

FÁBIO SOARES DE OLIVEIRA

**FOSFATIZAÇÃO EM SOLO E ROCHA EM ILHAS
OCEÂNICAS BRASILEIRAS**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Viçosa, como
parte das exigências do Programa de
Pós-Graduação em Solos e Nutrição de
Plantas, para obtenção do título de
“*Magister Scientiae*”

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2008

FÁBIO SOARES DE OLIVEIRA

**FOSFATIZAÇÃO EM SOLO E ROCHA EM ILHAS
OCEÂNICAS BRASILEIRAS**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Viçosa, como
parte das exigências do Programa de
Pós-Graduação em Solos e Nutrição de
Plantas, para obtenção do título de
“*Magister Scientiae*”

APROVADA: 08 de fevereiro de 2008.

Prof. Carlos Ernesto G. R. Schaefer
(Co-orientador)

Prof. Liovando Marciano da Costa

Prof. Felipe Nogueira Bello Simas

Pesq. João Herbert Moreira Viana

Prof. Walter Antônio Pereira Abrahão
(Orientador)

*Às pessoas mais grandiosas que conheci - Maria Moreira de Oliveira e
José Soares de Oliveira, mãe e pai - meu eterno amor e carinho.*

Dedico

AGRADECIMENTOS

A Deus e à Virgem Maria por iluminarem meus caminhos e tornarem meus dias cada vez mais especiais.

Aos meus pais, exemplos de amor e cumplicidade, para os quais devo todas as conquistas e felicidades.

Às minhas irmãs (Vânia, Nange e Rosa) que tanto amo.

À minha família, tios e tias, sobrinhos, primos, cunhados e tantos outros que tornam nossa convivência cada vez mais prazerosa.

À UFV, seus professores, funcionários e colegas dos Departamentos de Solos e Geografia, pelo acolhimento e oportunidade de aprender.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (CAPES) e pela concessão da bolsa de pesquisa.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento da pesquisa.

À Marinha do Brasil, por ter dado o apoio logístico para que fosse possível a coleta do material nas ilhas.

Ao Professor Walter Antônio Pereira Abrahão pela orientação, paciência, amizade e ensinamentos durante todo o trabalho.

Ao professor Carlos Ernesto G. R. Schaefer pela orientação, amizade, confiança e ensinamentos que ficarão pra vida toda.

Aos professores Liovando Marciano da Costa, Filipe Bello Simas, João Herbert Moreira Viana e Jaime Wilson Vargas pelos conselhos e por aceitar construir este sonho comigo.

Aos professores da graduação em Geografia pelos ensinamentos, em especial aos queridos e amigos André Lopes de Faria e Maria Isabel.

Aos professores do Departamento de Solos pelo apoio e ensinamentos.

Aos queridos João Ker, Elpidio e Arlicélio pelo incentivo e força constante.

À Claudinha, pela boa mesa, conselhos e por ser uma irmã pra mim.

À Eliane, pela oportunidade de trabalho que virou uma amizade eterna.

À Luciana e Tati, secretárias da Pós graduação a quem tanto recorri.

Aos meus amigos pra vida toda que fizeram de Viçosa a melhor fase da minha vida: Márcio (Jones), Marcinha (PRV), Gra (Baby), Luís Ricardo (B&V), Michelle Salles (Miii), Fernanda Costa, Gabi (RL), Cecília, Tiagão, Karoley (MS), Fernanda Xavier (BG), Akenya, Rafa, Alê, Vini, Tiago, Gigi, Nilda, Lauds, Pacheco, Michelle

França, Raquel, Diana, Vanessa Braga, Gilberto, Verônica, Letícia e tantos outros que por descuido eu não citei.

Aos amigos da pós-graduação pelos momentos de estudos, diversão e alegria.

A Juliana Raposo e Aloncio pelo trabalho e amizade.

Aos meus queridos alunos da Geografia.

A todas as pessoas que participaram da minha vida de um modo especial, o meu mais valioso agradecimento.

BIOGRAFIA

FÁBIO SOARES DE OLIVEIRA, filho de José Soares de Oliveira e Maria Moreira de Oliveira, nasceu na cidade de Belo Horizonte, Minas Gerais, no dia 21 de Novembro de 1983.

Em 05 de Maio de 2002, ingressou no curso de Geografia pela Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, graduando-se em 05 de Maio de 2006. Também em Maio de 2006, ingressou no Programa de Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas, do Departamento de Solos, da mesma IES.

ÍNDICE

RESUMO.....	vi
ABSTRACT.....	vii
1. INTRODUÇÃO GERAL.....	1
CAPÍTULO 1	
<i>Fosfatização de Rochas e Solos no Arquipélago de São Pedro e São Paulo,</i> <i>Atlântico Norte.....</i>	13
CAPÍTULO 2	
<i>Solos Fosfatizados da Ilha Rata, Arquipélago de Fernando de Noronha,</i> <i>Atlântico Sul.....</i>	76
2. CONCLUSÃO GERAL.....	114

RESUMO

OLIVEIRA, Fábio Soares de, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, Fevereiro 2008. **Fosfatização em solo e rocha em ilhas oceânicas brasileiras.** Orientador: Walter Antônio Pereira Abrahão. Co-Orientadores: Carlos Ernesto Gonçalves Reynaud Schaefer e Jaime Wilson Vargas de Mello.

A utilização das ilhas oceânicas por diversas espécies migratórias de aves faz com que estes animais depositem seus excrementos sobre seus substratos, fosfatizando-os. A fosfatização tem sua ocorrência relacionada a condições ambientais específicas e, por isso, é capaz de revelar evidências de mudanças ambientais pretéritas, associadas ao clima, correntes oceânicas, mudanças do nível do mar, entre outras. Além disso, exerce forte influência na ciclagem de nutrientes e na produtividade biológica das áreas marinhas adjacentes. Mesmo assim, pouco se conhece sobre este processo e como ele pode afetar a formação de solos insulares. Diante disso, este trabalho objetivou caracterizar a fosfatização nos Arquipélagos de São Pedro e São Paulo (ASPSP) e Fernando de Noronha (AFN), mais especificamente nas ilhas Belmonte e Rata, respectivamente. Foram coletadas amostras de rochas e solos fosfatizados nos dois arquipélagos. Os solos foram submetidos a análises químicas, físicas e microscópicas. As rochas, por sua vez, foram submetidas a análises químicas de elementos totais, Difração de Raio-X, microscopia eletrônica de varredura e microsondagens.

No ASPSP foram observados seis produtos da fosfatização. As rochas fosfatizadas compreendem tipos ou feições que se caracterizam pela acumulação e/ou interação de soluções ricas em fósforo com o embasamento (rochas ultramáficas infracrustais). Dentre tais feições, destacam-se crostas fosfáticas espessas sob peridotitos milonitizados, espeleotemas ou florescências de fosfatos nas bordas e interior de fraturas, formas de fosfatos percolados preenchendo fraturas intemperizadas ou constituindo revestimento framboideais em suas bordas, crostas esverdeadas ricas em P, Ni e Cr, guano e solos ornitogênicos, sendo o último um perfil de Neossolo Litólico com altos teores de P e caráter lítico fragmentário.

Na Ilha Rata, AFN, são encontrados Neossolos nas baixadas, associados a um relevo ruiforme proveniente da dissolução de calcarenitos, cujas propriedades físicas e químicas indicam sinais de sua evolução pedogenética, e Cambissolos no restante da Ilha. Os Cambissolos são originados de arenitos carbonáticos e de lavas ankaratríticas e se apresentam mais intemperizados. A fosfatização destes solos se processou em condições pretéritas, onde, numa fase mais árida, processos de coluvionamento misturaram à matriz carbonática, já fosfatizada, sedimentos aluminosos também fosfatizados. O que se observa, a partir disso, é a variscitação dos fragmentos de P-Ca constituindo agregados oolíticos de P-Al.

ABSTRACT

OLIVEIRA, Fábio Soares de, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February 2008. **Phosphatization in soil and rocks in Brazilian oceanic islands.** Adviser: Walter Antônio Pereira Abrahão. Co-Advisers: Carlos Ernesto Gonçalves Reynaud Schaefer and Jaime Wilson Vargas de Mello.

Oceanic islands are breeding places for several migratory species of birds whose their excrements are deposited on to the surface, besing subject to phosphatization. The occurrence of phosphatization has been related to specific environmental conditions and, for this reason, it is capable to indicate past environmental changes, associated to climate, oceanic currents, sea level changes, amongst others. Besides, it has strong influence in nutrients cycling and biological productivity of adjacent sea. Despite that, litte is known about this process, and how it can affect the formation of insular soils. Based on that, this work aimed at characterizing the phosphatization in São Pedro and São Paulo Archipelagos (ASPSP) and Fernando de Noronha (AFN), more specifically in Belmonte and Rata Islands, respectively. Samples of rocks and soils were collected in those two islands, and were submitted to chemical, physics, and microscopic analyses. The rocks were also submitted to total elements chemical analyses, X-Ray diffraction and scanning electronic microscopy.

Six products of phosphatization were observed in ASPSP. Phosphates rocks were characterized by the accumulation and/or interaction of P-rich solutions with the substrate. Among them, it thick phosphates crusts occur on milonitized peridotites, phosphates espeleotems on the borders and inner fractures. Also we find phosphates filling out weathering fractures or constituting framboidals coats on their borders, as well as rich greenish phosphate crusts with Ni and Cr, guano and ornitogenic soils. The latter is represented by a Lithosol with high P content and fragmentary lithic character.

In Rata Island, Noronha Arquipelago, we identified sloping Neosols, associates with calcarenites dissolution, whose physical and chemical properties indicate signs of pedogenetic evolution, and Cambisols in the rest of the island. These Cambisols are originated from calcarenites and basalts under low weathering degree. Phosphatization of these soils was processed in past conditions, under vanying humid to arid conditions . Colluviation processes mixed to phosphatized carbonatic san with a Al-P coating. Through this, it is observed a variscitization of P-Ca fragments, constituting P-Al oolitic aggregates.

1. INTRODUÇÃO GERAL

As ilhas, figurando como ambientes *sui generis* no planeta, têm despertado, cada vez mais, o interesse da comunidade científica. Se outrora foram alvos de expedições estritamente exploratórias, cujo objetivo central era o reconhecimento e conquista de novas áreas, elas agora representam verdadeiros territórios de estudos da biodiversidade e da manutenção de uma infinidade de ecossistemas. O isolamento geográfico associado às condições específicas de formação geológica e evolução biológica são responsáveis pela indução de um conjunto de fatores bióticos e abióticos bastante particulares, tais como um alto grau de endemismo e participação ativa na reprodução e alimentação de diversos organismos marinhos e terrestres, como as aves migratórias. Além disso, representam áreas estratégicas na organização política e gestão das atividades marítimas de diversos países, muitas vezes sendo ocupadas por bases militares ou mesmo por postos avançados de monitoramento e vigilância.

Sumariamente reconhecidas como massas de terras relativamente pequenas se comparadas aos continentes, circundadas de águas doces ou salgadas por todos os lados, as ilhas podem ser classificadas como sendo continentais ou oceânicas (ALMEIDA, 2006). O termo *ilhas oceânicas* é uma referência àquelas cuja sustentação se encontra em assoalho oceânico, ou seja, fora dos limites das plataformas continentais e cujos processos vulcânicos, tectônicos e biológicos seriam responsáveis por sua formação. *Ilhas continentais*, por sua vez, mantêm-se associadas aos litorais, considerando que apresentam os mesmos aspectos geológicos e estruturais dos continentes. Incluem-se nesse grupo as ilhas fluviais e/ou formadas por processos sedimentares.

A morfogênese de uma ilha ou conjunto delas pode estar associada a processos bastante diversificados, sendo seus resultados perceptíveis no mosaico de ambientes litoestruturais que as constituem. Dentre esses processos, destacam-se os de caráter vulcânico, tectônico, sedimentar e biológico. As ilhas vulcânicas estariam, em sua

maioria, relacionadas à atuação de *hot spots* ao longo de zonas de fraturas, cuja atividade pode ser responsável pela formação de arcos de ilhas ou, ainda, cadeias de montes submarinos, ou *guyots*, quando esses maciços se encontrarem abaixo do nível do mar. Em águas quentes, como as de regiões tropicais, esses gigantescos corpos vulcânicos, atingindo em alguns casos alturas superiores a 5.500 m, como é o caso da Ilha da Trindade (ES), tendem a ser colonizados por organismos coralíneos formando ilhas por atividade biológica. Caso sejam submetidas à atuação da erosão marinha, podem ser originados os atóis. Da mesma maneira, eventos tectônicos podem soerguer consideráveis porções da litosfera por falhamentos cisalhantes dando origem às ilhas cuja gênese está diretamente ligada à tectônica de placas. Em geral, as ilhas por estes processos formadas são muito interessantes do ponto de vista geológico, como é o caso do Arquipélago de São Pedro e São Paulo (Atlântico Norte). Ilhas sedimentares, por fim, são produtos diretos de ambientes agradacionais cujo pacote detrítico é suficientemente volumoso para constituir porções emersas. Em ambientes fluviais, leitos anastomosados são característicos por possuírem bancos arenosos ao longo do perfil longitudinal, cuja coalescência tende a formar ilhas. A Ilha do Bananal, de idade quaternária, é a maior ilha fluvial do mundo e sua gênese está associada a processos estritamente sedimentares.

Do ponto de vista ecológico, os ambientes insulares são cenários para a compreensão evolutiva da vida, sobretudo diante de sua perfeita adequação aos princípios da biogeografia de ilhas (MACARTHUR & WILSON, 2001). Na medida em que a elucidação sobre as questões referentes à distribuição dos seres vivos sobre a superfície do planeta se coloca como sendo fundamental à conservação destes, os fatores que explicam essa distribuição devem ser considerados nas suas mais variadas manifestações. Em outras palavras, fatores como a dispersão irregular dos oceanos, continentes e ilhas, as diversas formas do relevo, a variedade climática e as diferentes composições de rochas, assim como os diferentes tipos de solos e suas características peculiares (PEREIRA, 1996; ALMEIDA, 2006), podem afetar o comportamento e espacialização de espécies animais e vegetais. O conhecimento dos mesmos nos proporciona compreender a diversidade, a ausência ou a presença, de determinadas espécies em uma dada geobiocenose ou “comunidade integrada em seu meio ambiente” (STODDART, 1974 apud TROPPEMAIR, 2002). Ilhas, por sua vez, seriam geobiocenoses ideais para a realização de tais estudos, oferecendo modelos mais confiáveis sobre a organização dos distintos sistemas ecológicos. Da mesma maneira, estima-se que as ilhas, somadas às suas áreas oceânicas adjacentes, abriguem mais da

metade da biodiversidade marinha. A importância destes ambientes também pode ser entendida pelo alto grau de endemismo de espécies marinhas, pois aproximadamente 12 dos 18 centros mundiais de endemismo marinho (espécies que se ocorrem em uma determinada região) ocorrem nas proximidades das ilhas (THE NATURE CONSERVANCY, 2007).

No Brasil, dada a extensão do seu litoral e área oceânica adjacente, são encontrados diversos conjuntos de ilhas e ilhotas, destacando cinco arquipélagos oceânicos principais: Fernando de Noronha (AFN); São Pedro e São Paulo (ASPS); Trindade e Martin Vaz e Atol das Rocas (Figura 1). À exceção de Fernando de Noronha, todos os outros arquipélagos permanecem como áreas militares e/ou de pesquisas, sem autorização para o desenvolvimento de atividades turísticas.

Das pesquisas realizadas nas ilhas oceânicas brasileiras até o momento, prevalecem os estudos que procuraram retratar flora e fauna marinhas, sendo escassos trabalhos em ambientes terrestres. Destes, destacam-se os estudos desenvolvidos por Almeida (1955, 1961, 1965, 2006) relativos à geologia e geomorfologia, por Campos et al (2005) também sobre geologia e por Alves (1998, 2006) sobre a botânica. Demais contribuições pertinentes à geologia podem ser obtidas em Milet-Mureau (1797), Prior (1900), Veltheim (1950), Soares (1964), Cordani (1970) e Weaver (1990). Em relação aos solos, as pesquisas tornam-se ainda mais escassas, sendo conhecidos apenas os trabalhos de Batistela (1993) e Marques (2004) sobre os solos de Fernando de Noronha, de Paul Vageler (VELTHEIM, 1950) sobre os solos de Trindade e, mais recentemente, de Clemente (2006), também sobre os solos de Trindade. Tal lacuna de conhecimento, muitas vezes responsável pelo manejo inadequado destes ambientes, indica um desafio a ser superado: desbravar tais *sentinelas do oceano* (MARLIERE, 2006) sob uma perspectiva pedológica e gerar um conjunto de informações sobre os solos que poderão subsidiar medidas intervencionistas, sejam elas de recuperação e/ou preservação.

Observações preliminares dos resultados até então alcançados sobre os solos das ilhas oceânicas brasileiras (CLEMENTE, 2006; SCHAEFER et al., 2006, OLIVEIRA et al, 2004; MARQUES, 2004; BATISTELA, 1993) levam a crer que a interação conjunta do material de origem, do clima, do relevo, dos organismos e do tempo, como fatores de formação do solo (JENNY, 1941), realiza-se de maneira bastante atípica nas ilhas oceânicas. Isso ocorre porque, tanto do ponto de vista geológico quanto climático e biológico, estes ambientes apresentam características peculiares de formação e evolução, além de serem bastante recentes no tempo e sofrerem influência direta da

maritimidade. Como resultado, observa-se solos altamente diferenciados em relação àqueles encontrados nos continentes, reconhecidos nos preceitos de Bockheim (2005) como sendo endêmicos, o que confirma a necessidade de melhor estudá-los (CARDOSO, 1958; PISSARRA ET AL., 1965; FARIA, 1974).



Figura 1 – Localização dos Arquipélagos Oceânicos Brasileiros no Oceano Atlântico.
Fonte: Almeida (2006)

Em geral, a maior parte dos estudos sobre solos de ilhas oceânicas (CARDOSO, 1958; NUNES, 1962; FARIA, 1974; LIMA, 2003; MARQUES, 2004) tem evidenciado uma associação entre as características dos solos e o material de origem, majoritariamente de natureza vulcânica e/ou biogênica. Essa associação responderia por uma predominância de solos menos intemperizados e, mesmo quando mais desenvolvidos, preservando ainda muitas de suas características iniciais, tais como alta fertilidade. Vale acrescentar, entretanto, que não só os fatores de formação apresentam particularidades que influenciarão diretamente nas propriedades dos solos, mas, sobretudo, as relações estabelecidas entre eles, expressas, neste contexto, pelos processos pedogenéticos. Assim sendo, o grande avanço na compreensão das características dos solos de ilhas oceânicas reside, justamente, na compreensão destes processos.

Tal como em áreas continentais, os processos gerais de formação de solos em ambientes insulares são caracterizados pelas adições, perdas, transferências e transformações de materiais (SIMONSON, 1959). A interação, no tempo e no espaço, entre diferentes tipos de materiais induziria outros processos pedogenéticos, reconhecidos como sendo específicos. Tais processos se caracterizam pela predominância, no sistema solo, da dinâmica de um determinado componente em detrimento de outros, configurando propriedades ou atributos específicos, sejam eles químicos, físicos, mineralógicos ou morfológicos. Muitos dos processos específicos exerceriam forte influência na pedogênese insular, sendo mais conhecidos aqueles característicos do ambiente marinho, dentre eles o Halomorfismo, provocado pela constante emissão de spray salino sobre os solos em formação. Outro processo de destaque seria a Fosfatização.

Mesmo que tenha sido ignorada por muitos autores da Pedologia Clássica como um processo específico de formação de solos, a fosfatização e, por consequência, sua ocorrência em muitas áreas sob ação ornitogênica, tem se demonstrado como um componente fundamental na compreensão da gênese de solos em áreas afetadas pelos excrementos de alguns animais, principalmente as aves (SCHAEFER, 2004). Identificada como o processo pelo qual ocorre uma interação entre o material depositado (excremento) e o substrato (solo ou rocha), resultando em alterações físicas, químicas, mineralógicas e morfológicas do substrato, sobretudo pela impregnação de diferentes formas de fosfatos, ele tem despertado maior interesse por parte dos pedólogos que buscam compreender a origem de solos em ambientes como ilhas oceânicas e áreas criogênicas.

