza	14
2	PROVÍNCIA ALCALINA DE FORTALEZA, CEARÁ, BRASIL: EXTENSÃO, GEOQUÍMICA E PETROGRAFIA DAS ROCHAS ALACALINAS	16
2.1	Introdução à Província Alcalina de Fortaleza	16
2.2	Contexto geológico regional	18
2.2.1	<i>Província Borborema</i>	18
2.2.2	<i>Magmatismo pós-paleozoico</i>	21
2.2.2.1	<i>Província Alcalina de Fortaleza</i>	21
2.2.3	<i>Formação Barreiras</i>	24
2.2.4	<i>Sedimentos quaternários</i>	24
2.3	Materiais e métodos	25
2.3.1	<i>Sensoriamento remoto e aerogeofísica</i>	25
2.3.2	<i>Geoquímica</i>	26
2.3.3	<i>Microscopia eletrônica de varredura – MEV</i>	26
2.4	Sensoriamento remoto e contexto geológico local	27
2.4.1	<i>Resposta gamaespectrométrica</i>	27
2.4.2	<i>Geologia da Província Alcalina de Fortaleza</i>	30
2.4.2.1	<i>Encaixantes</i>	30
2.4.2.2	<i>Província Alcalina de Fortaleza</i>	30
2.4.2.3	<i>Coberturas sedimentares cenozoicas</i>	38
2.5	Petrografia da Província Alcalina de Fortaleza	39
2.5.1	<i>Fonólitos</i>	39
2.5.2	<i>Basanitos</i>	42
2.5.3	<i>Nefelina sienitos</i>	45
2.5.4	<i>Brecha vulcanoclástica</i>	49
2.6	Geoquímica da Província Alcalina de Fortaleza	51

2.6.1	<i>Classificação química das rochas da Província Alcalina de Fortaleza</i>	51
2.6.2	<i>Elementos menores e traço</i>	57
2.6.3	<i>Diagrama geotectônico</i>	60
2.7	Discussão dos dados petrográficos e geoquímicos da Província Alcalina de Fortaleza	62
3	AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE ROCHAS ALCALINAS DA PROVÍNCIA DE FORTALEZA-CE COMO REMINERALIZADORES DE SOLOS	66
3.1	Introdução a avaliação do potencial de rochas da Província Alcalina de Fortaleza para técnica de rochagem	66
3.2	Amostragem e métodos analíticos	68
3.2.1	<i>Amostras de rochas alcalinas e material de referência</i>	68
3.2.2	<i>Análises petrográficas e mineralógicas dos litotipos de interesse</i>	68
3.2.3	<i>Análises geoquímicas dos litotipos de interesse</i>	69
3.2.4	<i>Testes agronômicos</i>	69
3.2.4.1	<i>Teste de lixiviação</i>	69
3.2.4.2	<i>Teste de incubação</i>	70
3.3	Resultados	72
3.3.1	<i>Petrografia e análises mineralógicas dos litotipos de interesse</i>	72
3.3.1.1	<i>Nefelina sienito</i>	72
3.3.1.2	<i>Fonólito microporfírico</i>	74
3.3.1.3	<i>Brecha vulcanoclástica</i>	76
3.3.2	<i>Geoquímica dos litotipos de interesse</i>	78
3.3.3	<i>Testes agronômicos</i>	80
3.3.3.1	<i>Teste de lixiviação</i>	80
3.3.3.2	<i>Teste de incubação</i>	82
3.4	Discussão dos resultados dos testes agronômicos	88
3.4.1	<i>Teste de lixiviação</i>	88
3.4.2	<i>Teste de incubação</i>	88
3.4.3	<i>Comparação com produtos existentes no mercado</i>	90
4	DISCUSSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS	91
5	CONCLUSÃO	92
	REFERÊNCIAS	93

1 INTRODUÇÃO

Desde o primeiro reconhecimento do vulcanismo alcalino de Fortaleza, realizado por Almeida (1955), diversos geólogos têm pesquisado, principalmente, a geoquímica e a petrologia desse evento magmático (*e.g.* VANDOROS & OLIVEIRA, 1968; SIAL, 1987, 1970; BRAGA *et al.*, 1977; RAO & SIAL, 1972; GUIMARÃES, 1982). A partir dos dados levantados por esses e outros trabalhos, verificou-se que a composição dessas rochas mostra potencial para a prática de rochagem, bem como para a aplicação na fabricação de cimento especial *Portland*, produção de concreto de alto desempenho, cerâmicas e outros fins industriais. Atualmente, duas das principais ocorrências desse magmatismo, o traquito de São Gonçalo do Amarante-CE e o fonólito Caruru do Eusébio-CE, já são usadas para produção de revestimento e cimento. Em adição, a disponibilização de produtos gerados por técnicas de sensoriamento remoto (*e.g.* imagens orbitais, dados aerogeofísicos) permitiu revisitar a cartografia dos corpos vulcânicos.

Esta dissertação consiste na revisão cartográfica da Província Alcalina de Fortaleza (GUIMARÃES, 1982), trazendo a identificação de novos corpos, incluindo dados petrográficos e geoquímicos, bem como a avaliação do potencial agrônômico de alguns litotipos característicos desse magmatismo alcalino.

O trabalho é dividido em duas seções correspondentes aos artigos acadêmicos que serão produzidos a partir da presente pesquisa:

(1) *A Província Alcalina de Fortaleza, Ceará, Brasil: Extensão, Geoquímica e Petrografia das Rochas Alcalinas*, que trata da caracterização geológica desse evento magmático, com a descrição de fonólitos, basanitos, brecha vulcanoclástica e nefelina sienito;

(2) *Avaliação do Potencial de Rochas Alcalinas da Província de Fortaleza-CE como Remineralizadores de Solos*, que analisa três rochas da província de Fortaleza como possíveis fertilizantes de solos empobrecidos, através dos experimentos de lixiviação e incubação.

1.1 Justificativa

A pesquisa é justificada pela necessidade revisitar a cartografia da Província Alcalina de Fortaleza, utilizando dados obtidos por sensores remotos e técnicas analíticas para caracterização da mineralogia, petrografia e geoquímica.

Adicionalmente, foi avaliado o potencial desse magmatismo como fonte de macronutrientes, micronutrientes e elementos benéficos para a nutrição de solos ácidos, visando apontar alternativas sustentáveis capazes de mitigar impactos inerentes a fertilização convencional com produtos industrializados.

1.2 Objetivos

A finalidade dessa pesquisa é trazer novos dados cartográficos, petrográficos, geoquímicos e a determinação do potencial agrônomo da Província Alcalina de Fortaleza e assim, relacionar as novas ocorrências com aquelas já conhecidas.

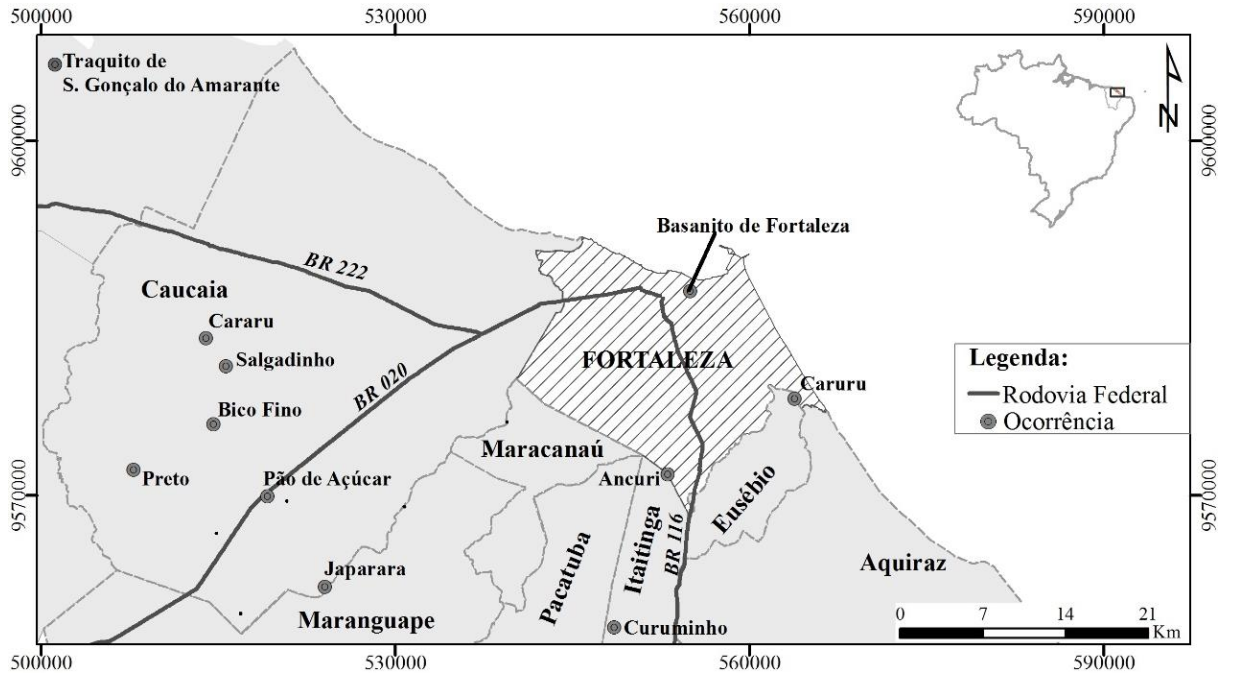
Faz parte dos objetivos secundários: (1) cartografar os afloramentos de rochas alcalinas subsaturadas em sílica, caracterizando as ocorrências, compondo regionalmente a distribuição dos corpos, agrupando-os numa área mais abrangente possível, a qual será definida como a Província Alcalina de Fortaleza; (2) apresentar novas evidências do vulcanismo alcalino máfico (cartografia de novos corpos basaníticos), corroborando ao caráter bimodal do magmatismo da referida província; (3) realizar testes de lixiviação e incubação, utilizando os litotipos que atendam às exigências da Instrução Normativa Nº 5 de 10 de março de 2016 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA, 2016).

1.3 Localização e Acesso da Província Alcalina de Fortaleza

Necks, domos, *plugs* e diques caracterizam a diversidade morfoestrutural da referida província, cujos limites geográficos abrangem diversos municípios da Região Metropolitana de Fortaleza, em uma área de cerca de 2.000 km². As ocorrências são cartografadas desde o município de Eusébio até São Gonçalo do Amarante, cujos principais corpos situam-se na região de Caucaia (serrotes Japarara, Pão de Açúcar, Bico Fino, Preto, Salgadinho, Cararu e diques associados – FIGURA 1). Em Itaitinga/CE situa-se o único *neck* basanítico (serrote Curuminho) e recentemente foi descrito um basanito subaflorante na região norte de Fortaleza, localizado ao longo da Avenida Santos Dumont, entre a Praça Luiza Távora e a Avenida Barão de Studart (WERNECK, 2018).

As principais vias de acesso aos *necks* e domos alcalinos da província são as rodovias federais BR-222, BR-020 e BR-116 (FIGURA 1), que dão acesso estradas carroçais que levam as principais ocorrências.

Figura 1 – Localização das principais ocorrências alcalinas e vias de acesso.



Fonte: dados da pesquisa.

2 PROVÍNCIA ALCALINA DE FORTALEZA, CEARÁ, BRASIL: EXTENSÃO, GEOQUÍMICA E PETROGRAFIA DAS ROCHAS ALCALINAS

2.1 Introdução à Província Alcalina de Fortaleza

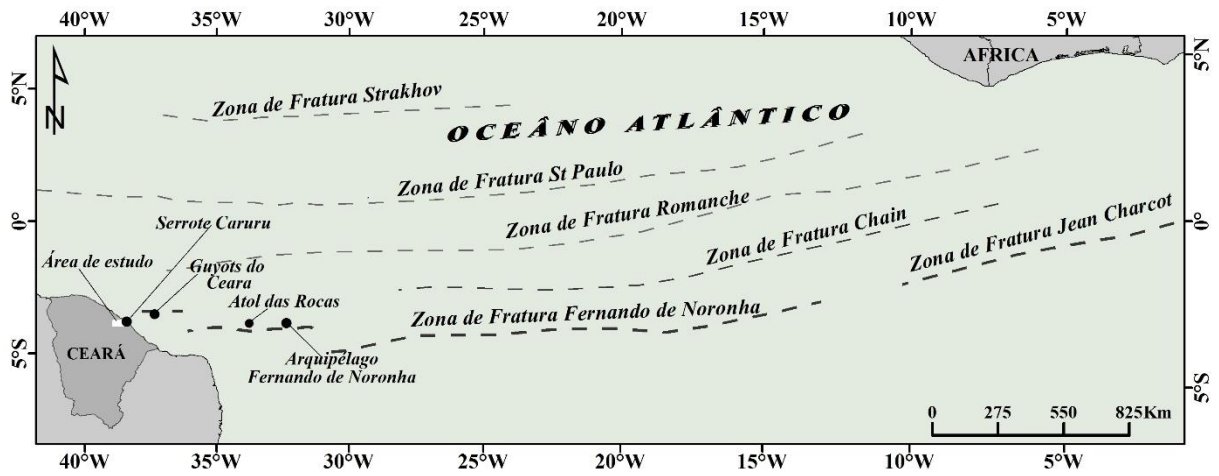
A Província Alcalina de Fortaleza está localizada nas proximidades da cidade homônima, no estado do Ceará, nordeste do Brasil. Inclui domos, *necks*, *plugs* e diques alcalinos de idade paleo-neógena, subsaturados em sílica, que intrudiram o embasamento pré-cambriano e ocorrem em uma área de aproximadamente 2.000 km², abrangendo terrenos desde o município de Eusébio até São Gonçalo do Amarante. O magmatismo sálico dessa província é composto por fonólitos, traquitos, nefelina sienitos, limburgitos, ankaramitos e essexitos (SIAL, 1987), além de rochas piroclásticas associadas. Esse conjunto de rochas caracteriza um evento bimodal, marcado pela ausência de litotipos intermediários entre fonólitos e rochas máficas, assim como ocorre, por exemplo, na Província Balcones do Texas/EUA (BARKER; MITCHELL; MCKAY, 1987). Werneck (2018) descreveu um basanito subaflorante em Fortaleza, corroborando com esse caráter bimodal.

O magmatismo alcalino de Fortaleza e região, segundo Almeida (2006), corresponde à extensão continental da Zona de Fratura de Fernando de Noronha (ZFFN – FIGURA 2), correspondente brasileira da zona de fratura oceânica Jean Charcot na África (GORINI, 1981). Essa relação foi proposta inicialmente por Almeida (1955), ao correlacionar o serrote Caruru com o alinhamento E-W do Arquipélago de Fernando de Noronha, Atol das Rocas e o *Guyot* do Ceará.

Esse magmatismo recebeu diversas denominações, tais como: Província Alcalina Terciária de Fortaleza (SIAL, 1970); Vulcanismo Messejana (ALMEIDA *et al.*, 1988); Suíte Magmática Messejana (CAVALCANTE *et al.*, 2003) e; Magmatismo Messejana (VASCONCELOS *et al.*, 2004). Este trabalho adotará a terminologia “Província Alcalina de Fortaleza”, introduzida por Guimarães (1982), já que as ocorrências alcalinas da região são relacionadas entre si por aspectos petrográficos e genéticos, além de possuírem idade (Eoceno-Oligoceno) e localização geográfica bem definidas.

A disponibilização de dados de sensoriamento remoto para a região, assim como a catalogação do basanito subaflorante de Fortaleza (WERNECK, 2018), motivaram essa reavaliação da província, apresentando novos dados petrográficos, geoquímicos e a cartografia de cinco novas ocorrências alcalinas, nas quais foram identificados fonólitos, basanitos, um nefelina sienito e uma brecha vulcanoclástica.

Figura 2 – Alinhamento da Província Alcalina de Fortaleza com a zona de fratura oceânica de Fernando de Noronha.



Fonte: Modificado da base de dados da CPRM e Almeida (2006).

Nota: Ilustra o alinhamento do vulcanismo continental do serrote Caruru, montes submarinos do *Guyot* do Ceará, Atol das Rocas e do Arquipélago Fernando de Noronha com as zonas de fraturas oceânicas de Fernando de Noronha/Jean Charcot e Chain.

2.2 Contexto geológico regional

A Província Alcalina de Fortaleza ocorre em uma área inserida no geológico regional da Província Borborema Setentrional, onde afloram os litotipos metavulcanossedimentares das unidades litoestratigráficas Canindé e Independência, em parte, recobertos por sedimentos cenozoicos (FIGURA 3).

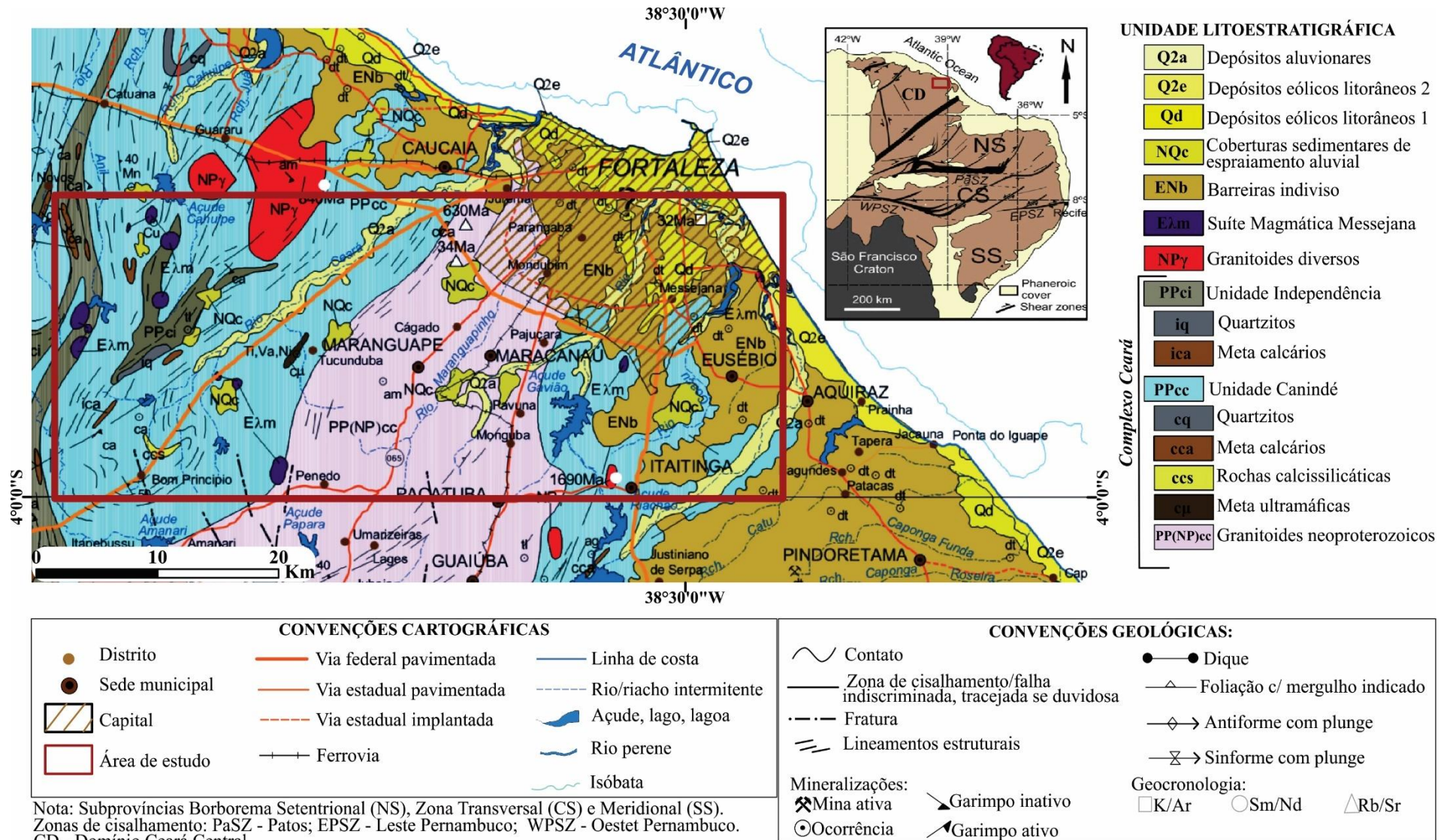
2.2.1 Província Borborema

A Província Borborema (PB) corresponde ao extremo nordeste da Plataforma Sul-Americana (ALMEIDA *et al.*, 2007), caracterizada como vasta região no nordeste do Brasil com aproximadamente 450.000 km² (VAN SCHMUS *et al.*, 1995). Essa província ocupa terrenos de parte da Bahia, sudoeste do Piauí e o noroeste do Ceará (ALMEIDA *et al.*, 1977) e sua geologia é caracterizada pela ocorrência de rochas arqueanas a neoproterozoicas (ALMEIDA *et al.*, 1981). A PB formou-se a partir da convergência, colisão e aglutinação dos crátons Amazônico, Oeste-Africano e São Francisco-Congo, durante o evento orogenético Brasileiro/Pan-Africano, em cerca de 600-550Ma, correlato a formação do supercontinente *West Gondwana* (CABY & ARTHAUD, 1986; CABY, 1989; TROMPETTE, 1994; ARTHAUD, 2007; ALMEIDA *et al.*, 2007).

Os lineamentos Patos e Pernambuco, duas megatranscorrências dextrais de direção E-W, seccionam a Província Borborema em três subprovíncias (VAN SCHUMUS *et al.*, 1995; 2011): Borborema Setentrional, Zona Transversal e Borborema Meridional. A subprovíncia Borborema Setentrional, onde situa-se a área alvo desta pesquisa, está localizada a norte do Lineamento Patos, sendo subdividida pelas zonas de cisalhamento Sobral Pedro II e Senador Pompeu em três domínios (VAN SCHMUS *et al.*, 1995; FETTER, 1999; AMARAL, 2007): Médio Coreaú ou Noroeste do Ceará, Domínio Ceará Central e Domínio Rio Grande do Norte.

O Domínio Ceará Central (DCC) é a unidade geotectônica de maior extensão da parte norte da Província Borborema (AMARAL, 2007). Esse domínio compreende a quase todo o território cearense, limitando-se a NW e a SE, respectivamente, pelas zonas de cisalhamento Sobral Pedro II (ZCSPII - Lineamento Transbrasiliano) e Senador Pompeu (ZCSP), sendo encoberto na direção SW-W pelos sedimentos da Bacia do Parnaíba e se estendendo para o N até o Oceano Atlântico.

Figura 3 – Síntese do contexto geológico regional da região onde afloram as rochas alcalinas de Fortaleza.



Fonte: Modificado de Cavalcante *et al.* (2003); Neves *et al.* (2012) e Neves (2014).

O DCC é subdividido em cinco unidades geotectônicas (FETTER *et al.*, 2000; CASTRO, 2004): Núcleo arqueano; Embasamento paleoproterozoico; Coberturas metassedimentares; Complexo Tamboril Santa Quitéria; Granitos pós-colisionais e anarogênicos neoproterozoicos.

Nessa sessão serão descritas apenas as unidades ou grupos litoestratigráficos do Domínio Ceará Central que caracterizam a região de interesse dessa pesquisa: (1) coberturas metassedimentares neoproterozoicas; (2) granitos pós-colisionais e anarogênicos neoproterozoicos.

(1) Coberturas Metassedimentares Neoproterozoicas

Correspondem a extensas sequências supracrustais de idade neoproterozoica, que afloram descontinuamente e foram incluídas no Complexo Ceará (CAVALCANTE *et al.*, 2003), também chamado de Grupo Ceará (ARTHAUD, 2007). Essas coberturas bordejam praticamente todo o complexo granítico-migmatítico Tamboril Santa Quitéria e, na região de interesse dessa pesquisa, correspondem às unidades litoestratigráficas Canindé e Independência.

Essas unidades são caracterizadas pela ocorrência de associações essencialmente pelíticas, acompanhadas por uma subordinada sedimentação química, metamorfizadas no fácies anfíbolito alto, acompanhadas por migmatização e, de acordo com Cavalcante *et al.* (2003) são compostas por: paragneisses, micaxistos, ortogneisses ácidos, rochas metabásicas e metaultramáficas, raros anfíbolitos, lentes de quartzito, metacalcários, rochas calcissilicáticas, formações ferríferas e ferro-manganesíferas, granulitos máficos, leptinitos, além de jazimentos estratóides e diqueformes de granitóides. No geral, as foliações são de baixo ângulo, verticalizadas apenas nas proximidades de zonas de transcorrência dúctil (ARTHAUD, 2007).

De acordo com Arthaud (2007), essas supracrustais caracterizam uma sequência de margem passiva, cuja deposição deve ter iniciado em aproximadamente 800Ma, durante o rifteamento do embasamento Arqueano/Paleoproterozoico. Em seu trabalho, o referido autor datou duas populações de zircões detríticos a partir de um metapelito, onde obteve cerca de 0,63 Ga para o primeiro grupo, interpretado como idade correspondente do metamorfismo e, para o segundo grupo alcançou cerca de 0,8 Ga, possível idade do processo de *rifting* e a abertura do oceano.

Em adição, Fetter (1999) obteve idades U-Pb em zircão de 772 ± 31 Ma para uma camada de metariolito intercalada a metapelito das proximidades do município de Independência e, mais tarde, Castro (2004) alcançou idades U-Pb similares, em torno de 770Ma para rochas da região de Itataia. As idades modelo Sm-Nd T_{DM} entre 2,4Ga e 1,09Ga (FETTER, 1999; SANTOS *et al.*, 2003; 2004; CASTRO *et al.*, 2003; CASTRO, 2004; ARTHAUD, 2007) indicam como fonte o embasamento paleoproterozoico e, possivelmente, arqueano.

As diferentes idades apresentadas para essas sequências supracrustais incluem mais de um tipo de área de fonte para sedimentação e diferentes ciclos de deposição (AMARAL, 2007).

(2) *Granitos pós-colisionais e anarogênicos neoproterozoicos.*

A PB é caracterizada por uma ampla granitogênese neoproterozoica, onde na região de interesse, Cavalcante *et al.* (2003) cartografaram os chamados granitoides diversos, definidos como biotita-granitos, monzogranitos, sienitos, quartzo-monzonitos e graníticos porfiríticos. Dados U-Pb de Brito Neves *et al.* (2003) apontam um intervalo de cristalização de 0,62 a 0,63Ga. No final do evento Brasileiro, são reconhecidos granitos tardi-tectônicos, datados com cerca de 580Ma (FETTER, 1999; BRITO NEVES *et al.*, 2003). Adicionalmente, na PB são reconhecidos granitos pós-orogênicos paleozoicos (530 a 460Ma) associados às bacias molassas tardi-brasilianas (FETTER, 1999; CASTRO, 2004; TEIXEIRA, 2005).

2.2.2 Magmatismo Pós-Paleozoico

Durante o Mesozoico e o Cenozoico, a PB foi marcada por diversas atividades ígneas intrusivas e extrusivas (MIZUSAKI *et al.*, 2002), onde Almeida *et al.* (1988) definiu três eventos: 1) magmatismo toleítico juru-cretáceo; 2) atividade aptiana e albiana, e; 3) magmatismo alcalino entre o Eoceno e o Mioceno (<50Ma), do qual faz parte o Magmatismo Macau, Vulcanismo Fernando de Noronha e a Província Alcalina de Fortaleza.

2.2.2.1 Província Alcalina de Fortaleza

Constitui-se por uma dezena de *plugs* e domos de rochas alcalifonolíticas, tefríticas e fonotefríticas, além de piroclastos locais e inúmeros diques alcalinos (ALMEIDA, 2006).

São rochas sálicas extremamente enriquecidas em álcalis, cuja razão $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ varia de 0,81 a 2,03 (SIAL, 1970). A partir de dados petrográficos e geoquímicos, Guimarães (1982) concluiu que os traquitos e fonólitos formaram-se a partir da diferenciação de um magma progenitor de composição furchítica (melanocrático analcima lamprófito com abundante augita e sem feldspato e olivina, LE MAITRE, 2002).

As rochas de composições basálticas (limburgitos e ankaramitos) provavelmente cristalizaram a partir de um magma máfico formado por uma pequena fusão parcial do manto (GUIMARÃES, 1982).

O vulcanismo alcalino na Região Metropolitana de Fortaleza foi reconhecido na década de 50 por Almeida (1955), ao correlacionar o serrote Caruru como a extensão continental do alinhamento de montes submarinos de direção E-W, que compreende o arquipélago Fernando de Noronha, o Atol das Rocas e o *Guyot* do Ceará. O morro Caruru, localizado no município de Eusébio, foi a primeira ocorrência a ter sua mineralogia petrograficamente descrita por Vandoros & Oliveira (1968), recebendo o nome “Fonólito de Messejana”, o qual foi quimicamente comparado aos fonólitos de Fernando de Noronha (FN), cuja relação genética foi estabelecida pelos referidos autores (GUIMARÃES, 1982).

Trabalhos realizados na década de 70 identificaram novas ocorrências alcalinas (serrotes Ancuri, Pão de Açúcar, Salgadinho, Preto, Japarara, Bico Fino e Caruru, além de diques associados), distribuídas ao S e SW de Fortaleza, distando cerca de 75km da capital cearense, correlacionando-as geneticamente ao magmatismo alcalino de Fernando de Noronha (SIAL, 1970; RAO & SIAL, 1972; BRAGA *et al.*, 1977; NASCIMENTO *et al.*, 1981; GUIMARÃES, 1982; SIAL, 1987; MACCIOTA *et al.*, 1990, etc). Ao estudar o arranjo tectônico equatorial do Atlântico e as margens continentais adjacentes, Gorini (1977) interpretou o serrote Caruru como a extensão mais ocidental da cadeia Fernando de Noronha.

Essa relação genética com as alcalinas de Fortaleza e de Fernando de Noronha, apesar das idades diferentes, é estabelecida a partir de aspectos mineralógicos e dos elementos maiores e traços (RAO & SIAL, 1972). A forte similaridade petrográfica e química com os basanitos de Fernando de Noronha e indicada por Werneck (2018).

As determinações geocronológicas pelos métodos K-Ar e Rb-Sr (CORDANI, 1970; ISLER *et al.*, 1977; NASCIMENTO *et al.*, 1981; BRAGA *et al.*, 1981; GUIMARÃES, 1982; THOMAZ FILHO, 1983) alcançaram idades de $36 \pm 2\text{Ma}$ (Rb-Sr – NASCIMENTO *et al.*, 1981) a $26,5 \pm 0,3\text{Ma}$ (K-Ar – TEIXEIRA *et al.*, 1978). Guimarães (1982) atribuiu a idade convencional de 32,4Ma (método Rb-Sr) para uma razão inicial $\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86}$ de $0,705 \pm 0,002$, referente ao serrote Ancori.

Conforme Macciotta *et al.*, (1990), essas idades em torno de 30Ma podem corresponder a quarta fase vulcânico-tectônica do continente *Gondwana*, que pode ter levado a atividade fonolítica na África do Sul, assim como na RMF. Além disso, as baixas razões iniciais Sr^{87}/Sr^{86} obtidas sugerem uma origem mantélica para as alcalinas de Fortaleza (GUIMARÃES, 1982).

Em adição, Mizusaki e Saracchini (1991) reportaram as mais antigas idades através do método K-Ar (43 ± 12 Ma e 44 ± 3 Ma) a partir de uma brecha toleítica da plataforma continental, a NW de Fortaleza.

Atualmente, a gênese da atividade magmática alcalina no nordeste do Brasil ainda é discutida. Autores como Fodor, Mukasa e Sial (1998) e Morgan (1971) acreditam que o vulcanismo teria sido originado por uma pluma mantélica profunda, a pluma de Fernando de Noronha, enquanto outros trabalhos (*e. g.* ALMEIDA, 1986; 2006; MIZUSAKI *et al.*, 2002) sugerem um *hotspot* ativo durante o Cenozoico. Todavia, ambas as hipóteses são questionadas em razão da distribuição geométrica das ocorrências e pela inexistência de uma anomalia geofísica no manto inferior (*e.g.* MONTELLI *et al.*, 2006; ERNESTO, 2005). Para Ernesto (2005), ainda que a área de atuação da pluma Fernando de Noronha tivesse um raio de ± 1000 km, se os *hotspots* fossem fixos no manto profundo não haveria possibilidade de se relacionar o vulcanismo Fernando de Noronha com a província alcalina no nordeste do Brasil.

No entanto, Almeida (2006) não descartou a hipótese de *hotspot* em razão das informações levantadas por Anderson (2000) e Courtillot *et al.* (2003), já que ambos consideram possível a formação de *hotspots* no manto superior. De acordo com Anderson (2005), a hipótese de pluma mantélica profunda é desnecessária, já que uma heterogeneidade química gerada por processos tectônicos (descompressão gerada por falha profunda) poderia gerar uma fusão no manto superior.

Em adição, na região costeira de Fortaleza e Acaraú, Costa *et al.* (2002) identificaram um sistema de falhas e fraturas de tectônica transcorrente E-W, concordante com o contexto transcorrente/transformante destrai durante a abertura do Atlântico, que, segundo Almeida (2006), parece confirmar a extensão continental da Zona de Fratura Fernando de Noronha. Assim, durante o Eoceno teria surgido um *hotspot* na região de Fortaleza, no contato entre a crosta continental e a oceânica, originado por uma anomalia térmica na astenosfera, dando origem ao vulcanismo alcalino reconhecido, bem como alto fluxo térmico e sismicidade (ALMEIDA, 2006). Com a deriva de placa, esse *hotspot* teria levado a infiltração de magmas nas fraturas da ZFFN, dando origem a cadeia vulcânica marinha homônima.

2.2.3 Formação Barreiras

A Formação Barreiras ocorre no litoral brasileiro desde o Amapá ao Rio de Janeiro, numa faixa de largura variável, recobrendo diversas unidades litoestratigráficas, composta por sedimentos parcialmente litificados.