Os estudos sobre a fosfatização vêm sendo realizados com maior aprofundamento na gênese dos solos conhecidos como Ornitogênicos. Grande parte dos estudos sobre rochas e solos fosfatizados foram realizados em áreas periglaciares, sobretudo na Antártica Marítima, e retratam as reações no substrato com o depósito de excrementos de aves como os pingüins (TATUR E MYRCHA, 1993; 1997; MYRCHA et al, 1985; TATUR E BARCZUK, 1985; TATUR, 1989; BLUME et al, 2002; SCHAEFER et al., 2004; MICHEL, 2005; SIMAS, 2006). Tais estudos têm conduzido à hipótese de que a fosfatização é, efetivamente, um dos principais responsáveis pela gênese de solos nestes ambientes, chegando, inclusive, a suscitar modificações nos sistemas taxonômicos existentes (SIMAS, 2006). Ficam evidenciados, pelas pesquisas, fosfatos minerais típicos de solos agrícolas fertilizados e raros em ambientes naturais,

ocorrendo como produtos diretos do processo em questão, sendo encontrados diversos minerais de argila incomuns em solos de outros ambientes (TATUR E MYRCHA, 1993; SCHAEFER et al, 2004), tais como fluorapatita $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$, brushita $\text{Ca}(\text{HPO}_4)\cdot 2\text{H}_2\text{O}$, leucofosfita $\text{KFe}^{3+}_2(\text{PO}_4)_2(\text{OH})\cdot 2\text{H}_2\text{O}$, minyulita $\text{KAl}_2(\text{PO}_4)_2(\text{OH},\text{F})\cdot 4\text{H}_2\text{O}$, taranakita $(\text{K},\text{Na})_3(\text{Al},\text{Fe}^{+3})_5(\text{PO}_4)_2(\text{PO}_3\text{OH})_6\cdot 18\text{H}_2\text{O}$, vivianita $\text{Fe}^{3+}_2(\text{PO}_4)_2\cdot 8\text{H}_2\text{O}$, etc. Nestas áreas, confirma-se a importância do aporte de nutrientes dos solos ricos em P na manutenção da produtividade primária dos ecossistemas aquáticos circundantes (SCHAEFER et al., 2004).

Sobre os estudos da fosfatização em ilhas oceânicas, raros são os trabalhos encontrados na literatura, destacando-se o estudo desenvolvido por Hutchinson (1950). Trata-se de um completo compêndio sobre a biogeoquímica de excrementos de vertebrados, principalmente aves, ao longo de muitas ilhas e áreas costeiras do planeta e, mesmo que a fosfatização não representasse objetivo central do trabalho, ela acaba por ser amplamente analisada pelo autor em diferentes situações, abrangendo, inclusive, áreas brasileiras, como o Arquipélago de São Pedro e São Paulo. Neste, o autor destaca a formação de esmaltes fosfáticos cobrindo as rochas (interpretadas como sendo dunitos), bem como gretas e preenchimentos fosfáticos em fraturas sem, contudo, explicar-lhes a gênese. Faz, entretanto, referência a outras observações realizadas por diferentes autores que consideram tais estruturas como sendo formadas pela interação entre os excrementos depositados e as condições climáticas de precipitação. Ainda em ilhas oceânicas, a fosfatização fora tema central de estudos no Arquipélago de Tuvalu, Pacífico Central, onde o autor (ROGERS, 1992) buscou compreender a associação entre solos e rochas fosfatizadas em regimes climáticos afetados diretamente pela maritimidade.

Nas ilhas oceânicas brasileiras, além do trabalho supracitado, as áreas fosfatizadas despertaram o interesse dos pesquisadores de maneira bastante diferenciada ao longo do tempo. São conhecidos os levantamentos do geólogo Orville Derby & Barros (1881) acerca dos fosfatos de Fernando de Noronha, localizados na Ilha Rata, cujo objetivo era estritamente econômico, e do naturalista Charles Darwin (1844) que, durante expedição científica em volta ao mundo, desembarca no ASPSP e atesta o recobrimento das rochas por crostas provinda dos excrementos das aves. Renard (1882), citado por Hutchinson (1950), também teve acesso às amostras de rochas coletadas no ASPSP pela expedição geológica Challenger realizando análises químicas das mesmas; assim como fizera Washington em 1929 (HUTCHINSON, 1950) para veios

fosfatizados, descritos como gretas (cracks) entremeadas pela rocha, neste mesmo arquipélago.

Almeida (1955), quando do levantamento petrográfico do AFN, fez referência aos arenitos fosfáticos (Arenito Caracas) circundados por lavas da Formação Quixaba, na Ilha Rata, sem, contudo, fazer menção à gênese destes materiais por intermédio da existência de ninhais na ilha. Apenas Flicoteaux e Melfi (2005) procuraram caracterizar a origem de crostas fosfáticas nos basaltos do Arquipélago de Abrolhos, ressaltando as relações deste material com os estudos paleogeográficos, como, por exemplo, a predição de antigos comportamentos climáticos na região.

De fato, as ilhas oceânicas representam importantes áreas de nidificação de diversas espécies de aves, tais como atobás (sulídios), fragatas, beneditos, viuvinhas, gaivotas, entre outras. Como consequência dessa nidificação, esses ambientes apresentam altos teores de fósforo, dependendo, sobretudo, do tipo de população de aves, do alcance da exploração marinha e do tempo de ocupação destas associados às características do substrato em reação. Logo, a fosfatização assume papel tão relevante na compreensão da gênese dos solos insulares que acabaria por induzir a hipótese de que, sem um conhecimento amplo e detalhado da maneira como ela ocorre e das alterações que produz, de nada adiantaria o estudo dos solos na maior parte das ilhas oceânicas conhecidas. Tal interação surge como mais uma particularidade destes ambientes, além de possuir uma abrangência geográfica considerável e exercer forte influência na ciclagem de nutrientes e na produtividade biológica das áreas marinhas adjacentes, pelo retorno de nutrientes, via lixiviação, de volta ao mar.

São apresentadas algumas hipóteses a partir do que foi exposto:

- A interação entre o excremento de aves e o substrato (rochas, solos ou sedimentos) tem como resultado a gênese de produtos distintos do material original e entre si.
- Os produtos da alteração geoquímica via fosfatização de rochas e solos são indicadores paleogeográficos na medida em que podem representar condições climáticas, geomórficas e/ou edáficas pretéritas, evidenciando a existência de paleoambientes.

A partir de tais premissas, o objetivo central deste trabalho foi caracterizar detalhadamente o processo de fosfatização ocorrente em algumas ilhas oceânicas brasileiras, como sendo um dos principais responsáveis pela formação de solos nestes

ambientes. As áreas selecionadas como mais representativas da ocorrência da fosfatização foram os Arquipélagos de São Pedro e São Paulo e Fernando de Noronha.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, F. F. M.; *Geologia e Petrologia do Arquipélago de Fernando de Noronha*. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Prospecção Mineral (DNPM), 1955, 181 p. (Monografia XIII).

_____. *Geologia e Petrologia da Ilha da Trindade*. Rio de Janeiro: DNPM/DGM, 1961. 197 p. (Monografia XIX).

_____. As ilhas oceânicas brasileiras e uma hipótese sobre a origem do Atlântico. In.: *Anais da Academia Brasileira de Ciências, Rio de Janeiro*, v. 37, n. 1, 1965. 41–145 pp.

_____. Ilhas oceânicas brasileiras e suas relação com a tectônica atlântica. In.: *Terræ Didática*. v. 2, n. 1. 2006. p. 3-18. Disponível em <http://www.ige.unicamp.br/terraedidatica/>. Acesso em 05/02/07.

ALVES, R.J.V. *Ilha da Trindade & Arquipélago Martin Vaz: Um Ensaio Geobotânico*. Rio de Janeiro: Serviço de Documentação da Marinha, 144 p. 1998.

_____. Terrestrial Vascular Floras of Brazil's Oceanic Archipelago. In.: ALVES, R. V.; CASTRO, J. W. A. (Org.). *Ilhas Oceânicas Brasileiras: da pesquisa ao manejo*. Brasília (DF): Ministério do Meio Ambiente, 2006. 83-104 pp. (Capítulo 04).

BATISTELLA, M. *Cartografia Ecológica do Arquipélago de Fernando de Noronha*. 236 f. Dissertação de Mestrado (Biociências). Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993. 236 p.

BLUME, H.P., BEYER, L., KALK, E., KUHN. Weathering and soil formation. In: Beyer, L., Bölder, e.M. (Eds.), *Geoecology of Antarctic Ice-Free Coastal Landscapes*. Springer-Verlag, Berlin, 2002. pp. 114–138.

BLUME, H.P., CHEN, J., KALK, E., KUHN, D. Mineralogy and weathering of antarctic cryosols. In: Kimble, J. (Ed.), *Cryosols — Permafrost Affected Soils*. Springer-Verlag, Berlin, 2004. pp. 415–426.

BOCKHEIM, J.G. Soil endemism and its relation to soil formation theory. *Geoderma* 129, 2005. pp 109–124.

BONATTI, E. Serpentinite protrusions in oceanic crust. *Earth and Planetary Sciences*. Letters. v. 32. 1976. pp. 107-113.

CAMPOS, T. F. da C.; VIRGENS NETO, J.; SRIVASTARA, N. K.; PETTA, R. A.; HARTMANN, L. A.; MORAES, J. F. S.; MENDES, L.; SUSAN, R. M. Arquipélago de São Pedro e São Paulo: soerguimento de rochas infracrustais no Oceano Atlântico. In: Winge, M.; Schobbenhaus, C.; Berbert-Born, M.; Queiroz, E. T.; Campos, D. A.; Souza, C. R. G.; Fernandes, A. C. S. (Edit.) *Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil*. Publicado na Internet em 24/12/2005 no endereço <http://www.unb.br/ig/sigep/sitio002/sitio002.pdf>

CARDOSO, J.C. - *Caracterização das principais unidades pedológicas do "Esboço da carta dos solos de S. Tomé"*. Junta de Investigações do Ultramar, Lisboa. Estudos, Ensaios e Documentos, 1958. 53- 88 p.

CLEMENTE, E. de P. SCHAEFER, C. E. R. G.; ALBUQUERQUE FILHO, M. R. OLIVEIRA, F. S. ALVES, R. W. MELO, V. F. Solos Endêmicos da Ilha da Trindade. In.: ALVES, R. V.; CASTRO, J. W. A. (Org.). *Ilhas Oceânicas Brasileiras: da Pesquisa ao Manejo*. Brasília (DF): Ministério do Meio Ambiente, 2006. 61-82 pp. (Capítulo 03).

CLEMENTE, E. de P. *Ambientes Terrestres da Ilha da Trindade, Atlântico Sul: caracterização do solo e do meio físico como subsídio para criação de uma Unidade de Conservação*. 210 f. Tese de doutorado (Solos e Nutrição de Plantas). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2006. 210 f.

CORDANI, U.G. *Idade do vulcanismo do Oceano Atlântico Sul*. São Paulo: Instituto de Geociências e Astronomia, Boletim IGA, 1, p. 9-75. 1970.

DARWIN. C. S. *Geological observations on the volcanic islands, visited during the voyage of HMS Beagle, together with some brief notices on the geology of Australia and the Cape of Good Hope*. London: Smith, Elder and Co. 1844. 175 p.

DERBY, O. A.; BARROS, L. M. *Jazidas de fosfato de cal na Ilha Rata do Arquipélago de Fernando de Noronha*. Rio de Janeiro: Min. Agricultura, 1881. (Relatório)

EMBRAPA – Centro Nacional de Pesquisa de Solos. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. 2 ed. Brasília: EMBRAPA-SPI, 2006, 420 p.

FARIA, F.X. *Os solos da Ilha do Fogo (Arquipélago de Cabo Verde)*. Junta de Investigações científicas do Ultramar. Rev.Estudos, Ensaios e Documentos, nº129, Lisboa, 1974. 146 p.

FIELDS, M.; PERROT, K. W. The nature of allophone in soils. III. Gypsum effects on growth and subsoil chemical propieties. *Soil Sci. Soc. Am. Journal*. v. 2, 1966. pp 623-629.

FLICOTEAUX, R.; MELFI, A. Les croûtes phosphates des basalts de l’archipel d’Abrolhos (Bahia, Brésil): des roches formées au Quaternaire récent à partir de guanos. In.: *Earth and Planetary Sciences*. v. 330. 2005. pp 193-200.

HUTCHINSON, G. E. *The biogeochemistry of vertebrate excretion*. Bulletin of the American Museum of Natural History. v. 96. New York: 1950. 554 p.

JENNY, H. *Factors of Soil Formation: a system of quantitative pedology*, New York: McGraw-Hill. 1941. 281 p.

LIMA, J.F.W.F. Caracterização e classificação de Neossolos do Arquipélago de Fernando de Noronha. In CD: XXIX Congresso Brasileiro de Ciência do Solo/ Solo: Alicerce dos Sistemas de produção. *Anais*. Ribeirão preto/SP, 2003.

MACARTHUR, R. H. & WILSON, E. O. *The Theory of Island Biogeography*. Ed. Princenton University Press. 2001. 224 p.

MARLIERE, E. R. Ilhas oceânicas brasileiras: sentinelas avançadas do Brasil. In.: ALVES, R. V.; CASTRO, J. W. A. (Org.). *Ilhas Oceânicas Brasileiras: da Pesquisa ao Manejo*. Brasília (DF): Ministério do Meio Ambiente, 2006. 17-25 p. (Capítulo 01).

MARQUES, F.A. *Caracterização e classificação de solos da Ilha de Fernando de Noronha (PE)*. 101 f. Dissertação de Mestrado (Solos e Nutrição de Plantas). Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife (PE), 2004. 101 p.

MELSON, W. G.; HART, S. R.; THOMPSON. Paul’s Rocks, Equatorial Atlantic: Petrogenesis, Radiometric Ages, and Implications on Sea-floor Spreading. *Geological Society of America Memoir*, Boulder, v. 132. 1972. pp. 241-272.

MICHEL, R. F. M. *Solos Criogênicos e Ornitogênicos da área de entorno da Ponta Llano, Antártica Marítima*. 146 f. Dissertação de Mestrado (Solos e Nutrição de Plantas). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2005. 146 f.

MILET-MUREAU, M.L.A. *Voyage de La Pérouse autour du monde*. Paris, 2, p. 26-29, 1797.

MYRCHA, A., PIETR, S.J., TATUR, A. The role of Pygoscelid penguin rookeries in nutrient cycles at Admiralty Bay, King George Island. In: Siegfried, W.R., Condy, P.R., Laws, R.M. (Eds.), *Antarctic Nutrient Cycles and Food Webs*. Springer-Verlag, Berlin, 1985. pp. 156–163.

NUNES, M. *Os solos da Ilha de São Nicolau (arquipélago de Cabo Verde)*. Junta de Investigações de Ultramar, Lisboa. Rev.Estudos, Ensaios e Documentos, nº94, Lisboa,, 1962. 108 p.

OLIVEIRA, F. S. de; CLEMENTE, E. de P.; SCHAEFER, C, E. G R. Evolução do Modelado da Ilha da Trindade: uma contribuição. In: I ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE GEOMORFOLOGIA E V SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, 2004, Santa Maria (RS). *Anais do I Encontro Latino-americano de Geomorfologia e V Simpósio Nacional de Geomorfologia: Geomorfologia e Riscos Ambientais*. Ed. UFSM, 2004.

PEREIRA, João B. da S.; ALMEIDA, Josimar Ribeiro de. Biogeografia e Geomorfologia. In.: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B.. (Orgs). *Geomorfologia e Meio ambiente*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1996.

PISSARRA, J.B. - *Mineralogia dos solos de São Tomé e Príncipe*. Junta de Investigações do Ultramar, Lisboa. Rev.Estudos, Ensaios e Documentos, nº116, Lisboa, 1965. .82 p.

PRIOR, G.T. Petrographic notes on the rock specimens collected in the little island of Trinidad, South Atlantic, by the Arctic Expedition of 1839-1843 under Sir James Clark Ross. *Mineralogical Magazine Journal of the Mineralogical Society*, 22 (58), 1900. 317-323 p.

RIBEIRO, M.R., MARQUES, F.A., BITTAR, S.M.B., FERRAZ, F.B., JACOMINE, P.K.T. & LIMA, JFWF. Caracterização e Classificação de Neossolos no Arquipélago de Fernando de Noronha. In.: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIENCIA DO SOLO, 29., 2003. *Anais*. Ribeirão Preto: SBCS, 2003. CD-ROM.

ROGERS, K. A. *Ocurrence of phosphate rock and associated soils in Tuvalu*, Central Pacific. In.: Atoll Research Bulletin, nº 360. Washington (D.C.): National Museum of Natural History, 1992. 32 p.

SCHAEFER, C. E. R. G.; CLEMENTE, E. P.; ALVES, R. V.; OLIVEIRA, F. S.; MOREIRA, G. F.; Solos e Geomorfologia Ambiental da Ilha da Trindade. In.: WORK SHOP ILHAS OCEÂNICAS: DA PESQUISA AO MANEJO, 01, 2006. *Anais*. Rio de Janeiro: Museu Nacional. UFRJ, 2006. Impresso.

SCHAEFER, C.E.G.R., SIMAS, F.N.B., ALBUQUERQUE-FILHO, M.R., MICHEL, R.F.M., VIANA, J. H. M., TATUR, A.. Fosfatização: Processo de formação de solos na Baía do Almirantado e implicações ambientais. In: Schaefer, C.E.G.R., Francelino, R., Simas, F.N.B., Albuquerque Filho, R. (Eds.), *Ecossistemas Costeiros e Monitoramento Ambiental da Antártica Marítima, Baía do Almirantado, Ilha Rei George*. NEPUT–Departamento de Solos, Viçosa Brasil, 2004. pp. 47–59.

SIMAS, F. B. *Solos da Baía do Almirantado, Antártica Marítima: mineralogia, gênese, classificação e biogeoquímica*. 153 f. Tese de Doutorado (Solos e Nutrição de Plantas). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2006. 153 f.

SIMONSON, R.W. Outline of a generalized theory of soil genesis. *Soil Science Society of America Proceedings* 23. 1959, pp. 152–156.

SOARES, L.de C. As ilhas oceânicas. In AZEVEDO A. de (ed.) *Brasil, a Terra e o Homem, Bases Físicas*. (volume 1). São Paulo: Companhia Editora Nacional, p. 341-378, 1964.

TATUR, A. Ornithogenic soils of the maritime antarctic. *Polish Polar Research* 4, 1989. pp. 481–532.

TATUR, A., BARCZUK, A. Ornithogenic phosphates on King George Island, Maritime Antarctic. In: Siegfried, W.R., Condry, P.R., Laws, R.M. (Eds.), *Antarctic Nutrient Cycles and Food Webs*. Springer-Verlag, Berlin, 1985. pp. 163–169.

TATUR, A.; MYRCHA, A., NIEGODZISZ; J. *Formation of abandoned penguin rookery ecosystems in the maritime antarctic*. *Polar Biology* 17, .1997 pp. 405–417.

TATUR, A.; MYRCHA, A. Ornithogenic soils. In: Rakusa-Suszczewski (Ed.), *The Antarctic Coastal Ecosystem of Admiralty Bay S. Polish Academy of Sciences*, Warsaw, 1993. pp. 161–165.

TEIXEIRA, W.; CORDANI, U. G. MENOR, E. de A.; TEIXEIRA, M. G.; LINSKER, R. *Arquipélago de Fernando de Noronha: o paraíso do vulcão*. São Paulo: Terra Virgem, 2003. 168 p.

THE NATURE CONSERVANCY: protecting nature, reserving life. Disponível em <http://www.nature.org/>. Acesso em 10/12/2007.

TROPPEMAIR, H. *Biogeografia e Meio Ambiente*. 5. ed. Rio Claro: Divisa- Gráfia Editora, 2002. v. 500. 197 p.

VELTHEIM, R.V. *Geologia da ilha da Trindade*. Relatório prévio da Expedição João Alberto à ilha da Trindade. Rio de Janeiro: [s. n.], 1950. (inédito).

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. 1990.

WOLFE, C.J.; BERGMAN, E.A.; SOLOMON, S.C. Oceanic transform earthquakes with unusual mechanism or locations: Relation to fault geometry and state of stress in the adjacent lithosphere. *Journal of Geophysical Research*, 98, 16187-16211.

CAPÍTULO 1

FOSFATIZAÇÃO DE ROCHAS E SOLOS NO ARQUIPÉLAGO DE SÃO PEDRO E SÃO PAULO, ATLÂNTICO NORTE

1. INTRODUÇÃO

A maior parte das ilhas oceânicas do planeta tem sua gênese ligada a eventos da tectônica de placas que ocasionam consideráveis processos vulcânicos. Em consequência, formam-se gigantescos edifícios vulcânicos cuja geologia e geomorfologia se diferenciam daquelas existentes nos continentes, sobretudo pela predominância de rochas vulcânicas básicas, ácidas e piroclastos. Soares (1964) lembra que, mesmo em atóis, onde a parte emersa dos arquipélagos é constituída por formações recifais coralígenas, o embasamento que sustenta a estrutura biogênica é caracterizado por rochas magmáticas, tal como é o caso do Atol das Rochas, na área oceânica brasileira.

Entretanto, embora possua caráter abrangente, incluindo quase todos os arquipélagos conhecidos, o vulcanismo não deve ser referenciado como o único processo formador de ilhas, pelo que a tectônica marinha pode ocorrer sem que, obrigatoriamente, este a acompanhe. Por consequência, existem ilhas cuja litologia confirma tais pressuposições, ou seja, ilhas em que o arcabouço geológico não se caracterize pela presença maciça de rochas eruptivas. Tal é o caso do Arquipélago de São Pedro e São Paulo (ASPSP).

Situado em águas brasileiras, distante cerca de 1.010 km do Cabo do Calcanhar (RN) e 1210 km da cidade do Recife (PE), o ASPSP é o único arquipélago do país localizado no Hemisfério Norte, tendo como pontos centrais as coordenadas 00°55'02" Latitude Norte e 29°20'42" Longitude Oeste de Greenwich (Figura 1). É constituído por um pequeno grupo de ilhas (10) e diversas saliências rochosas que se situam nas proximidades da Dorsal Meso-Atlântica, ocupando uma área total de 1,7 ha (Figura 2).

A geologia é, certamente, um dos aspectos que se destacam no ASPSP. Ao contrário do que propôs Guimarães (1932), para o qual as rochas encontradas nestas

ilhas seriam magmáticas básicas, sobretudo basaltos nefelíticos, olivinito e tufos vulcânicos, o que se observam como formadoras do embasamento do ASPSP são rochas plutônicas ultramáficas, milonitizadas durante seu soerguimento por forças tectônicas (CAMPOS et al., 2005). Trata-se de uma litologia constituída por peridotitos, a maior parte deles serpentinizados por fluxos hidrotermais. Além de comprovar a gênese não vulcânica deste arquipélago, tal geologia suscita uma série de outros questionamentos, dentre eles o posicionamento destas rochas e as relações entre os mecanismos aí operantes e a abertura do Oceano Atlântico.

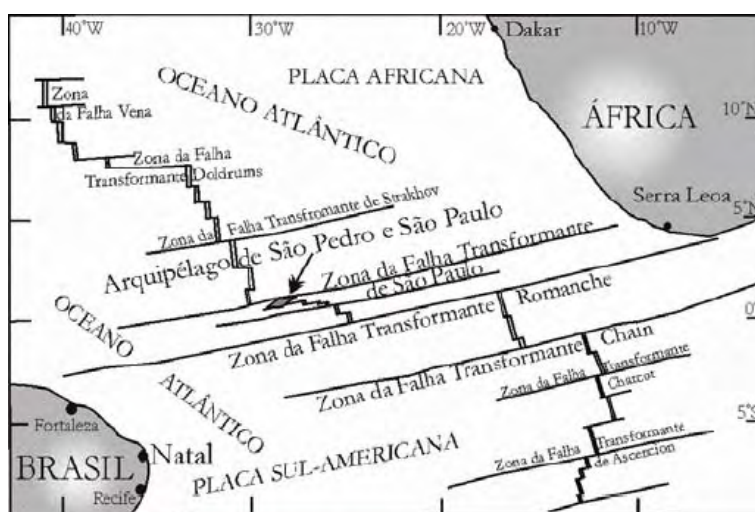


Figura 1 – Localização do ASPSP, Atlântico Norte.
Fonte: Campos et al (2005)

Várias foram as expedições que, desembarcadas no ASPSP, buscaram estudar suas rochas. A primeira referência à natureza não vulcânica do embasamento foi feita por Charles Darwin (1844) que, a bordo da embarcação Beagle, com a qual fizera expedições científicas ao redor do mundo, demonstrou seu interesse por aqueles materiais. Darwin chama atenção, também, para o recobrimento de tais rochas por crostas e um “verniz perolado”, o qual transformaria, a uma primeira vista, rochas originalmente cinza-verdoengas em rochas de coloração branca-acinzentada. Posteriormente, vários outros estudos coletaram e incluíram amostras de rochas em coleções dos maiores centros de investigações geológicas do mundo, não se reconhecendo, entretanto, maiores referências a essas estruturas de alteração sobre as rochas.

O fato é que, associada à presença de rochas tão particulares, haja vista os poucos registros de rochas infracrustais aflorando no planeta, e, no caso de ilhas

oceânicas, único no mundo, o ASPSP é palco de outros processos ainda muito pouco conhecidos. Sobre suas rochas são depositados abundantes excrementos de aves que usam as ilhas para se alimentar e reproduzir. Tais excrementos, além de estarem diretamente relacionados com o intemperismo dos peridotitos, são também responsáveis pela formação dessas coberturas que Darwin reportou. Por se tratarem de materiais ricos em fósforo, tais coberturas se caracterizam pelo acúmulo deste elemento. A esse processo dá-se o nome de fosfatização (SCHAEFER et al., 2004).

A fosfatização é conceituada como um processo pedogenético e representa uma interação entre o substrato e excrementos ricos em P de animais (SIMAS et al., 2007). Ocorrendo majoritariamente em áreas criogênicas, como na Antártica Marítima e em ilhas oceânicas, ela vem se demonstrado como de essencial importância para a compreensão dos processos de retorno do P, via lixiviação, de volta ao mar (SCHAEFER et al., 2004). Por constituir depósitos de P, a fosfatização tem uma forte relação com a produtividade primária das áreas marinhas adjacentes.



Figura 2 – Vista panorâmica do ASPSP, Atlântico Norte.

Fonte: Campos et al. (2005)

Como produtos mais evidentes do processo de fosfatização, têm-se os solos ornitogênicos, invariavelmente ricos em P. São estes solos os responsáveis por atribuir ao processo um caráter pedogenético, uma vez que, com a mineralização do excremento, ocorreriam interações físico-químicas com o substrato culminando no intemperismo químico de minerais primários instáveis e conseqüente formação de formas minerais secundárias ou, em outras palavras, minerais de argila fosfatados, incomuns em ambientes terrestres naturais. No ASPSP, todavia, observam-se outros produtos da fosfatização que não somente perfis de solos ornitogênicos. Crostas

espessas recobrando as rochas, coberturas peroladas de um verniz acinzentado e espeleotemas que surgem como florescências estão entre alguns dos produtos lá encontrados, que estão associados à deposição dos excrementos das aves. Sobre estes, muito pouco se conhece até o momento.

A partir disso, considerando a existência de um processo de fosfatização peculiar ao ASPSP, associado a um substrato também bastante singular, este trabalho teve como objetivo identificar, caracterizar e compreender a gênese dos diferentes produtos da fosfatização no Arquipélago de São Pedro e São Paulo, ou seja, a partir da interação dos excrementos das aves que lá estabelecem seus ninhais, como atobás e viuvinhas, e as rochas ultrabásicas do embasamento.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A compreensão do processo de fosfatização nas rochas e solos do ASPSP perpassa pelo desmembramento das características de seu arcabouço geológico, haja vista que é a partir da interação rocha – excremento que poderão ser reconhecidos os produtos finais desse processo pedogenético. Para tanto, faz-se necessária a compreensão do conjunto de teorias até então formuladas, que objetivam explicar a formação deste maciço peridotítico, bem como as rochas estão distribuídas em área emersa.

2.1. Formação do Arquipélago de São Pedro e São Paulo

Muitas controvérsias envolvem a hipótese de formação do ASPSP, com idade estimada por volta de 100-35 milhões de anos atrás (MELSON et al., 1972). Conforme Maia et al. (1999), citado por Campos et al. (2005), as rochas plutônicas milonitizadas e serpentinizadas que formam o arquipélago sugerem seu posicionamento atual por forças tectônicas que podem estar relacionadas com a quebra do continente Pangea e à expansão do oceano Atlântico. Em outras palavras, a geologia do ASPSP o torna tão particular que muitas são as incertezas se o mesmo corresponderia a uma relíquia do manto-litosférico sub-continental, associada à parte não expansiva do embasamento da região Meso-Atlântica Equatorial ou a uma protrusão de manto-oceânico soerguido pela ação da fratura transformante São Paulo, afetado pelos processos de milonitização e serpentinação (CAMPOS et al., 2005).

O maciço rochoso submerso na região onde está situado o arquipélago apresenta dois flancos que são distintos geologicamente (Figura 3). Esses flancos estão inseridos numa zona de falhas transformantes, de direção E-W, que formam uma estrutura tipo gabren entre os mesmos (Zona de Fratura de São Paulo). Enquanto o flanco norte é formado por milonito peridotítico serpentinado, milonito peridotítico bandado e

serpentinizado, raras intrusões gabróicas e derrames basálticos; o flanco sul é constituído por peridotito não deformado e serpentinizado, ocorrendo, ainda, alguns derrames basálticos e um capeamento de calcário endurecido (HEKINIAN et al., 2000). O grande desafio imposto por esta formação é a compreensão de como esse maciço rochoso se colocou dentro da falha transformante de São Paulo. O flanco sul, por exemplo, seria formado por movimentos tectônicos extensionais, diapíricos e por posterior denudação, enquanto o flanco norte seria um falhamento transversal cisalhante e cavalgante (WOLFE et al., 1993 & HEKINIAN et al., 2000). No interior do maciço, em razão de forças extensionais, teria ocorrido vulcanismo intra-transformante.

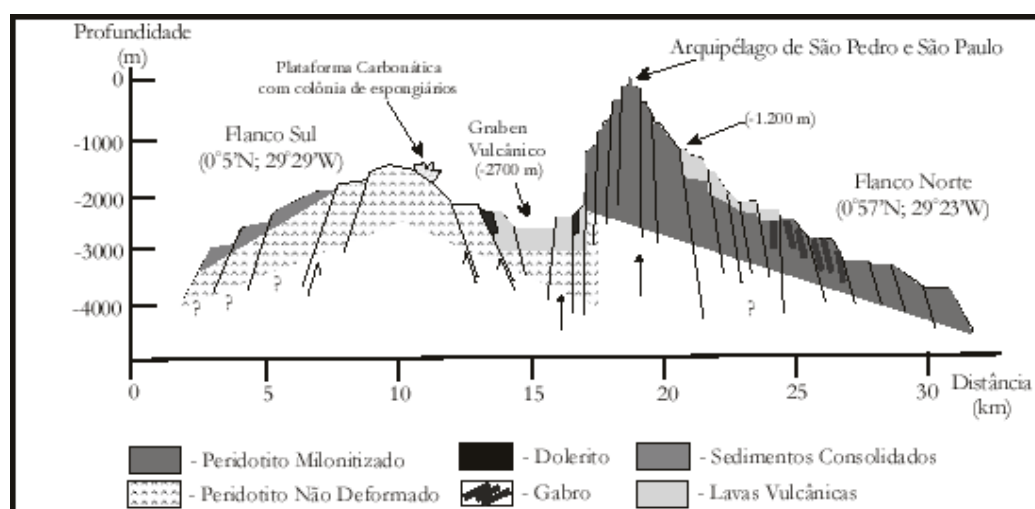


Figura 3 - Esquema representativo de formação do Maciço SPSP
Fonte: Hekinian et al (2000)

Em razão de tais processos tectônicos atípicos, Campos et al. (2005) expõe que o posicionamento da rocha plutônica mantélica que forma o ASPSP (peridotito) é o efeito combinado da protrusão e do cisalhamento diferencial dentro da falha transformante São Paulo, elevando o maciço acima do nível do mar e formando as áreas emersas que constituem o conjunto de ilhas e ilhotas. Essas seriam ainda mais fraturadas por eventos de milonitização posteriores.

2.2. Geologia do Arquipélago de São Pedro e São Paulo

O embasamento do ASPSP pode ser descrito como formado prioritariamente por rochas peridotíticas milonitizadas e serpentinizadas (Figura 4a). Apenas em alguns pontos da Ilha Belmonte encontram-se peridotitos que não foram alterados pelos processos de serpentinização. Sobre o embasamento, durante o período quaternário, formou-se uma cobertura sedimentar denominada de Formação São Pedro e São Paulo.

O peridotito é, pela literatura geológica, reconhecido como uma rocha rica em minerais silicatados de ferro e magnésio, tais como a olivina, forsterita, hilossiderita, faialita, entre outros. No ASPSP, eles ocorrem, principalmente, de duas maneiras: como uma rocha afanítica, homogênea, de dureza elevada e coloração branca-acinzentada a cinza-verdoengo, correspondendo à porção de peridotitos apenas milonitizados; e outra afanítica, heterogênea, de dureza baixa e coloração bastante variada, indo desde as cores anteriormente citadas até marrom-avermelhada (CAMPOS et al., 2005). No segundo caso, conforme salienta Campos et al. (2005) presencia-se uma trama entre a fase milonítica e a fase serpentinizada, sendo a última desenvolvida a partir do padrão do micro-diaclasamento e graças à fase milonítica, até o consumo total dessa. Algumas pontuações, ainda no contexto do embasamento, podem ser encontradas de milonitos bandados com rochas alcalinas ricas em kaersutita (Figura 4a).

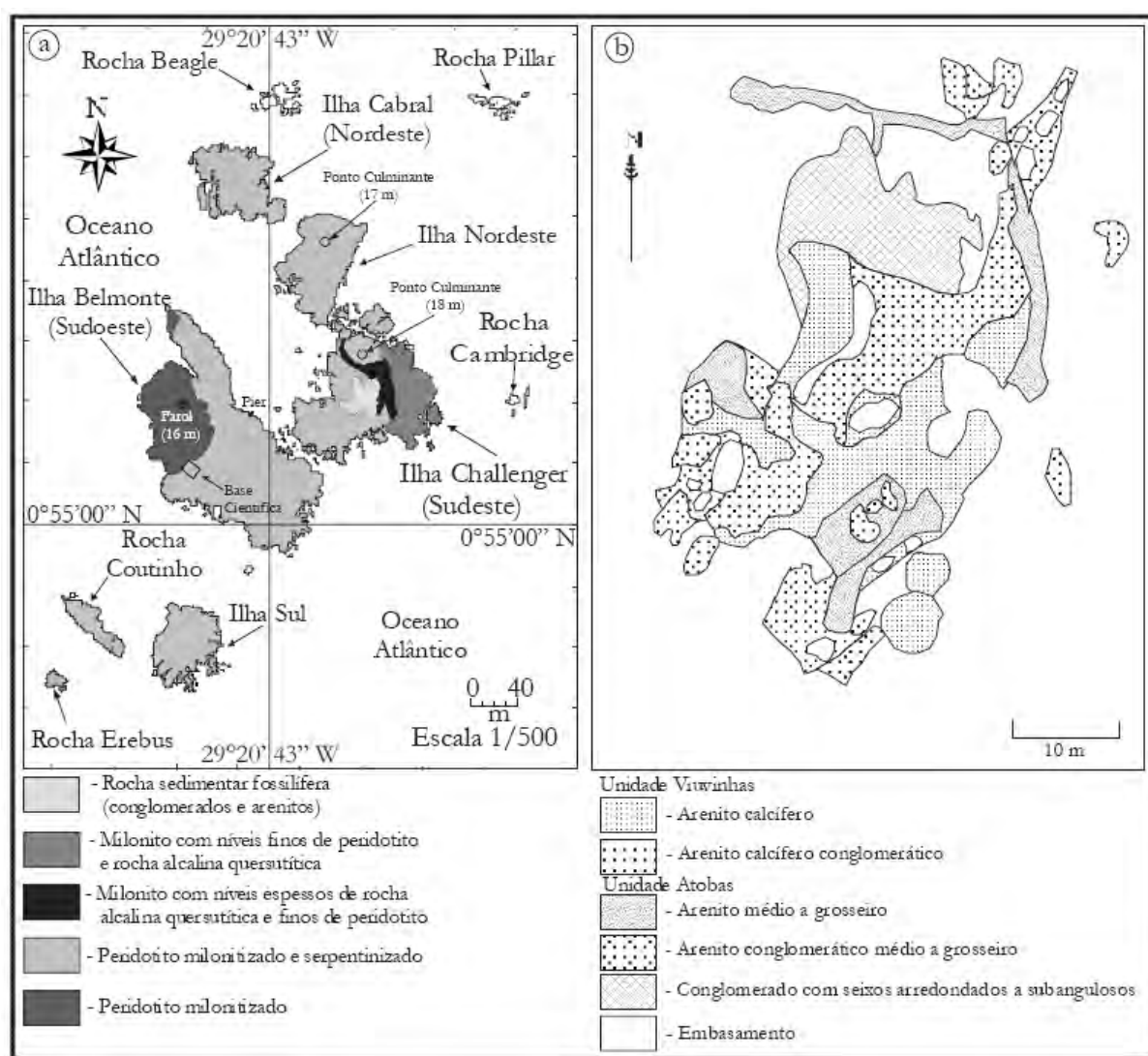


Figura 4: a – Mapa Geológico da área emersa do ASPSP;
b – Mapa Geológico da Formação São Pedro e São Paulo.
Fonte: Campos et al. (2005)

A Formação São Pedro e São Paulo (Figura 4b), de caráter bio-litoclástico, é constituída por duas unidades fundamentais (CAMPOS et al, 2003). A primeira delas, Unidade Atobás, é predominantemente conglomerática, enquanto a segunda, Unidade Viuvinhas, é arenítica. Formada em uma pequena paleobacia marinha, essa Formação é caracterizada por um hiato na seqüência deposicional e por ser altamente basculada, ambos os episódios causados por eventos tectônicos. Predominam cimentações calcíferas entre os grãos de areia e seixos arredondados pela ação das ondas.

3. MATERIAL E MÉTODOS

A realização deste trabalho seguiu os procedimentos metodológicos descritos a seguir.

3.1. Área de Estudo

A escolha da área de estudo teve como critério a identificação do processo de fosfatização acompanhado pela existência do embasamento peridotítico. Por se tratar de um arquipélago com área emersa bastante restrita (17.000 m²) e com pequena diversidade geológica, optou-se por localizar as coletas na maior e principal ilha, conhecida como Belmonte (Figura 5).

Na Ilha Belmonte, localiza-se a maior parte dos ninhais existentes no ASPSP, sendo que os ninhos de Atobás (*Sula leucogaster*), situados nas partes mais baixas, aí ocorrem exclusivamente. As Viuvinhas (*Anous stolidus*) ocupam as partes mais altas de praticamente todas as ilhas do Arquipélago. Vale acrescentar que a existência de somente duas espécies predominantes de aves se deve ao restrito espaço de áreas não afetadas pelas ondas e ao fato de que somente os Atobás já ocupam uma proporção de aproximadamente 0,4 aves/m², restringindo o estabelecimento de outras espécies migratórias (MENDES, 2004).

Em relação à geologia da Ilha Belmonte, predominam as rochas peridotíticas milonitizadas na face oeste – sudoeste da elevação do Farol e peridotitos milonitizados serpentinizados no restante da ilha. Do ponto de vista geomorfológico, Belmonte possui um relevo acidentado e baixo. É formado, na parte baixa, por marmitas de gigante circundadas por costões rochosos que sofrem intensa abrasão por ondas. Possui elevação máxima de aproximadamente 16 m, onde está localizado o farol. Em todo o entorno da ilha encontram-se coberturas de corais e mantos de algas, sustentados por paredões rochosos bastante íngremes.

Em Belmonte encontra-se, também, a Estação Científica, construída pela Marinha do Brasil em 1998 e estações meteorológicas (INMET) e sismográficas.