Caracteriza-se como uma sequência de sedimentos detríticos, de origem fluvial e marinha (ARAI, 2006), que é constituída argilas, areias e conglomerados, com cores variadas (avermelhadas a amareladas), muitas vezes oxidadas e/ou caulinizadas (MORAIS NETO & ALCKMIM, 2001). Na região de interesse dessa pesquisa, essas coberturas ocorrem entre os sedimentos quaternários e o embasamento cristalino.

2.2.4 Sedimentos Quaternários

Os sedimentos quaternários são marcados por areias finas e silte não consolidados, que constituem dunas móveis e paleodunas, cobrindo os sedimentos do Barreiras (GUIMARÃES, 1982). Segundo o Mapa Geológico do Ceará (CAVALCANTE *et al.*, 2003), esses sedimentos são compostos pelos depósitos: costeiros 1 (dunas fixas/paleodunas); costeiros 2 (praias atuais, dunas móveis, além dos sedimentos fluviais marinhos); fluviais e marinhos (planícies e canais de maré) e aluviais (localmente coluvial).

2.3 Materiais e métodos

2.3.1 Sensoriamento remoto e aerogeofísica

As técnicas de processamento digital de imagens foram utilizadas para identificar unidades litoestratigráficas, feições topográficas e aspectos estruturais. Foram utilizadas imagens multiespectrais Landsat 8/OLI (*Operational Land Imager*) e Landsat 5/TM (*Thematic Mapper*), cena de órbita/ponto 217/063, além de dados SRTM Arc Second Global (*Shuttle Radar Topography Mission*) correspondente à Tiff S04W039V3, com resolução espacial de 30 metros. Todas as imagens digitais foram disponibilizadas pelo site da *Earth Explorer USGS* (*United States Geological Survey*) e processadas pelo *software ENVI Classic 5.0*, onde foram produzidas composições RGB ternárias e razões de bandas (para imagens multiespectrais) e relevo sombreado do terreno (SRTM).

Os dados gamaespectrométricos foram processados conforme a metodologia de Blum (1999), através do *software Oasis Montaj*, gerando os seguintes produtos: GRIDs aerogeofísicos, imagem dos canais Potássio (K), Tório (Th) e Urânio (U), Contagem Total (TC), razões entre canais. Produziu-se a composição ternária RGB (Vermelho, Verde e Azul), combinando as informações dos canais K, Th e U em uma única imagem, proporcionando a melhor interpretação litoestrutural da região de interesse. Os dados das imagens ternárias foram micronivelados usando a ferramenta de filtro cosseno direcional para reduzir o desnível das linhas de voo. Os dados de gamaespectrometria foram disponibilizados pelo Projeto Aerogeofísico Norte Ceará do Serviço Geológico do Brasil (CPRM), adquirido pelo Ministério de Minas e Energia (MME), onde as informações foram coletadas de voos com 100 metros a partir da superfície, de direção N/S e espaçamento de 500 metros entre as linhas de voo.

A resposta gamaespectrométrica foi interpolada com as informações levantadas a partir das imagens multiespectrais e SRTM para a delimitação das principais ocorrências alcalinas e feições estruturais. Todos os produtos gerados foram integrados ao sistema de informações geográficas (GIS) e projetados no sistema de coordenadas UTM datum WGS1984 24 Zona Sul.

2.3.2 Geoquímica

As amostras foram preparadas e analisadas pela SGS Geosol Laboratórios LTDA., que realizou os seguintes procedimentos: (1) calcinação para determinação da perda de fogo (*Loss on Ignition* - LOI); (2) fusão por tetraborato de lítio e determinação por XRF (fluorescência de raios X) para a identificação dos elementos maiores (SiO₂; Na₂O; K₂O, MgO, MnO, Al₂O₃, etc.); (3) digestão por água régia e leitura por ICP - MS (Espectrometria de Massa por Plasma Acoplado Indutivamente) e ICP - OES (Espectrometria de Emissão Ótica por Plasma Acoplado Indutivamente) para quantificação de As, Cd, Al, Fe, Cu, Pb, U, Th, etc.; (4) determinação de Hg através da técnica de vapor frio e medição por AAS (Espectrometria de Absorção Atômica).

2.3.3 Microscopia eletrônica de varredura – MEV

A microscopia eletrônica de varredura utilizou o equipamento *Quanta 450 FEG - FEI* acoplado ao sistema EDS (*Energy Dispersive System*), programado com HV:20.000 kV e detector de elétrons retro-espelhados para baixo e alto vácuo (vCD). Essa técnica foi usada para dar suporte a petrografia na determinação de minerais e feições não identificados ao microscópio polarizador de luz transmitida e refletida. As análises foram realizadas no Laboratório da Central Analítica da Universidade Federal do Ceará – UFC.

2.4 Sensoriamento remoto e contexto geológico local

2.4.1 Resposta gamaespectrométrica

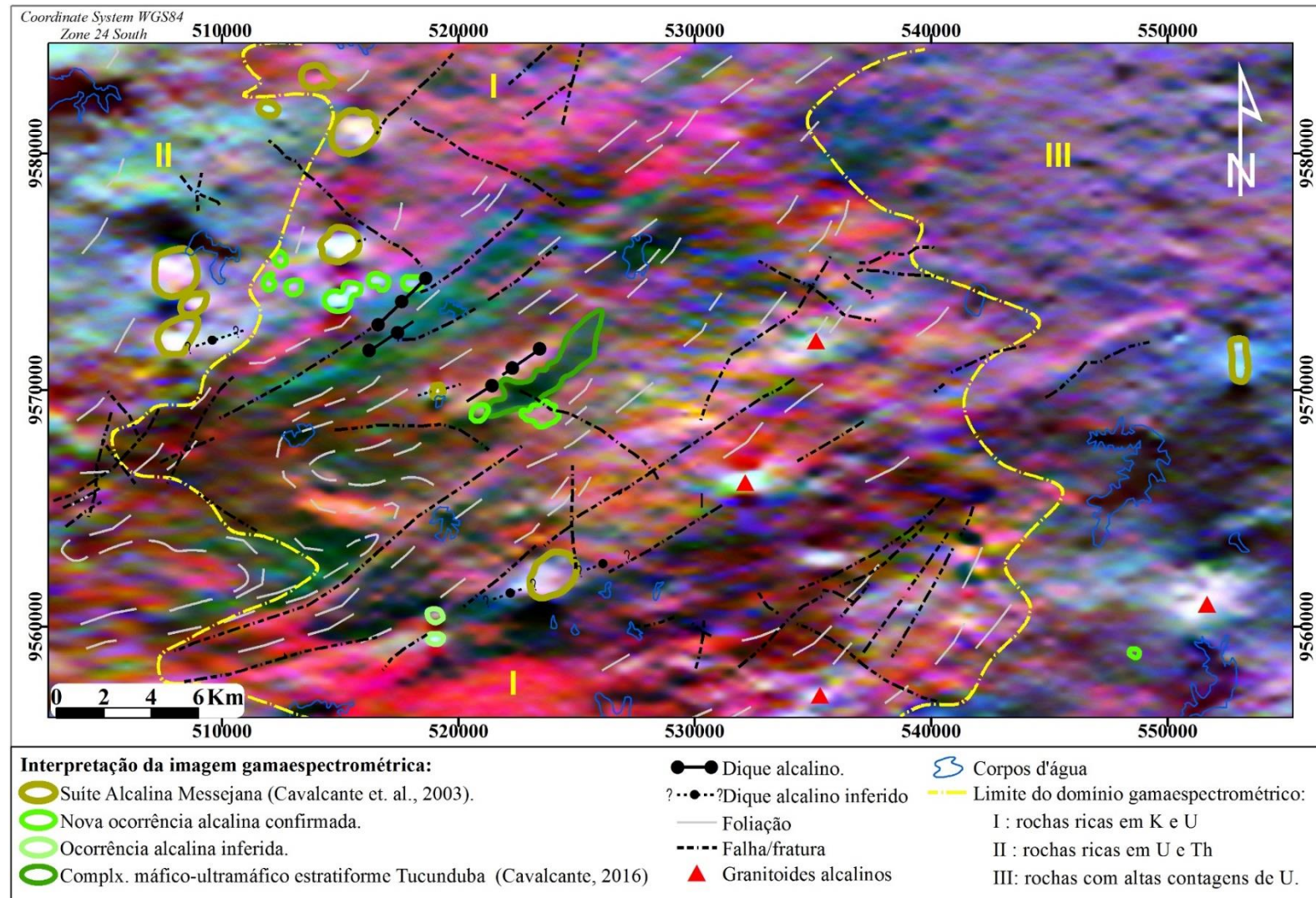
A partir da composição ternária micronivelada dos canais K, Th e U (FIGURA 4), foram reconhecidos os domínios gamaespectrométricos mais evidentes ou básicos, enquanto aqueles mais complexos, cuja diferenciação pode ser duvidosa, foram considerados como um domínio único. A interpretação geológico-estrutural foi favorecida pela técnica de sombreamento de imagens SRTM, integrada às imagens multiespectrais e dados gama. Em adição, as ocorrências alcalinas que marcam os limites leste e oeste da província, serrote Caruru e os traquitos de São Gonçalo do Amarante, não foram identificadas devido à ausência de dados aerogeofísicos para ambas as regiões.

Estruturalmente, a direção NE/SW marca os alinhamentos regionais e as principais zonas de falha e fraturas. No sudoeste da área, entre duas zonas de fraturas, ocorrem estruturas dobradas provavelmente associadas aos movimentos relativos das falhas.

Na imagem ternária, as rochas com tendência alcalina, sejam elas subsaturadas em sílica ou não, são diferenciadas pelos valores anômalos de K, Th e U. Logo, o domínio espectrométrico da Província Alcalina de Fortaleza é identificado por formas circulares a elipsoidais de coloração branca (FIGURA 4), que coincidem com o alinhamento E-W das zonas de fraturas oceânicas Fernando de Noronha e Jean Charcot. Além dos principais serrotes alcalinos (Salgadinho, Cararu, Preto, Bico Fino, Pão de Açúcar, Japarara e Ancuri), os dados gamaespectrométricos permitiram cartografar cinco novas ocorrências alcalinas, que variam de fonólitos a basanitos, onde destacam-se os diques e derrames de Tucunduba.

Nas regiões de Itaitinga e Maranguape ocorrem granitoides com tendência alcalina, identificados na resposta gamaespectrométrica como feições circulares de cor branca. A ausência ou baixa concentração dos radioelementos mostra domínios menores, indicados pela coloração preta a verde escuro, que delimitam a ocorrência de rochas insaturadas em sílica, bem como composições mais primitivas, a exemplo dos metagabros, metapiroxenitos e metaperidotitos do serrote Manoel Gonçalves, denominado de Complexo Máfico-Ultramáfico Estratiforme Tucunduba por Cavalcante (2016). Em adição, a cor preta também delinea as baixas contagens dos corpos d'água, que são diferenciados de rochas máficas e ultramáficas a partir da geometria dos corpos e pela interpolação da imagem gama com os produtos de sensores remotos.

Figura 4 – Composição RGB dos dados gamaespectrométricos e interpretação.



Fonte: dados da pesquisa.

No mapa ternário foram estabelecidos três domínios gama principais, delimitados na figura 4 pelas linhas tracejadas em amarelo:

(1) cores magenta a vermelho: predominam na porção central do mapa ternário e representam o domínio gamaespectrométrico das rochas ricas em potássio e urânio, correspondendo a região da Serra de Maranguape, a qual está inserida na Unidade de Canindé no Mapa Geológico do Ceará (CAVALCANTE *et al.*, 2003). Esta unidade é composta predominantemente por gnaisses ortoderivados (ricos em feldspato potássico, anfibólio e/ou biotita, mais quartzo), intrudidos por granitóides neoproterozoicos, cortados por zonas de falhas e fraturas.

(2) as cores ciano a verde: ocorrem do extremo NW a SW e correspondem as rochas ricas em tório e urânio, que fazem parte das unidades litológicas de Canindé e Independência, amplamente representadas por ortognaisses, gnaisses aluminosos paraderivados (com granada como aluminossilicato) e migmatitos. Não foi possível individualizar essas duas unidades a partir do mapa ternário.

(3) cores azuis a roxo: nos setores nordeste e sudeste, regiões de Fortaleza e Itaitinga, respectivamente, ocorre o domínio de altas contagens de U, com variáveis contribuições de K (cor magenta), correspondente a cobertura sedimentar (Formação Barreiras e sedimentos quaternários).

2.4.2 Geologia da Província Alcalina de Fortaleza

O magmatismo alcalino de Fortaleza é representado por corpos morfoestruturais variados intrudidos nos litotipos metavulcanossedimentares neoproterozoicos, estas agrupadas nas unidades litoestratigráficas Canindé e Independência. No extremo NW da região, os necks e domos fonolíticos tem seus contatos com as rochas encaixantes cobertos pelos sedimentos recentes da Formação Barreiras e depósitos quaternários.

2.4.2.1 Encaixantes

São rochas gnaiss-migmatíticas das unidades Canindé (NPcc) e Independência (NPci), esta última tem sua ocorrência limitada ao setor NW da região (FIGURA 5). São identificadas como blocos soltos e lajedos com dimensões variáveis, cujos afloramentos mais expressivos correspondem as serras de Maranguape e Pacatuba, localizadas na porção central da área. Essas encaixantes foram metamorfizadas no *fácies* anfibolito alto e estão alinhadas conforme o *trend* regional, NE/SW, e próximo às zonas cisalhamento exibem foliação vertical. A mineralogia comum é constituída por feldspato alcalino, plagioclásio, quartzo, biotita ± anfibólio (hornblenda), minerais opacos e ± granada.

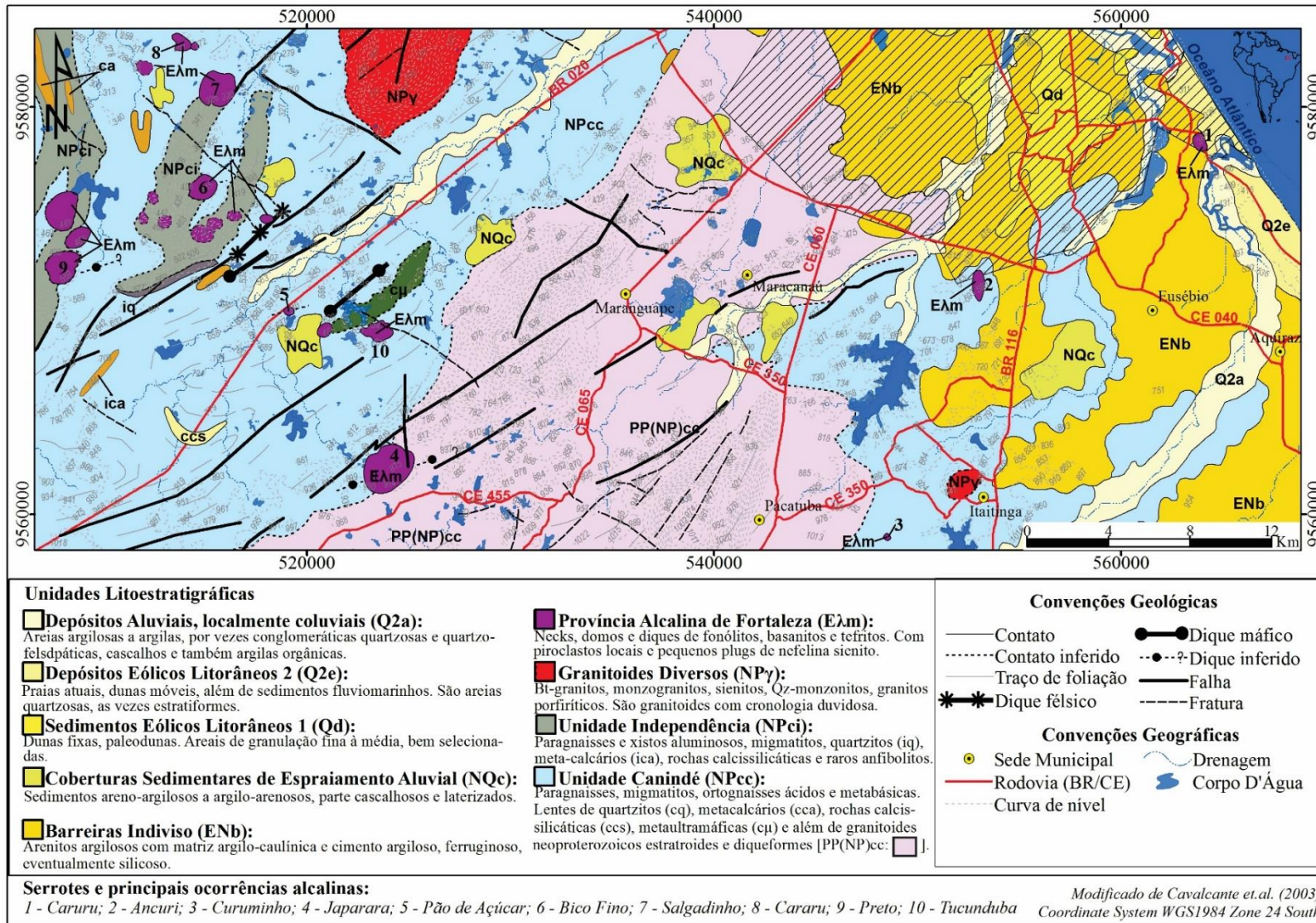
A Unidade Canindé hospeda diques, as ocorrências de Tucunduba e os serrotes alcalinos Ancori, Japarara, Pão de Açúcar, Curuminho e Cararu. Nessa unidade predominam ortognaisses de composições graníticas a monzograníticas, geralmente de coloração acinzentada e estrutura bandada, além de paragnaisses aluminosos, granitóides da Serra de Maranguape [PP(NP)cc] e, localmente, rochas calcissilicáticas (ccs), mármores (metacalcários - cca), quartzitos (cq) e metamáficas-ultramáficas (cμ) do serrote Manoel Gonçalves. Os paragnaisses e migmatitos da unidade Independência são cortados pelos *necks* fonolíticos Preto, Salgadinho e Bico Fino.

2.4.2.2 Província Alcalina de Fortaleza

Os principais afloramentos da província são constituídos por *necks* e domos fonolíticos destacados na paisagem aplainada, que ocorrem desde o limite entre Messejana e Eusébio (sudeste de Fortaleza) até Caucaia, região que constitui a planície do Rio Ceará (FIGURA 5).

Esses *necks* alcalinos são pequenos serrotes de formas circulares ou semicirculares, cujos diâmetros variam de algumas centenas de metros (*e.g.* Pão de Açúcar) até aproximadamente 2,5 km (*e.g.* Japarara), com encostas cobertas pelo tálus e sedimentos recentes. A morfologia do cone vulcânico é mais pronunciada nos serrotes Pão de Açúcar e Curuminho, que são os dois menores morrotes alcalinos da província.

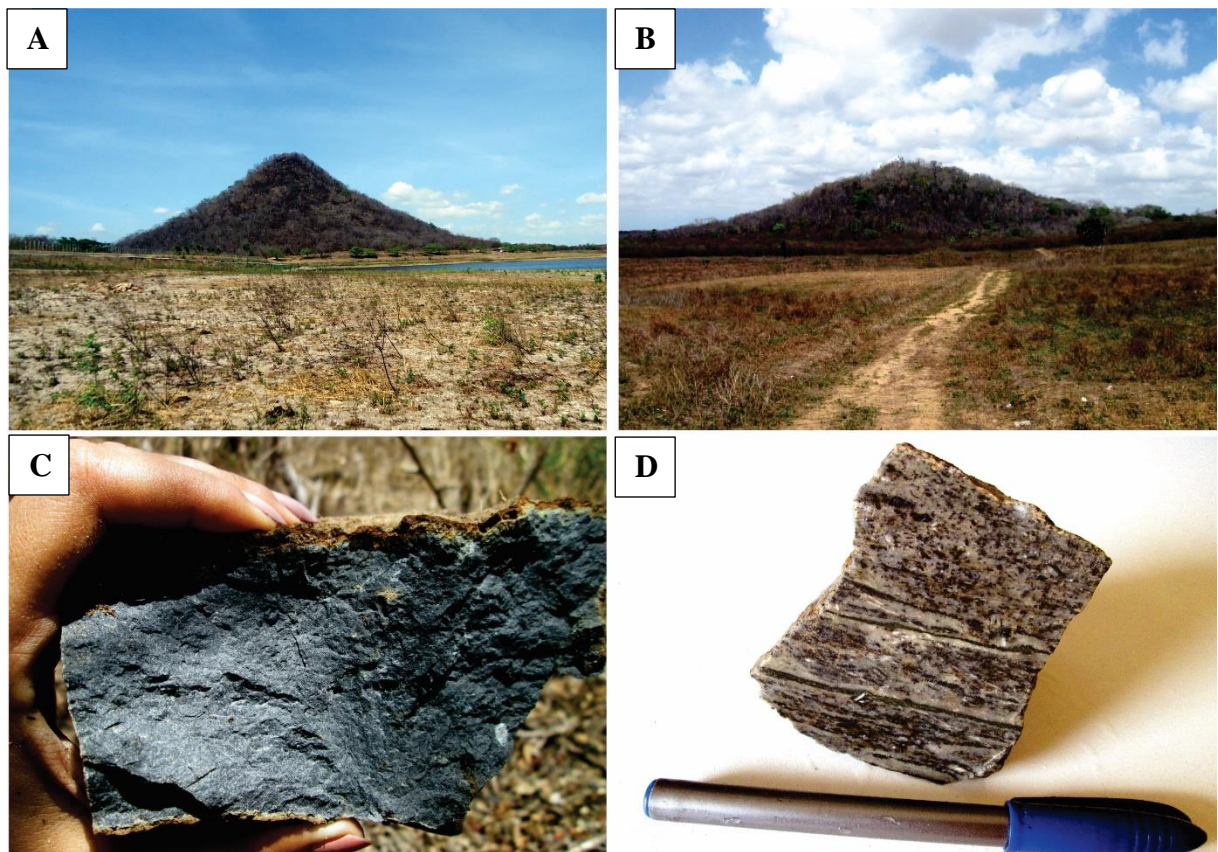
Figura 5 – Geologia da Província Alcalina de Fortaleza.



Fonte: dados da pesquisa.

O serrote Ancuri, localizado no limite entre Fortaleza e Itaitinga, aflora como um domo elipsoidal de orientação N/S, com cerca de 500 metros de comprimento na sua maior extensão. O serrote Pão de Açúcar, localizado em Caucaia, apresenta características de cone vulcânico (FIGURA 6A), onde sua forma circular possui um diâmetro de aproximadamente 500 m, cujas encostas foram intensamente erodidas, restando o conduto central, com brechas e diques fonolíticos associados. O contato com as rochas encaixantes é encoberto por blocos, matacões e sedimentos do depósito de tálus. No município de Caucaia, além do Pão de Açúcar, ocorrem os maiores *necks* fonolíticos da província que se sobressaem na topografia aplainada (serrotes Bico Fino, Preto, Salgadinho e Japarara), todos caracterizados pela presença de blocos e matacões desmoronados e frequentemente exibem diques simples ou radiais, que preenchem fraturas lateralmente dispostas em relação ao conduto central. Nas bordas de alguns desses *necks* (e. g. Ancuri) podem ser identificadas estruturas colunares tetragonais ou hexagonais.

Figura 6 – Modo de ocorrência das rochas vulcânicas alcalinas de Fortaleza.



Fonte: dados da pesquisa.

Notas: A) Morfologia do *neck* Pão de Açúcar; B) Vista do serrote Curuminho; C) Amostra de basanita do serrote Curuminho; D) Amostra de fonólito do *neck* Pão de Açúcar, exibindo bandamento ígneo. Há intercalação de finas camadas máficas (clinopiroxênio concentrado) com níveis de feldspatos alcalinos e feldspatoides.

Em Itaitinga foi identificado o único *neck* vulcânico preenchido por basanitos, o serrote Curuminho (FIGURA 6B), cuja forma circular possui cerca de 300 metros de diâmetro e tem suas encostas marcadas pela presença de blocos e matacões, onde seu contato com rochas encaixantes é coberto por sedimentos.

Os basanitos são rochas afaníticas, de cor cinza escuro a preta, predominantemente constituídos por piroxênios e plagioclásio (FIGURA 6C). Eventualmente é possível observar a textura de fluxo e centimétricos nódulos. Amígdalas preenchidas por carbonato e/ou clorita também são identificadas. No setor NE do serrote Manoel Gonçalves, o qual foi descrito por Cavalcante (2016) como Complexo Máfico-Ultramáfico Estratiforme Tucunduba, é identificado um estreito de dique basanítico que embora fragmentado, a sua extensão decamétrica possibilitou a identificação dessa intrusão a partir da imagem gamaespectrométrica. Localmente, outros diques basaníticos podem ser identificados próximo aos serrotes Preto e Salgadinho, caracterizados como rochas afaníticas de cor cinza escuro, sem estrutura de fluxo.

O complexo meta máfico-ultramáfico de Tucunduba tem suas bordas NE/SW e SE marcadas pela ocorrência de blocos soltos e pequenos afloramentos de fonólitos e rochas piroclásticas da província alcalina.

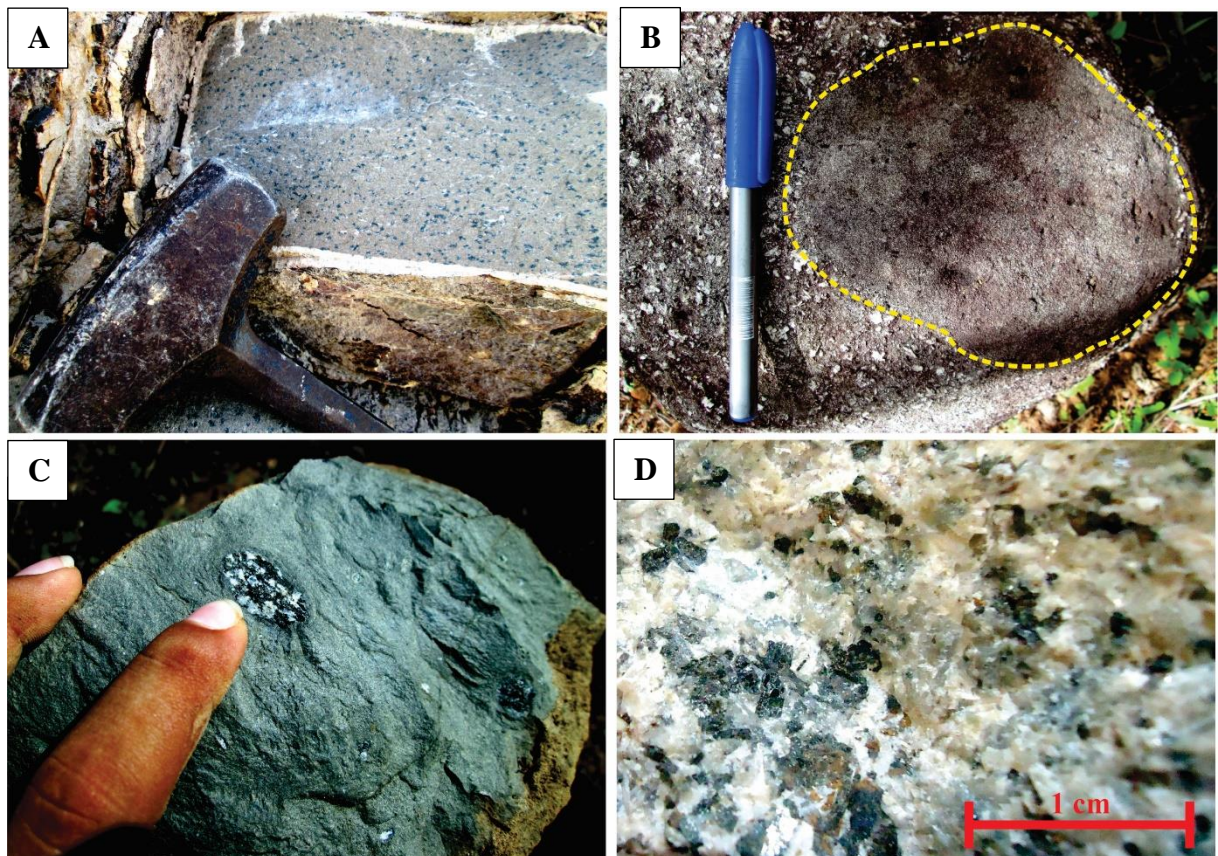
Os diques fonolíticos e traquíticos são mais comuns, principalmente na região de Tucunduba. Apresentam dimensões pequenas e frequentemente estão fragmentados. Essas intrusões são orientadas NE/SW, conforme a estruturação regional ou preenchem as fraturas extensionais que bordejam os condutos vulcânicos, como pode ser observado nos serrotes Pão de Açúcar e Japarara.

As composições fonolíticas são dominantes na província e variam de rochas afaníticas a glomeroporfiríticas, de coloração cinza a verde acinzentado e, frequentemente, estrutura maciça. Nas variações porfiríticas, a matriz afanítica envolve os milimétricos fenocristais de feldspato alcalino, nefelina, clinopiroxênio e, eventualmente, anfibólio. Apenas no *neck* Pão de Açúcar foi identificada uma variação com bandamento ígneo formado pela segregação gravimétrica de cristais (FIGURA 6D), onde são diferenciados os estreitos níveis de piroxênio (geralmente milimétricos) intercalados a níveis félsicos de feldspato e feldspatoides. A textura glomeroporfirítica de alguns fonólitos é marcada por concentrações esferulíticas a radiais de piroxênios, deixando a rocha com um aspecto de subvulcânica, tal como ocorre em uma variação do serrote Ancori (FIGURA 7A).

A textura amigdaloidal nas rochas fonolíticas é caracterizada pela presença de milimétricas cavidades arredondadas preenchidas por carbonato. Enclaves microgranulares com dimensões variadas e textura microporfirítica são comumente encontrados nos fonólitos da região de Tucunduba (FIGURA 7B). Durante a ascensão, os magmas fonolíticos foram capazes de remover fragmentos/nódulos já consolidados do magmatismo alcalino e fragmentos de rochas encaixantes que ficaram preservados como enclaves xenolíticos (FIGURA 7C).

As ocorrências alcalinas de Tucunduba, perfazem uma área de aproximadamente 1km² no SE do serrote máfico-ultramáfico Manoel Gonçalves, caracterizadas por derrames fonolíticos afíricos a microporfiríticos, uma pequena intrusão de nefelina sienito e uma rocha vulcanoclástica.

Figura 7 – Textura das rochas alcalinas de Fortaleza.



Fonte: dados da pesquisa.

Notas: A) Fonólito exibindo a textura glomeroporfirítica formada pela concentração de clinopiroxênios, deixando a rocha com um aspecto de rocha subvulcânica; B) Enclave microporfirítico incluído em fonólito porfirítico; C) Destaca o xenólito incluído no fonólito com textura subáfírica; D) Detalhe de nefelina sienito com textura fanerítica e estrutura maciça.

O nefelina sienito de Tucunduba é caracterizado como um pequeno *stock*, de geometria semicircular, alongado na direção NE/SW. Possui aproximadamente 250 m de comprimento, por 150 m de largura, embora a definição de suas dimensões não seja totalmente definida, já que seus contatos com encaixantes estão encobertos pelos depósitos cenozoicos. Os principais afloramentos do nefelina sienito são formados por blocos e matacões, que geralmente ocorrem circundados pelos fonólitos microporfiríticos e, na sua margem leste, ocorre a brecha vulcanoclástica. Esse corpo plutônico é, portanto, constituído por faneríticas leucocráticas, com coloração cinza, estrutura maciça, granulação média e inequigranular (FIGURA 7D).

A mineralogia do nefelina sienito é essencialmente constituída por: feldspatos alcalinos, feldspatoide (nefelina), plagioclásio e minerais máficos (anfíbólio ± piroxênio). As variações de granulação fina são típicas de bordas de resfriamento, que correspondem a *fácies* com características de subvulcânica, coloração cinza e textura porfirítica, denominada micro-nefelina sienito. As bordas de resfriamento podem ser indícios de condições relativamente rasas de alojamento do plúton.

Através dos dados de sondagem, fornecidos pela empresa Campo & Cia., foi reconhecida a relação do nefelina sienito com uma *fácies* alcalina saturada em sílica, classificada como um meta álcali-feldspato sienito, que foi identificado somente nos testemunhos de sonda. Esse meta granitoide é marcado pela textura porfirítica, granulação média-fina e coloração cinza escuro. A deformação tênue (apontada pela presença de cristais fraturados e extinção ondulante) desse meta álcali-feldspato sienito é, provavelmente, decorrente dos falhamentos que permitiram a ascensão dos magmas fonolíticos, bem como o *emplacement* do nefelina sienito.