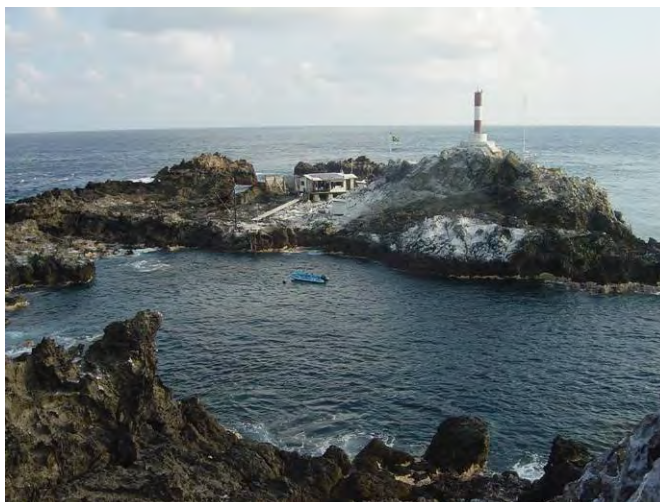


Figura 5 – Ilha Belmonte, ASPSP, Atlântico Norte.

3.2. Trabalho de Campo, Coleta e Preparo das Amostras

O trabalho de campo teve como objetivo a coleta do material a ser utilizado neste estudo. Foi realizado em duas etapas: a primeira expedição em Maio de 2005 e a segunda em Maio de 2007. Em ambas, foram coletados exemplares dos mais diferentes tipos de produtos decorrentes da fosfatização, incluindo-se oito amostras de rochas, uma amostra de guano e um perfil de solo (Tabela 1). A localização dos pontos de coleta é ilustrada na Figura 6.

As amostras coletadas foram identificadas e acondicionadas em sacos plásticos e conduzidas aos respectivos laboratórios, sendo, então, triadas e processadas para a realização das análises. Para contemplar a variabilidade espacial dos produtos da fosfatização e sua associação com o embasamento, foi utilizado o mapa geológico produzido por Campos et al. (2005) como referência para a coleta das rochas e guano. A coleta do único solo existente na Ilha, e também o único do ASPSP, foi realizada utilizando-se como referência Lemos et al. (2005).

O preparo das amostras envolveu, para as rochas, sua fragmentação inicial em seções (Tabela 1). Tais seções ou camadas são representativas dos diferentes níveis de interação do substrato com o excremento depositado sobre ele, e foram utilizadas para realização das análises químicas e mineralógicas. Para separá-las, utilizou-se um martelo geológico e uma espátula, quando da necessidade de raspar a superfície. Em seguida, procedeu-se à cominuição das rochas em fragmentos centimétricos por intermédio da utilização de um almofariz de ágata. Após a separação de duplicatas,

foram homogeneizadas e quarteadas manualmente para moagem e passadas por peneiras de 200 mesh (0,074 mm) para obtenção da granulometria adequada às análises. Os solos (amostras deformadas) foram secos ao ar, destorreados e passados por peneiras de 2 mm (TFSA).

3.3. Análises

3.3.1. Análises das rochas

Foram realizadas, nas rochas, análises químicas, mineralógicas e microscópicas. A análise dos teores totais dos elementos Cr, Cu, Ni, Pb e Zn foi feita através do ataque tri-ácido (HNO₃, HCl e HF) em microondas (CEM 2000), a 100 psi por 20 min a 650 W. A digestão inorgânica foi promovida com 2 mL de HCl, 9 ml de HNO₃ e 4 ml de HF adicionado a 0,3 g de material, com posterior determinação dos teores dos elementos por espectrofotometria de emissão em plasma induzido (ICP-OES). Os elementos P, Na, K, Fe, Al, Ca, Si e Mg foram determinados por fusão alcalina com 0,24 g de LiBO₂ e 0,05 g de amostra em cadinhos de grafite de alta pureza, a uma temperatura (mufla) de 1.000 °C e posterior diluição da pastilha fundida, aí formada, em 25 ml de HNO₃. A determinação dos teores também foi feita por espectrofotometria de emissão em plasma induzido (ICP-OES).

A mineralogia foi obtida por Difratomia de Raio-X. Após transportadas para lâminas de vidro escavadas com HCl, as rochas moídas foram levadas ao difratômetro Rigaku, operando com tensão de 40 kV, com corrente de 20 mA, radiação de CoK α e filtro de Be. A amplitude da varredura foi de 2 a 70 graus 2 θ . A interpretação dos difratogramas foi feita utilizando-se da comparação com padrões de literatura, como os trabalhos sobre minerais fosfáticos desenvolvidos por Brindley e Brown (1980) e Nriagu e Moore (1984), além dos trabalhos de Simas (2006) para solos da Antártica.

Algumas amostras de rochas foram selecionadas para observação em microscópio eletrônico de varredura e posterior espectrometria obtida por EDS. Isto é, seções finas, previamente estudadas em microscópio petrográfico com polimento manual, foram preparadas para microanálise em microscopia eletrônica de varredura. Amostras de 2,0 x 2,5 cm foram polidas sucessivamente em disco de nylon com pasta de diamante, desde 60 μ , 6 μ m, 3 μ m até 1 μ m. Após lavagem ultra-sônica final para remoção de resíduos do polimento, as seções finas foram recobertas com filme condutor de carbono e montadas em suporte metálico. As lâminas foram subsequentemente analisadas e fotografadas em microscópio eletrônico de varredura, modelo JEOL JSM 6400, com detector *backscattering* e acoplado a espectrômetro de dispersão de raios-X

Tabela 1 – Descrição das amostras de rochas, solo e guano coletadas no ASPSP, Atlântico Norte

Amostra	Localização	Figura	Seções	Descrição	Figura
R1 - Peridotito Milonitizado sem fosfatização	Terço inferior da vertente oeste da Ilha Belmonte em área com ausência de ninhais e forte abrasão provocada pelas ondas		Seção Única	Amostra representativa da ausência de fosfatização nas rochas do ASPSP	
R2 - Peridotito Milonitizado coberto por deposição de excrementos recentes	Terço médio da vertente sul-sudoeste da Ilha Belmonte em área de ninhal recente		R2.1	Excremento impregnado na rocha levemente raspado mais manto de intemperismo superior	
			R2.2	Rocha menos intemperizada	
R3 - Peridotito Milonitizado coberto por verniz fosfático perolado	Terço médio da vertente oeste da Ilha Belmonte em área de antigo ninhal		R3.1	Verniz fosfático levemente raspado	
			R3.2	Manto de intemperismo adjacente ao verniz fosfático	
			R3.3	Seç. menos intemperizada	
R4 - Peridotito Milonitizado coberto por crosta fosfática espessa	Terço superior da vertente oeste da Ilha Belmonte		R4.1	Crosta fosfática	
			R4.2	Manto de intemperismo superior adjacente à crosta fosfática	
			R4.3	Seç. menos intemperizada	
R5 - Crosta Fosfática	Terço superior da vertente oeste da Ilha Belmonte, onde a crosta se evidenciava por se soltar da rocha		Seção Única	Crosta fosfática facilmente separada da rocha	
R6 - Espeleotemas de Fosfato	Topo da Ilha Belmonte, face oeste, em fraturas sombreadas abaixo do farol		Seção Única	Inflorescências de fosfatos facilmente separadas da rocha	
R7 - Peridotito Milonitizado Serpentinizado com fosfatização percolante	Terço médio da vertente leste da Ilha Belmonte		R7.1	Superfície recoberta por capeamento branco de fosfatos	
			R7.2	Manto de intemperismo superior com sinais de fosfatização percolante	
			R7.3	Seç. menos intemperizada	
R8 - Peridotito Milonitizado Serpentinizado com frente de intemperismo esverdeada	Topo da Ilha Belmonte, face norte		R8.1	Capeamento esverdeado	
			R8.2	Manto de intemperismo superior	
			R8.3	Seção menos intemperizada	
G1 – Guano	Sopé do morro do farol, próximo à casa em área de ninhal recente. Evidências de ser guano carregado das elevações.		Seção Única	Guano com fragmentos de rochas, penas e ossos de aves.	
S1 – Neossolo Litólico distrófico fragmentário	Topo da Ilha Belmonte, próximo ao farol voltado para noroeste e área coberta por vegetação exótica.		A1	Horizonte A1 – 0 a 8 cm	
			A2	Horizonte A2 – 8 a 15 cm	

(PCXA - EDS). Foram realizados exames microquímicos das feições selecionadas, com ênfase para interação entre as diferentes formas de fosfatos e os constituintes da rocha. As análises microquímicas foram realizadas com voltagem de 15 kV, 5 A e a 39 mm de distância de trabalho (detector-superfície). A cada troca de amostras, o PCXA-EDS foi recalibrado com padrão de cobre.

Foi elaborado um menu dos principais elementos para análise quantitativa em EDS, tais como Si, Ca, Mg, P, Fe, K, Cu, Ni, Co, Al, entre outros. Destes foram produzidos mapas microquímicos das áreas selecionadas, e após a identificação de feições com características químicas distintas, procedeu-se à análise dessas feições em magnificação elevada, obtendo-se os espectros quantitativos de EDS.



Figura 6 – Localização dos pontos de coleta de rochas (R), guano (G) e solo (S) no ASPSP, Atlântico Norte.

3.3.2. Análises do solo

Para o solo, foram realizadas análises físicas, químicas e microscópicas. A análise física consistiu na determinação da cor e da textura. A cor foi obtida pela Caderneta de Munsell (Munsell, 1994) e a granulometria conforme metodologia da Embrapa (1997) com adaptações onde, após agitação vertical por 16h, determina-se o teor de argila e silte pelo método da pipeta, utilizando-se, como dispersante, solução com hexametáfosfato de sódio, sendo a areia determinada por pesagem e peneiramento; obtendo-se, assim, quatro frações (areias fina e grossa, silte e argila).

Em relação às análises químicas, foram determinados o pH em água e em solução de KCl 1 mol. L⁻¹ com medição pelo método potenciométrico em suspensão solo:solução igual a 1:2,5. Bases trocáveis (Ca²⁺ e Mg²⁺) foram extraídas com solução de KCl 1 mol L⁻¹, na proporção solo:solução de 1:10 e quantificados por espectrometria de absorção atômica e Na⁺ e K⁺ com Mehlich 1 (HCl 0,05 mol L⁻¹ + H₂SO₄ 0,025 mol L⁻¹) na proporção solo:solução 1:10, determinados por fotometria de chama. A acidez foi extraída com KCl 1 mol L⁻¹ na proporção solo:solução de 1:10 e titulada com NaOH 0,025 mol L⁻¹ na presença do indicador azul de bromotimol, expressa em Al³⁺ trocável; (H⁺+Al³⁺) extraídos com acetato de cálcio 0,5 mol L⁻¹ a pH 7,0 e titulados com NaOH 0,0606 mol L⁻¹ na presença de fenolftaleína como indicador. Realizou-se, também, a extração de P por Mehlich 1, determinando-o por colorimetria do complexo fósforo-molibdico na presença de ácido ascórbico, como descrito por Defelipo e Ribeiro (1981) e por resina trocadora de íons conforme recomendado por Hedley et al (1982)

Aferições da composição mineralógica e análise micromorfológica do solo foram realizadas apenas para uma lâmina do horizonte A2 com base na microscopia eletrônica de varredura e espectros microquímicos por EDS, conforme descrito, anteriormente, para as rochas. A caracterização da microestrutura seguiu as recomendações de Fitzpatrick (1993).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Os produtos da fosfatização no Arquipélago de São Pedro e São Paulo

Frequentemente, solos ricos em P cujo material parental não possua quantidades expressivas desse elemento e tenham sofrido, ou sofram, a ocupação por ninhais, são designados como os produtos mais representativos da fosfatização (MYRCHA et al., 1983; TATUR & BARCZUK, 1985; TATUR, 1989; TATUR & MYRCHA, 1993; BLUME et al., 2002; SCHAEFER et al., 2004; SIMAS, 2006). No Arquipélago de São Pedro e São Paulo, entretanto, além de solos fosfatizados, foram encontradas também outras feições de reação química diretamente ligadas à deposição de excrementos sobre as rochas, ou seja, rochas fosfatizadas. Com o objetivo de melhor reconhecer todas as formas de fosfatização existentes no ASPSP, foram descritas oito amostras de rochas, um perfil de solo e uma amostra de guano, representando um total de seis tipos ou produtos da fosfatização: crostas; espeleotemas; fosfatos percolados, coberturas esverdeadas; guano e solos fosfatizados. Das oito amostras de rochas, as cinco primeiras (R1; R2; R3, R4 e R5) evidenciam os estágios sucessivos do processo de formação de crostas fosfáticas. As demais (R6; R7 e R8) representam, respectivamente, espeleotemas, fosfatos percolados e coberturas esverdeadas (Tabela 1). O solo fosfatizado é indicado pelo perfil único S1 e, assim como o guano (G1), será apresentado posteriormente.

4.1.1. Crostas Fosfáticas

Um dos produtos da fosfatização no ASPSP mais perceptível é a cobertura de parte de algumas de suas rochas por uma espessa crosta de coloração cinza-esbranquiçada, sem brilho aparente e dureza baixa (R5). Restrita à face oeste da elevação do morro do farol, sobretudo em parte dos terços médio e superior desta, a crosta é associada ao peridotito milonitizado sem serpentinitização. Darwin (1844), ao

observá-la, descrevera-a como sendo formada “por finas lamelas de fosfatos cuja efervescência, mediante ataque ácido (experimentos realizados por ele em campo), não foi reconhecida”. Possuía, segundo o naturalista, espessura próxima de 2,5 mm (um décimo de uma polegada). Os relatos são confirmados pelas observações atuais.

Análises químicas do material coletado apresentaram altos teores de CaO (45,73%) e P₂O₅ (31,42%), associados a teores mais baixos, porém significativos, de SiO₂ (17,93%), MgO (1,82%) e FeO (1,13%). Teores de Al₂O₃, ZnO, CuO, NiO e Cr₂O₃ aparecem como sendo traços (Tabela 2). Proporções semelhantes foram encontradas por Renard (1882), para o mesmo material (50% de CaO e 33,61% de P₂O₅) e por Nesbit (1945), para crostas fosfáticas sobre rochas ígneas da Ilha de Pedro Cays, Jamaica (39,9% de CaO e 22% de P₂O₅), ambos citados por Hutchinson (1950).

Tais resultados evidenciam estreita relação entre a composição química desta crosta e os elementos constituintes dos dejetos animais, haja vista que a rocha subjacente contém pouco cálcio e fósforo (GREEN, 1964). Em contrapartida, a dieta das aves que habitam o ASPSP é constituída principalmente de sete a nove espécies de peixes, destacando-se a família *Exoetidae* responsável por cerca de 93% das presas consumidas, em que tais elementos são abundantes (BOTH & FREITAS, 2001). O contraste entre a composição química da crosta fosfática e a rocha peridotítica pode ser vislumbrado pelos mapas microquímicos elaborados na interface entre as mesmas (Figura 7). Tais mapas contrastam um substrato essencialmente ferromagnesiano fosfatizado em superfície, sem que se observe, entretanto, percolação dos fosfatos na estrutura da rocha. Por ser pouco fraturada, os excrementos parecem se acumular sobre o peridotito milonitizado sem serpentinização.

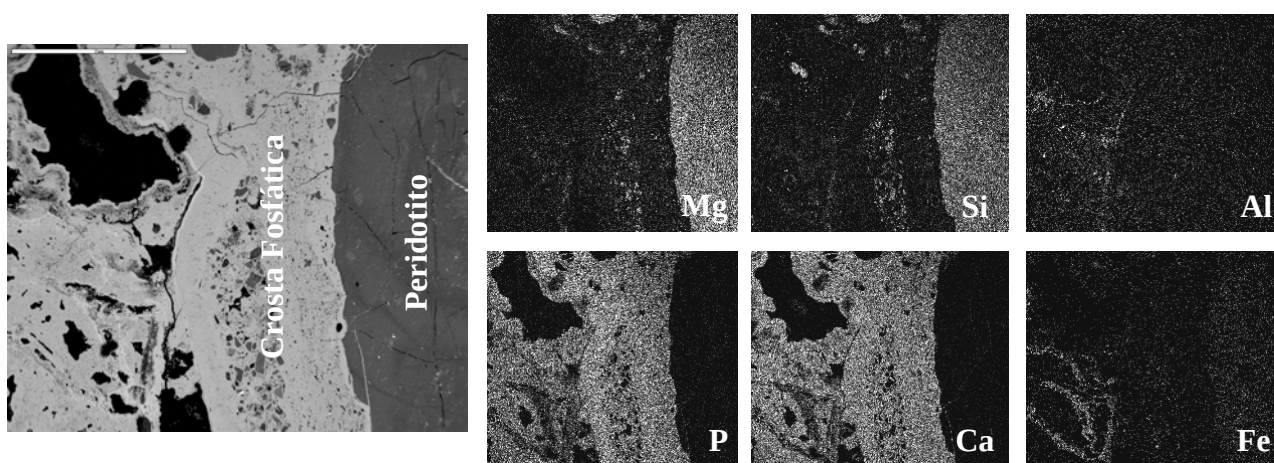


Figura 7 – Fotomicrografia em retroespalhamento eletrônico (MEV) e mapas microquímicos de EDS de crostas fosfáticas espessas sob peridotito milonitizado (as feições mais claras indicam a distribuição e a maior quantidade relativa do elemento na lâmina analisada).

Tabela 2 – Composição química total expressa em % de óxidos das rochas fosfatizadas do Arquipélago de São Pedro e São Paulo.

Seções	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	FeO	Fe ₂ O ₃	PbO	NiO	Cr ₂ O ₃	CuO	SiO ₂	ZnO
%														
R1 - Peridotito Milonitizado sem fosfatização														
Seção Única	nd*	1,08	0,72	34,35	0,83	1,00	6,35	-	nd	0,31	0,29	nd	54,60	nd
R2 - Peridotito Milonitizado coberto por deposição de excrementos recentes														
Seção 1	1,42	0,24	2,16	41,31	0,14	0,57	5,91	-	nd	0,30	0,20	nd	25,69	nd
Seção 2	0,02	0,30	1,46	40,89	nd	0,39	8,00	-	nd	0,31	0,23	nd	21,36	nd
R3 - Peridotito Milonitizado coberto por verniz fosfático perolado														
Seção 1	25,28	0,90	31,57	0,61	1,60	0,74	2,54	-	nd	0,03	0,03	nd	33,09	0,06
Seção 2	3,06	1,25	1,12	37,24	1,02	0,24	6,31	-	nd	0,10	0,33	nd	44,12	nd
Seção 3	nd	1,21	1,05	27,49	0,30	0,07	6,44	-	nd	0,25	0,32	nd	55,36	nd
R4 - Peridotito Milonitizado coberto por crosta fosfática espessa														
Seção 1	16,14	1,42	24,31	19,94	2,15	0,31	7,39	-	nd	0,02	0,04	nd	30,06	0,02
Seção 2	1,37	1,16	5,88	31,40	1,32	0,24	6,10	-	nd	0,22	0,36	nd	46,47	0,01
Seção 3	nd	1,35	1,94	38,48	0,91	0,02	6,96	-	nd	0,25	0,34	nd	45,96	nd
R5 - Crosta Fosfática														
Seção Única	31,42	nd	45,73	2,73	0,40	1,42	1,13	-	nd	0,01	0,02	0,02	17,93	0,06
R6 - Espeleotemas de Fosfato														
Seção Única	29,23	1,14	34,72	1,89	0,24	1,20	-	1,10	0,07	nd	0,01	0,10	30,80	0,13
R7 - Peridotito Milonitizado Serpentinizado com fosfatização percolante														
Seção 1	9,58	1,03	1,34	24,26	1,89	0,67	-	6,67	0,04	0,13	0,20	0,02	53,69	0,02
Seção 2	5,75	0,51	1,99	21,60	0,62	1,18	-	3,40	0,01	0,19	0,23	0,01	55,39	0,01
Seção 3	2,92	1,31	2,79	32,83	2,06	3,84	-	9,86	nd	0,26	1,31	0,01	41,37	nd
R8 - Peridotito Milonitizado Serpentinizado com frente de intemperismo esverdeada														
Seção 1	8,36	0,74	2,45	28,12	nd	0,90	-	4,50	nd	1,14	1,45	nd	51,88	nd
Seção 2	0,73	1,41	0,38	22,32	nd	1,06	-	3,85	nd	0,34	0,36	nd	23,22	nd
Seção 3	0,11	1,34	1,76	41,86	0,08	1,02	-	6,17	nd	0,26	0,31	nd	25,90	nd

* nd = teores não detectados

A análise mineralógica da crosta aponta para uma associação entre apatita, piroxênio e olivina (Figura 8). Por se tratar de um ambiente em processo de intemperismo físico e químico, existem fragmentos da rocha subjacente que se misturam ao excremento depositado, respondendo pelos picos de minerais ferromagnesianos encontrados na crosta. Seriam eles, principalmente, enstatita - $\text{Mg}_2\text{Si}_2\text{O}_6$, wollastonita como pertencentes ao grupo dos piroxênios, e faialita - Fe_2SiO_4 e forsterita - Mg_2SiO_4 como representantes do grupo das olivinas. Juntos, representam uma assembléia de minerais ultramáficos.

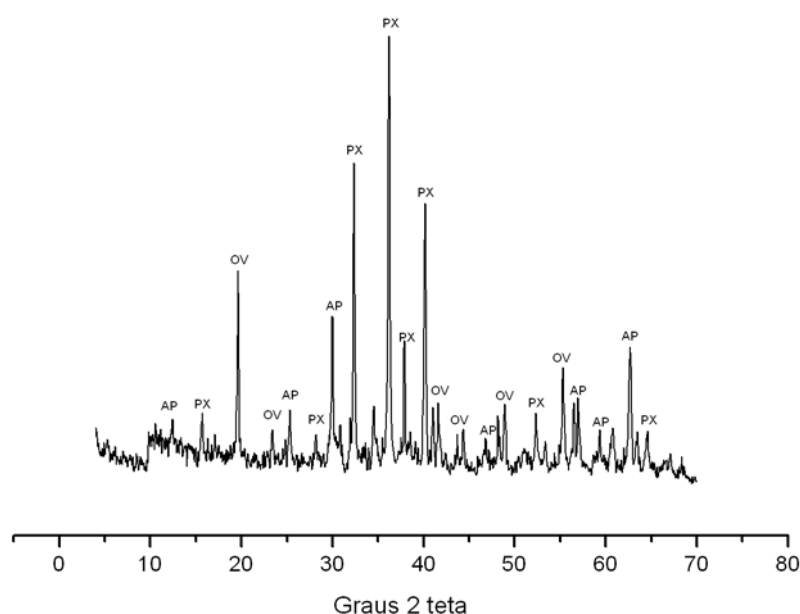


Figura 8 – Difratoograma de Raios-X (radiação $\text{CoK}\alpha$) da Crosta Fosfática sob Peridotito Milonitizado; Amostra R7, sendo AP – Apatita; OV – Olivina e PX – Piroxênio.

4.1.1.1. Processo proposto para a formação de crostas fosfáticas

Como produto de um processo de acumulação superficial de excrementos sobre rocha homogênea e compacta, a crosta fosfática passa por diferentes estágios de formação, indo desde a deposição inicial das fezes até a mineralização da apatita biogênica e de outros minerais fosfáticos. Observações de campo permitiram identificar três estágios subseqüentes e condicionados a fatores variados, tal como se verá adiante.

I – Peridotito milonitizado sem fosfatização

O início do processo de formação de crostas se dá pela deposição do excremento, ainda líquido, sobre a rocha. Antes, portanto, existe o peridotito milonitizado não fosfatizado. Tal rocha surge como uma exceção na área de estudo, pois apresenta como característica principal a ausência da serpentinização, ou, quando essa

ocorre, em grau muito incipiente; embora a maior parte dos peridotitos do Arquipélago apresente sinais da influência dos fluxos hidrotermais.

Na composição química, tem-se, predominantemente, 34,35% de MgO, 54,60% de SiO₂ e 6,4% de FeO (Tabela 2). Tais valores são bastante próximos daqueles reportados pela literatura para a mesma rocha, ou seja, 39,2% de MgO, 44,8% de SiO₂ e 6,8% de FeO (GREEN, 1964). Ainda assim, foi possível notar expressivas diferenças geoquímicas nos peridotitos do ASPSP. Observam-se, por exemplo, elevados teores de Na₂O (1,00%) em comparação com os valores da literatura (0,22%), assim como de K₂O (1,08% da amostra *versus* 0,05% da literatura). Tais diferenças podem ser atribuídas à almirólise, conceituada como qualquer forma de intemperismo provocada pela água do mar.

O ASPSP possui altitudes muito modestas (máxima de 18 m), e qualquer oscilação do nível do mar pode, potencialmente, implicar na submersão de grande parte das áreas emersas que hoje constituem as ilhas. Como no transcorrer do Quaternário essas oscilações foram perceptíveis, é provável que elas tenham afetado a geoquímica de tais rochas. Além disso, na área onde fora coletada, a rocha recebe constantemente a influência de “sprays” salinos e do impacto de ondas, estando, por estes vieses, sujeita ao intemperismo pela ação da água do mar. É importante notar que, mesmo alteradas quimicamente, as rochas não guardam valores expressivos de P. Tal elemento é mencionado por Green (1964) como sendo traço em tais rochas, e, na amostra em análise, isso pode ser comprovado pela não detecção do mesmo (Quadro 1 – Amostra R1). Assim, torna-se evidente que os altos índices de P encontrados na crosta (R5) não podem ser atribuídos à rocha matriz.

II – Peridotito milonitizado coberto por excrementos recentes

Uma vez depositado sobre a rocha, o excremento das aves tende a se solidificar, impregnando superficialmente e constituindo uma cobertura esbranquiçada e com forte odor, evidenciando a liberação de gases na decomposição do excremento, como metano. Seria esse o primeiro estágio da formação de crostas fosfáticas.

A interação entre o excremento depositado e o substrato vai depender das características dos dois, em especial do substrato. Como o Peridotito Milonitizado não permite maior absorção dos dejetos líquidos, a relação neste caso será de acumulação superficial. Tal acumulação não exclui, todavia, a oportunidade de ocorrer interação entre o excremento e a superfície de exposição da rocha. Em outras palavras, ao se depositar em uma rocha parcialmente decomposta na superfície, o limite de

impregnação do excremento, e, por consequência, da sua interação com o substrato, será o limite da camada superficial intemperizada, haja vista que a rocha fresca impedirá maior percolação. As condições de acumulação também se alternam, nesta mesma rocha, conforme alguns outros fatores.

Em áreas de declive mais acentuado, o excremento escorre por sobre a rocha e tende a se acumular em posições mais aplainadas ou côncavas. Áreas de maior exposição ao sol promovem maior aquecimento do substrato, que, por sua vez, em contato com os excrementos, tende a dessecá-lo, evaporando a água contida nos mesmos e acumulando em superfície seus precipitados. A presença e o tempo de permanência dos ninhais em determinadas áreas também responde pela maior ou menor acumulação de excrementos. Isso porque as aves, como os Atobás e as Viuvinhas, permanecem grande parte do dia em seus ninhos, saindo somente para se alimentar. Em consequência, tendem a excretar mais no lugar em que se fixam.

Evidências químicas da acumulação superficial, constituídas por uma cobertura primária de excrementos, podem ser avaliadas através da amostra R2 (Tabela 2). Observa-se uma queda nos teores de P_2O_5 e CaO no limite que separa o manto superior recoberto pelos dejetos recém depositados (Seção 1) e a rocha menos intemperizada (Seção 2). Tais teores não se revelaram muito elevados, uma vez que se trata do início do processo de acumulação. Para os outros elementos, valores semelhantes nas duas seções demonstram que nesse primeiro estágio ainda existe maior influência da rocha, com predomínio da sua composição química, mesmo nas seções superficiais. Existe, inclusive, uma dificuldade em separar a camada impregnada da rocha subjacente, o que provoca implicações na análise mineralógica com a presença de muitos picos de minerais da rocha na amostra de excremento recém depositado analisada.

A maior influência do substrato pode ser percebida pelo aumento da complexidade mineralógica da Seção 1 para 2, evidenciados pela comparação dos difratogramas de ambas (Figura 9). Na seção 1 observa-se que, mesmo se tratando de excrementos recém solidificados e em processo de acumulação, a composição mineralógica final da crosta já começa a se delinear. Sobressaem as apatitas como os minerais fosfáticos mais comuns, havendo também a possibilidade de leucofosfitas já em processo de mineralização. Vale ressaltar que parte dos picos de apatitas identificados podem representar apatitas biogênicas que resistiram ao trato digestivo das aves. Na seção 2, por sua vez, os picos de apatita sofrem uma redução acompanhada por um aumento da intensidade de vários outros picos, principalmente das olivinas. Embora

se observe também a redução da intensidade dos picos de alguns piroxênios, essa é acompanhada pelo aumento da intensidade no intervalo entre 20 ° e 30° 2 θ , região onde se concentram diversos minerais máficos.

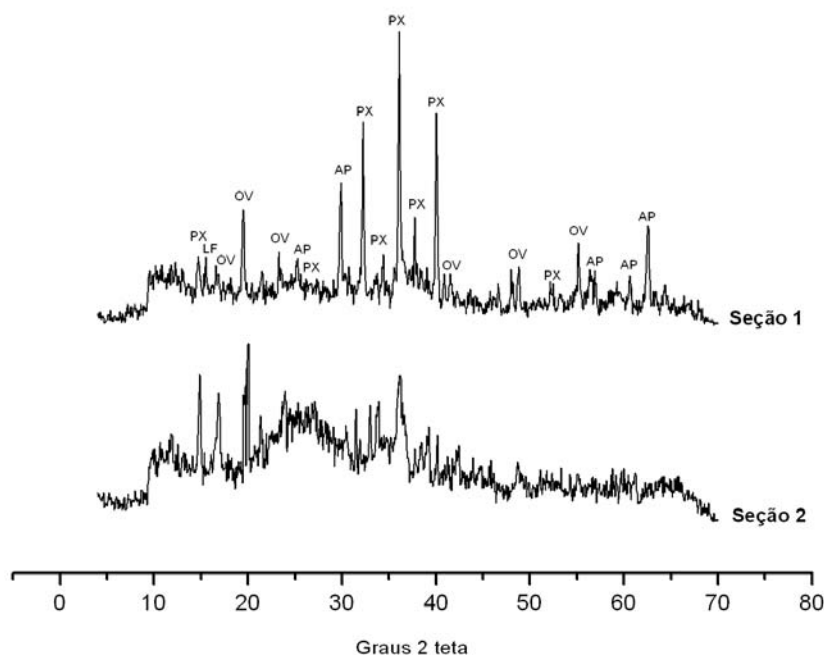


Figura 9 – Difratoograma de Raios-X (radição CoK α) das Seções 1 (deposição recente) e 2 (peridotito milonitizado) da Amostra R2, sendo AP – Apatita; LF – Leucofosfita; OV – Olivina e PX – Piroxênio.

III - Peridotito milonitizado coberto por verniz fosfático

O segundo estágio de formação da crosta é a consolidação dos excrementos depositados constituindo um verniz de brilho perolado e coloração acinzentada sobre a rocha. Tal verniz representa o aumento do aporte de fósforo e cálcio provenientes das excreções e seu amadurecimento, como pode ser visto pela amostra R3 no Quadro 1. Os teores de P₂O₅ sofrem redução considerável na comparação entre as Seções 1 (verniz raspado), 2 (manto de intemperismo subjacente ao verniz) e 3 (rocha menos intemperizada). Em termos numéricos, passam de 25,28% para uma faixa sem detecção. O CaO possui o mesmo comportamento, reduzindo de 31,57% para 1,05%. O aumento dos teores de FeO, MgO e SiO₂ da Seção 1 para 3 confirmam a presença da interface com a rocha peridotítica.

Na mineralogia, o comportamento é semelhante àquele descrito anteriormente (Figura 10). Isto é, na cobertura delimitada pela Seção 1, correspondente à capa de verniz mais pura, observam-se picos de baixa intensidade, mesmo para os minerais

fosfáticos, denunciando o baixo grau de mineralização do excremento. À medida que se aprofunda na rocha (Seção 2), crescem os picos dos minerais ferromagnesianos, embora alguns picos de apatitas também fiquem mais intensos. Corresponderia essa seção, ao produto da interação superficial mencionada no primeiro estágio. Na Seção 3, por sua vez, fica evidenciado o final da interferência dos fosfatos com a redução progressiva dos picos de apatitas e aumento dos piroxênios e olivinas, principalmente as enstatitas e faialitas, respectivamente. Ocorre, assim, uma estratificação micrométrica da fosfatização, relacionada à idade da mesma.

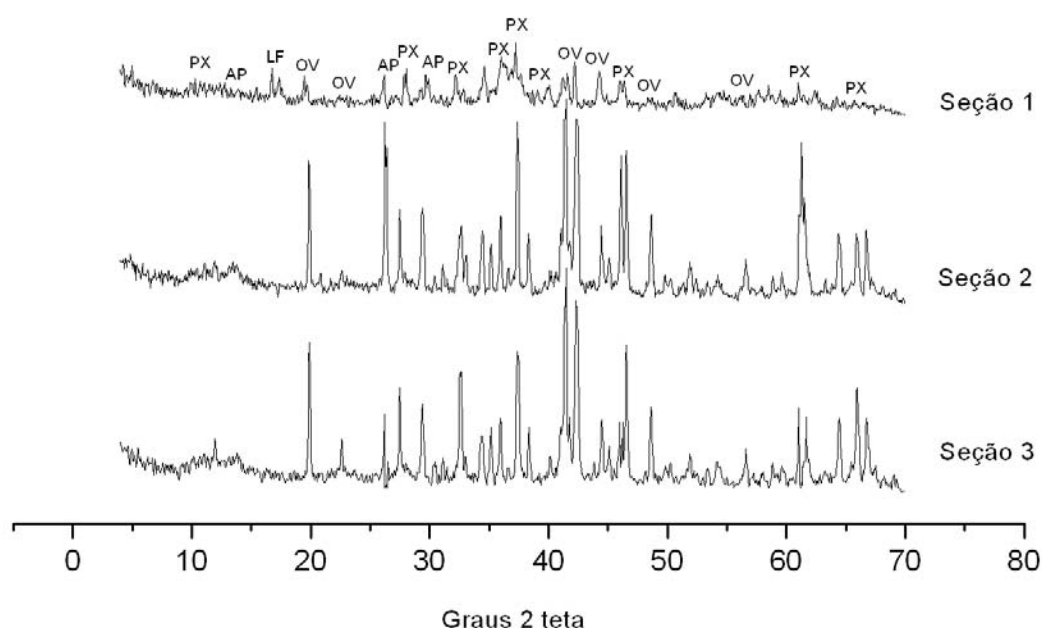


Figura 10 – Difratograma de Raios-X (radiação $\text{CoK}\alpha$) das Seções 1 (verniz fosfático perolado), 2 (manto de intemperismo superior, adjacente ao verniz fosfático) e 3 (rocha menos intemperizada) da Amostra R3, sendo AP – Apatita; LF – Leucofosfita; OV – Olivina e PX – Piroxênio.

IV - Peridotito Milonitizado coberto por crosta fosfática espessa

O terceiro e último estágio é a acumulação progressiva dos excrementos de maneira a formar um pacote suficientemente espesso que adquire comportamentos físicos e químicos distintos da rocha na qual se depositou. Observações de campo mostram que, após ser formada, a crosta passa a ter dilatação diferencial da rocha, motivo pelo qual se desprende da mesma com facilidade. Da mesma maneira, sua coloração se apresenta muito mais clara que o verdeengo característico dos peridotitos.

Do ponto de vista químico, numa comparação com o material subjacente, a crosta se confirma como uma acumulação de P e Ca. Embora apresente teores menores se comparados com sua fase predecessora (verniz), o comportamento dos teores destes

dois elementos no sentido crosta → rocha é o mesmo (Tabela 2), isto é, ocorre uma diminuição em ambos. Ficam como heranças de sua interação com o manto de intemperismo superficial da rocha, os altos teores de magnésio e ferro. Elementos como níquel e cromo permanecem como traços na crosta, tendo aumento considerável no interior do substrato (Tabela 2), típicos de uma assinatura geoquímica ultramáfica.

Os aspectos mineralógicos característicos do processo de formação da crosta se confirmam no contraste entre as três seções da amostra R4 (Figura 11). De 1 para 3, observam-se reduções na intensidade e ocorrência dos picos da apatita e leucofosfita associado ao aumento e/ou permanência da intensidade dos picos dos minerais ferromagnesianos, próprios do substrato ultramáfico. Chama a atenção, durante todo o processo, a presença de minerais da rocha na superfície fosfatizada. Trata-se, sobretudo, de fragmentos provenientes do intemperismo físico da rocha, tendo em vista que além das perturbações abrasivas, tal rocha está localizada numa vertente fortemente afetada pela radiação solar (Figura 6), que impulsiona os processos de dilatação e contração. Tais fragmentos mineralógicos são envolvidos pelas excreções e participam da composição mineralógica da crosta fosfática. A identificação de tais estágios na formação das crostas fosfáticas, não implica, necessariamente, que todo o material depositado sobre o peridotito milonitizado irá se transformar em crostas espessas. As condições para o acúmulo dos excrementos são fundamentais para que isso ocorra; caso contrário, todo o peridotito milonitizado estaria recoberto por crostas, o que não ocorre.

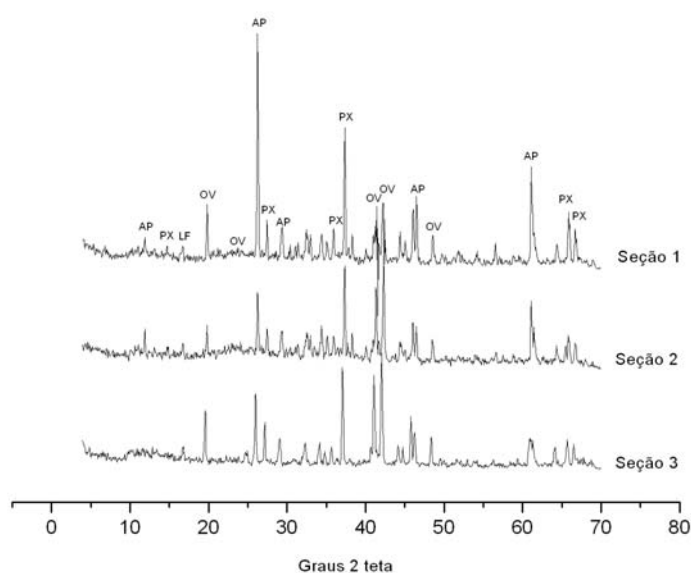


Figura 11 – Difratograma de Raios-X (radiação CoK α) das Seções 1 (crosta fosfática), 2 (manto de intemperismo superior, adjacente à crosta) e 3 (rocha menos intemperizada) da amostra R4, sendo AP – Apatita; LF – Leucofosfita; OV – Olivina e PX – Piroxênio.

4.1.2. Espeleotemas e Florações de Fosfatos

Tal como inflorescências na rocha, por vezes em associação com as crostas, os espeleotemas fosfáticos ocorrem, principalmente, no interior e borda de fraturas, nas áreas protegidas, que recebem soluções percolantes ricas em P. Possuem coloração amarelo-esbranquiçada a acinzentada (Figuras 12a e 12b) e dureza baixa. Estão, em alguns casos, associados à coberturas biológicas, sobretudo quando ocorrem em fraturas mais sombreadas e úmidas.

Caracterizam-se por composição química variada (Tabela 2), destacando-se o P_2O_5 (29,23%), o CaO (34,72%), o MgO (1,89%), o SiO_2 (30,80%), o Na_2O (1,20%) e o FeO (1,13%), totalizando cerca de 98,97% dessas feições. Os altos valores de sódio, tanto para os espeleotemas quanto para a maior parte das coberturas superficiais, podem ser novamente atribuídos à influência dos “sprays” salinos e pelos altos teores deste elemento nos excrementos das aves devido a sua dieta (BOTH & FREITAS, 2001). Chamam atenção os teores de PbO encontrados nos espeleotemas (0,07%). Embora sejam valores baixos, esse elemento não fora identificado na crosta e verniz fosfáticos. Como os espeleotemas estão associados aos peridotitos com serpentinização, é provável que a fonte de chumbo provenha de algum dos mais de 20 minerais do grupo das serpentinas que, após intemperizados, liberam juntamente com as soluções percolantes de fósforo, o Pb via lixiviação. Esse, por sua vez, participará da neoformação dos minerais que constituem as inflorescências. Tais pressuposições se confirmam pela presença de picos de apatita de chumbo - $Pb_3(PO_4)_2$ - na mineralogia.