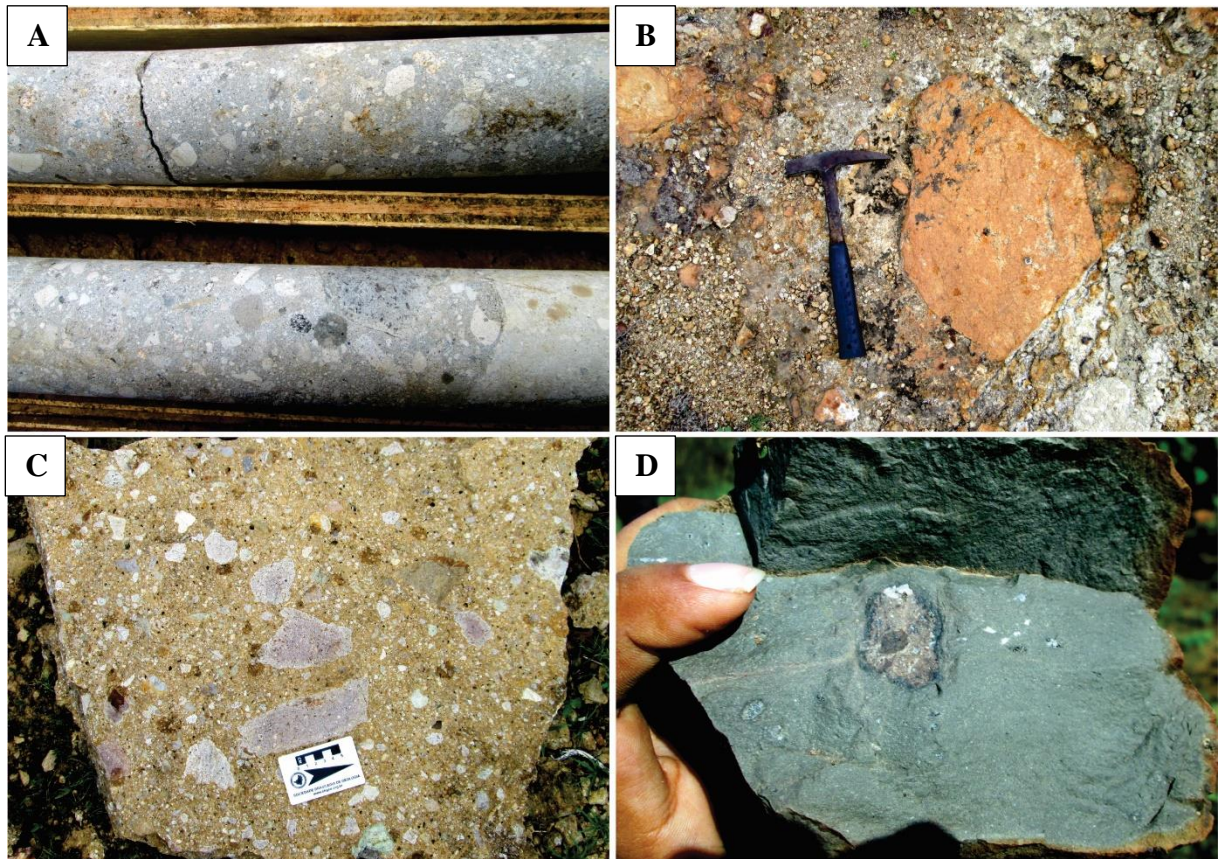
A rocha vulcanoclástica de Tucunduba é um *pipe* de brecha, que cobre a porção leste do *stock* de nefelina sienito e parte dos fonólito microporfiríticos dessa região. Do ponto de vista macroscópico, essa brecha é semelhante a variação subaflorante de Fortaleza descrita por Werneck (2018).

Esse *pipe* de Tucunduba é quase elipsoidal, com cerca de 800 metros na sua maior extensão, cujos afloramentos são caracterizados como lajedos métricos a decamétricos. Essa brecha vulcanoclástica aflora intensamente argilizada e, por ser muito porosa, exhibe capa de oxidação que lhe confere uma coloração ocre. Em subsuperfície o aspecto oxidado restringe-se aos planos de fratura e a rocha apresenta uma coloração cinza (FIGURA 8A). A matriz muito fina, tufisítica, e interfragmentada envolve os clastos polimíticos, que variam quanto a composição, tamanho nível de alteração e grau de arredondamento.

Os clastos variam de milimétricos (microfragmentos) a decimétricos (megafragmentos) e geralmente são angulosos a pouco arredondados (FIGURAS 8B e 8C). São constituídos por fragmentos argilizados de: (1) fonólitos e traquitos da província; (2) rochas encaixantes; (3) minerais, principalmente quartzo, feldspato e mica. Localmente, é possível identificar a presença de vênulas de carbonato cortando a matriz e os clastos da rocha, além de vesículas.

Um sistema de pares de fratura NNE/SSE e NW/SE pode ser identificado, localmente, cortando a brecha e, mais raramente diques aplíticos com direção NE/SW. Xenólitos dessa vulcanoclástica foram identificados em alguns fonólitos de Tucunduba (FIGURA 8D), exibindo bordas de reação no contato do fragmento com a rocha hospedeira.

Figura 8 – Textura da brecha vulcanoclástica da Província Alcalina de Fortaleza.



Fonte: dados da pesquisa.

Notas: A) Testemunhos de sondagem mostrando o aspecto da brecha em subsuperfície, cujo aspecto ocre (oxidação) limita-se as zonas de fratura. A matriz muito fina envolve os clastos polimíticos; B) Megafragmento lítico argilizado que possui aproximadamente 40 cm; C) Textura brechada, com variação de fragmentos líticos com diferentes níveis de alteração, composições e formas. Obs: escala não orientada; D) Fragmento arredondado da brecha incluso em fonólito, exibindo zoneamento nas bordas, indicando interação/reação entre o clasto e o líquido magmático.

2.4.2.3 Coberturas sedimentares cenozoicas

Compreendem sedimentos da Formação Barreiras, depósitos quaternários alúvio-coluvionares inconsolidados, paleodunas e dunas móveis. A Formação Barreiras ocorre no litoral cearense com espessura variável, compreendendo sedimentos areno-argilosos, pouco litificados, que bordejam a porção oeste do serrote Caruru, além de siltitos arenosos e lateritas.

Localizado próximo ao estuário do rio Pacoti, o serrote Caruru tem a sua porção leste coberta pelos os depósitos eólicos dunares e fluviais. Na porção SE desse morro ocorrem as areias quartzosas das dunas móveis. No restante da região alvo, os sedimentos quaternários alúvio-coluvionares ocorrem de forma irregular e com espessura variável, principalmente, nos leitos e margens de drenagens. São mal selecionados e constituídos por areias quartzosas amareladas a acinzentadas, seixos, cascalhos e uma fração fina (argila e/ou silte).

2.5 Petrografia da Província Alcalina de Fortaleza

2.5.1 Fonólitos

São rochas holocristalinas a hipocristalinas e que variam de porfiríticas a glomeroporfiríticas, constituídas por 5 – 30% (em estimativa modal) por microfenocristais, mergulhados na matriz afírica de granulação fina a muito fina (0,01 a 1mm), constituída pelos seguintes minerais e suas estimativas modais: feldspatos alcalinos (50 – 55%), feldspatoides (aprox. 10%), aegirina-augita (20 – 25%), minerais opacos (ilmenita ± hematita ± pirita; ≤5%), apatita (3 – 5%), zircão (≤1%) e titanita (≤1%). Texturalmente a matriz varia de intergranular a traquítica, esta última marcada pelo alinhamento dos micrólitos ripiformes de feldspatos alcalinos, que envolvem microfenocristais e inclusões. Em adição, o plagioclásio (albita) pode coexistir entre os feldspatos alcalinos, constituindo a matriz fonolítica.

Praticamente todas as ocorrências analisadas possuem textura amigdaloidal, com preenchimento por calcita e mais raramente zeólitas ou cloritas, além de carbonato preenchendo microfraturas. Vesículas são menos comuns. Em alguns litotipos foram observados xenólitos, identificados como fragmentos de meta granitoides arredondados e sem bordas de reação com a matriz fonolítica.

Os microfenocristais de feldspatos alcalinos variam de 0,7 a 6,0 mm, são cristais euédricos a subédricos com formas retangulares, geminados segundo a Lei de *Carlsbad* e polissintética. Comumente formam a textura glomeroporfirítica e exibem fraturas de contração térmica, além de mostrarem feições de alteração intempérica para argilomineral (provavelmente caulinita), carbonato e/ou sericita. Alguns cristais exibem extinção ondulante e bordas corroídas, indicando reabsorção pelo líquido magmático. Nessas rochas predominam feldspatos sódicos, anortoclásio à sanidina. Na matriz, o plagioclásio forma agregados de cristais ripiformes muito finos, com geminação albita, no geral com um aspecto turvo indicando processo intempérico de argilização.

Os micrólitos de aegirina-augita possuem granulação muito fina, variam de 0,03 a 0,2mm e ocorrem disseminados na matriz fonolítica, formando aglomerados microcristalinos ou constituindo milimétricas bandas subparalelas do bandamento ígneo, tal como foram identificados em amostras dos derrames fonolíticos de Tucunduba (FIGURA 9A) e do *neck* Pão de Açúcar (FIGURAS 9B e 9C). Geralmente os finos prismas de aegirina-augita bordejam inclusões e microfenocristais (FIGURAS 9C e 9D).

Os microfenocristais de aegirina-augita são idiomórficos a subidiomórficos, com hábito prismático alongado, variando de 0,1 a 2,0 mm. Por vezes, formam a textura glomeroporfirítica com cristais dispostos de forma radial, semelhante a um leque, como pode ser observado em uma das *fácies* do domo fonolítico Ancuri (FIGURA 9E). Em uma das variações fonolíticas do *neck* Pão de Açúcar, alguns cristais de aegirina-augita são substituídos por anfibólio de composição riebeckítica, pelo processo de uralitização.

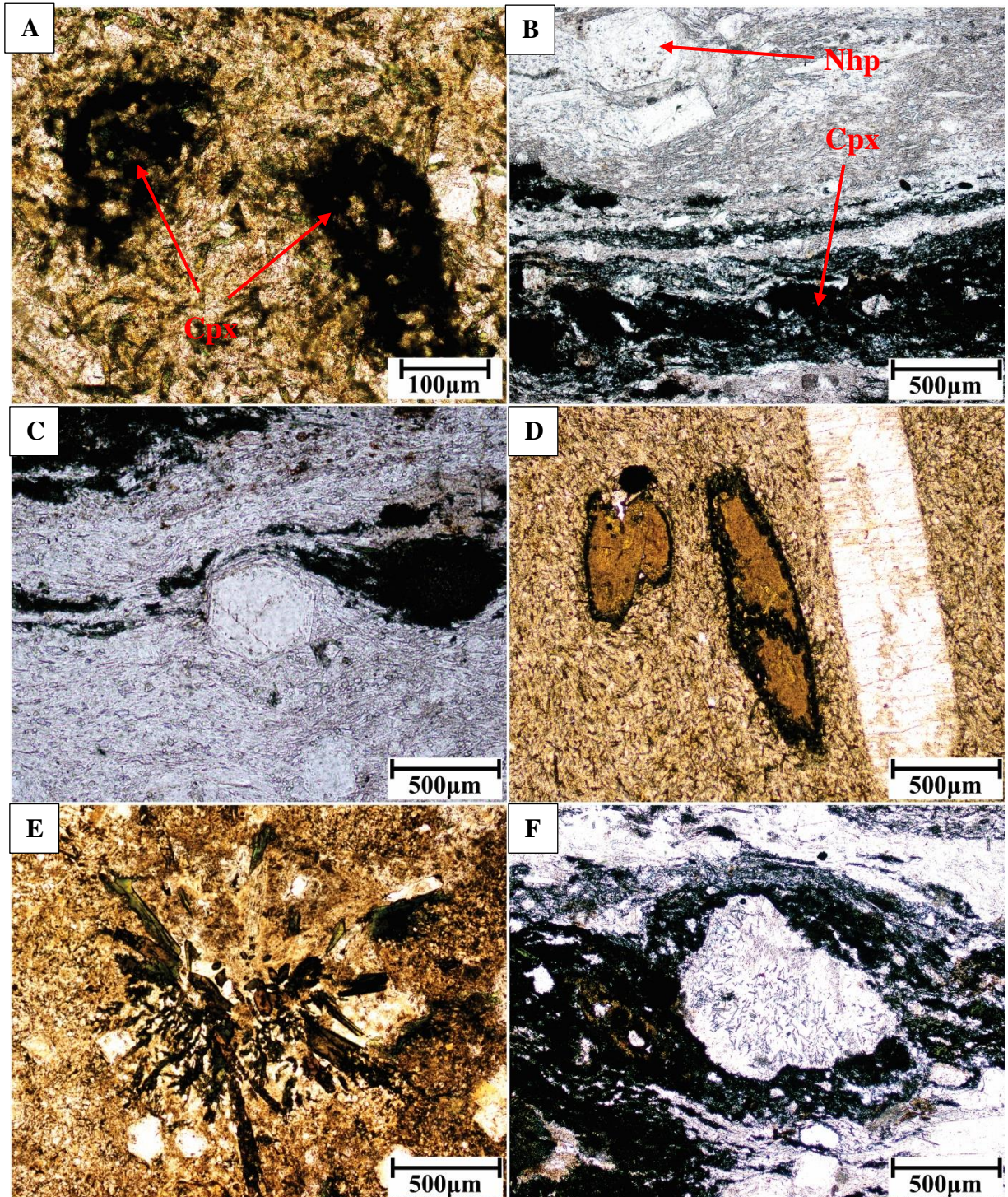
A nefelina é o feldspatoide dominante na província. Os fenocristais euédricos de nefelina ocorrem nos fonólitos com contornos quadráticos a hexagonais, variando de 0,5 a 2,5 mm e frequentemente zonados ou com microexsoluções de kalsilita bordejando as faces cristalinas do mineral (FIGURA 9C). Por vezes esse feldspatoide foi completamente substituído por carbonato ou sericita. Na matriz das rochas fonolíticas a nefelina também ocorre com hábito euédrico, variando de 0,01 a 0,05 mm e exibindo contornos quadráticos a hexagonais típicos. A sodalita foi identificada apenas no *neck* do Pão de Açúcar, com o auxílio do MEV.

A kaersutita $[\text{NaCa}_2(\text{Mg}_4\text{Ti})\text{Si}_6\text{Al}_2\text{O}_{23}(\text{OH})_2]$ está presente na matriz ou como fenocristal em quase todos os fonólitos da Província, sugerindo a baixa fugacidade de oxigênio dos magmas fonolíticos, permitindo a cristalização de pirita e ilmenita. Os fenocristais de kaersutita são euédricos a subédricos prismas alongados a cristais hexagonais, que variam de 0,3 a 2,0 mm. Frequentemente exibem zoneamento composicional, sugerindo o enriquecimento de ferro em direção as bordas do mineral. Além de cristais com bordas corroídas, a kaersutita também é identificada com textura esquelética, bordejada por micrólitos de aegirina-augita (FIGURA 9D). Em alguns fonólitos há inclusões de kaersutita em kaersutita.

A apatita ocorre principalmente como inclusões poiquilíticas nos cristais de kaersutita, mas esse fosfato também é identificado com hábito acicular incluso com uma distribuição caótica em clastos poliminerálicos, que provavelmente foram carregados pelo magma durante a ascensão (FIGURA 9F).

Ilmenita, e pirita estão entre os principais minerais acessórios dessas rochas variam de 0,02 a 0,05mm, hábitos euédricos a subédricos quadráticos, dendríticos e anedrais, estes associados à apatita microgranular e alteração dos ferromagnesianos. Titanita e zircão são acessórios menos frequentes, onde o primeiro ocorre como cristais microgranulares euédricos, de 0,1 a 0,5 mm, associados a reação de desestabilização da kaersutita e o segundo é identificado como grãos de granulação muito fina.

Figura 9 – Fotomicrografias dos fonólitos sob luz transmitida com nicóis paralelos (PPL)



Fonte: dados da pesquisa.

Notas: A) Aglomerados de aegirina-augita (Cpx) (PPL, 20x); B) Fonólito microporfirítico com nefelina e sodalita modal, textura bandada marcada por camadas ricas em aegirina-augita (parte inferior) e camadas compostas por feldspato alcalino e feldspatoide (PPL, 4,5x); C) Microfenocrystal hexagonal de nefelina com microexsoluções de kalsilita ao redor das faces cristalinas. Aglomerado de aegirina-augita (à direita) (PPL, 4,5x); D) Kaersutita com inclusão de apatita, cercada por finos prismas de aegirina-augita. O feldspato alcalino, mineral, tabular e incolor, mostra aspecto turvo devido a alteração para sericita (PPL, 4,5x); E) arranjos radiais em forma de leque dos piroxênios (PPL, 4,5x); F) Clasto poliminerálicos contendo apatita acicular, delimitados por aegirina-augita (PPL, 4,5x). Abreviações: Cpx= clinopiroxênio; Nhp = nefelina.

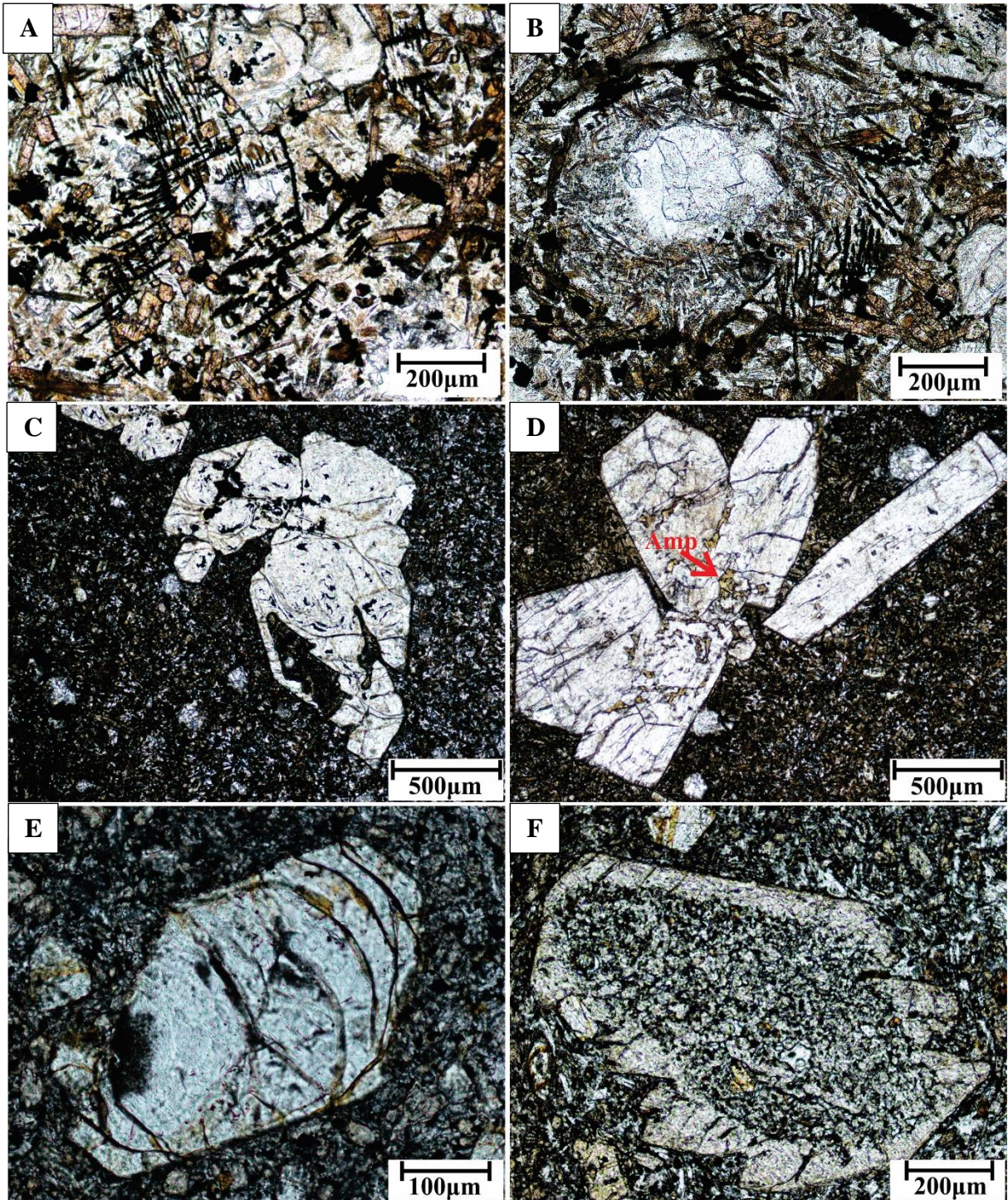
2.5.2 *Basanitos*

Como os ankaramitos e limburgitos reconhecidos por Sial (1970) não possuem a localização definida, apenas três ocorrências de basanitos são cartografadas na Província Alcalina de Fortaleza: (1) basanito subaflorante de Fortaleza, encoberto pelos sedimentos da Formação Barreiras e descrito por Werneck (2018); (2) serrote Curuminho, localizado em Itaitinga e; (3) diques de Tucunduba. Estas duas últimas ocorrências foram objeto de estudo dessa pesquisa.

São rochas holocristalinas a hipocristalinas, que variam de microporfiríticas a glomeroporfiríticas, caracterizadas pela textura seriada. A granulação é muito fina, constituída por cristais de 0,1 a 0,01mm. Possuem de 5 a 20% de microfenocristais (clinopiroxênio \pm olivina \pm plagioclásio \pm ortopiroxênio) envolvidos pela matriz intergranular/feltro a intersectal, que é essencialmente composta pelos seguintes minerais e suas estimativas modais: piroxênio (35 – 50%), feldspato (25 – 35%), minerais opacos (10 – 20%). Venulações carbonáticas são comuns. Os basanitos também apresentam autólitos bordejados por micrólitos de piroxênio e minerais opacos. Esses nódulos são identificados como milimétricos glóbulos com a mesma composição da rocha hospedeira, que estavam sólidos quando foram arrastados pelo magma durante a ascensão.

Os clinopiroxênios que constituem a matriz são prismas euédricos da série diopsídio-hedenbergita, levemente esverdeados (maior concentração de Fe) a acastanhados (maior concentração em Ti), frequentemente oxidados. O ortopiroxênio, menos comum, forma prismas euédricos de cor acastanhada, com frequentes inclusões de opacos. O plagioclásio é ripiforme e inequigranular, com geminação tipo albita, tênue saussuritização e por vezes está orientado. Os minerais opacos (principalmente ilmenita) são cristais de granulação fina, que variam de idiomórficos a xenomórficos, exibindo contornos quadrados (pirita) e as vezes prismáticos finos e alongados (quase aciculares). Esses minerais são encontrados disseminados na matriz, preenchendo fraturas, bordejando clastos poliminerálicos, fenocristais e amígdalas ou formando a textura simplectítica (FIGURA 10A). Os simplectitos podem resultar da reação de interação entre minerais cumuláticos e os líquidos magmáticos residuais que percolam nos limites dos cristais, durante os estágios finais da cristalização.

Figura 10 – Fotomicrografias dos basanitos sob nicóis paralelos (PPL).



Fonte: dados da pesquisa.

Notas: A) Minerais opacos formando a textura simplectítica, indicando interação com fluido (PPL, aumento de 10x); B) Minerais opacos circundando a amigdala preenchida por calcita (PPL, aumento de 10x); C) Microfenocristais de olivina pseudomorfizados por talco e textura esquelética com embainhamento envolvendo a matriz (PPL, 4,5x); D) Textura glomeroporfirítica com fenocristais de clinopiroxênio (Cpx). A seta destaca uma incipiente substituição para anfibólio (Amp) a partir das fraturas internas do mineral (PPL, 4,5x); E) Microfenocristal de olivina com fraturas preenchidas por iddingsita (PPL, aumento de 20x); F) Augita *sieve* (PPL, 10x).

A textura amigdaloidal é marcada pela presença de milimétricas cavidades arredondadas a ovaladas preenchidas por minerais tardi a pós-magmáticos de calcita e, rara, clorita. As amígdalas e os autólitos são bordejados pelos minerais opacos. Ao redor das amígdalas, os cristais de piroxênio tornam-se aciculares e com uma granulação ainda mais fina, com textura semelhante aos enclaves autolíticos (FIGURA 10B).

Até 50% modal dos microfenocristais são de olivina, caracterizados por formas prismáticas a arredondadas, com até 1,5 mm na maior dimensão. Geralmente possuem fraturas conchoidais preenchidas por iddingsita ($MgO.Fe_2O_3.3SiO_2.4(H_2O)$) (FIGURAS 10C e 10E). A alteração da olivina para serpentina é indicada por manchas amarronzadas nos cristais. Os microfenocristais de clinopiroxênio variam de augita a titanoaugita. São euédricos cristais prismáticos incolores, de 0,2 a 1,2 mm, intensamente fraturados, que exibem maclas polissintéticas ou tipo *Carlsbad* e, às vezes, possuem zoneamento em “ampulheta”, característico da titanoaugita. Frequentemente esses piroxênios formam a textura glomeroporfírica e estão parcialmente substituídos para anfibólio (FIGURA 10D). Os microfenocristais de ortopiroxênio são, geralmente, idiomórficos prismas alongados ou cristais hexagonais (seção basal) com cor marrom pálida e pleocroísmo característico de marrom a “rosa salmão”, cor de interferência cinza e, por vezes, com inclusões em *schlieren*.

São comuns fenocristais pseudomorfos de olivina completamente substituídos por talco e, mais raramente, por serpentina, além de cristais com crescimento paralelo (*parallel-growth olivine*) e esqueléticos (*skeletal olivine*), estes exibindo o embainhamento da matriz (FIGURA 10C), desenvolvidos durante a rápida cristalização, aspecto denominado de “olivina em funil” (*hopper* – DONALDSON, 1976). Fenocristais esqueléticos de titanoaugita, além do embainhamento da matriz exibem inclusões de rutilo e óxidos de Fe. No basanita do serrote Curuminho, alguns microfenocristais de augita mostram textura de peneira (*sieve-textured pyroxene* – FIGURA 10F), com inclusões de líquido magmático, bordas corroídas e/ou arredondadas, produto de reabsorção durante a ascensão do magma, provavelmente em condição de subsaturação de água, que pode ser indicativo de mistura de diferentes líquidos magmáticos (NIXON & PEARCE, 1987) ou decompressão. Esta última hipótese corroborada pela presença de nódulos/clastos poliminerálicos com contatos instáveis com a matriz da rocha, bem como pela presença de apatita acicular nas inclusões exibindo uma distribuição desornada, caótica.

2.5.3 Nefelina sienito

Rocha holocristalina, hipidiomórfica a panidiomórfica composta por cristais subequigranulares, com contatos retilíneos entre si, que variam de granulação fina a média (0,13 a 5,0mm). A trama granular é formada essencialmente pelos minerais seguintes e suas respectivas estimativas modais: de feldspato alcalino (47 – 58%); nefelina (10 – 15%); plagioclásio (6 – 10%); kaersutita (8 – 13%); hornblenda ($\leq 4\%$); clinopiroxênio ($\leq 2\%$); opacos de Fe e Ti (3 – 10%), apatita (2 – 7%), zircão ($\leq 1\%$); biotita ($\leq 1\%$); titanita ($\pm 1\%$) e rutilo ($\leq 1\%$). A mineralogia secundária típica é constituída por calcita, sericita, epidoto (possivelmente clinozoisita) e argilominerais, produtos de alteração. Assim como nos fonólitos, essa rocha é caracterizada por pela presença de carbonato substituindo os minerais félsicos e preenchendo venulações intra e extramineral.

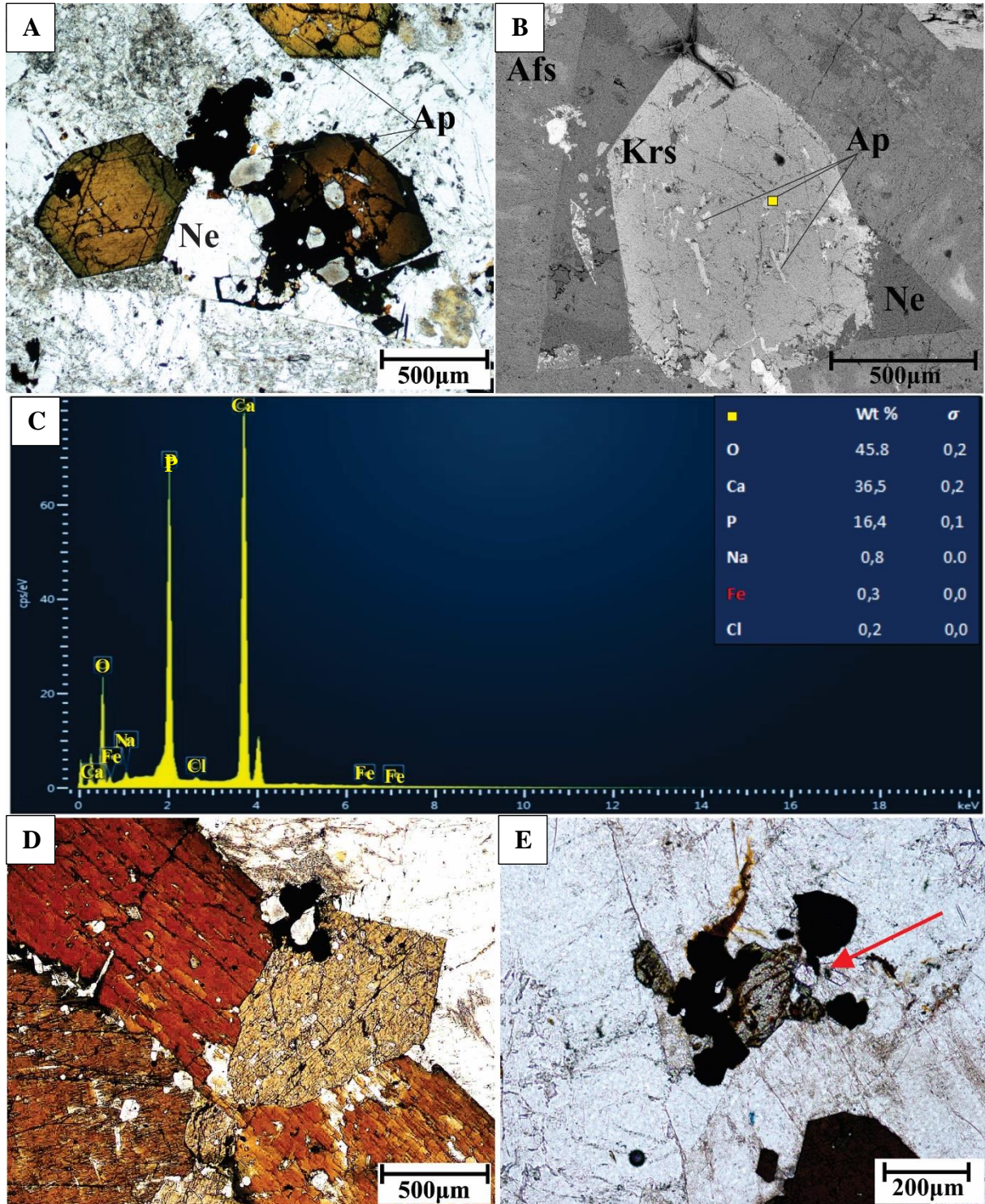
O mineral félsico dominante é o feldspato sódico, anortoclásio, cujas dimensões variam de 1,82 a 4,5 mm. Os cristais idiomórficos a subidiomórficos apresentam hábito tabular a placoide, geralmente com geminação simples tipo *Carlsbad*, fraturas intragranulares e aspecto turvo, resultante de alteração para argilominerais.

Eventualmente são identificadas o anortoclásio possui: micropertitas; cristais com bordas corroídas, indicando reação com o fluido magmático; extinção ondulante e; parcial ou completa substituição por sericita (alteração intempérica).

O plagioclásio forma agregados ripiformes, que variam de 0,5 a 2 mm na maior dimensão, marcados por múltiplas geminações tipo albita e bordas de desestabilização. São comuns cristais saussuritizados, formando epidoto (clinozoisita) + calcita \pm sericita. A nefelina é euédrica a subédrica, mostrando contornos hexagonais, quadrática a retangulares e é intersticial ao anortoclásio (textura sienítica). Esse feldspatoide é parcialmente substituído por mica fina (sericita) e suas dimensões variam de 0,24 a 2,07 mm.

Dois gerações texturais de kaersutita são identificadas. A primeira geração consiste em cristais euédricos a subédricos que estão inclusos na segunda geração, esta última tem cristais idiomórficos mais desenvolvidos, que variam de 0,5 a 5,0 mm, exibem geminação *Carlsbad* e, raramente Baveno. O zoneamento composicional é comum, onde o vermelho amarronzado torna-se esverdeado em direção as bordas provavelmente devido ao enriquecimento em ferro, indicando uma composição próxima a ferrokaersutita (FIGURA 11A).

Figura 11 – Fotomicrografias do nefelina sienito com nicóis paralelos (*PPL*) e MEV – EDS.



Fonte: dados da pesquisa.

Notas: A) Cristal euédrico de kaersutita poiquilítica zonada (esquerda). O cristal da direita indica a reação de desestabilização, produzindo apatita e opacos de Ti-Fe (ilmenita). A nefelina (Nph) cristalizou nos espaços deixados pelos cristais formados anteriormente, resultando em formas triangulares a quadráticas (*PPL*, 4,5x); B) Imagem MEV-EDS mostrando as microinclusões de cloroapatita (Ap) em kaersutita subédrica (Krs), cuja borda corroída indica desequilíbrio/reação com feldspatos alcalinos (Afs). O quadrado amarelo indica o cristal de apatita cujo espectro é apresentado no item C; C) Difractograma do cristal de apatita incluído no anfíbólio, com picos mais altos de P e Ca. D) Cristais subédricos de kaersutita incluindo poiquilíticamente apatita (*PPL*, 4,5x); A imagem indica a ocorrência de diferentes gerações de kaersutita; E) Minerais resultantes da desestabilização da kaersutita: titanita, apatita (seta vermelha), ilmenita e raramente biotita vermelha/acastanhada (*PPL*, 10x).

Frequentemente a kaersutita inclui poiquiliticamente prismas delgados de cloroapatita, e minerais opacos de Fe e Ti, identificados através da técnica MEV acoplado ao EDS (FIGURAS 11B, 11C e 11D). As bordas corroídas nos cristais de kaersutita, indicam a desestabilização do anfibólio, liberando Fe e Ti para a formação de exsoluções de rutilo e cristais de titanita e óxidos de Fe e Ti e, às vezes, biotita. Os planos de fratura e o contorno desse mineral são preenchidos por óxidos. E eventualmente, é observada a presença de bordas de substituição por clinopiroxênio (aegirina-augita).