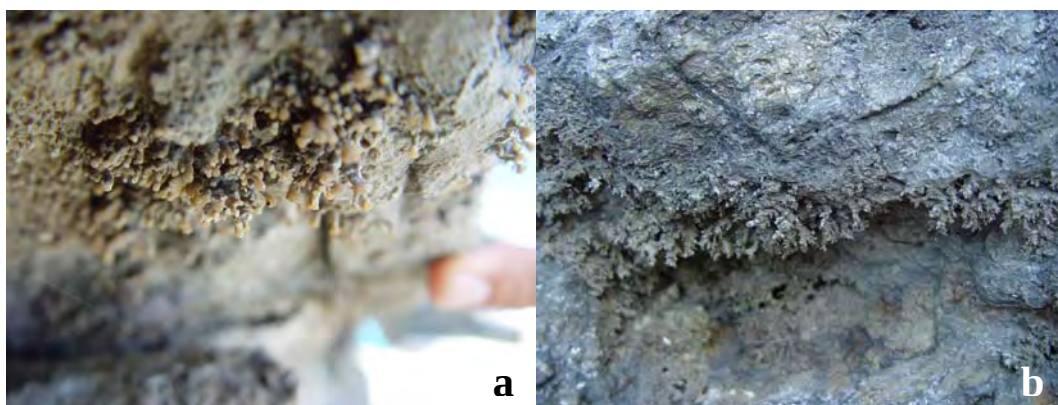


Figura 12: **a** – Espeleotemas de fosfatos amarelados nas paredes internas de fraturas.
b – Espeleotemas de fosfatos acinzentados sustentados em fraturas expostas.

Associada à análise química total, a análise por microsonda com EDS em MEV revelou uma maior heterogeneidade na composição dos espeleotemas se comparada

àquela esperada (Figura 13). Ao contrário do que se imaginava, tais estruturas não constituem formas primárias de fosfatização, compostas, essencialmente, por apatitas como identificado para as crostas espessas. Como produtos de fluídos enriquecidos quimicamente pelo intemperismo dos minerais primários dos peridotitos e das serpentinas, observa-se a mineralização de fosfatos de Fe, Al, K e Ca, destacando-se como mineral secundário a taranakita. - $(K,Na)_3(Al,Fe^{III})_5(PO_4)_2(PO_3OH)_6 \cdot 18H_2O$. Tal mineral, conjuntamente com fosfatos de cálcio degradados e fragmentos mineralógicos da rocha do embasamento, forma a base cristalina dos espeleotemas (Figura 14). A taranakita foi identificada em solos ornitogênicos da Antártica por Simas et al. (2007).

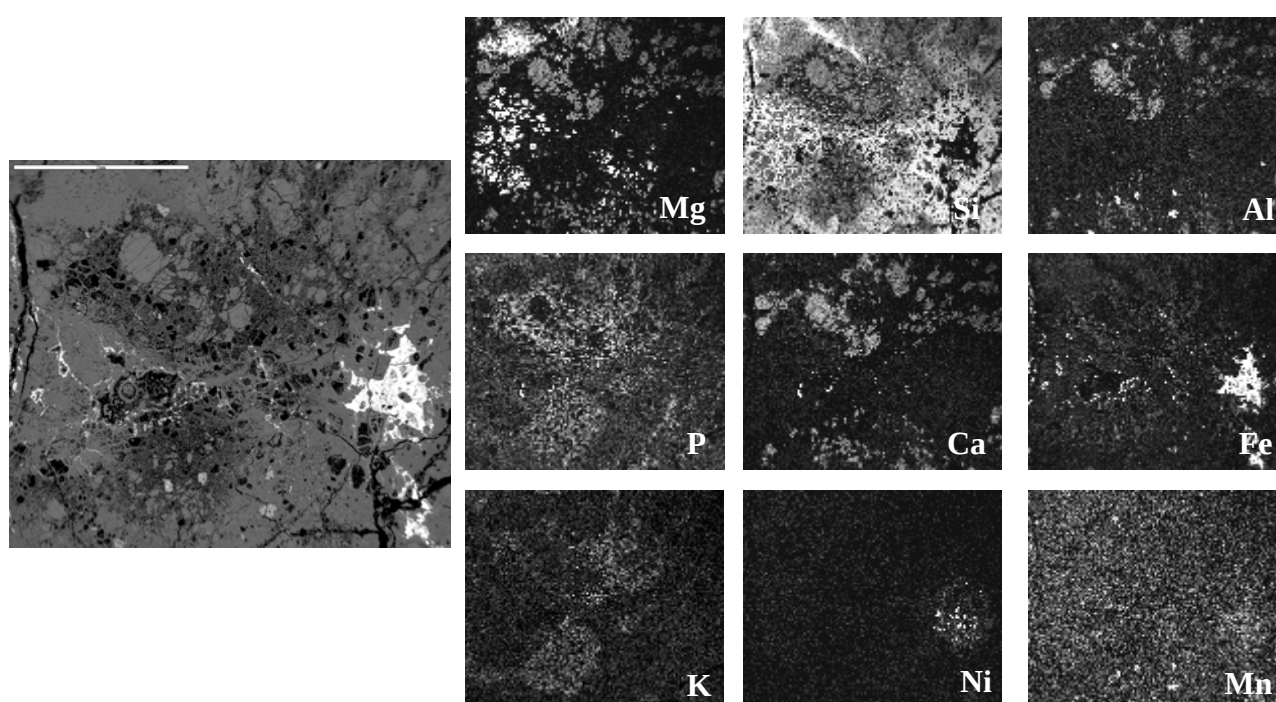


Figura 13 – Fotomicrografia em retroespalhamento eletrônico (MEV) e mapas microquímicos de EDS de espeleotemas fosfáticos do Arquipélago de São Pedro e São Paulo, Atlântico Norte (as feições mais claras indicam a distribuição e a maior quantidade relativa do elemento na lâmina analisada).

Dentre os minerais provindos do peridotito serpentinizado envolvidos pela matriz fosfática das inflorescências, destacam-se o mineral cromita (Figura 14). Trata-se de um óxido de fórmula $((Fe,Mg)(Cr,Al,Fe)_2O_4)$, aparentemente rico em Ni. Tal variação mineralógica foi também encontrada por Linares (1992) em depósitos de rochas ultramáficas no sul da Espanha. A cromita é um mineral associado às serpentinas, embora não faça parte deste grupo.

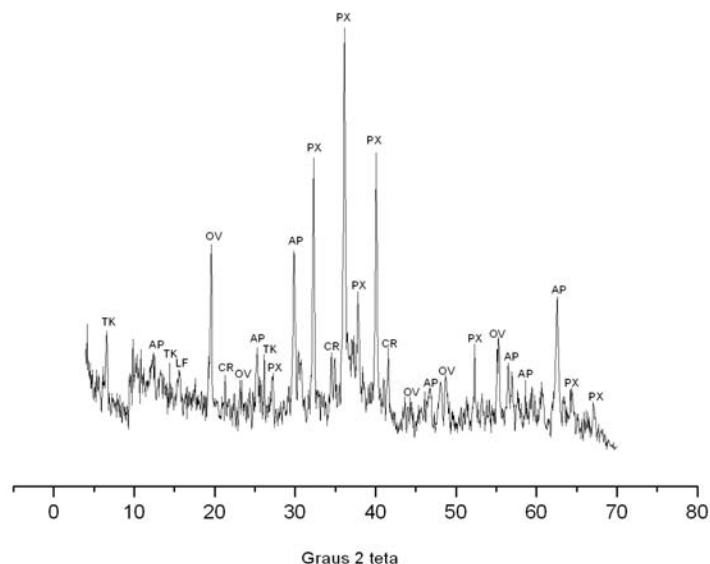


Figura 14 – Difratograma de Raios-X (radição $\text{CoK}\alpha$) da amostra R6 (espeleotemas fosfáticos), sendo AP – Apatita; LF – Leucofosfita; OV – Olivina, CR – Cromita, TK - Taranakita e PX – Piroxênio.

4.1.2.1. Processo proposto para a formação de espeleotemas fosfáticos

Espeleotemas são, etimologicamente, reconhecidos como depósitos minerais. Notadamente a literatura apresenta vasta gama de trabalhos desenvolvidos sobre a formação de tais estruturas em cavernas via precipitação de carbonatos, culminando na mineralização e esculturação de estalactites e estalagmites de calcita (CaCO_3). Podem desenvolver-se a partir de outras matrizes químicas, sobretudo se forem satisfeitas as condições primordiais de sua formação: existência de fluidos líquidos saturados submetidos às condições físico-químicas que privilegiam a (re)cristalização de minerais.

O papel da gota d'água saturada com bicarbonato de cálcio proveniente do intemperismo de calcários e mármore é, aqui, substituído pelos fluidos ricos em P e Ca das excreções animais. Após serem depositados sobre as rochas podem diretamente, dependendo de sua viscosidade, penetrar nas fraturas existentes ou, ainda, serem carregados para as mesmas mediante interferência da água da chuva. É comum que tais fluidos se incorporem à rocha através de sua trama de micro-fraturamento, comum em rochas serpentinizadas. Ao percolarem, tais fluidos reagem com a rocha tanto do ponto de vista químico, enriquecendo-se com Fe, Mg, Al, K e Si, quanto físico, promovendo a degradação de fragmentos mineralógicos. Os espeleotemas serão formados quando houver acúmulo nas paredes íngremes de fraturas mais abertas ou, ainda, nas bordas destas (Figuras 15a e 15b), expostas à maior interferência da radiação solar. Em outras palavras, quando o fluido atinge a parede lateral da fratura, tal como se fosse o teto de

uma caverna, o equilíbrio entre água, gás carbônico, elementos químicos dissolvidos e fragmentos minerais se romperá. Na superfície das gotas ocorrerão processos de trocas de CO_2 com a atmosfera e a insolubilidade dos minerais recém precipitados responderá por sua concentração em deposições cumulativas, conferindo geometria aos espeleotemas. O processo continuará enquanto houver soluções ricas em fosfatos penetrando nas fraturas.

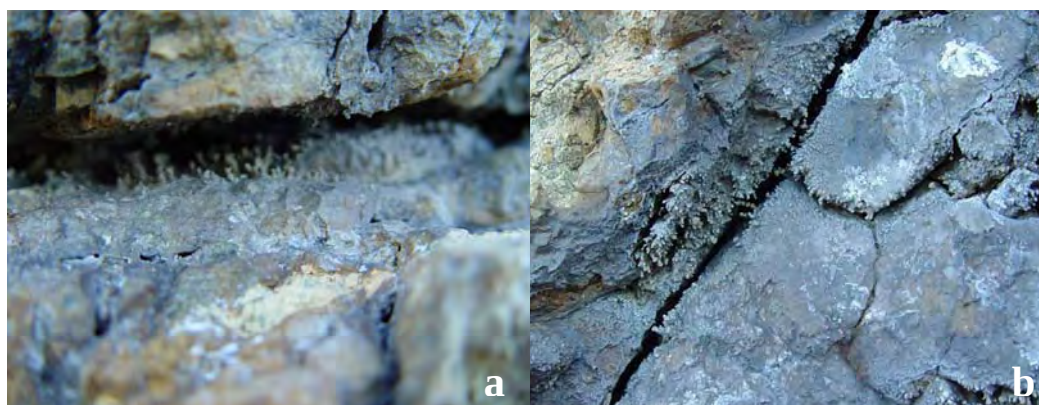


Figura 15: **a** – Espeleotemas de Fosfatos no interior de fraturas da rocha.
b – Espeleotemas de Fosfatos nas bordas de fraturas da rocha.

4.1.3. Fosfatos Percolados

O intenso fraturamento (macro e micro) dos peridotitos milonitizados serpentinizados é um mecanismo propulsor da formação de mais um produto da fosfatização no ASPSP: formas de fosfatos percolados. Além de contribuir na gênese dos espeleotemas, associados às outras condições já referenciadas, as fraturas atuam como dutos da percolação dos excrementos depositados pelas aves (Figura 16). Ao contrário do que acontece com a acumulação superficial nos peridotitos sem a serpentinação, aqui há uma interação geoquímica entre a solução rica em P e o saprolito da rocha, culminando na neoformação de minerais bastante incomuns em ambientes naturais.

O saprolito dos milonitos de peridotitos serpentinizados tem na sua composição química marcas dos intensos processos intempéricos pelos quais vem passando desde a exposição da rocha à atmosfera. Com a fosfatização, essa composição tende a se alterar ainda mais, sobretudo na área de interferência dos excrementos. Evidências geoquímicas apontam para altos teores de P_2O_5 na rocha em profundidade. Observam-se, por exemplo, teores que correspondem a 9,58% na Seção 01 da amostra R7 (Tabela 2) e 5,75% na Seção 02. Se comparada com a Seção 2 das amostras R2, R3 e R4 esses

valores reduzem para 0,02%, 3,06% e 1,37% de P_2O_5 , respectivamente. Outros elementos, cuja contribuição provém dos excrementos, possuem comportamento análogo, isto é, exibem teores em profundidade semelhantes ou maiores que na superfície, como é o caso do cálcio e do potássio (Tabela 2 – Amostra R7).

Como se utilizou neste estudo exemplares de rochas reconhecidas como amostras de mão, a existência de uma distribuição geoquímica menos concentrada na superfície pode ser atribuída à importância do micro-fraturamento na percolação e, conseqüente fosfatização destas rochas. A trama irregular de serpentinas, evidenciada pelas oscilações nos teores de MgO (24,26% - 21,60% - 32,83%), FeO (6,67% - 3,40% - 9,86%) e SiO_2 (51,88% - 23,22% - 25,90%) nas três seções é outro fator importante ao processo de fosfatização, principalmente no condicionamento de novas formas de fosfatos mineralizadas, haja vista que serão elas que, após intemperizadas, servirão de fonte de elementos metálicos para a formação de outras formas minerais fosfáticas que não somente as apatitas biogênicas e/ou neoformadas .



Figura 16 – Em destaque, excrementos percolados nas fraturas do saprolito de peridotito milonitizado serpentinizado.

A mineralogia confirma tais observações, na medida em que é encontrada apatita também em profundidade, algumas vezes em maior intensidade que na crosta superficial (Figura 17). Observam-se, também, como produtos da interação geoquímica com o saprolito, formas cristalinas de fosfatos de Fe, Al e K. A taranakita e a leucofosfita voltam a aparecer como minerais secundários, assim como os picos de cromita e serpentina se destacam na Seção 03. As olivinas e os piroxênios acompanham os

resultados encontrados pelas análises químicas para Fe e Mg, apresentando picos que se alternam em intensidades na comparação das três seções.

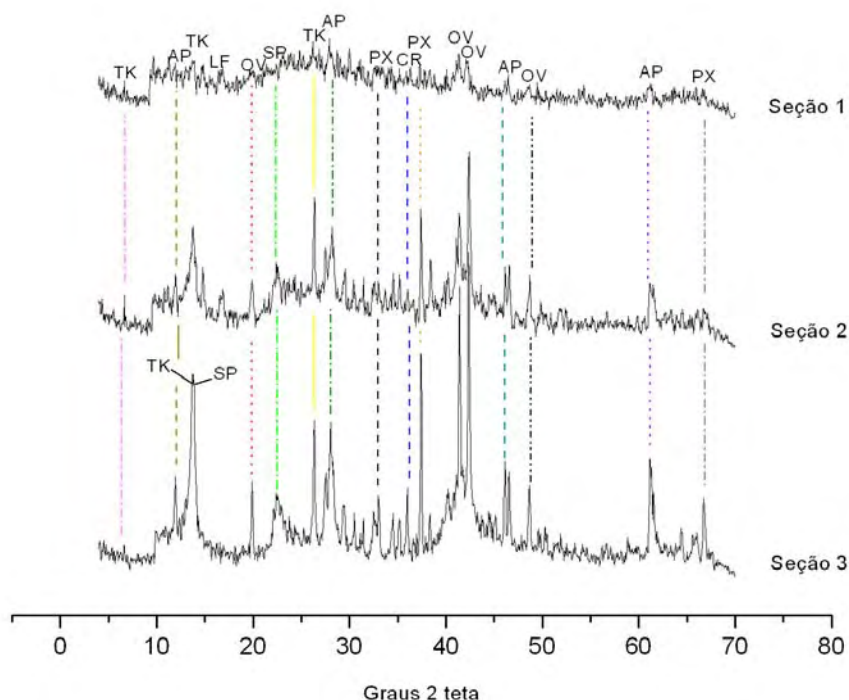


Figura 17 – Difratoograma de Raios-X (radiação $\text{CoK}\alpha$) das Seções 1 (superfície recoberta por capeamento branco de fosfatos); 2 (manto de intemperismo superior com sinais de fosfatização percolante) e 3 (rocha menos intemperizada) da amostra R7, sendo AP – apatita; LF – Leucofosfita; OV – olivina; PX – piroxênio; TK – Taranakita; CR – Cromita e SP – Serpentina.

Um destaque maior deve ser dado à taranakita encontrada no ASPSP. Tipicamente conhecida como um mineral fosfático originado em ambientes cuja rocha contenha altos teores de Al na sua composição, o que leva alguns autores a denominá-la de fosfato de alumínio com potássio (ROBERTS et al., 1974), a taranakita se caracteriza por possuir sistema cristalino hexagonal, densidade em torno de 2,09 e por coloração branca, às vezes misturada com cinza ou branco-amarelado. Tem na sua composição química, conforme material de referência para a literatura (NRIAGU & MOORE, 1984), 4,2 a 8,28% de K_2O ; 0 a 1,4% de CaO ; 0,83 a 1,17% de Fe_2O_3 ; 18,6 a 22,9% de Al_2O_3 ; 35,1 a 42,3% de P_2O_5 e 28,2 a 33,1% de H_2O .

No ASPSP, entretanto, os baixos teores de Al da rocha associados aos altos teores de Fe, evidenciam modificações estequiométricas e de composição neste mineral, indicando que ocorre uma substituição do Al pelo Fe na estrutura e o registro de Si e, em alguns casos, de Na e Cr na constituição, levantando questionamentos sobre a

existência de uma provável taranakita férrica ou de algum outro fosfato ainda não conhecido. Por meio da microsonda acoplada ao EDS, observa-se que nas fraturas do saprolito serpentizado este mineral aparece em abundância, cuja composição química foi identificada como sendo de 7,79% de K_2O ; 0% de CaO ; 20,45% de Fe_2O_3 ; 7,84% de Al_2O_3 ; 41,23% de P_2O_5 ; 9,52% de SiO_2 , 0,51% de Na_2O , 0,43% de MgO e 0,33% de Cr_2O_3 (Figura 19; Ponto 01; Tabela 3). A substituição de Al_2O_3 por Fe_2O_3 ocorre em fraturas derivadas do intemperismo de serpentinas, piroxênios e olivinas, fraturas essas ferruginosas por causa da abundância deste elemento na forma oxidada.

A análise por MEV revelou distintas formas de fosfatização nas fraturas do peridotito serpentizado. A primeira delas corresponde ao **preenchimento** destas por soluções ricas em P e/ou progressiva fosfatização das bordas pela interação geoquímica com o saprolito. Neste caso, o excremento exerce a pedogênese via mineralização da matéria orgânica nele contida. As fraturas preenchidas pelos excrementos servem de lócus para essa mineralização, tendo como resultado a formação da referida “taranakita férrica”, tal como pode ser visto pela Figura 18.

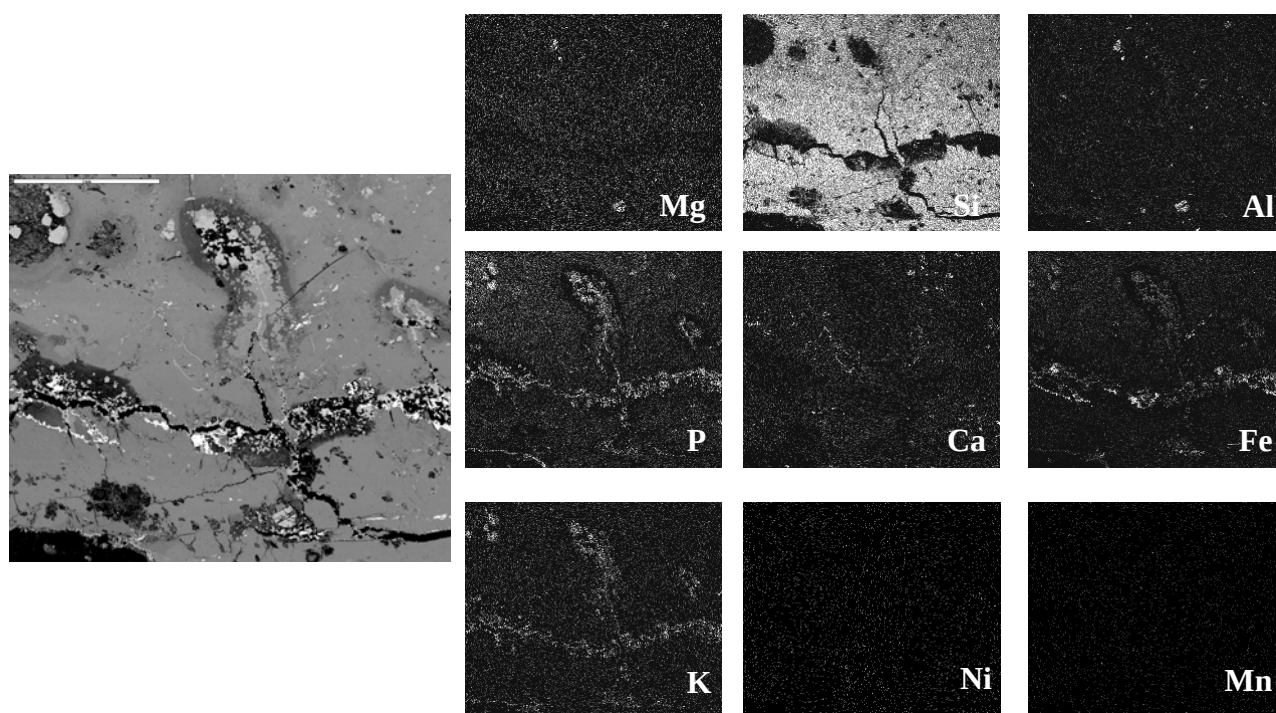


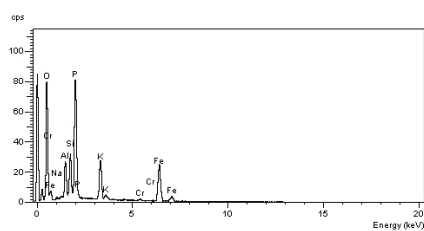
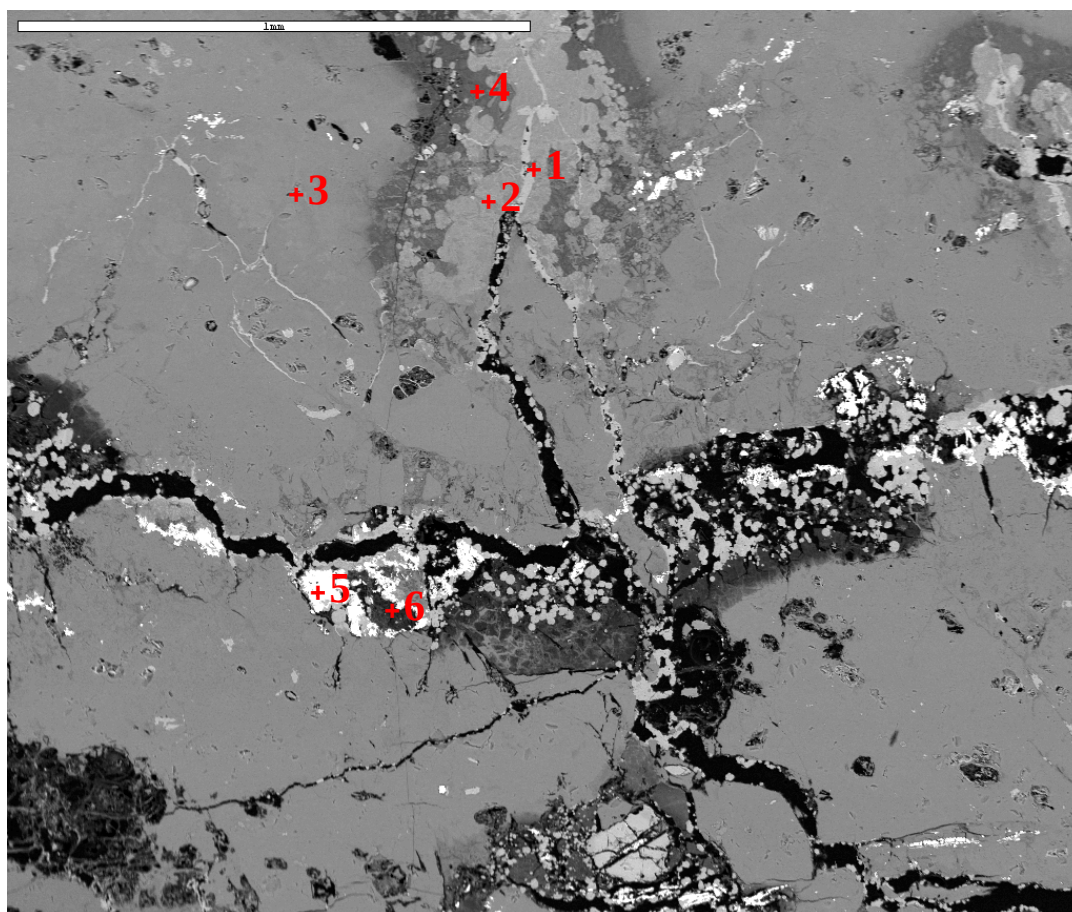
Figura 18 – Fotomicrografia em retroespalhamento eletrônico (MEV) e mapas microquímicos de EDS de material intemperizado de fraturas antigas, coletado a mais de 4 m de profundidade, correspondentes à amostra R7 (as feições mais claras indicam a distribuição e a maior quantidade relativa do elemento na lâmina analisada).

A matriz silicosa que envolve as fraturas é o sub-produto de um intenso processo de remoção da maior parte dos componentes químicos da rocha serpentinizada, denotando se tratar de um material já bastante intemperizado, localizado em fraturas muito antigas. O SiO_2 se concentra e precipita na forma de silcrete, quase sempre misturado a algum outro elemento.

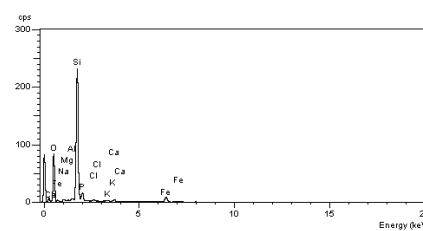
As análises pontuais evidenciadas pelos espectros geoquímicos (Figura 19) e suas respectivas quantificações (Tabela 3) demonstram a relação entre a taranakita e os silcretes, elucidando o porquê da presença de Si na composição desta. Em P1, observa-se o preenchimento das fraturas pela taranakita. Em P2 ocorre um silcrete impregnado pela taranakita e em P3, observa-se um silcrete mais característico, contendo traços de cálcio e ferro, mas sem nenhum fosfato. Summerfield (1983), estudando silcretes na região do Kalahari, África, identificou que é comum sua associação com óxidos de ferro. Embora não tenha inferido a fonte destas impurezas, é provável que no ASPSP, o próprio intemperismo dos minerais máficos se comporta como fonte. Em P4, próximo à outra fratura, observa-se novamente o espectro de um silcrete com alguma fosfatização. A partir destes pontos, percebe-se que a proximidade das fraturas condiciona à fosfatização dos silcretes, o que não implica que a fosfatização seja um processo posterior à formação de tais concreções silicosas.

Estudos têm demonstrado que o fósforo se comporta como um elemento residual enquanto outros minerais como os silicatos, vão se desestabilizando (LAPIDOLOREIRO & MELAMED, 2006). Neste caso, poderá ter ocorrido a formação de apatitas primárias submetidas a processos subseqüentes de solubilização/cristalização antes da formação dos silcretes. Tornar-se-iam taranakitas a partir do intemperismo dos veios serpentíníticos e liberação de soluções ricas em Fe^{3+} . Logo, a recristalização dos fosfatos deve ser considerada e, conforme Alcover Neto & Groke (1989), é provável que ela se processe da seguinte maneira: apatita primária $\rightarrow$ apatita secundária $\rightarrow$ Fosfatos de Ca-Mn-Na-Al $\rightarrow$ Fosfatos de Al e Fe $\rightarrow$ Fosfatos de Fe + Fosfatos de Al.

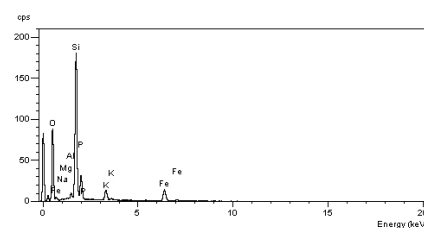
A presença de Si na composição química das taranakitas, deve-se à sua formação concomitante a liberação deste elemento nos estágios que caracterizam sua precipitação. Nos outros pontos, observa-se um fragmento de magnetita (P5), também identificada por Campos et al (2005) em associação aos processos de alteração hidrotermal dos peridotitos milonitizados.



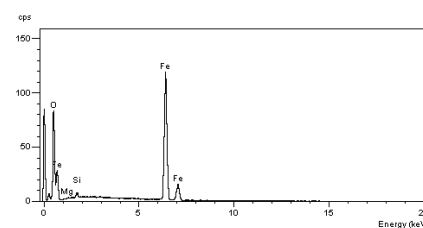
P1



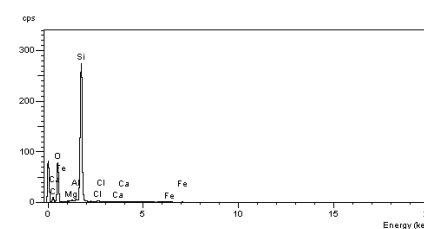
P4



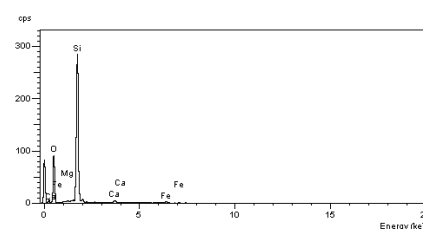
P2



P5



P3



P6

Figura 19 – Fotomicrografia em retroespalhamento eletrônico (MEV) e pontos da análise química por meio de EDS com respectivos espectogramas. Material correspondente à amostra R7, evidenciando fosfatos percolados preenchendo fraturas.

Tabela 3 – Composição química das análises pontuais das Figuras 19 e 21

Análises Pontuais	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	FeO	Fe ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	SiO ₂
-------------------	-------------------------------	------------------	-----	-----	--------------------------------	-------------------	-----	--------------------------------	--------------------------------	------------------

%

Figura 17 – Fosfatização por preenchimento de fraturas

1	41,23	7,79	-	0,43	7,84	0,51	-	20,45	0,33	9,52
2	14,74	3,21	-	0,33	1,83	0,40	-	11,72	-	57,72
3	-	-	1,30	1,32	0,48	-	-	0,84	-	94,78
4	8,59	0,41	0,97	0,38	0,60	1,06	-	6,82	-	79,65
5	-	-	-	0,35	-	-	29,36	65,25	-	1,73
6	-	-	1,30	0,66	-	-	-	1,75	-	95,27

Figura 19 – Fosfatização framboidal nas fraturas

1	43,02	3,69	0,27	-	3,11	-	-	31,51	0,48	3,06
2	25,12	-	0,20	-	1,77	-	-	21,14	0,51	39,29
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	99,94
4	-	-	-	10,34	49,14	-	11,82	-	21,45	0,42
5	37,28	2,69	-	0,21	2,93	-	-	30,94	0,74	6,84
6	-	-	-	-	-	-	-	0,72	-	98,00

Outra forma de fosfatização percolante da rocha é a impregnação dos fosfatos de forma ***circular ou framboidal*** nas bordas e interior das fraturas. Tal como demonstrado na Figura 20, após percolar no saprolito e interagir com o manto de intemperismo que margeia as fraturas, os minerais fosfáticos descrevem crescimento centrífugo que se assemelha à fosfatização promovida pela ação de cianobactérias. Neste caso, estudos mais específicos precisam ser realizados para comprovar se este padrão de crescimento dos minerais é característico da atividade biológica, ou se através da reação geoquímica com o substrato, a mineralização do P já pode assumir tal geometria.

Novamente, como produtos da fosfatização, são observados pontualmente (Figura 21) taranakitas no preenchimento das fraturas (P1) e como incrustações globulares (P5) nas bordas. Demonstram-se como sendo minerais mais densos se comparados às impregnações de fosfatos ricas em Si próximas a elas (P2). Identificam-se, também, silcretes mais puros em P3 e P6, assim como fragmentos minerais primários em P4. Trata-se, provavelmente, de uma cromita rica em Al₂O₃, o que sugere alguns questionamentos, já que a cromita é reconhecida como um mineral que apresenta em sua constituição primordial FeO e Cr₂O₃, respectivamente assumindo proporções de 30,10% e 67,90% (SPIER, 1999).

Embora seja realmente formada por tais elementos, a cromita pode ter cerca de 65% do seu Cr_2O_3 substituído por Al_2O_3 . Além disso, grande parte do FeO pode ser substituído pelo MgO , o que atribui composição variável para esse espinélio conforme o ambiente em que se forme (SPIER, 1999). O que se torna questionável para a cromita em questão, muito encontrada em fotomicrografias de seções bastante intemperizadas como residual, é a fonte de Al para que ocorra essa substituição, uma vez que o Fe é um elemento bem mais abundante nas rochas do arquipélago. Tais questões carecem de maior aprofundamento.

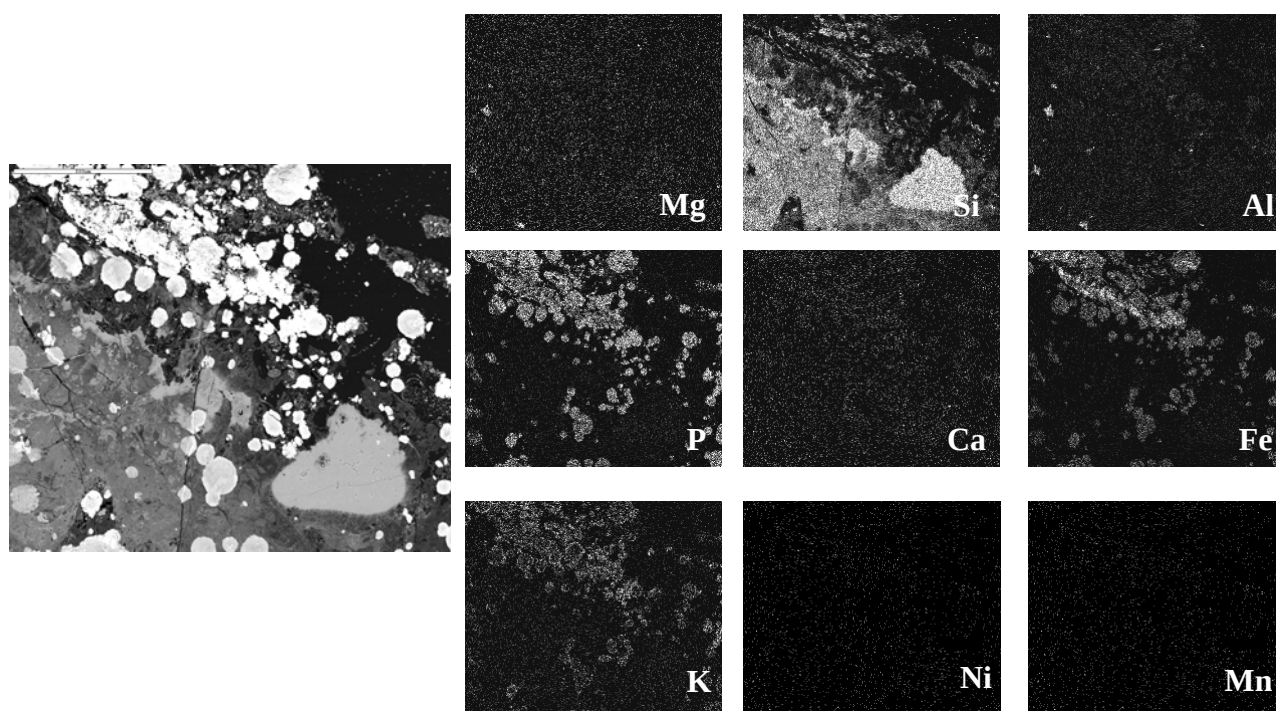
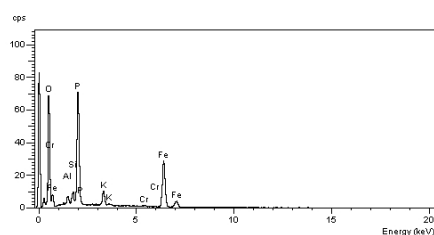
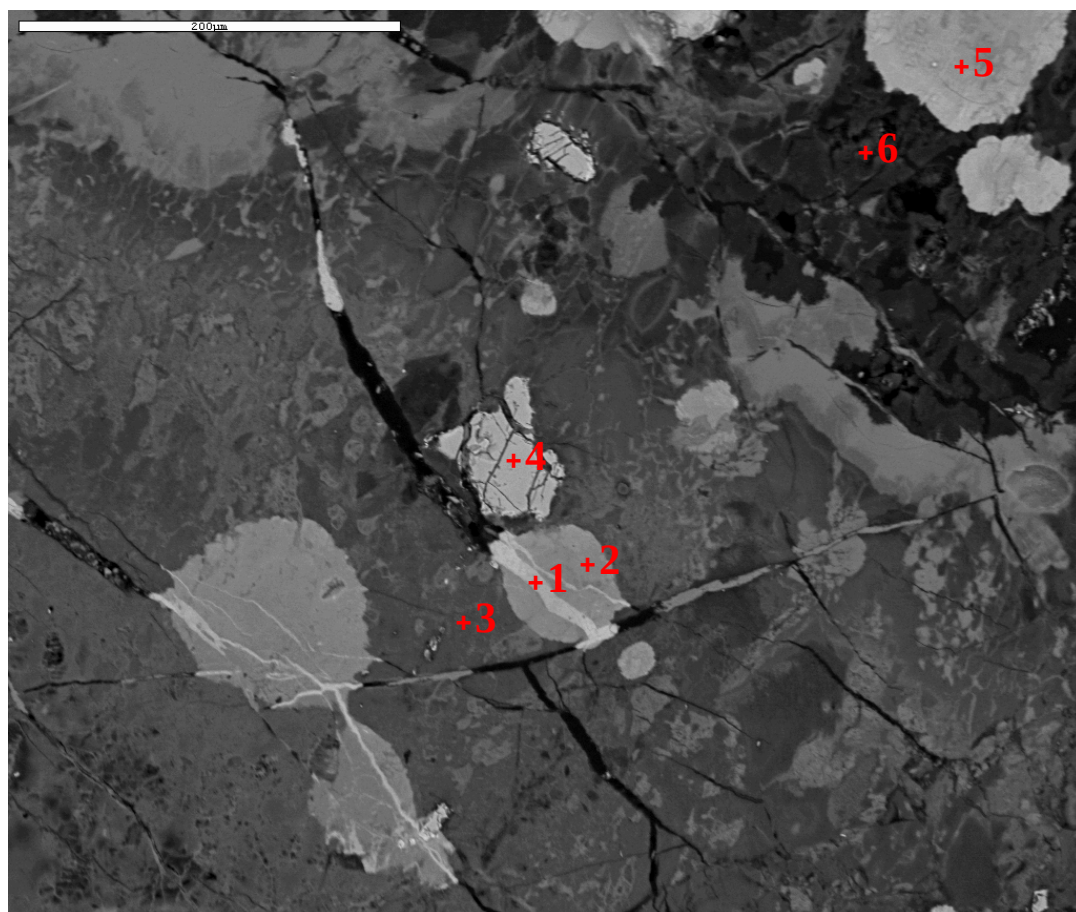
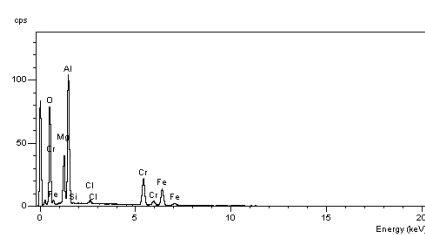


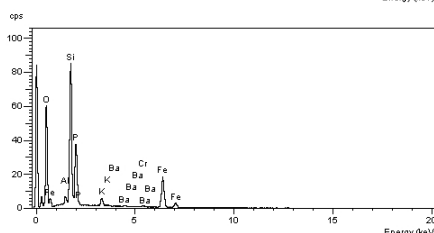
Figura 20 – Fotomicrografia em retroespalhamento eletrônico (MEV) e mapas microquímicos de EDS fosfato terroso coletado nas fraturas da rocha serpentinizada, correspondente à amostra R7, com possíveis colônias de cianobactérias (as feições mais claras indicam a distribuição e a maior quantidade relativa do elemento na lâmina analisada).