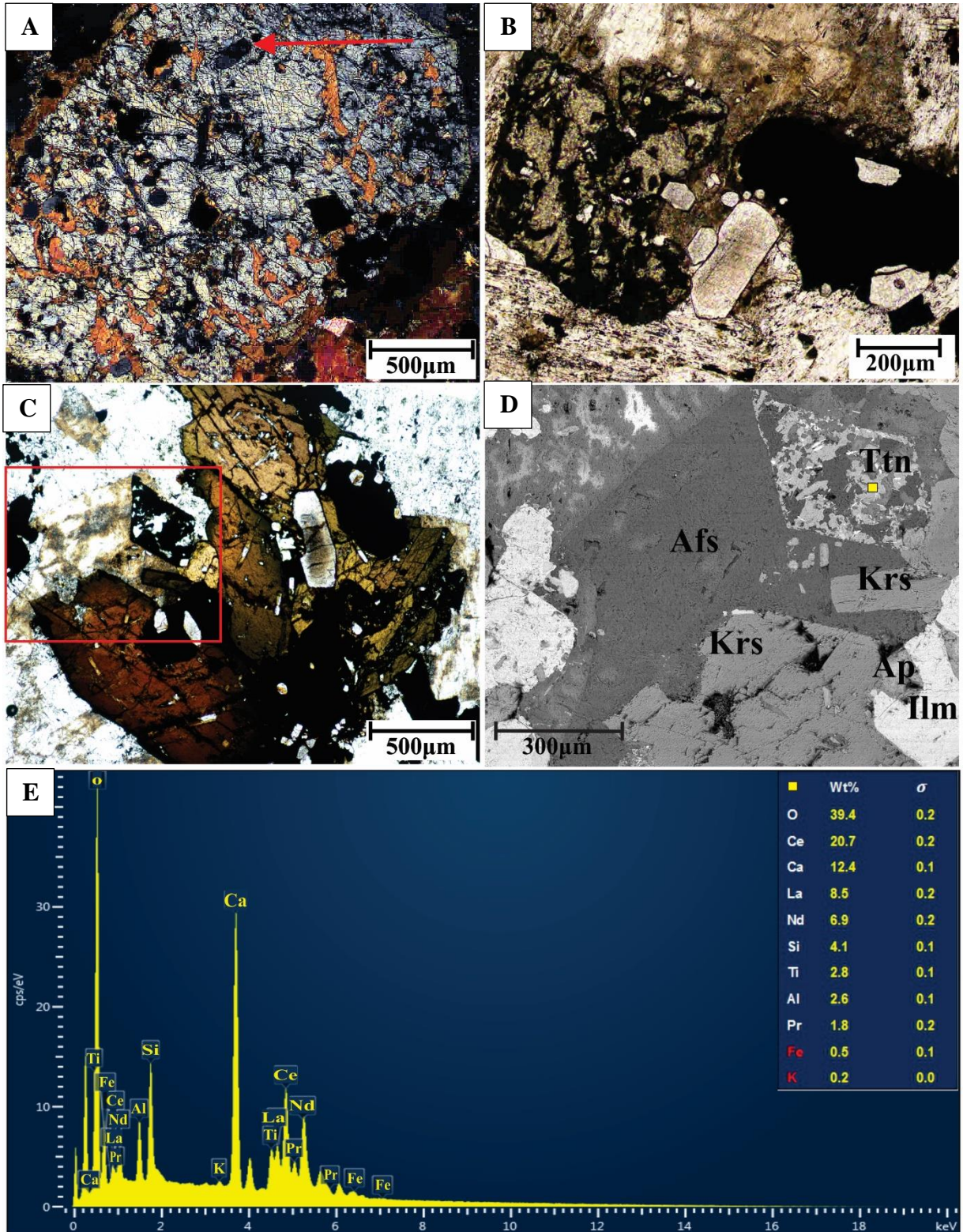
Os clinopiroxênios são prismáticos cristais idiomórficos a subidiomórficos, com dimensões de 0,81 a 2,5 mm, que variam de augita a titanaugita. Geralmente são zonados, pouco oxidados e incluem poiquiliticamente cristais de apatita e opacos de Fe-Ti. Podem ocorrer com bordas e fraturas internas substituídas por anfibólio (textura coronítica – FIGURA 12A).

A apatita é mineral acessório típico desse nefelina sienito, caracterizada por cristais euédricos e incolores de hábito prismático a hexagonal, que variam de 0,01 a 0,2 mm. Esse fosfato ocorre como inclusão nos minerais máficos ou associado aos minerais opacos (FIGURA 12B), estes últimos são identificados como ilmenita, pirita e hematita, que variam de cristais euédricos a anédricos, geralmente com 0,1 mm. O zircão identificado como grãos microcristalinos euédricos de hábito característico, com aproximadamente 0,1 – 0,2 mm.

A titanita ocorre como cristais xenomórficos a idiomórficos com hábito losangular, cor amarronzada pálida e dimensões variáveis de 0,5 a 1mm. Esse mineral acessório ocorre com a textura esquelética opaca, produto de alteração deutérica (FIGURA 12C), nesse caso, é identificada pelo seu formato de losango que é preservado. Alguns cristais subidiomórficos de titanita exibem bordas corroídas, indicando a reação com o fluido durante os estágios finais do processo magmático, que pode ter sido responsável pela substituição de parte do Ca e Ti, respectivamente, por ETRs e Fe + Nb (FIGURA 12B). Essas reações de podem ainda ter causado a entrada de F e Zr na estrutura do mineral. Essas substituições foram identificadas a partir da análise MEV-EDS (FIGURAS 12D e 12E).

Petrograficamente a *fácies* das bordas de resfriamento do plúton, o micro-nefelina sienito, diferencia-se apenas texturalmente, já que se caracteriza como uma textura microporfírica, onde destacam-se os cristais tabulares de anortoclásio e o os prismas idiomórficos de kaersutita. A nefelina ocorre nos interstícios da trama formada pelos cristais de feldspato alcalino e anfibólio.

Figura 12 – Fotomicrografias do nefelina sienito com nicóis cruzados (*XPL*) e paralelos (*PPL*) e BSE – SEM.



Fonte: dados da pesquisa.

Notas: A) Titanita sendo substituída por anfibólio. Esta substituição é acompanhada por cristais opacos euédricos (ilmenita) e apatita (seta vermelha) (*XPL*, 4,5x); B) Minerais acessórios: titanita (direita) interagindo com o fluido, apatita (cristais incolores) e opacos anédricos (ilmenita); C) O quadro indica a titanita (Ttn) esqueletal, associada a ilmenita (Ilm), kaersutita (Krs) e apatita (Ap) (*PPL*, 4,5x); D) Imagem de MEV-EDS da área do quadrado do item C. O quadrado amarelo indica o local da análise do espectro do item E; E) Difratoograma indicando a presença de ETRs na titanita. Abreviações: Afs = álcalis feldspato.

2.5.4 Brecha vulcanoclástica

Rocha heteromítica com textura brechada matriz-suportada, que exhibe variações intensamente oxidadas e/ou argilizada. A matriz tufisítica, extremamente fina (criptocristalina), envolve uma mistura complexa de diferentes partículas, que variam quanto a granulação, grau de arredondamento e alteração, mas que caracterizam a textura piroclástica típica (FIGURA 13A) e, no geral, estão argilizados e oxidados. A rocha é constituída por fragmentos polimíticos de: (1) vidro vulcânico; (2) fonólitos e traquitos; (3) rochas encaixantes (4) minerais quebrados. São comuns fraturas intra e extraclasto preenchidas por carbonato secundário.

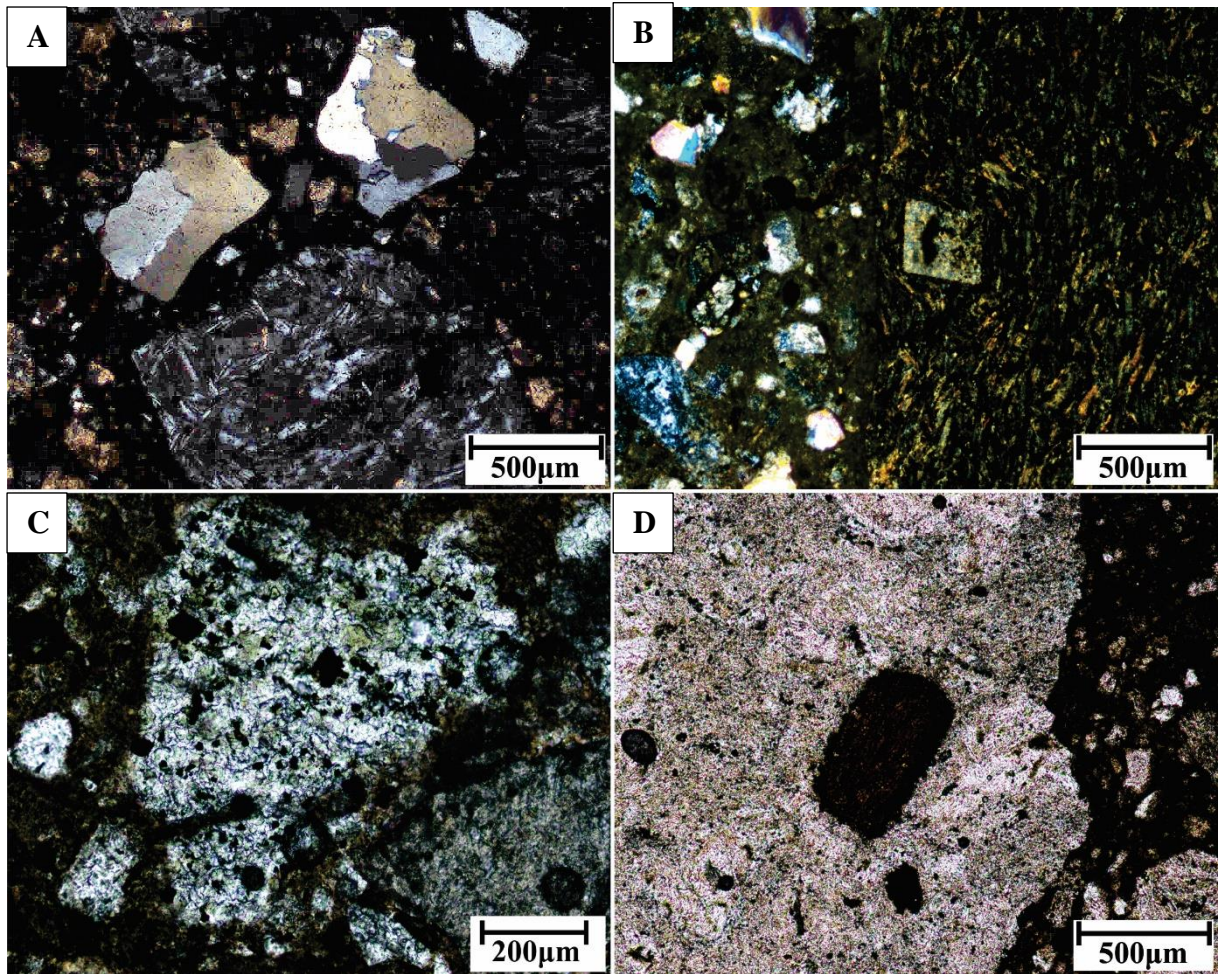
Até 75% da rocha, em estimativa modal, é constituída por material piroclástico, onde predominam clastos pouco arredondados a angulosos de traquitos e fonólitos, que variam de alguns milímetros até decímetros e mostram-se parte de sua mineralogia sericitizada ou substituída por zeólitas, cloritas e, principalmente, carbonato. Os fragmentos de fonólitos microporfíricos exibem textura traquítica a “feltro” e constituídos por ripas de feldspato alcalino, micrólitos de piroxênio e minerais opacos, envolvendo os fenocristais pseudomórficos de feldspato alcalino (anortoclásio) e nefelina, ambos completamente substituídos por minerais pós-magmáticos (FIGURAS 13B e 13C). Nesses fragmentos fonolíticos ocorrem cristais prismáticos de zircão e alanita como acessórios (FIGURA 13D), além de amigdalas preenchidas por calcita, epídoto e/ou zeólitas.

Os fragmentos de rochas encaixantes variam de milímetros a centímetros, possuem formas arredondadas a pouco angulosas e são compostos por rochas com granulação média-fina, textura granoblástica a lépido-granoblástica, cuja mineralogia comum é formada por: quartzo recristalizado, feldspato alcalino, plagioclásio com geminação albita, biotita, muscovita, mais minerais opacos, apatita e zircão como acessórios \pm granada. A biotita é amarronzada e exhibe halos pleocróicos devido a inclusão de zircão, e em alguns clastos mostra cristais sintectônicos com dobramento tipo “*kink bands*”. Por vezes essa mica forma a textura decussada.

Em adição, como é constituída por uma mistura de piroclastos e epiclastos, com o tamanho médio dos cristais superiores a 2 mm, também pode ser empregado o termo descritivo brecha tufisítica (SCHMID, 1981) para essa rocha.

Não foram observados fragmentos juvenis como escória e *spatters*. A presença de micrólitos e microfenocristais nos clastos fonolíticos (FIGURA 13B e 13D) indica que eles não são provenientes de derrame, mas provavelmente de um *neck*.

Figura 13 – Fotomicrografias da brecha vulcanoclástica com nicóis cruzados (*XPL*) e paralelos (*PPL*).



Fonte: dados da pesquisa.

Notas: A) Textura brechada contendo microfragmentos de cristais minerais, rocha traquítica vulcânica (em baixo) e rochas encaixantes (*XPL*, 4,5x); B) Clasto de rocha microporfirítica composta por matriz traquítica, com minerais máficos oxidados e microfenocrystal, pseudomorfo, de nefelina substituído por sericita (direita). À esquerda, a matriz criptocristalina da brecha envolve os clastos polimíticos, alguns deles apresentando alteração para zeólitas (*XPL*, 4,5x); C) Fragmento de rocha com clorita secundária (*PPL*, 10x); D) Alanita em clastos de rocha traquítica (*PPL*, 4,5x).

2.6 Geoquímica da Província Alcalina de Fortaleza

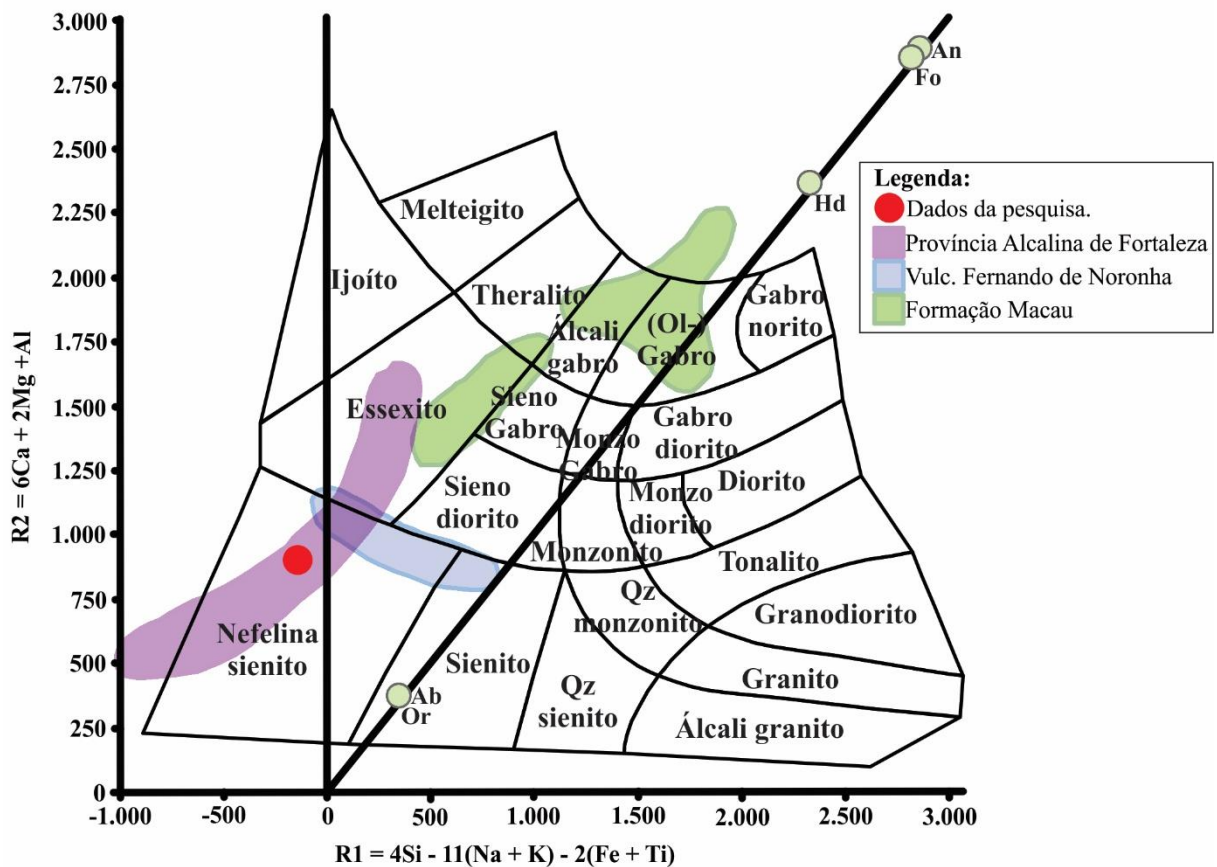
Esta seção apresenta dezesseis determinações litogeoquímicas da Província Alcalina de Fortaleza, onde foram realizadas amostragens das maiores ocorrências conhecidas e exemplares não catalogados em estudos anteriores. A classificação química considera o Diagrama Álcalis Total vs. Sílica (Diagrama de Classificação de TAS - LE MAITRE *et al.*, 1989) e o Diagrama de Variação Química R1-R2 (DE LA ROCHE, 1980), este último foi utilizado para classificação da rocha fanerítica (nefelina sienito) em razão da provável perda de álcalis devido à alteração intempérica. Os dados geoquímicos e a norma CIPW estão resumidos na tabela 1.

2.6.1 Classificação química das rochas da Província Alcalina de Fortaleza

Os dados geoquímicos para a brecha vulcanoclástica consideram essa rocha como “um todo”, pois não foi feita a separação entre a matriz e fragmentos, logo, os resultados aqui mostrados não foram usados em diagramas de classificação e apresentam apenas a caracterização química do litotipo. De acordo com a tabela 1, os valores obtidos para as duas variedades analisadas, brecha oxidada (amostra de afloramento – BRV 02.C) e brecha não oxidada (amostra de testemunho de sonda – F01CX1), são semelhantes, porém, a primeira variação aumenta fortemente o teor de Ba. A brecha apresenta uma composição intermediária (teor de SiO₂ de 57,8 – 58,9%) e, de acordo com os índices aluminosilicático (AGI < 1) e alumina saturação total (IAS_T = 1,13 e 1,10) é uma rocha peraluminosa. Essa peraluminosidade é, possivelmente, resultado da lixiviação de parte do conteúdo em álcalis durante reações intempéricas e pela presença de clastos de rochas encaixantes, portadores biotita, granada e muscovita.

No Diagrama de Variação Química R1-R2 para rochas plutônicas (DE LA ROCHE, 1980 – FIGURA 14), a rocha alcalina fanerítica da província plota no campo de nefelina sienito, concordando com a classificação modal e com dados obtidos por Macciotta *et al.* (1990) ao analisar xenólitos cognatos inclusos em fonólitos da província de Fortaleza. Conforme a relação molar de álcalis versus alumina, a rocha é de tendência metaluminosa e o índice aluminosilicático menor que 1 (AGI = 0,82), sugere a sua classificação como rocha miasquítica. O nefelina sienito apresenta maiores teores de TiO₂, Fe₂O₃, CaO e P₂O₅ que os fonólitos, principalmente pela cristalização de kaersutita, hematita, piroxênio e apatita.

Figura 14 – Diagrama R1 vs. R2 para rochas plutônicas.

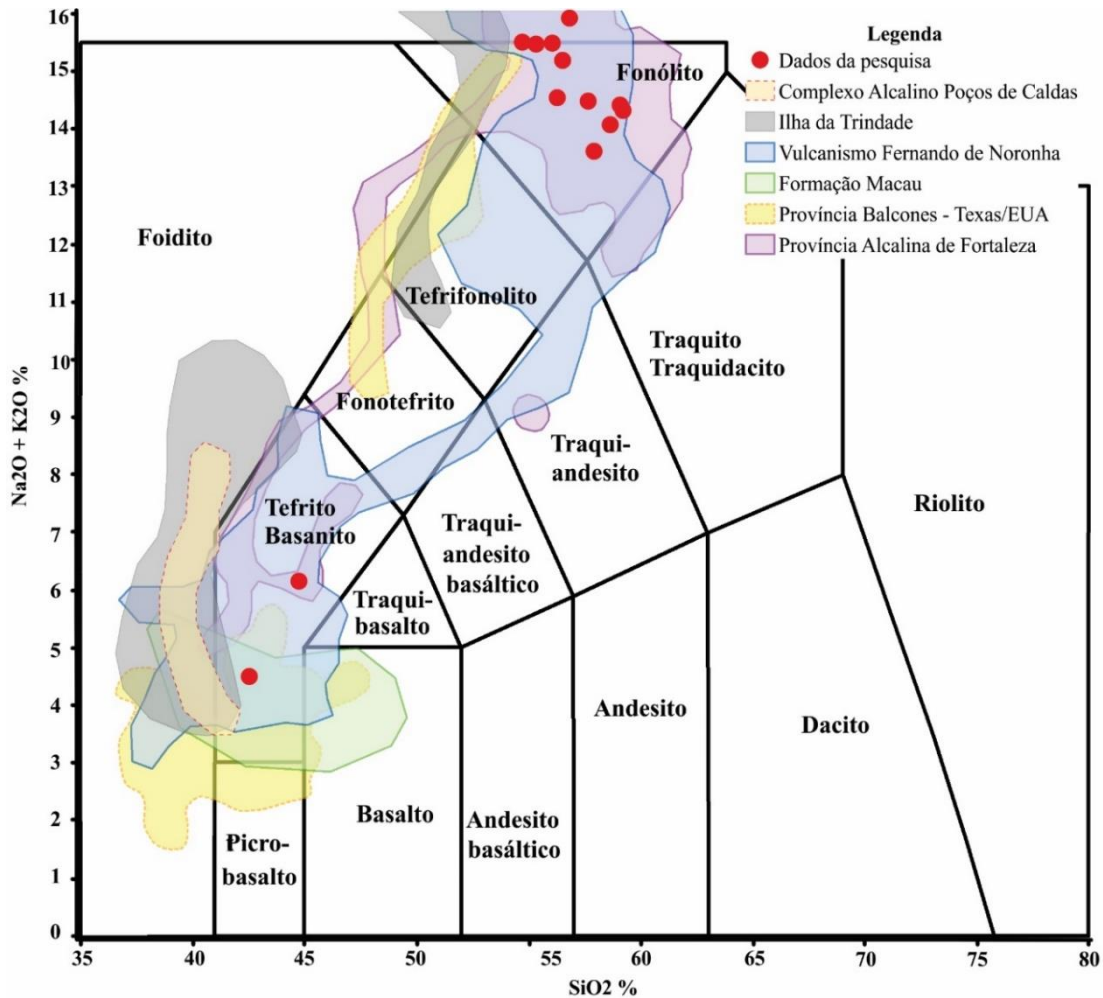


Fonte: dados da pesquisa.

Nota: Diagrama de variação química R1 x R2 de La Roche (1980), onde são plotadas as amostras da Província Alcalina de Fortaleza (MACCIOTTA *et al.*, 1990) e dos magmatismos cenozoicos de Fernando de Noronha (LOPES, 2002) e Macau (SILVEIRA, 2006).

As rochas vulcânicas melanocráticas e leucocráticas, respectivamente, plotam nos campos de tefrito/basanito e fonólito no diagrama TAS (FIGURA 15), estes resultados foram confrontados com dados já conhecidos sobre o magmatismo alcalino na região (dados de GUIMARÃES, 1982; MACCIOTTA *et al.*, 1990, RAO & SIAL, 1972, NASCIMENTO *et al.*, 1981, WERNECK, 2018), além dos vulcanismos de Fernando de Noronha (LOPES, 2002; RAO & SIAL, 1972), Macau (SILVEIRA, 2006), Complexo Alcalina de Poços de Caldas (ALVES, 2003) e da Província Alcalina de Balcones (BARKER; MITCHELL; MCKAY, 1987). No geral, as amostras analisadas apresentam-se concordantes com os resultados obtidos por outros autores para este e outros eventos magmáticos do nordeste brasileiro, menores que 50 Ma (ALMEIDA *et al.*, 1988; MIZUSAKI *et al.*, 2002; OLIVEIRA, 1998; SILVEIRA, 2006; KNESEL *et al.*, 2010) e mostram similaridade com a atividade bimodal de Balcones, onde foram reportadas idades de 98 a 66 Ma (BARKER; MITCHELL; MCKAY, 1987).

Figura 15 – Diagrama de TAS para as amostras das rochas alcalinas vulcânicas de Fortaleza, de outros eventos magmáticos alcalinos do Brasil e da Província Alcalina de Balcones (EUA).



Fonte: dados da pesquisa.

As alcalinas máficas de Fortaleza são metaluminosas e miasquíticas, com AGI (índice agpaítico) e ASI_T (índice de alumina-saturação total) menores que 1. São as rochas as menos diferenciadas da província, com índices de diferenciação inferiores a 50 e o Mg# (número de Mg) é de 58 a 60. Através da norma CIPW, essas rochas são classificadas como basanitos (olivina normativa > 10%) e possuem nefelina normativa.

Os fonólitos afíricos a subafíricos são rochas intermediárias (conteúdo de SiO_2 de 59,2 – 54,7%), que possuem de 6,62 a 4,95% de K_2O e de 10,4 a 6,99% de Na_2O , onde as razões Na_2O/K_2O variam de 1,89 a 1,06. Os maiores conteúdos Na_2O foram encontrados nas amostras dos serrotes Pão de Açúcar (PA 15), Ancuri (SAF 04.A) e do Bico Fino (MM 6), indicando o caráter fortemente sódico da província, atribuído a cristalização de feldspatos sódicos, aegirina-augita e nefelina. Esses valores são concordantes com trabalhos anteriores, onde Guimarães (1982) determinou até 11,49% de Na_2O , considerando estes teores extremamente altos para rochas continentais.

De uma forma ampla, províncias e suítes alcalinas com tendência sódica não são comuns, no entanto, teores de Na_2O elevados foram relatados nos eventos alcalinos: (1) alguns foid sienitos neoproterozoicos/fanerozoicos da Suíte Alcalina Monte Santo, TO (VIANA & BATTILANI, 2014); (2) fonólitos da Formação Remédios de Fernando de Noronha, PE (LOPES, 2002); (3) fonólitos da Ilha da Trindade, ES (ALMEIDA, 1961; WEAVER, 1990) e; (4) fonólitos da Província Balcones/TX (BARKER; MITCHELL; MCKAY, 1987). Em adição, a tendência fortemente sódica da Província Alcalina de Fortaleza é corroborada pela relação entre a proporção de álcalis ($\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$) e os valores do índice de *Rittmann* (S).

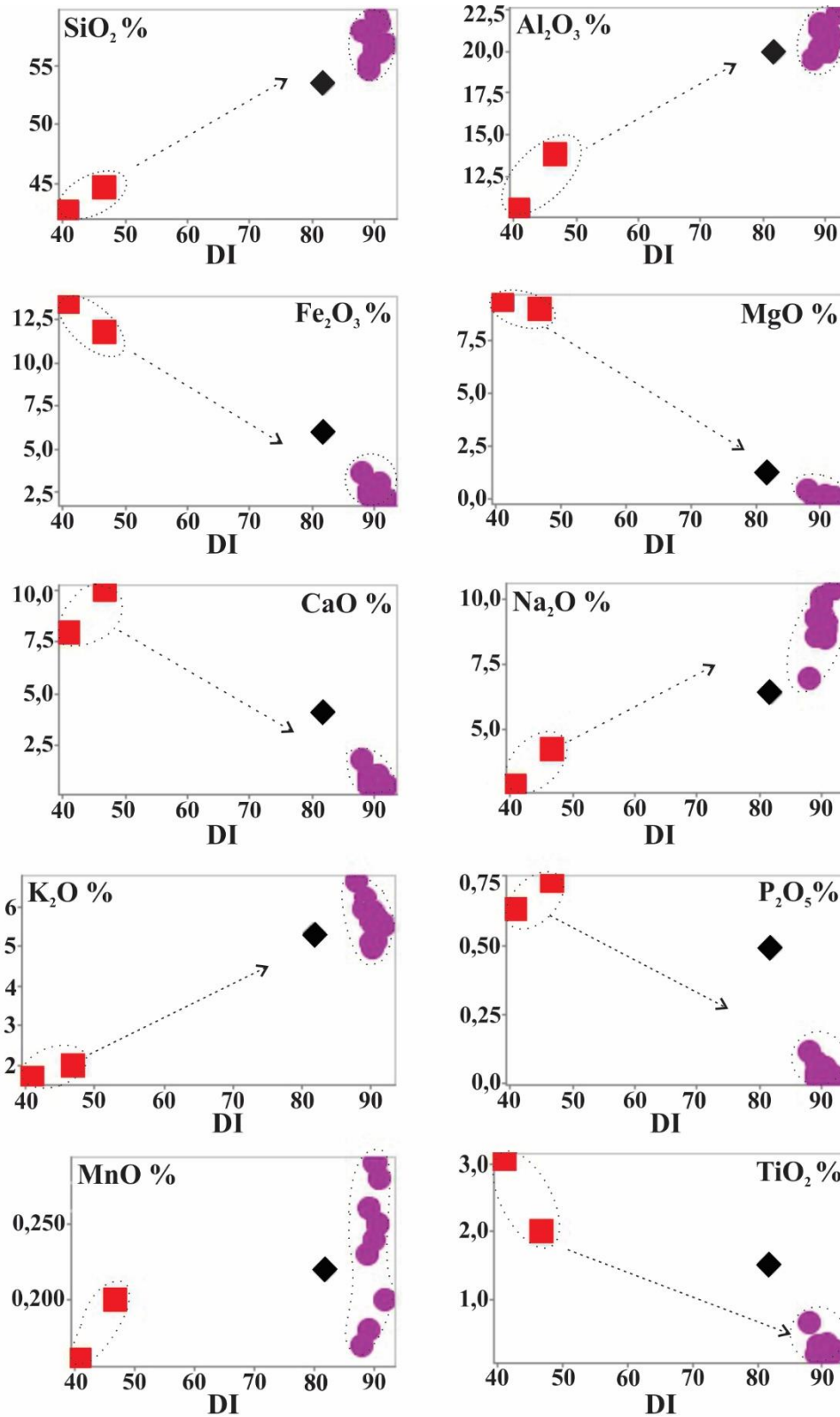
Como são mais diferenciados, os fonólitos apresentam valores mais baixos de CaO , MgO e Fe_2O_3 que os demais litotipos analisados. Em adição, as composições fonolíticas variam de peralcalinas a metaluminosas, de acordo com os valores do índice aluminático (AGI = 1,04 a 0,96). As variações peralcalinas (AGI >1) são classificadas como miasquíticas pela ausência de eudialita e arfvedsonita. O número de Mg (Mg#) varia de 2 a 19 para essas rochas, o que já era esperado, afinal esse índice tem seus maiores valores associados às rochas mais ricas em Fe e Mg, assim como menos diferenciadas.

Os diagramas de Harker (FIGURA 16) mostram as relações dos principais óxidos versus índice de diferenciação (determinado pela soma dos minerais normativos $\text{Qz} + \text{Ab} + \text{Or} + \text{Nph} + \text{Lct} + \text{Kfs}$), evidenciando o hiato de composições intermediárias entre os DI de 47 e 88 (ou entre cerca de 45 e 55% de SiO_2), separando as variações máficas e félsicas em dois grupos, semelhante ao apresentado por Macciotta *et al.* (1990). De maneira análoga, Lopes (2002) apresentou para a Formação Remédios do vulcanismo Fernando de Noronha a ausência de rochas de 46 a 52% de SiO_2 , o que o referido autor descreveu como semelhante a “*Daly gap*”.

Os diagramas de variação mostram a tendência da diminuição dos óxidos compatíveis (Fe_2O_3 , MgO e CaO), TiO_2 e P_2O_5 em relação ao aumento dos teores de SiO_2 , Al_2O_3 , Na_2O e K_2O , indicando a diferenciação magmática através do processo de cristalização fracionada. A redução dos teores de Fe_2O_3 e MgO com o aumento da concentração de SiO_2 indica a remoção da olivina (forsterita). Adicionalmente, a diminuição dos teores de Fe_2O_3 , MgO , CaO e TiO_2 indica a remoção de outros minerais máficos (*e.g.* piroxênios, anfibólios) e titanomagnetita. Já a crescente tendência de K_2O e Al_2O_3 com relação ao aumento do teor de SiO_2 indica a cristalização dos feldspatos alcalinos. O fracionamento positivo de Na_2O marca a cristalização de feldspatos sódicos e da nefelina.

No diagrama $\text{MnO}\%$ versus DI, verificou-se a dispersão dos valores de manganês para o grupo das rochas félsicas (FIGURA 16).

Figura 16 – Diagramas de variação de Harker para as amostras das rochas alcalinas de Fortaleza.



Legenda: DI: índice de diferenciação = Qz+Ab+Or+Nph+Lct+Kls

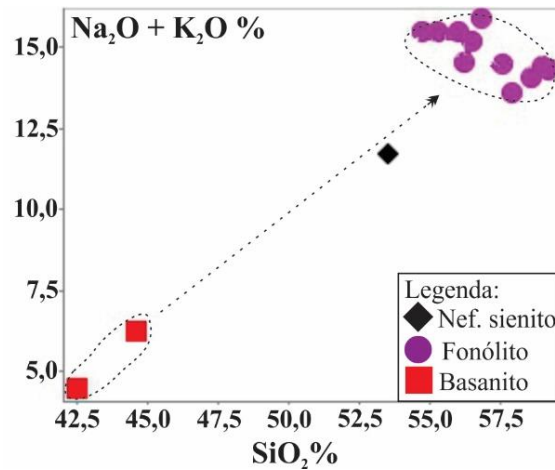
■ Basanito; ● Fonólito; ◆ Nefelina sienito;

Fonte: dados da pesquisa.

Nota: Abreviações: Qz = quartzo; Ab = albita; Or = ortoclásio; Nph = nefelina; Lct = leucita; Kls = kalsilita.

O diagrama $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ versus SiO_2 (FIGURA 17) ilustra o aumento dos teores dos álcalis à medida que os teores de sílica crescem. Nesse sentido, a partir de 54% de SiO_2 inicia o fracionamento de álcalis feldspatos (albita, feldspatos sódicos) e da nefelina.

Figura 17 – Diagrama álcalis vs. sílica, em porcentagem de peso.

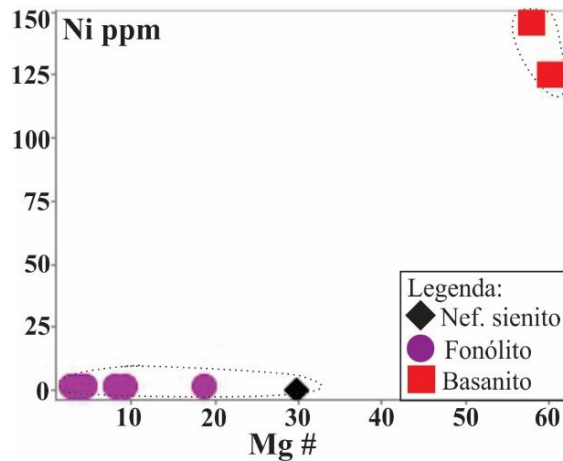


Fonte: dados da pesquisa.

2.6.2 Elementos Menores e Traço

Os basanitos apresentam conteúdos mais elevados em Cr, Cu e Ni relativo à estrutura cristalina da olivina e dos piroxênios. No diagrama Mg# (número de Mg) versus Ni (FIGURA 18), os basanitos são rochas menos diferenciadas.

Figura 18 – Diagrama com número de Mg vs. Ni.

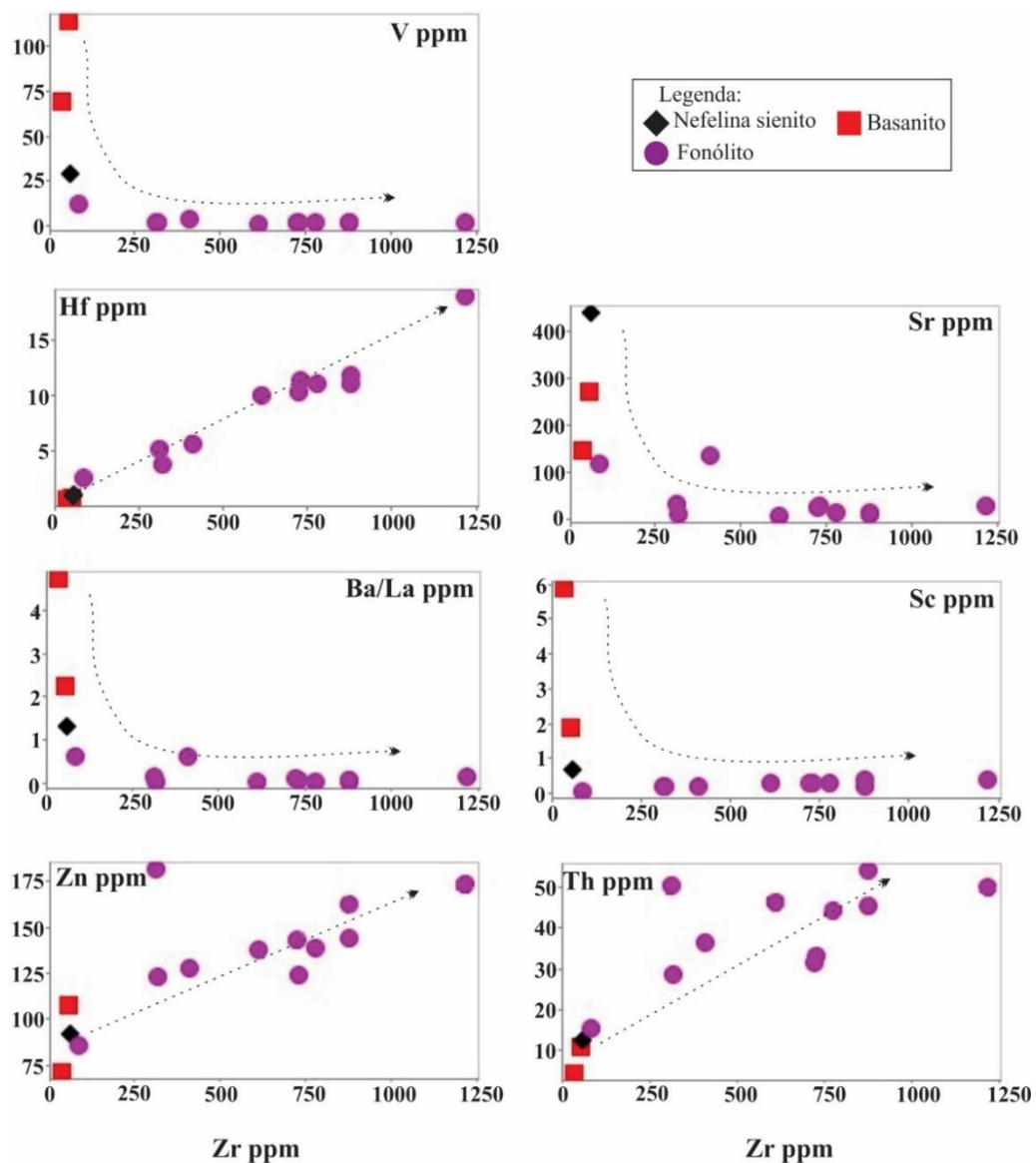


Fonte: dados da pesquisa.

Nota: $\text{Mg\#} = 100 * \text{Mg} / (\text{Mg} + \text{Fe})$, molar.

Os diagramas de variação de Zr versus alguns elementos traço (FIGURA 19) mostram a redução de V e Sc durante a evolução da diferenciação magmática, através da remoção dos óxidos. Sr e a razão Ba/La também reduzem dos basanitos para os fonólitos. O Hf, Zn e Th mostram uma tendência de correlação positiva em direção à magmas mais diferenciados.

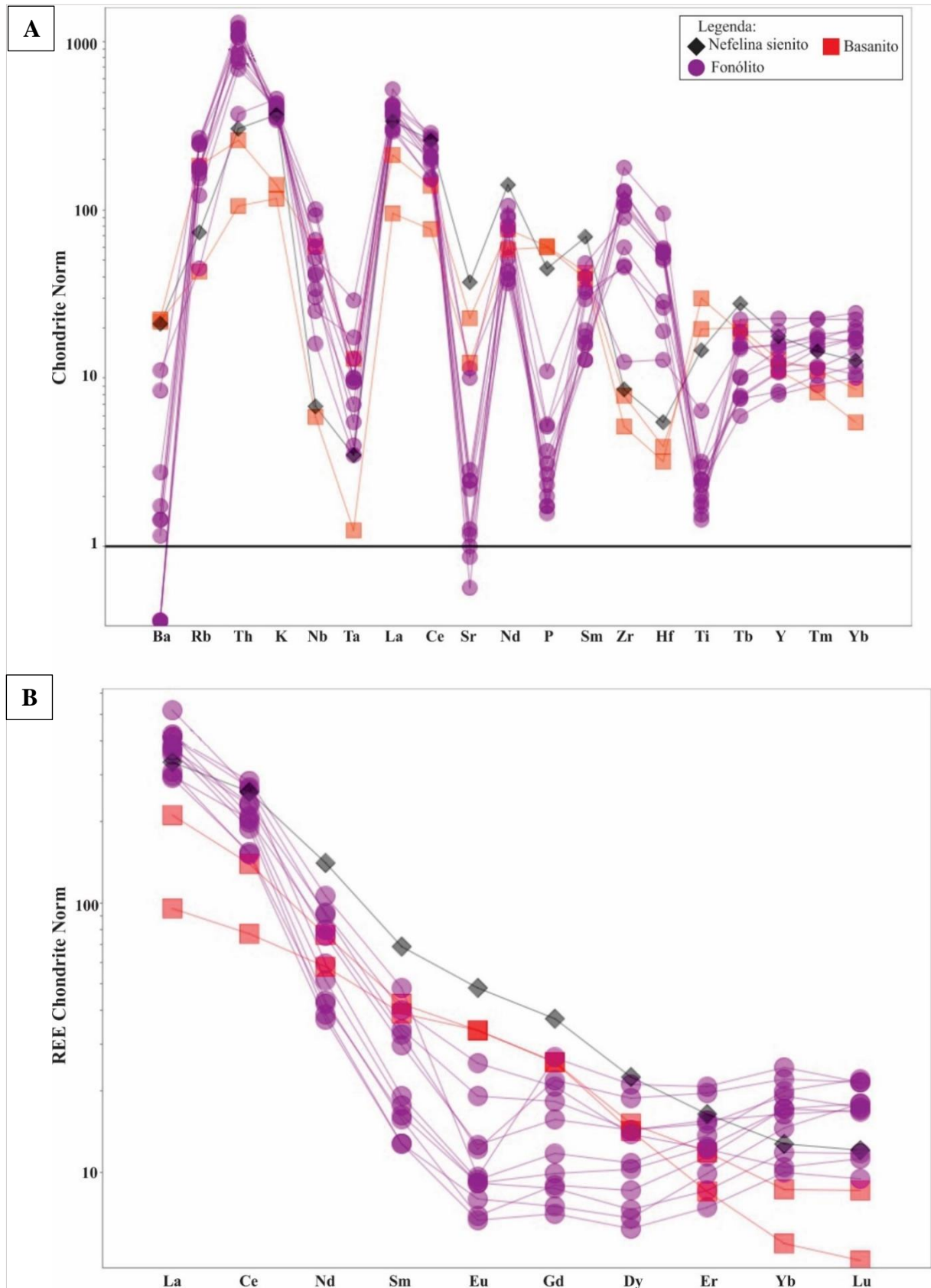
Figura 19 – Diagramas de variação para elementos menores e traço vs. Zr.



Fonte: dados da pesquisa.

O *spider* normatizado por condritos (THOMPSON, 1982) mostra a depleção de Ba, Sr, Ti e, menos intensa de Ta, principalmente, nos fonólitos, estes que, diferentemente do nefelina sienito e das vulcânicas máficas, possuem anomalias negativas de P e não são depletados em Zr e Hf (FIGURA 20A).

Figura 20 – Diagramas *spiders* normalizados por condrito para as amostras da Província Alcalina de Fortaleza.



Fonte: dados da pesquisa.

Nota: A) Diagrama normalizado com condritos (THOMPSON, 1982); B) Diagrama ETR normalizado por condrito (NAKAMURA, 1974).

A partir do Tb, os fonólitos da província exibem um padrão horizontal de distribuição dos elementos, enquanto nefelina sienito e, principalmente, os basanitos mostram depleção de Y, Tm e Yb, padrão que também é identificado no basanito de Fortaleza e no padrão OIB (*Ocean Island Basalt*). Considerando também os dados levantados por Werneck (2018), é possível concluir que a Província Alcalina de Fortaleza possui anomalias negativas de K e P, cujo padrão, de acordo com a referida autora, se assemelha aos padrões apresentados para as rochas dos vulcanismos Macau e Fernando de Noronha.

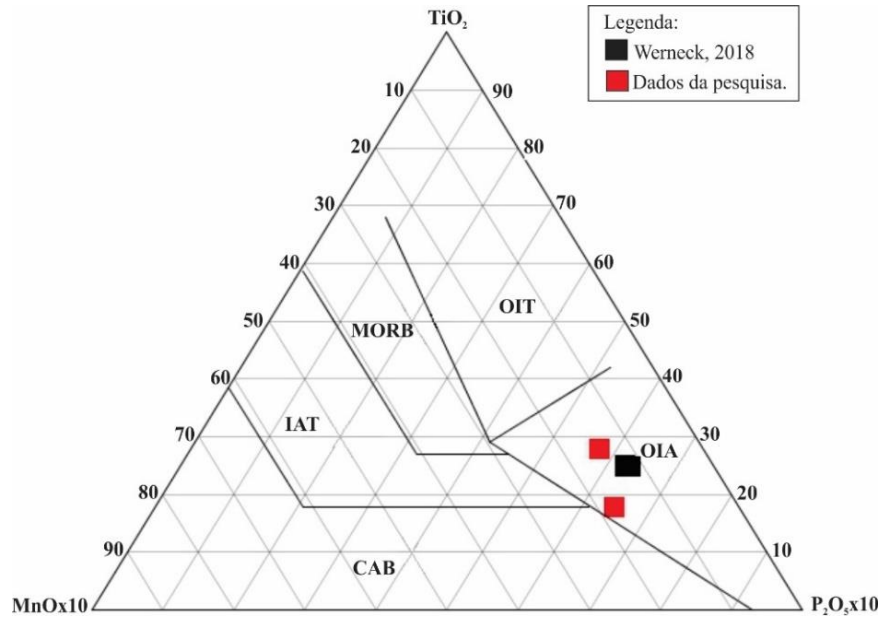
Os ETR (elementos terras raras) normatizados por condrito (NAKAMURA, 1974) mostram uma tendência de enriquecimento nos elementos terras raras leves (ETRL), enquanto os elementos terras raras pesados (ETRP) e médios mostram um padrão de distribuição horizontal (FIGURA 20B). Para o nefelina sienito e o basanito do dique de Tucunduba (RMF 08) é observado o fracionamento de Yb e Lu. O padrão de distribuição dos ETR para o basanito do serrote Curumininho (SAF 03) é concordante com o padrão do basanito subafiorante de Fortaleza e com o padrão OIB (*Ocean Island Basalt*), assim como foi relatado por Werneck (2018). Através do diagrama ETR e das baixas razões Eu/Eu* verificou-se que a província é caracterizada pela anomalia negativa em Eu, que juntamente com a acentuada depleção de Ba e Sr nas rochas mais evoluídas, corresponde ao fracionamento dos feldspatos alcalinos. A anomalia negativa em Eu também foi identificada nos fonólitos analisados por Macciotta *et al.* (1990) e Werneck (2018).

O nefelina sienito e os basanitos mostram uma sutil depleção de Er que pode estar relacionada ao fracionamento de minerais máficos (olivina, piroxênios e anfibólios) durante a evolução destes magmas. A depleção de ETRP e Eu pode indicar uma fonte mantélica com granada na composição mineralógica, que deve ter ficado no resíduo após a fusão parcial.

2.6.3 Diagrama Geotectônico

De acordo com o diagrama de ternário de TiO_2 , $MnO \times 10$ e $P_2O_5 \times 10$ (MULLEN, 1983 – FIGURA 21), os basanitos plotam no campo das rochas de ilhas oceânicas alcalinas (OIA), concordando com os resultados de Werneck (2018).

Figura 21 – Discriminação ambiente tectônico para os basaltos.



Fonte: dados da pesquisa.

Nota: Diagrama dos Andesitos Bálticos e Basaltos de Regiões Oceânicas (MULLEN, 1983). Abreviações dos tipos de basaltos e ambientes petrotectônicos: MORB = Mid-oceanic Ridge Basalts; IAT = Island-arc Tholeiites; CAB = Island-arc Calc-alkaline Basalt; OIT = Ocean-island Tholeiite; OIA = Ocean-island Alkali Basalt.

2.7 Discussão dos dados petrográficos e geoquímicos da Província Alcalina de Fortaleza

A cartografia e prospecção de rochas alcalinas é favorecida por técnicas de sensoriamento remoto e, principalmente, pelos dados aerogeofísicos de gamaespectrometria, estes últimos permitem indicar a relação dos *necks* e diques com fraturas locais e, em um contexto mais amplo, com a zona de fratura oceânica de Fernando de Noronha. A eficiência desse método depende diretamente da resolução espacial, já que a maior parte das ocorrências tem dimensões pequenas.

Desde a década de 80 (*e.g.* SIAL, 1970; 1987; GUIMARÃES, 1982; MACCIOTTA *et al.*, 1990) são reconhecidas ocorrências de rochas alcalinas máficas (*e.g.* ankaramitos, essexitos, limburgitos, furchitos) na Região Metropolitana de Fortaleza, entretanto, a cartografia desses litotipos não era bem reconhecida, o releva a importância da recente pesquisa de Werneck (2018) e do presente trabalho, pois ambos trazem a caracterização e localização de basanitos da Província Alcalina de Fortaleza. A cartografia das rochas basaníticas corrobora com o caráter bimodal da Província em razão da inexistência de termos intermediários entre os fonólitos e os basanitos. De forma semelhante, a cartografia do nefelina sienito da região de Tucunduba mostra um avanço na caracterização do referido evento magmático, visto que em trabalhos anteriores esse litotipo foi identificado apenas como xenólitos em rochas fonolíticas.

Magmas alcalinos são, no geral, ricos em voláteis e por consequência possuem minerais hidratados como anfibólios na mineralogia, favorecendo a ocorrência de erupções explosivas (GILL, 2014). Os fonólitos de Fortaleza, além de possuírem kaersutita na mineralogia essencial, são caracterizados pela presença de vesículas e, principalmente amígdalas, que indicam presença de voláteis no magma, sugerindo uma erupção explosiva. Adicionalmente, erupções explosivas são também caracterizadas pela ejeção de material piroclástico, que na Província Alcalina de Fortaleza foi identificado como brechas vulcanoclásticas na região de Tucunduba (Caucaia/CE) e de Fortaleza (brecha subaflorante descrita por Werneck, 2018).

Considerando os aspectos petrográficos, algumas variedades de fonólitos da Província podem ser identificados como kaersutita fonólitos, de acordo com as recomendações da IUGS (*International Union of Geological Sciences*), conforme LE MAITRE *et al.* (2002). A ampla gama de microfenocristais nessas rochas fonolíticas (álcalis feldspato, nefelina, kaersutita e aegirina-augita), característica observada em quase todos os exemplares analisados, sugere magmas evoluídos, onde a cristalização fracionada foi intensa.

A presença de microfenocristais zonados de kaersutita nas rochas fonolíticas pode ser um indício de um longo estágio de cristalização em profundidade (estágio plutônico), permitindo a evolução do líquido antes de sua ascensão. Em adição, os cristais de kaersutita com bordos corroídos sugerem a reação desse anfibólio com o líquido magmático durante a evolução desses magmas. Essa reação levou a parcial dissolução da kaersutita, que ao desestabilizar promoveu a formação de minerais opacos de ferro e titânio, observados na petrografia, além de titanita, biotita e exsoluções de rutilo. Experimentalmente, Merrill & Wyllie (1975) verificaram que a kaersutita, na presença de H₂O e pressões acima de 20Kbar, quebra formando anfibólios, clinopiroxênios e granadas, podendo gerar ainda rutilo, titanita, flogopita e líquido. A proposição dos referidos autores permite sugerir aos magmas alcalinos de Fortaleza uma fonte profunda e condições de altas pressões, bem como reforça a importância dos voláteis.

A textura traquítica envolvendo os microfenocristais (*e. g.* FIGURA 9C), inclusões e amígdalas, de acordo com GILL (2014), indica que os cristais da matriz formaram um fluxo laminar tardio no magma pseudoviscoso com alta concentração de cristais.

As rochas máficas da Província podem ser classificados como basanitos microporfíricos com microfenocristais de olivina e augita, cuja textura seriada evidencia a lenta ascensão dos magmas máficos. No entanto, assim como em alguns fonólitos, os microfenocristais exibem textura de reabsorção e embainhamento da matriz. A olivina esquelética dos basanitos possivelmente é produto do aumento na velocidade de cristalização, onde o crescimento cristalino supera a difusão química (GILL, 2014).

As variações fonolíticas peralcalinas da Província (*e.g.* fonólitos dos serrotes Caruru, Ancuri, Pão-de-Açúcar) apresentam as maiores concentrações de Zr e são caracterizadas pela presença de piroxênio sódico (aegirina-augita) e, embora mais raramente, anfibólio de composição sódica (*e.g.* fonólito do serrote Pão-de-Açúcar com riebeckita na mineralogia). Enquanto o caráter metaluminoso do nefelina sienito da região de Tucunduba é corroborado pela presença de biotita, hornblenda, titanoaugita e zircão.

Os dados petrográficos e geoquímicos sugerem a evolução da Província a partir do processo de cristalização fracionada, evidenciando a proveniência das rochas félsicas a partir da diferenciação dos magmas máficos. As curvas de tendência apresentadas nos diagramas de variação de óxidos versus SiO₂ (FIGURA 16) sugerem o fracionamento dos minerais máficos (*e.g.* olivinas, clinopiroxênios, anfibólios) e alguns minerais acessórios (*e.g.* magnetita, pirita, ilmenita e apatita) nos magmas parentais durante estágios iniciais. Essa relação é indicada pela diminuição dos teores de óxidos compatíveis (Fe₂O₃, MgO e CaO) do TiO₂ e P₂O₅ com relação ao aumento dos teores de SiO₂, processo que resulta em um magma rico em álcalis.

A curva de tendência mostrando o aumento de Al_2O_3 , K_2O e Na_2O com relação ao aumento do teor em SiO_2 sugere o fracionamento dos feldspatos alcalinos (albita, feldspatos sódicos) e nefelina, concordante com a ordem de cristalização de rochas miasquíticas. Essa relação também foi relatada para as rochas do arquipélago Fernando de Noronha. Em adição, as rochas peralcalinas possuem um grande intervalo de cristalização, o que favorece reações tardi-magmáticas (SORENSEN, 1974).

Guimarães (1982) relacionou a tendência de diminuição de CaO , MgO e FeO total com relação a sílica como resultado do fracionamento da augita, kaersutita e flogopita, principais minerais formadores de furchitos. Em adição, a referida autora identificou inclusões de furchíticas em fonólitos da Província, que foram interpretadas como o estágio magmático inicial, ou seja, o magma progenitor seria de composição semelhante a um furchito. Guimarães (1989) fundamentou sua hipótese a partir da proposição de Bowen (1928), que sugere a formação de rochas alcalinas a partir do fracionamento de anfibólios (hornblenda) durante a cristalização fracionada, que reagem com o magma de composição insaturada em anfibólio. Essa reação produz piroxênio e olivina, ambos guardam parte do CaO , MgO e FeO total dos anfibólios, resultando em um magma rico em álcalis. Conforme Guimarães (1982), a formação dos furchitos relaciona-se a reação com quebra e dissolução parcial da kaersutita em profundidade. Os dados petrográficos da presente pesquisa, portanto, corroboram a proposição de Guimarães (1982) quanto a reação da kaersutita com o líquido, assim como foi discutido anteriormente. Por outro lado, segundo Macciotta *et al.* (1990), a presença de inclusões de cumulos de olivina clinopiroxenito nos fonólitos do serrote Caruru evidencia a natureza basanítica do magma parental.

De acordo com o *spidergrama* ETR normatizado por condrito (NAKAMURA, 1974 – FIGURA 20B) é possível que a depleção em ETRP e Y seja indicativo de um resíduo com granada e/ou anfibólio, nesse caso, corroborando com a proposta de Guimarães (1982) para gênese dos fonólitos a partir de uma fonte rica em anfibólio. É importante salientar que basanitos produto da fusão parcial de regiões mais profundas do manto são pobres em ETRP e Y (GILL, 2014).

Diante disso, deve-se ressaltar a importância da realização de análises de química mineral em microfenocristais de kaersutita e suas inclusões, além de inclusões fluidas em fenocristais de augita, a fim de se obter mais informações acerca de características do magma progenitor e, possivelmente, dados sobre o manto, contribuindo para a compreensão acerca da evolução magmática que gerou as rochas alcalinas subsaturadas em sílica da Província Alcalina de Fortaleza.

A exceção da anomalia negativa de Eu, as rochas alcalinas de Fortaleza mostram uma assinatura geoquímica similar ao padrão OIB (*Ocean Island Basalt*) e do magmatismo de Fernando de Noronha, assim como foi apresentado por Werneck (2018). A referida autora fez uma detalhada comparação geoquímica entre esses eventos, indicando a similaridade dos padrões ETR dos basanitos de Fortaleza e de Fernando de Noronha com os padrões OIB (SUN & McDONOUGH, 1989) e da Crosta Continental Superior (TAYLOR & McLENNAN, 1995).

O amplo enriquecimento em elementos incompatíveis fomenta a discussão acerca da gênese dessas atividades ígneas. Nesse contexto, destacam-se três vertentes: (1) a mistura de um manto litosférico com um astenosférico poderia gerar magmas com essas características (e.g. NGONGE *et al.*, 2016a; RIVALENTI *et al.*, 2007); (2) o enriquecimento de elementos incompatíveis pode ser produto de contaminação crustal (FODOR; MUKASA; SIAL, 1998; MACCIOTTA *et al.*, 1990); (3) o magmatismo seria formado a partir de um manto fortemente enriquecido, portanto uma fonte mais enriquecida que a fonte dos OIB (*Ocean Island Basalt*) (e.g. WERNECK, 2018). Diante dos resultados apresentados por esta pesquisa e por trabalhos precedentes, a última hipótese parece mais coerente. Além disso, as baixas razões iniciais Sr^{87}/Sr^{86} constituem um forte indício de que o vulcanismo alcalino de Fortaleza seria resultado de uma fonte mantélica (GUIMARÃES, 1982).

Em trabalhos futuros é importante determinar e comparar as razões iniciais Sr^{87}/Sr^{86} de basanitos e fonólitos, o que permitirá esclarecer a origem do enriquecimento em elementos incompatíveis, se houve ou não contaminação crustal. Isso porque são esperadas baixas razões iniciais Sr^{87}/Sr^{86} para os basanitos, semelhante aos valores determinados para rochas mantélicas.

Adicionalmente, o magmatismo alcalino bimodal e a presença de rochas piroclásticas da Província Alcalina de Fortaleza, além do alto fluxo térmico relatado por Almeida (2006), indicam um ambiente extensional de rifte continental para esse evento. Nesse sentido, Macciotta *et al.* (1990) sugeriu que as idades K-Ar e Rb-Sr determinadas em torno de 30Ma para fonólitos da Província parecem corresponder a quarta fase vulcano-tectônica do continente Gondwana, que poderia ter levado a atividade fonolítica na África do Sul (MARSH, 1975) e em Fortaleza.

3 AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE ROCHAS ALCALINAS DA PROVÍNCIA DE FORTALEZA-CE COMO REMINERALIZADORES DE SOLO

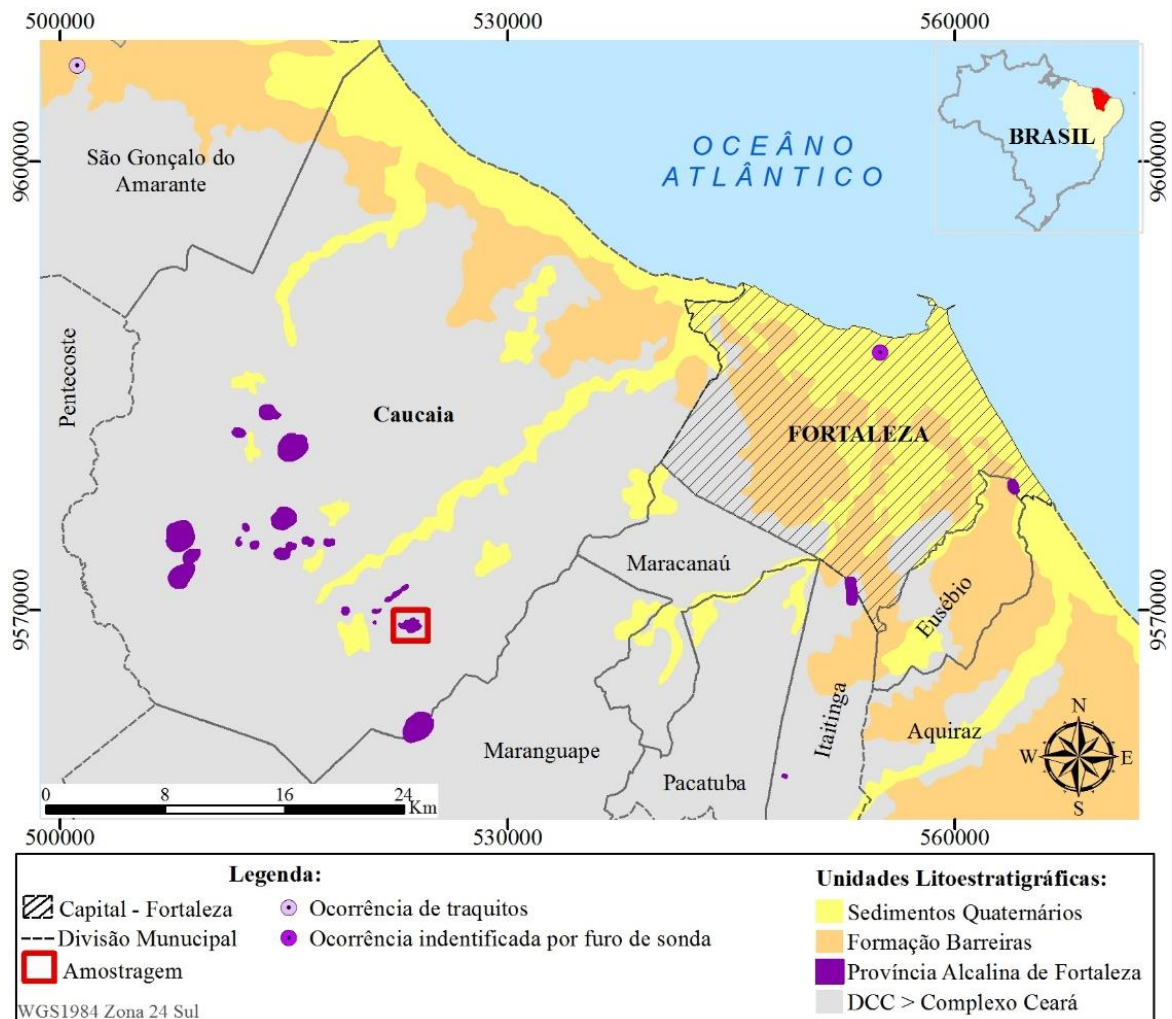
3.1 Introdução a avaliação do potencial de rochas da Província Alcalina de Fortaleza para a técnica de rochagem

A influência do agronegócio na economia brasileira fomenta a dependência nacional por fertilizantes importados. Conforme indicadores da Associação Nacional para Difusão de Adubos (ANDA, 2019), a produção de fertilizantes no Brasil no ano de 2018 foi equivalente a 23,01% do consumo interno, sendo o restante importado de países como Rússia, Estados Unidos, Canadá e Israel. Diante da busca por alternativas sustentáveis e econômicas que reduzam os custos e impactos ambientais adversos ao uso excessivo de insumos agrícolas, a remineralização (rochagem ou petrofertilização) tem sido alvo de várias pesquisas (*e.g.* THEODORO, 2000; ANDRADE *et al.*, 2002; ALMEIDA *et al.*, 2006; THEODORO & LEONARDOS, 2006; BENEDUZZI, 2011; NUNES, 2012; COLA & SIMÃO, 2012; RAMOS *et al.*, 2014; 2015; 2017; REIS, 2015; BORGES & SOUZA, 2015; MEDEIROS, 2017).

A rochagem consiste na utilização de fontes naturais de minerais moídas como alternativa aos fertilizantes químicos industrializados como os superfosfatos simples ou triplo. Theodoro (2000) constatou que a petrofertilização disponibiliza continuamente nutrientes, melhorando a qualidade e o nível de fertilidade dos solos, reduzindo os custos de produção, já que os efeitos dessa técnica se estendem por cerca de quatro anos, diferentemente da adubação convencional que exige recargas anuais.

Rochas vulcânicas silicáticas são frequentemente utilizadas em solos de clima tropical (LEONARDOS *et al.*, 1987; 2000; HARLEY & GILTKES, 2000; THEODORO & LEONARDOS, 2006), pois além do potencial fertilizante, corrigem a acidez do solo (VON FRAGSTEIN *et al.*, 1988; HILDEBRAND, 1991; FAKENGREN-GERUP & TYLER, 1992). Esta pesquisa avalia o potencial três litotipos (fonólito, nefelina sienito e brecha vulcanoclástica) da Província Alcalina de Fortaleza (GUIMARÃES, 1982) como remineralizadores. A Província está intrusa nos terrenos Neoproterozoicos do Complexo Ceará (CAVALCANTE *et al.*, 2003), cujas ocorrências afloram em uma área de aproximadamente 2.000 km² da região metropolitana homônima, entre Eusébio e São Gonçalo do Amarante, nordeste do Brasil (FIGURA 22).

Figura 22 – Região de ocorrência da Província Alcalina de Fortaleza e local da coleta das amostras.



Fonte: Modificado de Cavalcante *et al.*, 2003.

Constituída por fonólitos, traquitos, nefelina sienitos, basanitos e piroclastos paleo-neógenos, a Província corresponde a extensão continental do vulcanismo submarino do arquipélago Fernando de Noronha, Atol das Rocas e *Guyots* do Ceará (ALMEIDA, 2006).

A geoquímica das rochas desse magmatismo alcalino sugere o potencial uso industrial (*e.g.* produção de cimento *Portland Pozolânico*) e agrícola. Nesse contexto, com base na petrografia, geoquímica e testes agrônômicos de lixiviação e de incubação foram avaliados litotipos da Província Alcalina de Fortaleza para utilização como remineralizadores de solos.

3.2 Amostragem e métodos analíticos

3.2.1 Amostras de rochas alcalinas e material de referência

Três litotipos da Província Alcalina de Fortaleza foram amostrados para o estudo (TABELA 2): (1) Fonólito; (2) Nefelina sienito; (3) Brecha vulcanoclástica. São rochas compostas essencialmente por feldspatos alcalinos, feldspatoides, clinopiroxênios e clinioanfíbolios, com óxidos e fosfatos como minerais acessórios.

Tabela 2 – Coordenadas UTM das ocorrências alcalinas testadas como remineralizadores de solos.

Amostra	Coord. UTM – WGS84 Zona 24S	Rocha	Descrição
MP2	523913/9569170	Fonólito (Phon)	Rocha vulcânica de coloração cinza, textura microporfírica, constituída por fenocristais de 4,0 – 5,0 mm de feldspato alcalino, nefelina, aegirina-augita ± kaersutita, mergulhados na matriz afanítica, constituída essencialmente por feldspatos alcalinos, aegirina-augita e nefelina. Possui amígdalas preenchidas por calcita e fenocristais de feldspatos alcalinos substituídos por argilominerais.
BRV 04	523290/9569279	Nefelina sienito (Nef sien)	Rocha fanerítica, leucocrática, com granulação média a grossa, estrutura maciça e coloração acinzentada. Constituída essencialmente por cristais equigranulares e euédricos de feldspato alcalino, nefelina, plagioclásio e anfíbólio. Possuem carbonato e argilominerais produzidos por reações intempéricas.
F01CX1	523642/9569145	Brecha vulcanoclástica (Bcc)	<i>Pipe</i> preenchido por rocha heteromítica brechada, constituída por uma matriz cinza afanítica envolvendo clastos líticos e fragmentos minerais angulosos a pouco arredondados. Os clastos variam de mm até aprox. 40 cm (megaclastos) e geralmente estão argilizados. Exibe uma capa de alteração intempérica com uma tonalidade ocre. Possui vênulas de carbonato e oxidação em torno das fraturas. Vesículas e amígdalas preenchidas por calcita são comuns.

Fonte: dados da pesquisa.

Nota: Abreviações: Phon = Fonólito; Nef sien = Nefelina sienito; Bcc = Brecha vulcanoclástica.

3.2.2 Análises petrográficas e mineralógicas dos litotipos de interesse

A microscopia de luz transmitida e refletida de 19 lâminas delgadas foi realizada utilizando microscópio petrográfico binocular (Nikon Eclipse CiPOL com cinco objetivas de 5x à 100x e câmera Nikon DS-Ri1 acoplada). A microscopia eletrônica de varredura foi executada com o equipamento *Quanta 450 FEG - FEI* acoplado ao sistema EDS (*Energy Dispersive System*), operados nas condições: (1) HV: 20.000 kV; (2) detector: vCD – detector de elétrons retro-espalhados para alto e baixo vácuo. Todas as análises petrográficas e mineralógicas foram realizadas na Universidade Federal do Ceará.

3.2.3 Geoquímica dos litotipos de interesse

A preparação das amostras e as determinações da composição dos elementos maiores, menores e traço em rocha total foram realizadas pela SGS Geosol Laboratórios LTDA. Seguiram os seguintes procedimentos: (1) calcinação para determinação da perda ao fogo (*Loss on Ignition* - LOI); (2) fusão por tetraborato de lítio e determinação por XRF (fluorescência de raios X) para a determinação dos elementos maiores (SiO_2 ; Na_2O ; K_2O , MgO , MnO , Al_2O_3 , etc.); (3) digestão por água régia e leitura por ICP - MS (Espectrometria de Massa por Plasma Acoplado Indutivamente) e ICP - OES (Espectrometria de Emissão Ótica por Plasma Acoplado Indutivamente) para quantificação de As, Cd, Al, Fe, Cu, Pb, U, Th, etc.; (4) determinação de Hg através da técnica de vapor frio e medição por AAS (Espectrometria de Absorção Atômica).

3.2.4 Testes agronômicos

Para a avaliação do potencial de utilização dos litotipos para a melhoria da fertilidade do solo foram feitos em laboratório teste de lixiviação e de incubação. Nesses experimentos, as amostras das rochas foram britadas em britador de mandíbula, pulverizadas em moinho de panela AMEF, quarteadas e passadas em peneira ASTM #200 *mesh*, essa fração granulométrica foi escolhida para agilizar as reações e assim avaliar melhor o potencial do material em solubilizar os nutrientes. Utilizou-se também um remineralizador de referência, produto comercial composto pela mistura de pó das rochas biotita xisto e serpentinito, indicado pelo seu potencial para correção do pH e lenta disponibilização de nutrientes ao solo. No experimento de incubação foi incluído um carbonato de cálcio como tratamento adicional para comparação com os litotipos para a correção da acidez do solo.

3.2.4.1 Teste de lixiviação

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado com quatro tratamentos (fonólito, nefelina sienito, brecha vulcanoclástica e o produto comercial) e cinco repetições. Este teste simula a produção de ácidos orgânicos naturalmente formados na rizosfera, capazes de facilitar o intemperismo dos minerais e a liberação dos nutrientes através da formação de complexos metal-orgânicos (RAMOS *et al.*, 2015). O experimento demonstra os fenômenos de arraste, diluição e dessorção via passagem de água através do material testado (RAMOS *et al.*, 2017).

Adotou-se a metodologia do Manual de Métodos Analíticos Oficiais para Fertilizantes e Corretivos (MAPA, 2014), que consiste na utilização de ácido cítrico 2%.

A preparação dos extratos foi feita a partir da homogeneização de 1g de pó de rocha e 100 mL de ácido cítrico 2% em um agitador rotativo tipo *Wagner* analógico, durante 30 minutos à 35 rpm.

No extrato obtido foram quantificados em ICP-OES (*Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry*) os seguintes elementos: Al, As, B, Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, K, Mg, Mn, Na, Ni, P, Pb, S, Se, Si e Zn.

3.2.4.2 Teste de incubação

Consiste na avaliação dos atributos químicos do solo com a aplicação de doses dos litotipos, com ênfase na fertilidade e no risco de contaminação do solo por metais pesados. Com base no teste de lixiviação foram selecionadas as duas rochas (nefelina sienito e brecha vulcanoclástica) mais promissoras para aplicação no solo. O período de incubação durou três meses, de 24 de julho à 24 de outubro de 2018. O experimento foi conduzido por delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial $2 \times 6 + 2$, sendo duas rochas (nefelina sienito e brecha vulcanoclástica), seis doses (testemunha ou dose 0 t ha^{-1} e equivalentes a 2; 4; 6; 8 e 10 t ha^{-1}), dois tratamentos adicionais (produto comercial e calcário) e quatro repetições, totalizando 56 unidades experimentais.

O produto comercial foi utilizado na dose recomendada de 2 t ha^{-1} (PINHEIRO & BARRETO, 1996) e o calcário (carbonato de cálcio P.A.) na dose equivalente para elevar a saturação por bases do solo a 60% ($2,11 \text{ t ha}^{-1}$).

O solo utilizado foi um Argissolo Vermelho-Amarelo, coletado no município de Maracanaú/CE e que apresenta as seguintes características: pH em água = 4,6; matéria orgânica (M.O.): 9 g kg^{-1} ; P-disponível: 6 mg dm^{-3} ; K^+ : $1,1 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$; Ca^{2+} : $1,3 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$; Mg^{2+} : $2,5 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$; Na^+ : $0,3 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$; H+Al: $38,8 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$; Al^{3+} : $10 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$; soma de bases (SB): $5,1 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$; capacidade de troca de cátions (CTC): $44 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e saturação por bases (SB): 12%. As análises de rotina de solo foram feitas seguindo procedimentos descritos em Silva *et al.* (1998).

A incubação foi feita em recipientes de plástico com capacidade para $0,3 \text{ dm}^3$, que receberam a mistura homogeneizada de solo e as doses equivalentes dos tratamentos. Em seguida, adicionou-se água deionizada em quantidade para elevar a umidade do solo a 70% do CRA (capacidade de retenção de água).

Durante o período de incubação, a reposição de água perdida foi feita por meio de pesagem dos recipientes de plástico. Noventa dias após o início do período de incubação, as amostras foram levadas à estufa de circulação forçada de ar à 45°C para secagem, posteriormente foram destorroadas e peneiradas em peneira de malha 2 mm (peneira ASTM #10 *mesh*). Em seguida, as amostras de solos foram submetidas à análise de rotina, conforme procedimento descritos em Silva *et al.* (1998).

A extração de micronutrientes e de metais pesados disponíveis nas amostras de solos foi feita com a solução de DTPA (RAIJ *v et al.*, 2001) e a quantificação por ICP-OES.

Os resultados dos experimentos de lixiviação e de incubação foram submetidos à análise de variância (*ANOVA*) e as médias foram comparadas por meio de teste de *Tukey* (a 5% de probabilidade). No experimento de incubação as doses foram ajustadas aos modelos de regressão linear e quadrático, à 1 e 5% de probabilidade. O processamento estatístico foi desenvolvido com o *software AgroEstat* (BARBOSA & MALDONADO JÚNIOR, 2015).

O teste de *Tukey* compara os contrastes entre as médias dos tratamentos, a partir da mínima diferença significativa (M.D.S), verificando se elas diferem ou não entre si. O teste F compara as variâncias, verificando se o aumento dos nutrientes no solo realmente variou conforme o pó de rocha e a dose aplicada, considerando a média dos teores determinados pela leitura do ICP-OES e a variação dos resultados para cada elemento analisado.

3.3 Resultados

3.3.1 Petrografia e análises mineralógicas dos litotipos de interesse

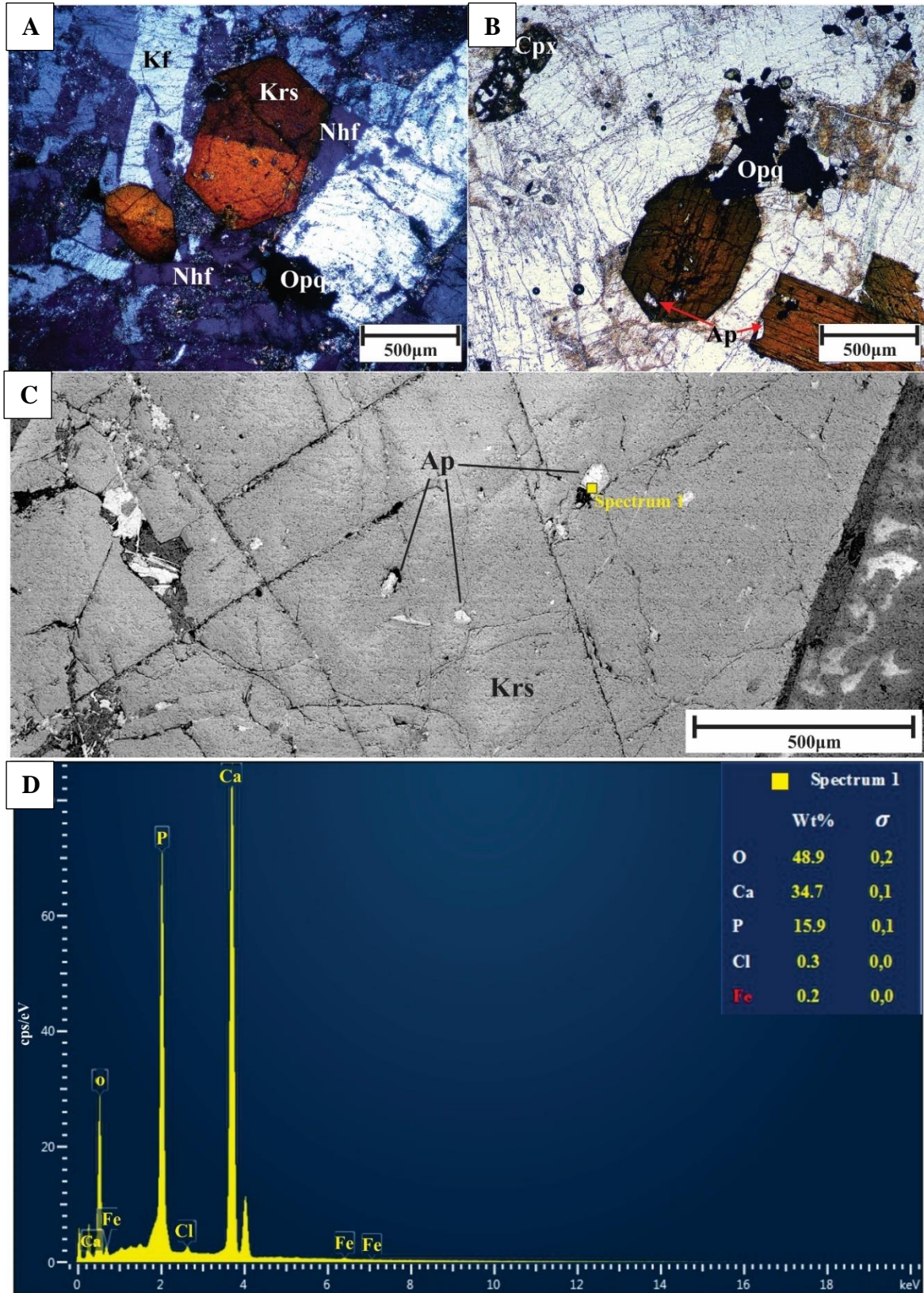
3.3.1.1 Nefelina sienito

Rocha holocristalina, com textura granular hipidiomórfica a panidiomórfica, constituída essencialmente por cristais que variam de aproximadamente 0,13 a 5,00 mm, com as seguintes estimativas modais de: feldspato alcalino (anortoclásio, 47 – 58%), nefelina (10 – 15%), plagioclásio (6 – 10%), kaersutita (8 – 13%), hornblenda ($\leq 4\%$), augita \pm titanaugita ($\leq 2\%$), biotita ($\leq 1\%$). Os acessórios são constituídos por cristais de granulação fina, anedrais a euedrais, de: minerais opacos (como ilmenita, magnetita \pm pirita \pm titanomagnetita, 3 – 10%), apatita (2 – 7%), zircão ($\leq 1\%$), titanita ($\leq 1\%$) e rutilo ($\leq 1\%$). Sericita, carbonato, epidoto e argilominerais são minerais secundários comuns.

Anortoclásio é o feldspato dominante, caracterizado por cristais euedrais tabulares, que variam de 1,82 a 4,5 mm, por vezes com exsoluções lamelares de albita e bordas corroídas. Mostram alteração para argilominerais (caulinita) e/ou sericita. A nefelina ocupa os interstícios da trama textural formada pelo anortoclásio (textura sienítica – FIGURA 23A). Esse feldspatoide ocorre como cristais euédricos a subédricos, geralmente com contornos quadráticos a triangulares, que variam de 0,24 a 2,07mm e comumente alterados para sericita.

O plagioclásio é subédrico tabular, no geral, com cerca de 2,54 mm e geminações simples, conforme a Lei da Albita. Frequentemente os cristais estão saussuritizados, substituídos por epidoto, calcita \pm sericita. A kaersutita $[\text{NaCa}_2(\text{Mg}_4\text{Ti})\text{Si}_6\text{Al}_2\text{O}_{23}(\text{OH})_2]$ forma prismas alongados e cristais hexagonais de 0,51 a 5,0mm. A zonação composicional indica o enriquecimento em Fe do centro em direção às bordas dos cristais. São diferenciadas duas gerações de kaersutita, onde aquela que cristalizou primeiro está inclusa em uma kaersutita prismática idiomórfica. Ilmenita + titanita \pm titanomagnetita \pm biotita \pm exsoluções de rutilo ocorrem pela desestabilização da kaersutita.

Figura 23 – Fotomicrografias e imagens MEV – EDS do nefelina sienito.



Fonte: dados da pesquisa.

Nota: A) Kaersutita (Krs); nefelina (Nhf); feldspatos alcalinos (Kf) (XPL, 4,5x); B) clinopiroxênio esqueletal (Cpx) e kaersutita com inclusões de apatita (Ap) (PPL, 4,5x); C) Imagem MEV-EDS de cristais de apatita inclusos em kaersutita; D) Espectro EDS do cristal de apatita indicado pelo quadrado amarelo na figura 23.C.

Os piroxênios variam de augita a titanaugita. São prismas euédricos de 0,81 a 2,5 mm, com zonação composicional e, as vezes oxidação. Os cristais apatita variam de 0,16 a 0,21mm e ocorrem disseminados ou inclusos em kaersutita (textura poiquilítica – FIGURA 23B). Esse fosfato foi identificado por MEV-EDS (FIGURA 23C) como cloroapatita $[Ca_5(PO_4)_3Cl]$.

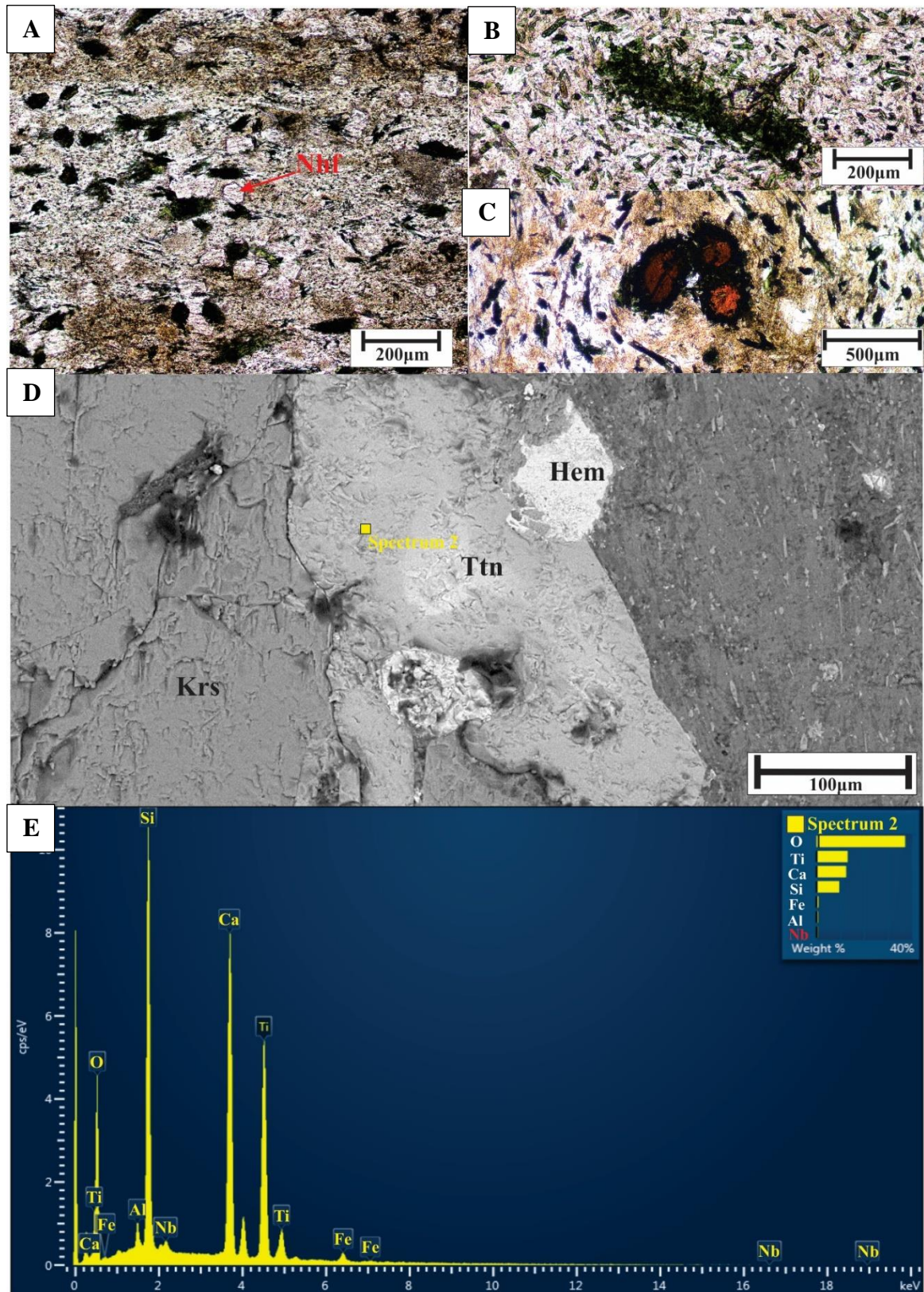
A pirita, ilmenita e a hematita, geralmente possuem 0,1mm e variam de cristais euédricos a anédricos, por vezes com bordas de oxidação. O zircão é euédrico e varia de 0,1 a 0,2mm. A titanita é euédrica, com hábito losangular que varia de 0,5 a 1,0 mm e, por vezes, ocorre com textura esquelética, bordas corroídas e opaca, resultado de alteração deutérica.

3.3.1.2 Fonólito microporfirítico

Rocha holocristalina, microporfirítica a glomeroporfirítica, constituída por 15 a 30% de microfenocristais (estimativa modal) mergulhados na matriz de granulação fina (aprox. 0,1 mm) e textura traquítica a intergranular. Possui textura amigdaloidal com preenchimento de minerais pós-magmáticos (calcita \pm zeólitas \pm cloritas). A matriz é composta essencialmente pelos seguintes minerais e suas estimativas modais: feldspatos alcalinos (50 – 55%), aegirina-augita (20 – 25%) e nefelina (\approx 10%). Micrólitos de plagioclásio (albita) podem coexistir entre os feldspatos alcalinos, constituindo a matriz. A mineralogia acessória é constituída por cristais euédricos a anédricos de granulação fina de: apatita (\leq 5%), minerais opacos (hematita \pm ilmenita \pm pirita \leq 2%), titanita (\leq 1%) e zircão (\leq 1%). Eventualmente exibem enclaves microgranulares, além de clastos poliminerálicos e, mais raramente, xenólitos de: (1) fragmentos de rochas encaixantes, e; (2) brecha vulcanoclástica.

Os microfenocristais variam de 0,7 a 2,0 mm e são identificados como cristais euédricos a subédricos: feldspato alcalino, aegirina-augita, nefelina e kaersutita, sendo os dois primeiros dominantes. Os microfenocristais de feldspato alcalino variam de sanidina a anortoclásio, possuem hábito tabular e, por vezes, exibem bordas corroídas e substituição parcial por sericita ou argilominerais. Os microfenocristais de nefelina são idiomórficos, com até 1,0 mm, que exibem microexsoluções de kalsilita $[KAlSiO_4]$ e, frequentemente, substituição por carbonato ou sericita. Na matriz, a nefelina é diferenciada pelo hábito euédrico hexagonal (FIGURA 24A).

Figura 24. Fotomicrografias e imagens MEV-EDS do fonólito microporfirítico.



Fonte: dados da pesquisa.

Notas: A) Nefelina (Nhf) na matriz fonolítica (PPL, 10x); B) Aglomerado de aegirina-augita (PPL, 10x); C) micrólitos de aegirina-augita bordejando kaersutita; D) Imagem MEV – EDS de titanita (Ttn) inclusa em kaersutita (Krs). (Hem) – hematita; E) Espectro EDS da titanita assinalada pela marca amarela na figura 24.D.

Os fenocristais de aegirina-augita são prismas alongados a aciculares de 0,1 a 2,0 mm. Na matriz, formam aglomerados ou bordejam os microfenocristais de kaersutita e nefelina (FIGURAS 24B e 24C). Os fenocristais de kaersutita são euédricos a subédricos prismas zonados, com 0,3 a 2,0 mm e inclusões poiquilíticas de apatita. Esse fosfato, principal mineral acessório da rocha, ocorre prismático, hexagonal ou acicular, variando de 0,17 a 0,22 mm.

Os minerais opacos (hematita + ilmenita \pm pirita) variam de euédricos a anédricos e ocorrem disseminados ou inclusos nos fenocristais de anfibólio. Os romboedros de titanita geralmente possuem 0,1 mm e ocorrem associados ou inclusos nos fenocristais de anfibólio, como mostra a imagem do MEV – EDS (FIGURAS 24D e 24E).

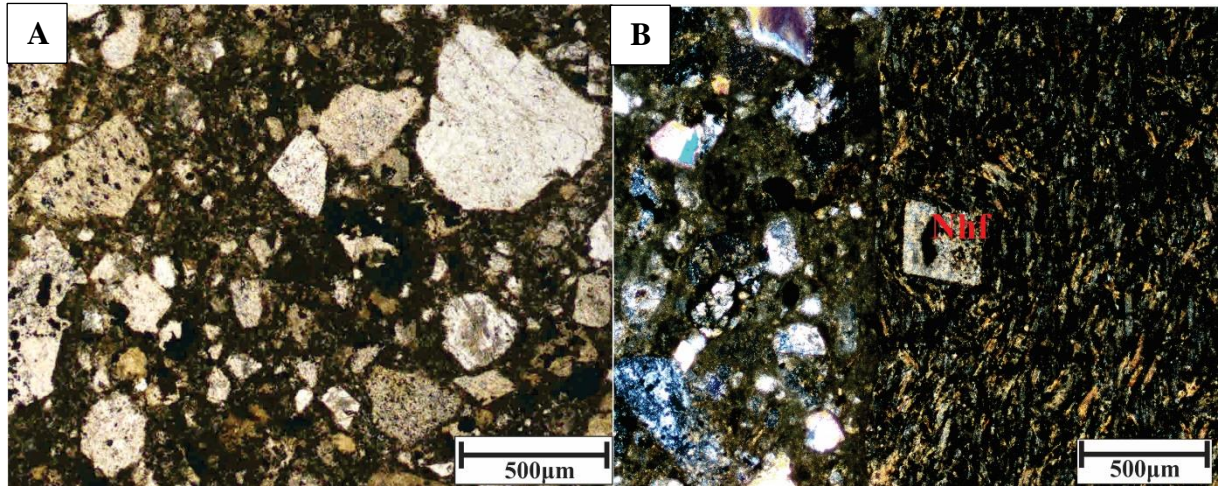
3.3.1.3 Brecha vulcanoclástica

O *pipe* piroclástico possui textura brechada, matriz-suportada, com uma gama ampla de fragmentos oxidados, argilizados e alterados para óxidos de ferro, envoltos pela matriz tufisítica (FIGURA 25A), cuja granulação extremamente fina impossibilita a análise mineralógica mesmo por microscopia eletrônica de varredura. Os clastos polimíticos são inequigranulares, pouco arredondados a angulosos e compostos por: (1) vidro vulcânico; (2) fragmentos das rochas alcalinas da Província Alcalina Fortaleza (principalmente fonólitos microporfíricos e traquítos); (3) encaixantes e; (4) fragmentos minerais (principalmente quartzo \pm feldspatos \pm biotita). Predominam fragmentos de alcalinas, com minerais geralmente sericitizados ou substituídos por carbonatos. Vênulas de calcita intra e extraclasto são comuns.

Os fragmentos de fonólitos microporfíricos, variam de mm a cm, são constituídos predominantemente por micrólitos de piroxênios oxidados e ripas de feldspato alcalino orientadas (paralelismo fluxional da textura traquítica), envolvendo microfenocristais euédricos pseudomórficos de sanidina e de nefelina substituídos por sericita e carbonato (FIGURA 25B).

Os clastos das encaixantes exibem texturas granoblástica a lepidogranoblástica e são essencialmente compostos por: feldspato alcalino, plagioclásio (albita), quartzo recristalizado, biotita marrom. Os principais minerais acessórios são: apatita; zircão, ocorre incluso na biotita; rutilo e; minerais opacos (hematita + pirita \pm ilmenita).

Figura 25 – Fotomicrografias da brecha vulcanoclástica.



Fonte: dados da pesquisa.

Notas: A) Textura brechada; B) Fenocristal pseudomorfo de nefelina (Nhf) substituído por carbonato, Os aspecto em clasto traquítico alterado (XPL, 4,5x).

3.3.2 Geoquímica dos litotipos de interesse

Realizando a comparação dos resultados obtidos a partir das diferentes técnicas de extração utilizadas, a fusão por Tetraborato de Lítio e digestão por Água Régia, a primeira é mais eficiente (TABELA 3), sendo capaz de determinar os teores daqueles elementos que formam ligações com a sílica, determinando a concentração total dos constituintes principais da rocha, razão que justifica essa técnica ser amplamente utilizada para determinação dos elementos maiores. Logo a técnica de fusão permite a dissolução dos principais minerais formadores das rochas, os silicatos. Por outro lado, a digestão por Água Régia realiza a dissolução de sulfatos, sulfetos, óxidos e carbonatos.

Os três litotipos de Fortaleza são rochas intermediárias, predominantemente constituídas por SiO_2 (535,0 – 579,0 g kg^{-1}) e Al_2O_3 (170,0 – 199,0 g kg^{-1}) (TABELA 3). Os teores de Na_2O , K_2O e CaO variam respectivamente de: 22,4 – 67,8 g kg^{-1} ; 48,5 – 66,1 g kg^{-1} e 18,3 – 41,7 g kg^{-1} . Segundo a proporção entre os álcalis Na_2O e K_2O , o nefelina sienito e o fonólito são classificados como rochas da série magmática sódica. Esse resultado corrobora com dados apresentados por outros autores (e.g. GUIMARÃES, 1982; MACCIOTTA *et al.*, 1990), que obtiveram altos teores de Na_2O , comparáveis aos determinados para as rochas de uma das ilhas mais sódicas do mundo, a Ilha da Trindade (ALMEIDA, 1961). Esse caráter sódico deve-se, principalmente, aos feldspatos alcalinos, aegirina-augita e nefelina.

Conforme a relação entre índice de alcalinidade [$\text{AI} = \text{Al}/(\text{Na} + \text{K})$ molar] versus a porcentagem de sílica (FROST & FROST, 2008), a brecha vulcanoclástica e o nefelina sienito são rochas metaluminosas e o fonólito é peralcalino. O caráter metaluminoso, bem como a instauração em sílica, justifica a mineralogia portadora de feldspatos alcalinos, minerais insaturados (nefelina), piroxênios (aegirina-augita/augita) e anfibólios (kaersutita/hornblenda), além de acessórios como ilmenita, apatita, titanita e zircão.

Considerando as determinações da Instrução Normativa Nº 5 de 10 de março de 2016 para remineralizadores (MAPA, 2016), as rochas atendem as especificações quanto ao teor de K_2O superior a 1% (10 g kg^{-1}) e a soma de $\text{CaO} + \text{MgO} + \text{K}_2\text{O}$ superior a 9% (90 g kg^{-1}). Adicionalmente, as rochas cumprem a exigência do (MAPA, 2016) quanto aos elementos potencialmente tóxicos, cujos valores são de 10 a 100 vezes menores do que o limite máximo sugerido (As/15 ppm, Cd/10 ppm, Hg/0,1 ppm e Pb/200 ppm).

O nefelina sienito possui o maior teor de P (2.053 mg kg⁻¹), enquanto a brecha e o fonólito possuem, respectivamente, 779 mg kg⁻¹ e 512 mg kg⁻¹ de fósforo em rocha total. Esses teores são inferiores ao valor mínimo de (1% ou 10 g kg⁻¹) necessário para declarar o macronutriente fósforo na composição de um remineralizador (MAPA, 2016).

Sobre os macronutrientes MgO e S, os teores determinados para as três rochas são baixos e variam, respectivamente, de 4,2 – 15,0 g kg⁻¹ e <0,1 – 2,1 g kg⁻¹.

Tabela 3 – Teores totais dos elementos nos litotipos da Província Alcalina Fortaleza.

Rocha Amostra	Brecha vulcanoclástica F01P1.50	Nefelina sienito BRV 04.A	Fonólito MP 2.B
	<i>g kg⁻¹</i>	<i>g kg⁻¹</i>	<i>g kg⁻¹</i>
SiO₂	578,0	535,0	579,0
TiO₂	10,1	15,1	6,6
Al₂O₃	170,0	199,0	193,0
Fe₂O₃	46,8	60,5	36,2
MnO	1,9	2,2	1,7
MgO	15,0	12,9	4,2
CaO	33,3	41,7	18,3
Na₂O	22,4	64,1	67,8
K₂O	48,5	53,0	66,1
P₂O₅	2,76	4,93	1,12
S	2,1	< 0,1	0,1
LOI	78,7	24,5	26,1
Total	1.009,56	1.012,93	1000,22
	<i>mg kg⁻¹</i>	<i>mg kg⁻¹</i>	<i>mg kg⁻¹</i>
Hg	<0,05	<0,05	<0,05
As	2,00	<1	<1
Al	6.500	34.700	38.800
B	<10	<10	<10
Ca	23.300	18.800	8.500
Cd	0,2	0,1	0,1
Co	6,6	3,6	1,3
Cr	10	<1	3,50
Cu	7,2	1,2	1,6
Fe	31.800	29.600	19.100
K	2.500	5.600	4.100
Mg	9.300	3.300	1.350
Mn	1.421	1.043	887
Mo	1,4	6,7	4,9
Na	500	24.000	31.300
Ni	11,2	<0,5	1,9
P	779	2.053	512
Pb	2,4	2,2	4,2
Se	<1	<1	<1
Th	6,7	12,7	15,5
U	0,6	3,4	3,3
Zn	106	92	88

Fonte: dados da pesquisa.

Com relação aos micronutrientes e elementos benéficos, a brecha apresentou os teores mais elevados em Co (6,6 mg kg⁻¹), Cu (7,2 mg kg⁻¹), Mn (1.421 mg kg⁻¹), Ni (11 mg kg⁻¹) e Zn (106 mg kg⁻¹), enquanto o nefelina sienito tem os valores mais altos de Fe₂O₃ (60,5 g kg⁻¹) e Mo (6,7 mg kg⁻¹). De acordo com o MAPA (2016), os teores de Mn da brecha e do nefelina sienito superam o valor mínimo de 0,1% (1 g kg⁻¹) que é exigido para que esse micronutriente possa seja declarado no produto remineralizador.

U e Th, considerados potencialmente tóxicos, variaram, respectivamente, de 0,6 a 3,4 mg kg⁻¹ e 6,7 a 15,5 mg kg⁻¹ e estão inclusos na estrutura da apatita. Apesar do Cr também ser considerado um elemento potencialmente tóxico, alguns trabalhos relatam seu benefício, em doses mínimas, para o desenvolvimento de algumas culturas (SANTOS & SANTOS, 2018). A brecha vulcanoclástica possui 10 mg kg⁻¹ de Cr em rocha total.

3.3.3 Testes agronômicos

3.3.3.1 Teste de Lixiviação

Os litotipos e o produto comercial apresentaram diferenças nos teores de K, P, S, Ca e Mg, além de alguns micronutrientes e elementos benéficos (Fe, Mn, Ni, Al, Na e Si) (TABELA 4).

Os três litotipos de Fortaleza apresentaram baixos teores solúveis de elementos potencialmente tóxicos, sendo as concentrações de As e Cd estavam abaixo do limite de detecção. Os teores de Pb variaram de 1,0 a 2,2 mg kg⁻¹ e os valores mais altos foram encontrados na brecha vulcanoclástica e no produto comercial. Quanto ao Cr, o produto comercial apresentou teores mais elevados que as rochas da província alcalina.

Os maiores valores de P solúvel foram determinados para o nefelina sienito, sendo a média 10 vezes maior que o conteúdo médio liberado pelo produto comercial. Esse resultado corrobora com a geoquímica e a mineralogia, já que o nefelina sienito possuía o maior teor total de P (2.053 mg kg⁻¹) e concentração modal de apatita (até 7%). A solução dessa rocha extraiu cerca de 42% do seu conteúdo total de fósforo, enquanto o fonólito e a brecha extraíram, respectivamente, aproximadamente 80% e 52% (considerando as determinações por digestão por Água Régia).

Tabela 4 – Teores dos elementos presentes nos extratos dos litotipos e do produto comercial após o teste de lixiviação.

Elemento	Phon	Nef sien	Bcc	Produto comercial	Teste F ¹	C.V
	----- mg.kg ⁻¹ -----					%
Al	23.422 a ²	16.013 b	760 c	1.140 c	**	2,3
B	7,4 a	5,0 a	8,2 a	6,4 a	ns	26,5
Ca	5.887 d	14.323 c	20.603 b	50.905 a	**	11,5
Cr	19,4 b	21,2 b	12,4 c	37,2 a	**	11,1
Cu	3,4 a	3,8 a	3,4 a	4,6 a	ns	19,1
Fe	2.045 c	1.123 d	8.590 a	4.563 b	**	7,7
Hg	1,0 a	1,0 a	1,2 a	1,0 a	ns	21,3
K	1.323 b	2.282 a	262 c	279 c	**	5,5
Mg	377 d	1.503 c	4.925 b	16.216 a	**	5,1
Mn	599,4 b	549 bc	779 a	501 c	**	5,6
Na	18.566 a	12.67 b	380 c	279 c	**	2,1
Ni	2,0 b	1,00 b	4,8 b	175,4 a	**	22,0
P	408 b	863 a	402 b	86 c	**	4,1
Pb	1,4 bc	1,0 c	2,0 ab	2,2 a	**	21,4
S	97 c	137 bc	174 b	461 a	**	13,6
Se	2,8 a	2,6 a	2,8 a	2,4 a	ns	18,9
Si	4.377 a	4.456 a	556 c	1.892 b	**	9,4
Zn	43,0 a	77,8 a	100,0 a	38,2 a	ns	70,7

Fonte: dados da pesquisa.

Nota: C.V: Coeficiente de variação; 1 ** e *: significativo pelo teste F a 1% e 5%, respectivamente; ns: não significativo pelo teste F; 2: Médias seguidas de letras iguais na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey (p < 0,05).

Embora a concentração total de P na brecha vulcanoclástica seja cerca de 52% maior que no fonólito, ambas as rochas mostraram o mesmo potencial em liberar esse elemento, que foi quase 5 vezes maior que o conteúdo solubilizado pelo produto comercial.

O nefelina sienito e o fonólito liberaram, respectivamente, 41% (2.282 mg kg⁻¹) e 32% (1.322 mg kg⁻¹) do conteúdo total de potássio. Em razão da composição essencialmente constituída por feldspatos alcalinos e do teor de 53 g kg⁻¹ de K₂O, o nefelina sienito liberou as maiores taxas de K dentre os tratamentos, onde valor médio é 8 vezes maior que a média determinada para produto comercial. Estatisticamente, o potencial da brecha para liberar K não difere do produto de referência.

Considerando os três litotipos propostos, a brecha solubilizou os maiores teores médios de cálcio (20.603 mg kg⁻¹) e magnésio (4.925 mg kg⁻¹), liberando o equivalente a 88% e 53% do conteúdo total desses dois elementos, respectivamente. Essa alta taxa de extração de cálcio se deve, principalmente, a dissolução/alteração dos feldspatos, piroxênios e anfibólios. Nos extratos do nefelina sienito foram determinados altos teores de Ca (14.322 mg kg⁻¹) e Mg (1.503 mg kg⁻¹) pela solubilização da augita, titanogaugita, aegirina-augita e da kaersutita. Já o fonólito obteve as menores médias de Ca e Mg solúvel e, portanto, é a rocha com o menor potencial para fornecer esses macronutrientes.

A brecha vulcanoclástica se sobressaiu como fonte de Fe e Mn, apresentando teores solúveis de 8.590 mg kg⁻¹ e 779 mg kg⁻¹, respectivamente. Essa rocha extraiu cerca de 27% do seu teor total de Fe (31, 8 g kg⁻¹), cerca de 88% a mais que a média do produto comercial.

O nefelina sienito solubilizou menos de 4% do seu conteúdo total de Fe (29,6 g kg⁻¹), o que indica a baixa solubilidade e lenta alteração dos minerais portadores desse micronutriente.

A mineralogia predominantemente constituída por aluminossilicatos e os teores elevados de Al₂O₃ (acima de 199 g kg⁻¹) resultaram nos altos valores de Al solúvel determinados para o fonólito e o nefelina sienito. O fonólito solubilizou uma média de 23.422 mg kg⁻¹ de alumínio, equivalente a cerca de 60% do seu conteúdo total. Já o teor solúvel de Al no nefelina sienito foi de 16.013 mg kg⁻¹.

O caráter fortemente sódico e a mineralogia essencialmente constituída por feldspatos sódicos, nefelina e aegirina-augita foram os fatores que influenciaram na alta solubilidade de Na do fonólito (18.566 mg kg⁻¹) e do nefelina sienito (12.267 mg kg⁻¹). Esse resultado já era esperado, afinal o sódio é um elemento de grande mobilidade geoquímica. A brecha disponibilizou os menores teores de Na e Al mesmo comparada ao produto comercial.

Nenhum dos litotipos propostos mostra-se como fonte potencial de Ni e S em virtude dos baixos teores solúveis, sobretudo quando comparados aos resultados do produto comercial.

Apesar das médias não diferirem entre si, ressalta-se a solubilidade do Zn, de aproximadamente 94% para a brecha e 85% para o nefelina sienito, mostrando que esse micronutriente estava presente na estrutura cristalina de fases muito solúveis em ácido orgânico. O alto conteúdo de Si solúvel no nefelina sienito e no fonólito é concordante com a geoquímica dessas rochas. Em contrapartida, a brecha, cuja composição é constituída por 578 g kg⁻¹ de SiO₂, disponibiliza teores mais baixos em silício até mesmo em comparação ao produto de referência.

3.3.3.2 *Teste de incubação*

Com exceção do pH, as demais variáveis foram influenciadas pela interação entre rochas e doses. Independentemente do litotipo utilizado o valor de pH do solo aumentou com o incremento das doses (FIGURA 26A), entretanto esse aumento foi inferior aos tratamentos adicionais (calcário e produto comercial) (TABELA 5). Dentre os tratamentos adicionais, o calcário apresentou maior eficiência em aumentar o pH do solo.

Os efeitos das rochas (R), das doses (D) e da interação rochas/doses (R x D) são significativos, a 1% de probabilidade, para o aumento do P-disponível no solo.

A aplicação das rochas de Fortaleza ao Argissolo Vermelho-Amarelo promoveu aumento linear nos teores de P-disponível (FIGURA 26B), entretanto o nefelina sienito resultou em maior variação nos teores do elemento, corroborando com o teste de lixiviação e a geoquímica. Com 2 t ha⁻¹, o nefelina sienito aumentou em 28% o teor P-disponível no solo, enquanto a brecha e o produto comercial, respectivamente, promoveram aumentos de 9% e 7% aproximadamente.

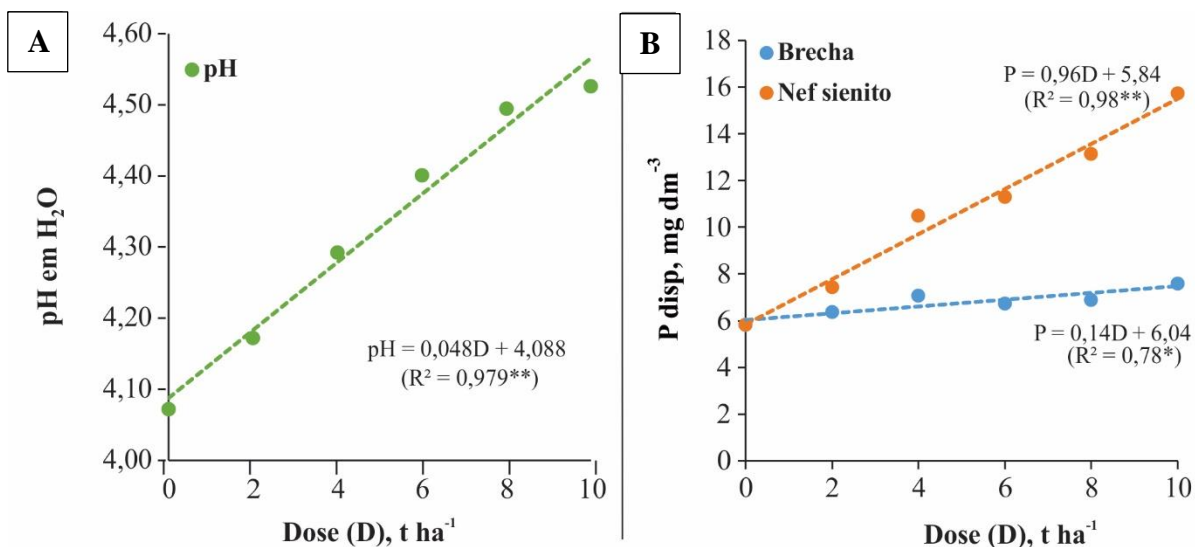
Tabela 5 - Atributos químicos do solo em função da aplicação de rochas da Província Alcalina de Fortaleza, calcário e do produto comercial.

Tratamentos		pH	P-disp	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	Al ³⁺	SB
		H ₂ O	mg/dm ³	----- mmolc dm ⁻³ -----					
Rochas (R)	Bcc	4,35 a ¹	6,75 b	1,31 b	8,01 a	4,02 a	0,23 b	2,02 b	13,57 a
	Nef sien	4,30 a	10,66 a	1,46 a	6,72 b	2,90 b	1,02 a	2,35 a	12,10 b
Doses (D), t/ha	0	4,07	5,83	1,32	5,21	2,71	0,19	2,75	9,43
	2	4,17	6,91	1,35	5,76	2,92	0,44	2,65	10,45
	4	4,29	8,8	1,37	6,83	3,28	0,61	2,33	12,08
	6	4,4	9,03	1,38	7,87	3,59	0,77	1,98	13,63
	8	4,5	10,02	1,48	8,99	3,97	0,93	1,80	15,37
	10	4,53	11,67	1,44	9,55	4,28	0,81	1,62	16,07
Adicionais	Calcário	5,53 a	5,46 a	1,32 a	32,40 a	2,54 b	0,24 a	0,05 b	36,50 a
	Produto ²	4,54 b	6,20 a	1,33 a	8,84 b	6,71 a	0,22 a	1,46 a	17,09 b
Média	Fatorial	4,33 b	8,71 a	1,39 a	7,37 b	3,46 b	0,63 a	2,19 a	12,84 b
	Adicionais	5,03 a	5,83 b	1,32 a	20,62 a	4,63 a	0,23 b	0,76 b	26,79 a
Teste F									
R		2,30 ^{ns}	189,82**	23,90**	37,27**	322,78**	160,06**	21,46**	19,63**
D		25,70**	36,69**	2,43 ^{ns}	45,58**	63,06**	12,94**	29,28**	42,70**
R x D		1,13 ^{ns}	19,66**	3,08*	7,03**	33,65**	11,47**	2,64*	5,55**
Fatorial		12,41**	42,87**	4,68**	27,30**	73,30**	25,64**	16,46**	23,72**
Adicionais x fatorial		334,93**	58,84**	2,72 ^{ns}	2253,21**	200,76**	23,79**	238,05**	1006,65**
Entre adicionais		193,84**	1,12 ^{ns}	0,00 ^{ns}	2076,05**	743,19**	0,02 ^{ns}	67,48**	568,24**
C. V. (%)		2,28	7,9	7,62	7,9	5,97	37,79	12,24	7,77

Fonte: dados da pesquisa.

Nota: SB = Soma de bases trocáveis (SB = K⁺ + Ca²⁺ + Mg²⁺); C.V (%) = Coeficiente de variação em porcentagem; ¹ = Médias seguidas letras iguais na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade; ² = Produto comercial de referência; ** e * = significativo pelo teste de F a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente. ^{ns} = Não significativo pelo teste F.

Figura 26 – Efeito das doses sobre o pH e interação entre a disponibilidade de P-disponível e a dose aplicada.



Fonte: dados da pesquisa.

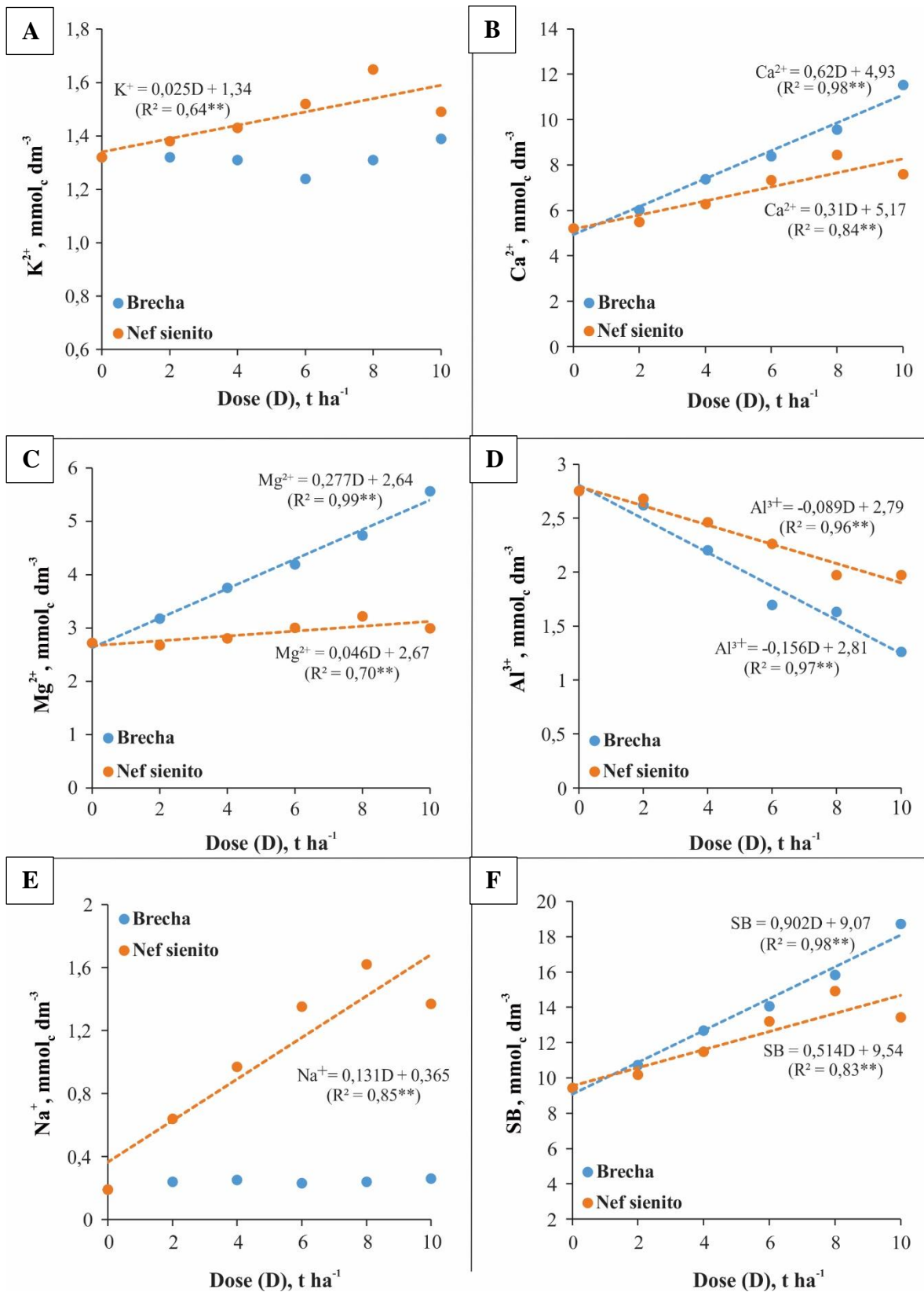
Notas: A) Efeito das doses sobre o pH. O diagrama é formulado a partir do efeito das doses; B) (B) Desdobramento da interação entre P-disponível e dose aplicada. O desdobramento foi realizado a partir da interação rocha/dose.

Os teores de K^+ do solo foram influenciados pela interação entre rochas e doses, entretanto somente a aplicação de nefelina sienito resultou em aumento linear (FIGURA 27A). Por outro lado, as médias dos teores de K^+ com a aplicação das rochas avaliadas não diferiram dos tratamentos adicionais.

As aplicações de nefelina sienito e a brecha resultaram em aumentos lineares dos teores de Ca^{2+} e de Mg^{2+} do solo (FIGURAS 27B e 27C), porém, esse aumento foi inferior ao proporcionado pelos tratamentos adicionais (calcário e produto comercial). Estes resultados condizem com o teste de lixiviação, confirmando a baixa eficiência das rochas da província em fornecer Ca^{2+} e de Mg^{2+} .

Os teores de Al^{3+} e Na^+ nas amostras de solo foram influenciados pela interação entre rochas e doses. Tanto a aplicação do nefelina sienito quanto da brecha vulcanoclástica possibilitaram a diminuição nos teores de Al^{3+} do solo (FIGURA 27D), entretanto, essas rochas não foram capazes de neutralizar esse elemento, como o ocorrido com a aplicação de calcário. Já para os teores de Na^+ , a aplicação de nefelina sienito resultou em aumento linear. Por outro lado, a brecha vulcanoclástica não resultou em alteração do teor desse elemento no solo (FIGURA 27E), concordando com o teste de lixiviação. As rochas proporcionaram um aumento da SB no Argissolo Vermelho-Amarelo (FIGURA 27F), entretanto esse efeito foi menos evidente que com a aplicação de calcário.

Figura 27 – Modelo de regressão ajustado a interação entre a dose da rocha e a disponibilidade dos cátions.



Fonte: dados da pesquisa.

Nota: Os diagramas baseiam-se no valor médio determinado para cada dose.

Além dos teores de Hg, que ficaram abaixo do limite de detecção do equipamento, os tratamentos e as doses não tiveram efeito significativo sobre a disponibilidade As, Cd e Cr (TABELA 6). Embora o teor de Pb com o nefelina sienito tenha sido maior que com a brecha, ambas apresentaram teores que não diferiram dos tratamentos adicionais (calcário e produto comercial). Por outro lado, a aplicação de brecha vulcanoclástica aumentou o teor de Ni no solo, em relação ao nefelina sienito, entretanto, esses teores foram menores do que os proporcionados pelos tratamentos adicionais. De modo geral, nenhum dos tratamentos ofereceu risco de contaminação do solo por acúmulo de metais potencialmente tóxicos.

Tabela 6 – Disponibilidade de micronutrientes e elementos potencialmente tóxicos no solo em função da aplicação das rochas alcalinas de Fortaleza, do calcário e do produto comercial.

Tratamentos		As	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
		mg dm ⁻³								
Rochas (R)	Bcc	0,05 a ¹	0,02 a	0,02 a	0,33 b	128,83 a	4,09 a	0,08 a	1,09 b	1,23 b
	Nef sien	0,05 a	0,02 a	0,02 a	0,72 a	102,20 b	3,68 b	0,07 b	1,19 a	1,56 a
Dose (D), t/ha	0	0,06	0,02	0,02	0,46	105,47	3,54	0,08	1,15	1,32
	2	0,05	0,02	0,02	0,5	112,41	3,87	0,08	1,16	1,47
	4	0,05	0,02	0,02	0,5	116,44	4,01	0,08	1,14	1,44
	6	0,05	0,02	0,02	0,54	116,29	3,9	0,08	1,12	1,41
	8	0,05	0,02	0,02	0,57	123,08	4,11	0,08	1,17	1,4
	10	0,05	0,02	0,02	0,6	119,42	3,91	0,07	1,11	1,34
Adicionais	Calcário	0,05 a	0,00 b	0,00 b	0,32 a	73,74 b	1,44 b	0,05 b	1,14 a	0,77 b
	Produto ²	0,05 a	0,02 a	0,02 a	0,31 a	101,08 a	2,49 a	0,17 a	1,13 a	1,15 a
Média	Fatorial	0,05 a	0,01 a	0,02 a	0,53 a	115,52 a	3,89 a	0,08 b	1,14 a	1,4 a
	Adicionais	0,05 a	0,01 a	0,01 a	0,31 b	87,41 b	1,96 b	0,11 a	1,13 a	0,96 b
Teste F										
R		0,22 ^{ns2}	0,58 ^{ns}	1,17 ^{ns}	109,82**	199,92**	23,12**	6,05*	23,87**	51,64**
D		0,40 ^{ns}	0,58 ^{ns}	1,17 ^{ns}	1,25 ^{ns}	6,90**	3,49*	1,14 ^{ns}	0,81 ^{ns}	1,22 ^{ns}
R x D		0,62 ^{ns}	0,58 ^{ns}	1,17 ^{ns}	5,93**	17,70**	3,05*	1,06 ^{ns}	1,51 ^{ns}	3,29*
Fatorial		0,48 ^{ns}	0,58 ^{ns}	1,17 ^{ns}	13,24**	29,27**	5,07**	1,55 ^{ns}	3,22**	6,74**
Adicionais x fatorial		0,29 ^{ns}	70,08**	88,17**	18,60**	126,68**	290,16**	70,05**	0,06 ^{ns}	57,16**
Entre adicionais		0,33 ^{ns}	31,50**	112,00**	0,03 ^{ns}	34,94**	24,93**	354,73**	0,01 ^{ns}	12,79**
C.V. (%)		24,67	21,17	14,67	26,25	5,87	8,19	11,48	6,44	11,41

Fonte: dados da pesquisa.

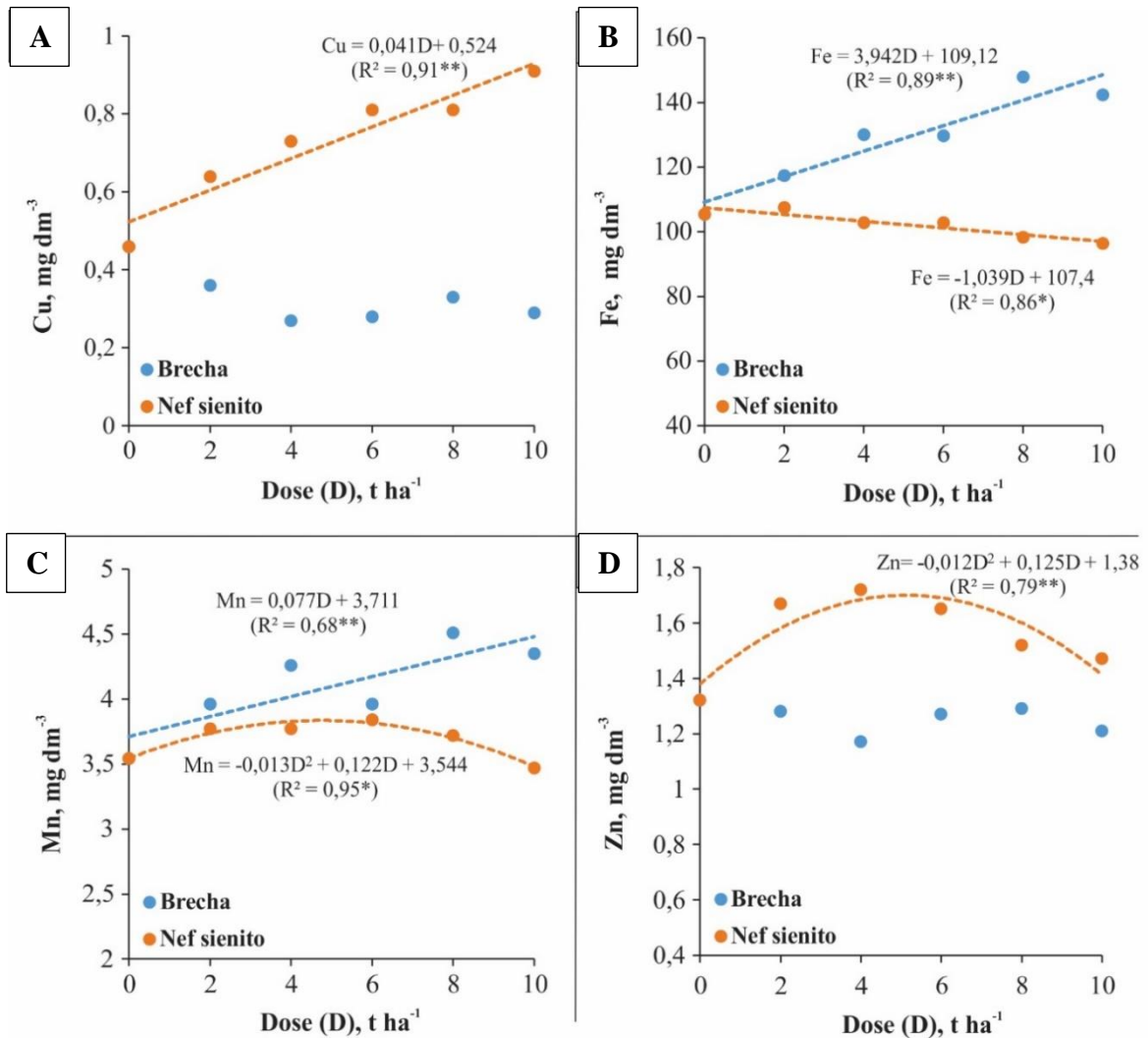
Nota: C.V (%) = Coeficiente de variação em porcentagem; ¹ = Médias seguidas letras iguais na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade; ² = Produto comercial de referência; ** e * = significativo pelo teste de F a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente. ^{ns} = Não significativo pelo teste F.

O ajuste ao modelo de regressão linear indicou que o incremento das doses de nefelina sienito resultou em aumento nos teores de Cu no solo (FIGURA 28A). Já a brecha, em doses crescentes, reduz a disponibilidade desse micronutriente de forma aleatória (FIGURA 28A). O produto comercial e o calcário também reduziram o valor médio de Cu.

A brecha vulcanoclástica foi mais eficiente em aumentar os teores de Fe e Mn do solo do que o nefelina sienito, corroborando com o ensaio de lixiviação. As doses aumentaram os teores desses micronutrientes, ajustando ao modelo de regressão linear (FIGURAS 28B e 28C). Já os teores de Mn com a aplicação de nefelina sienito ajustaram à função polinomial quadrática e o teor mais alto desse elemento seria obtido com a dose de 6 t ha⁻¹. De modo geral, os tratamentos adicionais apresentaram menores teores de Fe e Mn em relação às rochas avaliadas.

A influência do nefelina sienito nos teores de Zn ajustou ao modelo de regressão quadrático, onde a disponibilidade máxima desse micronutriente (1,71 mg dm⁻³) seria alcançada com a dose equivalente a 5,21 t ha⁻¹ (FIGURA 28D).

Figura 28 – Desdobramento do modelo de regressão para os micronutrientes Cu, Fe, Mn e Zn.



Fonte: dados da pesquisa.

3.4 Discussão dos resultados dos testes agronômicos

3.4.1 Teste de lixiviação

Embora Si, Al e Fe sejam elementos de baixa mobilidade geoquímica, foram intensamente extraídos do nefelina sienito e do fonólito em razão da mineralogia essencial dessas rochas ser constituída por minerais pouco estáveis frente ao intemperismo (piroxênios, anfibólios e feldspatos). Apesar do nefelina sienito ser constituído essencialmente por minerais sódicos, as pequenas concentrações de potássio nas estruturas cristalinas do anortoclásio e da nefelina permitiram a extração desse elemento superior àquela determinada ao produto comercial.

Trabalhos anteriores apontam rochas fonolíticas como promissoras para correção da acidez e lenta liberação de nutrientes em razão do pH alcançar valores superiores a 10,0 (CETEM, 2010). No entanto, o fonólito de Fortaleza foi descartado enquanto remineralizador por liberar altos teores de alumínio e sódio, que apesar de serem elementos benéficos para algumas culturas (quando em baixas concentrações no solo), no geral, o primeiro é tóxico para a maioria dos vegetais e é um dos principais responsáveis pela baixa produtividade e redução do crescimento das plantas e raízes, especialmente em solos ácidos, diminuindo a absorção de nutrientes (BALINO MIGUEL *et al.*, 2010). O sódio é um elemento benéfico para o crescimento de algumas culturas, mas em excesso pode salinizar ou sodificar, sobretudo, os solos ácidos.

3.4.2 Teste de incubação

As reações de precipitação, dissolução, adsorção e oxi-redução determinam a concentração dos elementos na solução do solo disponíveis às plantas e microrganismos (FERREIRA *et al.*, 2001). O experimento de incubação foi elucidativo à determinação do efeito do pH na variação da disponibilidade dos nutrientes e elementos potencialmente tóxicos.

O efeito do nefelina sienito e da brecha para o aumento do pH do solo é, provavelmente, resultante das reações de dissolução da calcita, carbonato que constitui parte da mineralogia secundária em ambas as rochas. O processo de dissolução da calcita libera íons de Ca^{2+} , bicarbonato e hidróxido, este último é considerado um receptor de prótons, capaz combinar-se com os íons de hidrogênio (H^+) da solução do solo, formando água, neutralizando o H^+ e elevando o pH do solo (RITCHEY, 2006; RAIJ, 2017).

O aumento do pH reduz a disponibilidade dos micronutrientes Zn e Cu (FERREIRA *et al.*, 2001). Quando o pH em água é elevado até aproximadamente 5,5, assim como foi alcançado pelo tratamento com calcário, o zinco é adsorvido pelos hidróxidos de alumínio (KALBASI *et al.*, 1978), ferro (KINNBURGH & JACKSON, 1982; POMBO & KLAMT, 1986) e manganês (LOGANATHAN *et al.*, 1977). O produto comercial e, principalmente, o calcário, tem efeito significativo na correção da acidez do solo, por isso a disponibilidade de Zn e Cu diminuiu com a aplicação de ambos. O pequeno aumento no pH do solo pela aplicação de pó de brecha foi suficiente para reduzir os teores de cobre e zinco.

Embora o do pH solo seja o fator mais importante para o controle da disponibilidade de Zn (FERREIRA *et al.*, 2001), a redução dos teores desse elemento somente a partir da dose 6 t ha⁻¹ de nefelina sienito, provavelmente, deve-se a interação entre Zn e P-disponível, este último teve um aumento significativo através do tratamento com a referida rocha. A aplicação de fósforo favorece ao aumento da adsorção de zinco, principalmente em solos ricos em óxidos de ferro e de alumínio hidratados (SAEED & FOX, 1979). A disponibilidade de Cu crescente no nefelina sienito possivelmente está relacionada a solubilidade desse elemento superar o efeito do pH e da interação com o potássio, zinco ou com o fósforo.

A disponibilidade do Fe e do Mn também diminuiu com o aumento do pH do solo, assim como foi identificado nas amostras tratadas com o nefelina sienito, produto comercial e, principalmente, com o calcário. As plantas absorvem especialmente o Fe²⁺ ou quelatos, enquanto o Fe³⁺ forma compostos de baixa solubilidade, cuja atividade decresce com o aumento de pH, favorecendo a precipitação de Fe(OH)₃ (FERREIRA *et al.*, 2001). A redução de Fe³⁺ para Fe²⁺ aumenta a disponibilidade desse nutriente para as plantas e essa reação depende das condições de aeração do solo e de oxidação-redução (FERREIRA *et al.*, 2001).

Nos tratamentos com nefelina sienito, o aumento do P disponível pode ter influenciado a redução da disponibilidade de ferro, através da interação P-Fe, cuja alta afinidade entre Fe³⁺ e H₂PO₄⁻ favorece a precipitação de FePO₄.2H₂O (FERREIRA *et al.*, 2001).

A interação Fe-Mn também pode ter favorecido a redução dos teores de ferro. Entretanto, os efeitos do pH e das interações P-Fe e Fe-Mn foram superados pela alta taxa de solubilidade de ferro da brecha, que em doses crescentes elevou gradualmente a disponibilidade desse micronutriente no solo.

Os tratamentos com maior poder de correção da acidez (calcário e produto comercial) reduziram a disponibilidade de Mn. Porém, a brecha solubiliza teores de Mn tão altos que, mesmo com o aumento do pH, a disponibilidade é crescente.

Até a aproximadamente 5 t ha⁻¹, a adição de nefelina sienito promoveu o aumento do teor de manganês no solo, no entanto, em doses maiores o efeito do pH diminuiu a disponibilidade desse elemento.

O potencial da brecha em fornecer Fe e Mn reflete a presença de minerais ferromagnesianos e óxidos de baixa estabilidade, susceptíveis a alteração: clinopiroxênios (aegirina-augita, augita) anfibólios (hornblenda, kaersutita), biotita, hematita e ilmenita.

Apesar de o nefelina sienito apresentar altos teores solúveis de Al³⁺ (TABELA 4), a sua aplicação em Argissolo Vermelho-Amarelo não resultou em aumento de teores, possivelmente devido à precipitação de hidróxidos de Al. Em pH superior a 5,8, praticamente todo o alumínio ocorre como Al(OH)₃ insolúvel, não tóxico para as plantas (FAQUIN, 2005). O efeito do calcário para a redução dos teores de alumínio foi bastante significativo por ter alcançado um pH 5,5. A precipitação de alumínio também é favorecida pelo aumento de fósforo disponível em condições de pH próximo a neutralidade.

3.4.3 Comparação com produtos existentes no mercado

Apesar do aumento do pH do solo tanto com a aplicação do nefelina sienito quanto da brecha vulcanoclástica, essas rochas, mesmo em doses de 10 t ha⁻¹, apresentaram menor eficiência que o calcário, o que inviabilizaria a utilização como corretivos de acidez.

O nefelina sienito e a brecha vulcanoclástica foram menos eficientes que o produto comercial para o aumento da disponibilidade de Mg, Ca e Ni, elementos que possuem teores elevados nas rochas que compõem o material de referência (biotita xisto e serpentinito). Logo, as duas rochas da província de Fortaleza propiciaram valores mais elevados em: P, K, Al, Na, Cu, Fe, Mn e Zn. Ressalta-se que o produto comercial também não proporcionou benefícios notórios aos atributos químicos do solo, o que pode ter sido efeito do tempo de incubação, uma vez que as reações de intemperismo dos minerais ocorrem lentamente, assim como a liberação dos elementos ao solo.

4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa demonstra que o conhecimento acerca da Província Alcalina de Fortaleza ainda não foi exaurido. O uso de técnicas de sensoriamento remoto e aerofotogrametria comprova que novas ocorrências ainda poderão ser descobertas na região, fortalecendo o conceito de província para esse magmatismo ígneo. O interesse de empresas de mineração, bem como, as campanhas de sondagem rotativa realizadas para a abertura do metrô de Fortaleza, estão contribuindo diretamente para o surgimento de novos trabalhos (*e.g.* WERNECK, 2018) que visam não só aproveitamento econômico da província, mas também a sua caracterização geológica.

A descrição dos basanitos e do nefelina sienito mostra um grande avanço na geologia da região e, principalmente, para concretizar o evento bimodal, afinal, antes de Werneck (2018) e da presente pesquisa não se tinha conhecimento da cartografia dessas rochas, que foram identificadas somente em inclusões nas rochas fonolíticas (*e.g.* GUIMARÃES, 1982; MACCIOTTA *et al.*, 1990). A caracterização e cartografia da brecha vulcanoclástica contribui para a identificação de um evento piroclástico na região, que também era pouco documentado.

Os dados levantados em campo, os resultados petrográficos e geoquímicos não só confirmam a semelhança das rochas alcalinas de Fortaleza com o magmatismo alcalino de Fernando de Noronha.

Com relação aos testes agronômicos, embora os resultados não tenham sido plenamente favoráveis, é importante ressaltar que o potencial remineralizador dos litotipos testados pode ser melhorado com a mistura de rochas máficas-ultramáficas da região e, principalmente, que pesquisas com esse caráter são de suma importância para um país que tem a agricultura como um de seus pilares econômicos. O crescimento da agricultura tem exigido cada vez mais a aplicação de fertilizantes industrializados e agrotóxicos. Estatísticas apresentadas pela ANDA (2019) mostram que nos últimos anos a importação de fertilizantes vem crescendo frente a produção nacional. Essa dependência por insumos agrícolas importados não só encarece a produção, mas também gera impactos ambientais e na qualidade dos alimentos. Nesse sentido, a técnica de rochagem, aliada a adubação orgânica, mostra-se como uma alternativa para a redução dos custos de produção e do uso indiscriminado de insumos agrícolas industrializados.

A prática de rochagem no Brasil ainda é incipiente, sendo necessário o incentivo ao manejo sustentável e consistente do solo através dessa técnica. Para tanto, é importante o trabalho cooperativo entre instituições acadêmicas, empresas privadas e de políticas públicas.

5 CONCLUSÃO

A Província Alcalina de Fortaleza é caracterizada por um magmatismo bimodal, provavelmente, induzido por um baixo grau de fusão parcial de regiões profundas de um manto não depletado. A ocorrência dos magmas félsicos e máficos de natureza alcalina, associados a rochas piroclásticas caracterizam um ambiente típico de rifte continental.

O magmatismo bimodal da referida Província é caracterizado principalmente por fonólitos e basanitos, onde os primeiros são dominantes. Na região de Caucaia ocorrem os principais afloramentos que caracterizam esse evento ígneo.

A disposição espacial dos corpos alcalinos sugere a relação entre a província de Fortaleza e a zona de fratura oceânica Fernando de Noronha.

Possivelmente, a ascensão dos magmas alcalinos foi favorecida pelos sistemas de fraturas identificados em técnicas de sensoriamento remoto e dados aerogeofísicos.

Cinco ocorrências alcalinas, não relacionadas em trabalhos anteriores a este, foram cartografadas e entre elas destacam-se as rochas do distrito de Tucunduba, ao sul/sudeste do serrote meta máfico-ultramáfico Manoel Gonçalves, onde ocorrem fonólitos, um pequeno stock de nefelina sienito e um pipe de brecha vulcanoclástica.

No município de Itaitinga, foi identificada a ocorrência de um basanito semelhante, sob aspectos petrográficos e geoquímicos, ao basanito subaflorante de Fortaleza e às rochas máficas do vulcanismo Fernando de Noronha.

Contudo, a pesquisa corrobora com trabalhos anteriores, indicando a similaridade do magmatismo alcalino de Fortaleza com as rochas do arquipélago Fernando de Noronha.

Nenhuma das rochas oferece risco de contaminação do solo pela acumulação de metais potencialmente tóxicos: As, Cd, Hg e Pb.

Principalmente os altos teores solúveis de Al^{3+} tornam a aplicação do fonólito microporfirítico de Fortaleza inviável para a técnica de rochagem, sob o risco de acidificar o solo.

A brecha vulcanoclástica e o nefelina sienito apresentam poder de correção da acidez do solo menor que o calcário e fornecimento de nutrientes semelhantes ao produto comercial.

O potencial remineralizador das rochas testadas poderia ser melhorado a partir de uma mistura com rochas máficas ou ultramáficas, pois estas possuem, no geral, teores mais baixos de SiO_2 , Al_2O_3 e Na_2O , além de concentrações mais elevadas em MgO , CaO , Fe_2O_3 .

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, F. F. M. **Geologia e petrologia do arquipélago de Fernando de Noronha**. 1955. 181 p. Monografia 13. Ministério de Minas e Energia, Departamento Nacional de Produção Mineral, Divisão de Geologia e Mineralogia. Rio de Janeiro, 1955.
- ALMEIDA, F. F. M. **Geologia e petrologia da Ilha da Trindade**. 1961. 197 p. Monografia 18. Ministério de Minas e Energia, Departamento Nacional de Produção Mineral, Divisão de Geologia e Mineralogia. Rio de Janeiro, 1961.
- ALMEIDA, F.F.M. *et al.* Províncias estruturais brasileiras. *In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE*, 8., 1977, Campina Grande. **Boletim Resumos**. Campina Grande: SBG, 1977. v. 6, p. 363-391.
- ALMEIDA, F.F.M. *et al.* 1981. Brazilian Structural Provinces: an introduction. **Earth-Science Reviews**, v. 17, p. 1-29, apr. 1981.
- ALMEIDA, F. F.M. Distribuição Regional e Relações Tectônicas do Magmatismo Pós-Paleozoico no Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 16(4), p 325 – 349, dez. 1986.
- ALMEIDA, F. F.M. *et al.* Magmatismo Pós-Paleozoico no Nordeste Oriental do Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 17, p. 180 – 188, dez. 1988.
- ALMEIDA, F.F.M. Ilhas Oceânicas Brasileiras e suas Relações com a Tectônica Atlântica. **Terra Didática**, v. 2(1), p. 3 – 18, 2006.
- ALMEIDA, A.R. *et al.* 2008. **Geologia da Folha Itatira SB.24-V-B-V**, Sistema de Informações Geográficas. 2008. 196 p. Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. Ceará: UFC/CPRM.
- ALVES, A. D. **Rochas vulcanoclásticas do Complexo Alcalino de Poços de Caldas – MG/SP**. 2003. 139 p. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Instituto de Geociências. Programa de Pós-Graduação em Mineralogia e Petrologia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.
- ALMEIDA, E. Powdered Rock to Revitalise Soils. **Leisa Mag**, v. 22, p. 12 – 13, jan. 2006.
- AMARAL, W.S. **Integração de dados aerogeofísicos e geológicos e sua contribuição à evolução geodinâmica do Domínio Ceará Central, Província Borborema**. 2007. 165 p. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas (SP), 2007.
- ANDA. Associação Nacional para Difusão de Adubos e Corretivos Agrícolas. **Mercado de Fertilizantes**. Estatísticas. 2019. Disponível em: < <http://anda.org.br/estatisticas/>>. Disponível em: 1 jul. 2019.
- ANDERSON, D.L. The Thermal State of Upper Mantle: no Role for Mantle Plumes. **Geoph. Res. Lett.**, v. 27, p. 3623 – 3626, nov. 2000.

ANDERSON, D.L. Large igneous provinces, delamination, and fertile mantle. **Elements**, v. 1, p. 271 – 275, dec. 2005.

ANDRADE, L.R.M *et al.* **Avaliação de uma Rocha Ígnea como Corretivo de Acidez e Disponibilização de Nutrientes para as Plantas**. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento. Embrapa Cerrados. Platina – DF, p18, 2002.

ARAI, M. A. Grande elevação eustática do mioceno e sua influência na origem do Grupo Barreiras. *Geologia USP. Série Científica*, São Paulo, v. 6, n. 2, p. 1 – 6, out. 2006.

ARTHAUD, M. H. **Evolução neoproterozóica do grupo Ceará - domínio central, NE Brasil: da sedimentação à colisão continental brasileira**. 2007. 132 p. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2007.

BALBINO MIGUEL, P. S. *et. al.* Efeitos Tóxicos do Alumínio no Crescimento das Plantas: Mecanismos de Tolerância, Sintomas, Efeitos Fisiológicos, Bioquímicos e Controles Genéticos. *Juiz de Fora, CES Revista*, v. 24, p. 13 – 29, 2010.

BARKER, D.S.; MITCHELL, R. H.; MCKAY, D. Late Cretaceous nephelinite to phonolite magmatism in the Balcones province, Texas. *Geological Society of America. Special Paper*, v. 215, p. 293 – 304, 1987.

BARBOSA, J. C.; MALDONADO JÚNIOR, W. **Experimentação agrônômica e AgroEstat: sistema para análises estatísticas de ensaios agrônômicos**. Jaboticabal, SP: Multipress, 2015. 396 p.

BENEDUZZI, R.B. **Rochagem: Agregação das Rochas como Alternativa Sustentável para a Fertilização e Adubação de Solos**. 2011. 90 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Rio Grande do Sul. Rio Grande do Sul, 2011.

BLUM, M.L.B. **Processamento e Interpretação de Dados de Geofísica Aérea no Brasil Central e sua Aplicação à Geologia Regional e à Prospecção Mineral**. 1999. 247 p. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 1999.

BRAGA, A. P. G. *et al.* **Projeto Fortaleza** (Relatório Final). Departamento Nacional de Produção Mineral – Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais, Vol.1. Recife, 339p, 1977.

BRASIL. Ministério da Educação. Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior. Portaria nº 206, de 4 de setembro de 2018. **Diário Oficial da União**, Brasília, nº 172, 5 set. 2018. Seção 1, p. 22. Disponível em: http://www.imprensa nacional.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/39729251/do1-2018-09-05-portaria-n-206-de-4-de-setembro-de-2018-39729135. Acesso em: 19 out. 2018.

BRASIL. Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento – MAPA. Instrução Normativa Nº5 de 10 de março de 2016. **Diário Oficial da União**, Seção 1. nº 49, 14 mar.2016.

BRASIL. Ministério de Ciência e Tecnologia. Centro de Tecnologia Mineral - CETEM. 2010. **Agrominerais para o Brasil**. Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral – CETEM, 2010. 297 p.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento - MAPA. **Manual de Métodos Analíticos Oficiais para Fertilizantes Minerais, Orgânicos, Organominerais e Corretivos. Secretaria de Defesa Agropecuária**. Coordenação-Geral de Apoio Laboratorial; Murilo Carlos Muniz Veras (Org.) – Brasília: MAPA/SDA/CGA, 2014. 220 p.

BORGES, T. A.; SOUZA, F. N. S. Utilização de um Remineralizador de Solos em Associação com Outras Fontes Alternativas de Nutrientes no Manejo Agroecológico do Feijão Cauípi. **AGRI. Environmental Sciences**, v. 1, p. 8 – 12, jul. 2015.

BRITO NEVES, B. B. *et al.* U-Pb Age of some Classic Granites of Borborema Province. *In: SOUTH AMERICA SYMPOSIUM OF ISOTOPE GEOLOGY*, 4., 2003, Salvador. **Short Paper**. Salvador: CBPM/IRD, 2003. p. 158-159.

BOWEN, N. L. **The evolution of the igneous rocks**. New Jersey: Princeton University Press, 1928. 332 p.

CABY, R. Precambrian terranes of Benin Nigeria and Northeast Brazil and the Late Proterozoic South Atlantic fit. **Geological Society of America Special Paper**, v. 230, p. 145 – 158, jan. 1989.

CABY, R.; ARTHAUD, M.H. Major Precambrian nappes of the Brazilian belt, Ceará, northeast Brazil. **Geology**, v. 14(10), p. 871 – 874, 1986.

COLA, G. P. A; SIMÃO, J. B.P. Rochagem como forma alternativa de suplementação de potássio na agricultura agroecológica. (Mossoró – RN – Brasil). *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*. **Revista Verde**, Espírito Santo, v. 7 (1), p. 1 – 8, jan./mar. 2012.

CASTRO, N. A. *et al.* Nd data from Central Ceara Domain: Archean Relicts, Paleoproterozoic Record and Neoproterozoic Crustal Reworking. *In: SOUTH AMERICA SYMPOSIUM OF ISOTOPE GEOLOGY*, 4., 2003. Salvador. **Short Papers**. Salvador: CBPM/IRD, 2003. p. 161-163.

CASTRO, N.A. **Evolução Geológica Proterozoica da Região entre Madalena e Taperuaba, Domínio Tectônico Ceará Central (Província Borborema)**. 2004. 221 p. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

COSTA P.R.C. *et al.* O Registro da Deformação Mesozoica Relacionada à Abertura da Margem Equatorial atlântica no litoral do Estado do Ceará (Nordeste do Brasil): evidências a partir da análise de imagens orbitais e de afloramentos. *In: CONG. BRAS. GEOLOGIA*, 41., 2002, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa: SBG, 2002. p. 623.

CAVALCANTE, J.C. *et al.* **Mapa Geológico do Ceará**. Fortaleza, 2003. 1 mapa. color. Escala 1:500.000. MME/CPRM. 2003.

- CAVALCANTE, D. H. A. **Complexo Máfico-Ultramáfico Estratiforme de Tucunduba (CMUET)**. 2016. 160 p. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Geologia) – Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2016.
- CORDANI, U.G. Idade do vulcanismo no Oceano Atlântico Sul. **Bol. Inst. Geoc. Astron. USP**. São Paulo, v. 1, p. 9 – 75, 1970.
- COURTILLOT, V. *et al.* Three distinct types of hotspot in the Earths mantle. **Earth. Planet. Sci. Lett.**, v. 205, p. 295 – 308, oct. 2003.
- CPRM. 2019. Serviço Geológico do Brasil – Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais – **CPRM**. Disponível em: < <http://geosgb.cprm.gov.br/geosgb/downloads.html/> >. Disponível em 31 jul.2019.
- DE LA ROCHE, *et al.* A classification of volcanic and plutonic rocks using R1 R2 diagram and major element analyses - Its relationships with current nomenclature. **Chem. Geol.**, v. 29, p. 183 – 210, 1980.
- DONALDSON, C. H. An experimental investigation of olivine morphology. **Contributions to Mineralogy and Petrology**, v. 57, p. 187 – 213, 1976.
- ERNESTO, M. Paleomagnetism of the Post-Paleozoic Alkaline Magmatism in the Brazilian Platform: Questioning the Mantle-Plume Model. *In*: P. Comin-Chiaramonti & C. B. Gomes, eds. **Mesozoic to Cenozoic alkaline magmatism in the Brazilian Platform**. São Paulo, Edusp/Fapesp. 689 – 705, 2005.
- FAKENGREN-GERUP, U.; TYLER, G. Changes Since 1950 of Mineral Pools in the Upper Chorizon of Swedish Deciduous Forest Soils. **Water Air Soil Poll**, v. 64, p. 495 – 501, jul. 1992.
- FAQUIN, V. **Nutrição Mineral de Plantas**. 2005. 186 p. (Especialização a Distância em Solos e Meio Ambiente) – Curso de Pós-Graduação “Lato Sensu” a Distância: Solos e Meio Ambiente, Universidade Federal de Lavras – UFLA., Lavras, 2005.
- FERREIRA, M. E. *et al.* **Micronutrientes e elementos tóxicos na agricultura**. Jaboticabal, SP: CNPq/FAPESP/POTAFOS, 2001. 600 p.
- FERREIRA, V. P. *et al.* Geochemical and Isotopic Signatures of Proterozoic Granitoids in Terranes of the Borborema Structural Province, Northeast Brazil.; **Journal of South American Earth Science**, v.11(5), p. 419 – 455, sep. 1995.
- FETTER, A.H. **U/Pb and Sm/Nd geochronological constraints on the Crustal framework and geologic history of Ceara State, NW Borborema Province, NE Brazil: Implications for the Assembly of Gondwana**. 1999. 164 p. Thesis. (PhD) – Departament of Geology, Kansas University, Kansas, 1999.
- FETTER, A.H. *et al.* UPb and Sm-Nd geochronological constraints on the crustal evolution and basement architecture of Ceará State, NW BorboremaProvince, NE Brazil: mplications for the existence of the Paleoproterozoic supercontinent “Atlantica”. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 30, p. 102 – 106, mar. 2000.

FROST, B. R.; & FROST, C. D. A geochemical classification for feldspathic igneous rocks. **Journal of Petrology**, v.49, p. 1955 – 1969, nov. 2008.

FODOR R.V.; MUKASA, S. B.; SIAL, A. N. Isotopic and trace-element indications of lithospheric and asthenospheric components in Tertiary alkalic basalts, northeastern Brazil. **Lithos**, v. 43, p. 197 – 217, sep. 1998.

GILL, R. **Rochas e processos ígneos** – Um guia prático. Porto Alegre: Bookman, 2014. 427p.

GORINI, M. A. **The tectonic fabric of the equatorial Atlantic and adjoining continental margins: Gulf of Guinea to Northeastern Brazil**. 1977. 341 p. Dissertation. (PhD) – Columbia University, Columbia, 1977.

GORINI, M.A. The Tectonic Fabric of the Equatorial Atlantic and Adjoining Continental Margins: Gulf of Guinea to Northeastern Brazil. **Série Projeto REMAC**, 9, Petrobras, Rio de Janeiro, p. 11 – 117, 1981.

GUIMARÃES, I.P. **Petrologia e Geoquímica da Província Alcalina Terciária de Fortaleza - CE**. 1982. 165 p. Dissertação. (Mestrado em Geologia) – Centro de Tecnologia da UFPE, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 1982.

HARLEY, A. D.; GILKES, R. J. Factors Influencing the Release of Plant Nutrient Elements from Silicate Rock Powders: a Geochemical Overview. **Nutr. Cycl. Agroecosyst**, v.56, p. 11 – 36, 2000.

HILDEBRAND, E. E. The Spatial Heterogeneity of Chemical Properties in Acid Forest Soils and its Importance for Tree Nutrition. **Water Air Soil Poll**, v. 54, p. 183 – 191, mar. 1991

ISSLER, R. S. *et al.* Chaminés alcalinas na região de dobramentos Caririanos. *In*: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE, 8., 1978, Campina Grande. **Anais...** Campina Grande: SBG, 1978. p. 14.

KALBASI, M. *et al.* Mechanism of zinc adsorption by iron and aluminum oxides. **Soil Sci.**, v. 125, p. 146 – 150, mar. 1978.

KINNIBURGH, D. G. & JACKSON, M. L. Concentration and pH dependence of calcium and zinc adsorption by iron hydrous oxide gel. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 46, p. 56 – 61, jan. 1982.

KNESEL, K.M. *et al.* $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology reveals the youngest volcanism in mainland Brazil and no evidence for a plume trace on the continent. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 302, p. 38 – 50, 2010.

LEONARDOS, O.H. *et al.* The Use of Ground Rocks in Laterite Systems: An Improvement to the Use of Conventional Soluble Fertilizers. **Chem. Geol.**, v. 60, p. 361 – 370, mar. 1987.

LEONARDOS, O.H. *et al.* Remineralization for Sustainable Agriculture: A Tropical Perspective from a Brazilian Viewpoint. **Nutr. Cycling Agroecosyst**, v. 56, p. 3 – 9, jan. 2000.

LE MAITRE, R. W. **A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms. Recommendations of the IUGS Commission on the Systematics of Igneous Rocks.** Oxford: Blackwell, 1989. 193 p.

LE MAITRE, R. W. **Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms. Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks.** 2nd. Cambridge: Cambridge University Press, 2002. 236 p.

LOGANATHAN, P. *et al.* Influence of pH on Co^{2+} , Zn^{2+} and Ca^{2+} by adsorption a hydrous manganese oxide. **Soil. Sci. Soc. Am. J.**, v. 41, p. 57 – 62, 1977.

LOPES, R.P. **O Vulcanismo do Arquipélago Fernando de Noronha, PE: Química Mineral e Geoquímica.** 2002. 339 p. Tese. (Doutorado em Geociências) – Programa de Pós-Graduação em Mineralogia e Petrologia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

MACCIOTTA, G. *et al.* Petrology of the Tephrite-phonolite Suite and Cognate Xenoliths of the Fortaleza District (Ceará, Brasil). **J. Mineral**, v. 2, p. 687 – 709, jan. 1990.

MEDEIROS, F de PAULA. **Uso dos Remineralizadores Associado a Policultivos para Produção da Palma Forrageira no Semiárido Baiano.** 2017. 132 p. Dissertação. (Mestrado em Meio Ambiente e Desenvolvimento Rural) – Programa de Pós-graduação em Meio Ambiente e Desenvolvimento Rural, PPGMADER., Universidade de Brasília, UnB, Brasília, 2017.

MARSH, J. The Luderitz alkaline province, southwest Africa I – Descriptive petrology of the Granitzberg foyaite complex. **Trans. Geol. Soc. South Africa**, v. 78, p. 215 – 224.

MIZUSAKI, A.M.P; SARACCHINI, F.E. Catálogo Geral dos Dados Geocronológicos da Petrobras. Petrobras **Inter. Rep.** p24, 1991.

MIZUSAKI, A.M.P *et al.* Mesozoic and Cenozoic Igneous Activity and its Tectonic Control in Northeastern Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 15, p. 183 – 198, jun. 2002.

MORAIS NETO, J. M. e ALKMIM, F. F. A deformação das coberturas terciárias do Planalto da Borborema (PB-RN) e seu significado tectônico. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 31(1), p. 95 – 106, mar. 2001.

MORGAN, W. J. Convection plumes in the lower mantle. **Nature**, v. 230, p. 42 – 43, 1971.

MONTELLI, R. *et al.* A catalogue of deep mantle plumes: new results from finite-frequency tomography. **Geochem. Geophys. Geosyst.**, v. 7(11), p. 1 – 69, nov. 2006.

MERRIL, R. B.; WYLLIE, P. J. Kaersutite and kaersutite eclogite from Kakanui, New Zealand, water excess and water deficient melting to 30Kb. **The Geological Society of America**, v. 86, p. 555 – 570, 1975.

MULLEN, E.D. MnO/TiO₂/P₂O₅: a minor element discriminant for basaltic rocks of oceanic environments and its implications for petrogenesis. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 62, p. 53 – 62, jan. 1983.

NASCIMENTO, D.A. do. *et al.* Geologia. *In: Projeto Radam Brasil. Folha SA .24 Fortaleza: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra.* MMEISG. (Levantamento de Recursos Naturais. 21). Rio de Janeiro, 488p, 1981.

NAKAMURA, N. Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and K in carbonaceous and ordinary chondrites. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 38, p. 757 – 775, may. 1974.

NEVES, S.P *et al.* Geochronological, Thermochronological and Thermobarometric constraints on Deformation, Magmatism and Thermal Regimes in Eastern Borborema Province (NE Brazil). **Journal of South American Earth Sciences**, v. 38, p. 129 – 146, oct. 2012.

NEVES, S.P. Constraints from Zircon Geochronology on the Tectonic Evolution of the Borborema Province (NE Brazil): Widespread Intracontinental Neoproterozoic Reworking of a Paleoproterozoic Accretionary Orogen. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 58, p. 150 –164, mar. 2014.

NIXON, G.T & PEARCE, T.H. Laser-interferometry study of oscillatory zoning in plagioclase: the record of magma mixing and phenocryst recycling in calc-alkaline magma chambers, Iztaccihuatl volcano, Mexico. **Am Mineral**, v. 72, p. 1144 – 1162, jan. 1987.

NGONGE, E.D. *et al.* Petrology of the alkaline rocks of the Macau Volcanic Field, NE Brazil, **Lithos**, v. 266-267, p. 453 – 470, dec. 2016b.

NUNES, J. M. G. **Caracterização de Resíduos e Produtos da Britagem de Rochas Basálticas e Avaliação da Aplicação na Rochagem.** 2012. 95 p. Dissertação (Mestrado em Avaliação de Impactos Ambientais em Mineração) - Unilasalle, Canoas, 2012.

OLIVEIRA, D. C. Evolução Magmática da Bacia Potiguar. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, 40., 1998., Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: SBG, 1998. 1, p. 102.

PINHEIRO, S; BARRETO, S. B. **MB-4: Agricultura Sustentável, Trofobiose e Biofertilizantes.** Canoas: Fundação Juquira Candiru/MIBASA, 1996. 276 p.

POMBO, L. C. A. & KLAMT, E. Adsorção de zinco e cobre de dois solos do Estado do Rio Grande do Sul. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 10, p. 191 – 194, 1986.

RAIJ, B. V. *et al.* **Análise Química para Avaliação de Fertilidade de Solos Tropicais.** Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. 285 p.

RAIJ, B. V. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes.** 2. Ed. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2017. 420 p.

RAMOS, C.G. *et al.* Evaluation of the potential of volcanic rock waste from southern Brazil as a natural soil fertilizer. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, p. 2700 – 2706, jan. 2017.

RAMOS, C. G. **Avaliação Preliminar do Pó de Rocha Vulcânica Ácida de Nova Prata – RS, Brasil, Visando Aplicação na Agricultura como Remineralizador de Solos.** 2014. 66 p. Dissertação. (Mestrado em Avaliação de Impactos Ambientais) – Centro Universitário La Salle/Unisalle, Canoas, 2014.

RAMOS, C. G. *et al.* A preliminary study of acid volcanic rocks for stonemeal application. *Environmental Nanotechnology. Monitoring & Management*, v. 1–2, p. 30 – 35, nov. 2014.

RAMOS, C.G. *et al.* A Preliminary Evaluation of Volcanic Rock Powder for Application in Agriculture as Soil a Remineralizer. *Science of the Total Environment*, v. 512–513, p. 371 – 380, apr. 2015.

RAO, A.B; SIAL, A.N. Observations on alkaline plugs near Fortaleza city, Ceará State, Brazil. *In: INTERNATIONAL GEOLOGICAL CONGRESS*, 24., 1972, Montreal. **Anais...** Montreal: 1972. Sec. 14, p. 56-61.

REIS, B. R. dos. **Potencial de Consumo de Remineralizadores como Fonte de Nutrientes na Agricultura e Construção do Modelo de Arranjos Produtivos Locais.** 2015. 49 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Agrônômica) – Escola de Agricultura Luiz Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015.

RITCHEY, E. L *et al.* Agricultural Lime Recommendations Based on Lime Quality. **Agriculture and Natural Resources Publications**, v. 102, p. 1 – 6, 2016.

RIVALENTI, G. *et al.* The effect of the Fernando de Noronha plume on the mantle lithosphere in north-eastern Brazil. **Lithos**, v. 94, p. 111 – 131, mar. 2007.

SAEED, M. & FOX, R. L. Influence of phosphate fertilization on zinc adsorption by tropical soils. **Soil. Sci. Soc. Am. J.**, v. 43, p. 683 – 686, jul. 1979.

SANTOS, T. J. S. *et al.* Nd Isotopes and the Provenance of Metasediments of the Itataia Group, Northwest Borborema Province, NE Brazil. *In: SOUTH AMERICA SYMPOSIUM ON ISOTOPE GEOLOGY*, 4., 2003, Salvador. **Short Papers.** Salvador: CBPM/IRD, 2003. p. 286-289.

SANTOS, T.J.S. *et al.* Evidências de Crosta Juvenil Neoproterozóica no Ceará. *In: CONG. BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, 42., 2004, Araxá. **Anais...** Araxá, MG: SBG, 2004. p. 1175.

SANTOS, V. F. O de. & SANTOS, G. L. dos. Elemento cromo na nutrição mineral de plantas. **Revista da Universidade Vale do Rio Verde**, v. 16(2), p. 1-7, ago./dez. 2018.

SILVA, F. C. da. *et al.* **Análises químicas para avaliação da fertilidade do solo: métodos usados na Embrapa Solos.** (Documentos, 3). Rio de Janeiro: Embrapa-CNPS. p 40, 1998.

SIAL, A.N. The Tertiary Alkaline Province of Fortaleza, State of Ceará, Brazil: Oxygen Isotopes and REE Geochemistry. **Geochimica Brasiliensis**, v. 1(1), p. 41-51, jan. 1987.

SIAL, A. N. Estudo Petroquímico de alguns vulcanitos do nordeste do Brasil. **Relatório Para o Conselho Nacional de Pesquisa**, p 84, 1970.

SILVEIRA, F.V. **Magmatismo Cenozoico da Porção Central do Rio Grande do Norte, NE do Brasil**. 2006. 195 p Tese (Doutorado em Geodinâmica) – Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade do Rio Grande do Norte, Natal, 2006.

SORENSEN, H. **The alkaline rocks**. (Ed). London: John Wiley & Sons, 1974. 622 p.
SUN, S.S. AND MCDONOUGH, W.F. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *In*: Saunders, A.D. and Norry M.J., Eds., **Magmatism in the Ocean Basins**, Geological Society, London, **Special Publications**, v. 42, p. 313-345, 1989.

TAYLOR, S.R. AND MCLENNAN, S.M. The geochemical evolution of the continental crust. **Reviews in Geophysics**, v. 33, p. 241-265, may 1995.

TEIXEIRA, W *et al.* **Interpretação geocronológica da folha AS-24 Fortaleza**. Projeto Radam Brasil, Natal, p 18, 1978.

TEIXEIRA, M.L.A. **Interpretação de Dados Aerogeofísicos, Geológicos e Isotópicos, do Limite Norte do Complexo-Tamboril Santa Quitéria – CE (Província Borborema)**. 2005. 91 p. Dissertação. (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências de Brasília, Universidade de Brasília, Brasília, 2005.

THEODORO, S. H; LEONARDOS, O. H. The use of rocks to improve family agriculture in Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 78(4), p. 721-730, jan./dec. 2006.

THEODORO, S. C. H. de. **A fertilização da terra pela terra: uma alternativa para sustentabilidade do pequeno produtor rural**. 2000. 241 p. Tese. (Doutorado em Desenvolvimento Sustentável) – Centro de Desenvolvimento Sustentável/CDS, Universidade de Brasília/UNB, Brasília, 2000.

THOMAZ FILHO, A. Datações Radiométricas de Rochas Ígneas Básicas da Bacia do Ceará. Rio de Janeiro, Petrobras/Cenpes. **Rei. int. Cenpes**, 673.4462, 1983.

THOMPSON. Magmatism of the British Tertiary Volcanic Province.Scott. **J. Geol.**, v. 18, p. 49-107, 1982.

TROMPETTE, R. **Geology of Western Gondwana (2000-500 Ma): Pan-African-Brasiliano aggregation of South America and Africa**. 1 ed. USA: A.A. Balkema, Rotterdam, 1994. 350 p.

V SCHMID, R. Descriptive nomenclature and classification of pyroclastic deposits and fragments: Recommendations of the IUGS Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks. **Geology**. The Geological Society of America. Boulder, Co., v. 9, p. 41-43, 1981.

VAN SCHMUS, W.R. *et al.* U/Pb and Sm/Nd geochronologic studies of eastern Borborema Province, northeastern Brazil: initial conclusions. **J. South Am. Earth Sci.** v. 8, p. 267-288, jul. 1995.

VANDOROS, P. & OLIVEIRA, M. A. F. Sobre o Fonólito de Mecejana, Ceará. **An. Acad. bras. Ciênc.**, v. 40(2), p. 203-206, 1968.

VASCONCELOS *et al.* **Folha Fortaleza AS.24**. Fortaleza, 2004. 1 mapa. color. Escala 1:1.000.000. Programa Geologia do Brasil. MME. Secretaria de Minas e Metalurgia. Serviço Geológico do Brasil-CPRM, 2004.

VASCONCELOS, R.M. *et al.* **Geofísica em levantamentos geológicos**. Rio de Janeiro, DIGEOF-CPRM, 1990. 172 p.

VIANA, R. R.; BATTILANI, G. A. Geochemistry and petrography of alkaline rocks from Monte Santo Alkaline Intrusive Suite, Western Araguaia Belt, Tocantins State, Brazil. **Journal of Geoscience and Environment Protection**, v. 2, p. 72-79, jan. 2014.

VON FRAGSTEIN, P. *et al.* Verwitterungsverhalten Silikatischer Gesteinsmehle unter Laborbedingungen (in German). **Z. Pflanzenern Bodenk**, v. 151, p. 141-146, 1988.

WEAVER, B. L. Geochemical of the highly - undersaturated ocean island basalt suites from the South Atlantic Ocean Fernando de Noronha and Trindade. **Contributions to Geology and Petrology**, v. 105, p. 502-515, oct. 1990.

WERNECK, L.S. **Geoquímica das Rochas Alcalinas Máficas Subaflorantes na Zona Urbana de Fortaleza-CE**. 2018. 87 p. Dissertação. (Mestrado em Geologia) – Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.