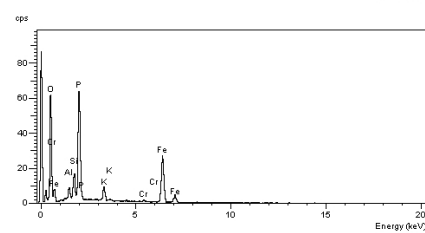
P1



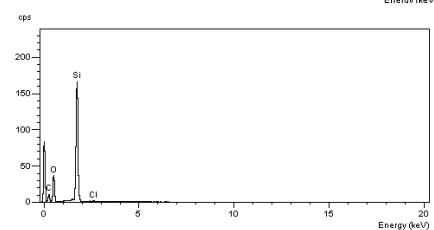
P4



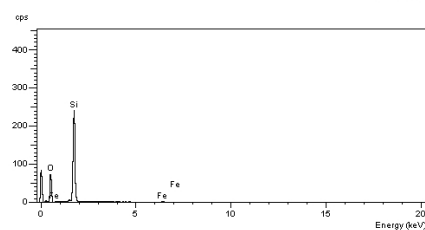
P2



P5



P3



P6

Figura 21 – Fotomicrografia em retroespalhamento eletrônico (MEV) e pontos da análise química por meio de EDS com respectivos espectogramas. Material correspondente à amostra R7, evidenciando fosfatos percolados na forma framboidal ou circular.

4.1.3.1. Processo proposto para a formação dos fosfatos percolados

A gênese de formas minerais fosfáticas a partir da percolação dos excrementos nas fraturas deve ser elucidada mediante a compreensão de como se dá o fraturamento intenso dos peridotitos e de como o intemperismo dos minerais no interior destas fraturas pode contribuir com o enriquecimento geoquímico do processo de fosfatização. É preciso lembrar que os excrementos podem interagir com fraturas em distintos graus de desenvolvimento e tamanhos, assim como sua interação será condicionada às características do substrato em reação e seu grau de decomposição. Em outras palavras, a interação do excremento nas fraturas de um saprolito se processa de maneira bastante distinta daquela com uma rocha sã.

O fraturamento das rochas do Arquipélago pode ser relacionado a dois processos fundamentais. O primeiro deles está ligado às perturbações de ordem estrutural, como o tectonismo, ocorridas desde a formação do edifício peridotítico até a atualidade, haja vista que o ASPSP se encontra numa zona tectonicamente ativa (CAMPOS et al., 2005). O segundo, por sua vez, é de ordem intempérica, como a degradação física e a decomposição química das rochas. Embora não demonstre a princípio sua relação direta com a origem de fraturas, o intemperismo químico, sobretudo por meio da almirólise, foi responsável pela decomposição e mesmo remoção de boa parte da trama de serpentinas dos milonitos, tendo como consequência a abertura de fissuras na rocha que a tornam ainda mais susceptível às alterações geoquímicas.

Na caracterização dos fosfatos percolados do item anterior, observou-se a reação dos fluidos em fraturas antigas, submetidas a processos de decomposição química bastante avançados. Aqui, como forma de retratar outras possibilidades de ocorrência dessa interação, serão demonstrados três estudos de caso que traduzem a percolação de soluções ricas em P em veios serpentiniticos em fases distintas de desenvolvimento, a saber: veios desagregados, decompostos e removidos.

O primeiro estudo de caso se dá pela interação entre o excremento e um veio serpentinitico fraturado por desagregação física. Tal interação se inicia através da percolação e preenchimento dos espaços intersticiais entre os minerais e conseqüente precipitação das formas de fosfatos. Os mapas microquímicos da Figura 22 ilustram tal fosfatização por precipitação de P-Ca, com elevada cristalinidade, no contato com o veio. Por se tratar de fraturas originadas principalmente pelo intemperismo físico,

haverá pouca reação geoquímica com os componentes da rocha e a apatita será o mineral fosfático prioritariamente formado.

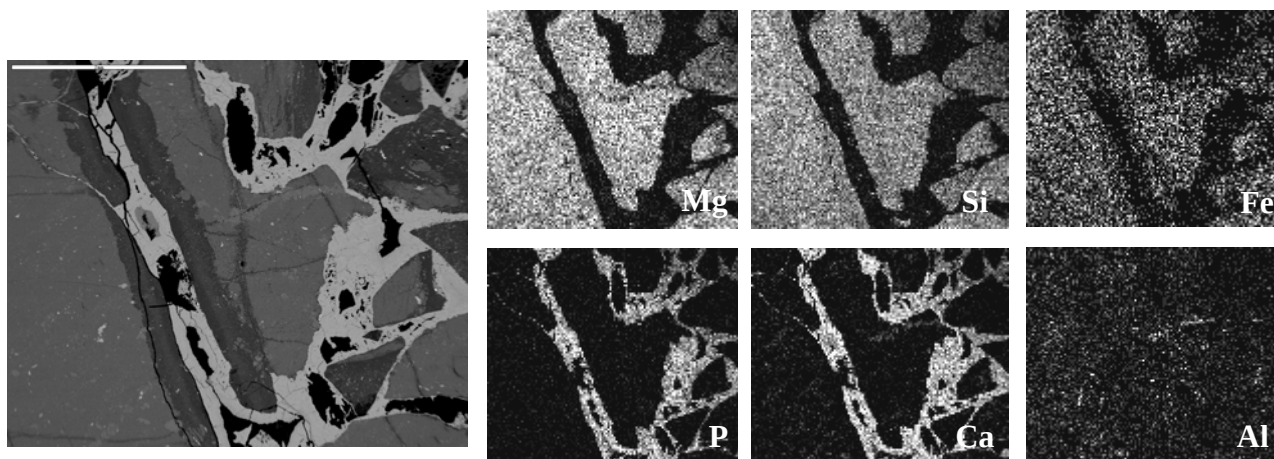
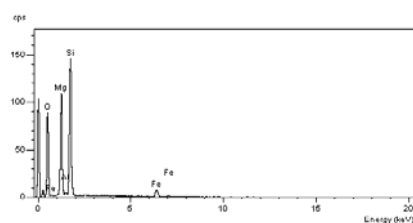
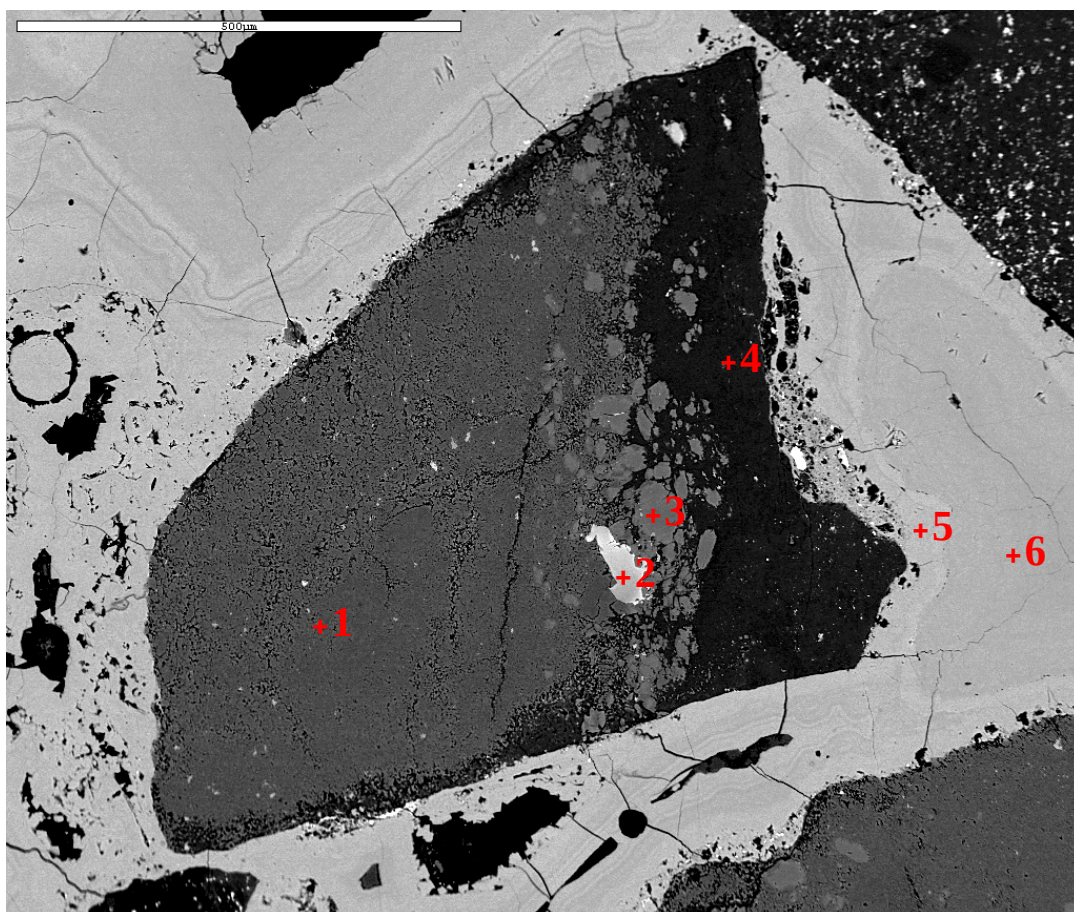


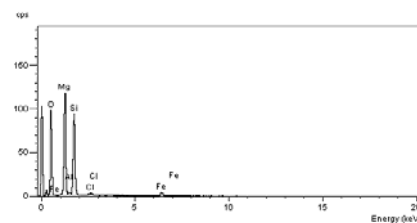
Figura 22 – Fotomicrografia em retroespalhamento eletrônico (MEV) e mapas microquímicos de EDS de preenchimento fosfático em veio desagregado por intemperismo físico (as feições mais claras indicam a distribuição e a maior quantidade relativa do elemento na lâmina analisada).

A presença das apatitas sobre os serpentinitos pode ser confirmada, pontualmente, pela fotomicrografia e espectros geoquímicos apresentados na Figura 23, cujos teores podem ser observados a partir da Tabela 4. Observa-se um fragmento de serpentinito em contato com uma massa fosfática com processo de mineralização já bastante avançado. No interior do fragmento (P1), destaca-se uma composição química mais característica da serpentina (34,35% de MgO; 0,82% de Al_2O_3 ; 58,61% de SiO_2 e 6,4% de FeO), ao passo que na sua borda, percebem-se variações mineralógicas (P2) e de composição (P3). Em P2, observa-se novamente um fragmento de cromita rico em Al e em P3 os teores característicos para a serpentina de MgO, FeO e SiO_2 são acompanhados de outros elementos; expressos pelas proporções de 0,50% de TiO_2 ; 2,67% de Na_2O ; 12,95% de CaO e 1,17% de Cr_2O_3 . Nesse ponto, tal variação química pode indicar algum outro mineral do grupo das serpentinas ou a alteração geoquímica destas.

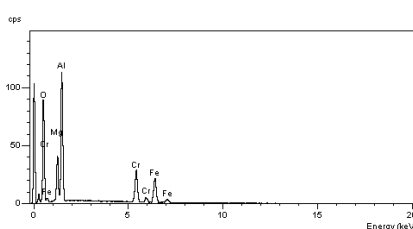
As apatitas da Figura 23, nos pontos 5 e 6, encontram-se associadas a teores de magnésio (Tabela 4) e sódio. O Mg certamente provém da reação com as serpentinas, sobretudo porque os valores aumentam quanto mais próximos destes minerais as apatitas se concentram. O Na pode ter sua origem relacionada ao próprio excremento ou, ainda, ao caráter salino das soluções que penetram a rocha em função da influência direta de sprays salinos. Fica evidente neste ponto que, mesmo de forma primária, ocorrem interações entre os dois materiais (rocha e excremento). As apatitas aí presentes podem ser consideradas apatitas secundárias.



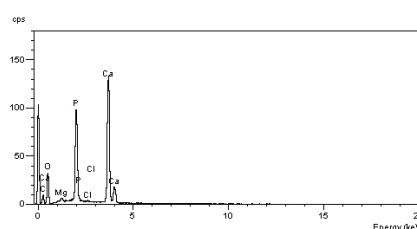
P1



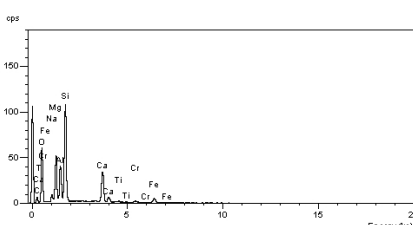
P4



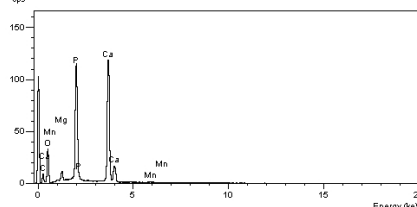
P2



P5



P3



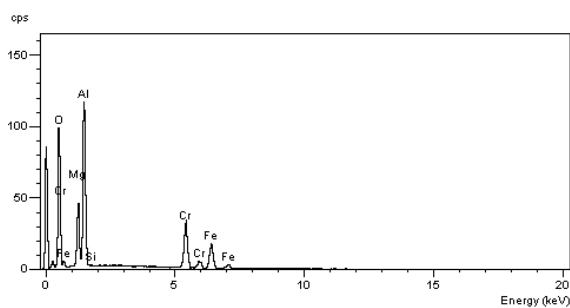
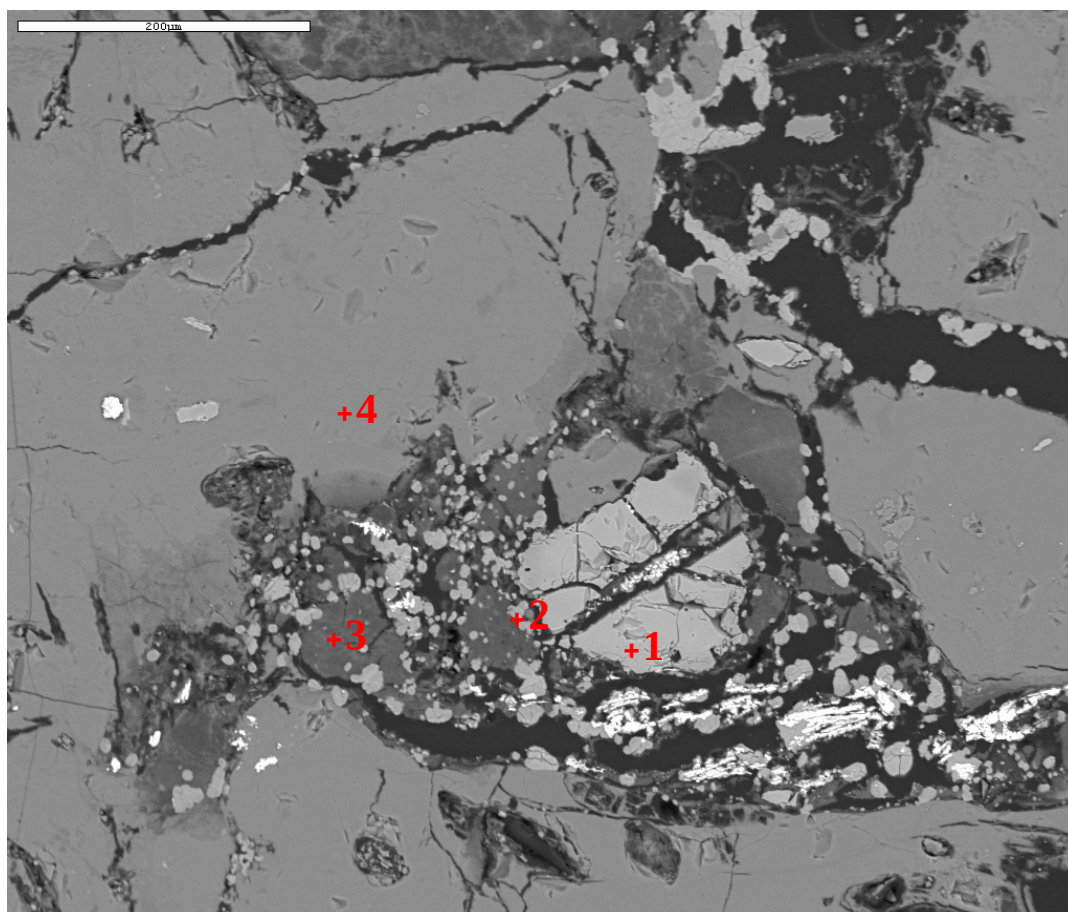
P6

Figura 23 – Fotomicrografia em retroespalhamento eletrônico (MEV) e pontos da análise química por meio de EDS com respectivos espectrogramas. Material correspondente à amostra R7, evidenciando veio serpentínico fragmentado envolvido por massa fosfática.

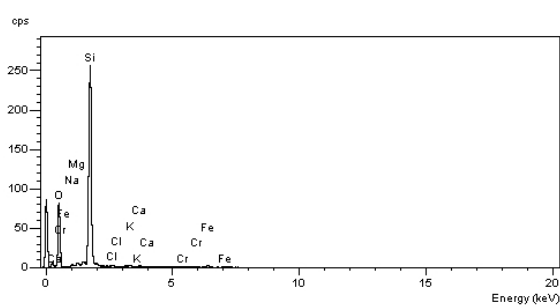
Tabela 4 – Composição Química das Análises Pontuais das Figuras 21, 22, 24 e 28.

Análises Pontuais	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Cr ₂ O ₃	NiO
%											
Figura 21 - Veio serpentinitico fragmentado envolvido por massa fosfática – Amostra R7											
1	-	-	-	34,35	0,83	-	6,40	-	58,61	-	-
2	-	-	-	15,44	46,95	-	18,84	-	-	18,77	-
3	-	-	12,95	17,73	14,84	2,67	4,11	-	46,03	1,17	-
4	-	-	-	44,22	1,91	-	4,49	-	48,88	-	-
5	49,95	-	45,96	3,29	-	0,40	-	-	-	-	-
6	44,32	-	53,96	1,61	-	0,58	-	-	-	-	-
Figura 22 - Veio serpentinitico decomposto reagindo com fosfatos – Amostra R7											
1	-	-	-	-	44,17	-	14,85	-	0,36	20,39	-
2	31,25	6,77	-	0,48	5,25	-	-	21,17	14,54	0,71	-
3	2,47	0,24	0,34	0,78	1,02	0,45	-	2,12	82,05	0,33	-
4	-	0,24	0,22	0,53	1,21	0,18	-	0,28	90,83	-	-
Figura 24 – Veio serpentinitico esvaziado com preenchimento de carbonatos sendo fosfatizados – Amostra R7											
1	-	-	-	42,49	-	-	7,6	-	49,91	-	-
2	-	-	93,52	5,52	-	-	-	-	0,96	-	-
3	1,54	-	85,85	12,61	-	-	-	-	-	-	-
4	42,74	0,16	54,15	1,49	-	0,96	-	-	0,28	-	-
Figura 28 – Crosta Fosfática de interação esverdeada – Amostra R8											
1	-	-	-	49,01	-	-	-	8,66	42,33	-	-
2	-	-	1,31	29,79	-	-	-	11,78	54,25	-	2,05
3	21,47	1,03	2,58	9,58	-	-	-	17,43	43,60	-	0,83
4	7,05	0,58	1,16	1,12	-	1,53	-	7,22	80,77	-	-
5	6,12	2,19	4,06	-	-	0,66	-	26,98	53,13	-	-

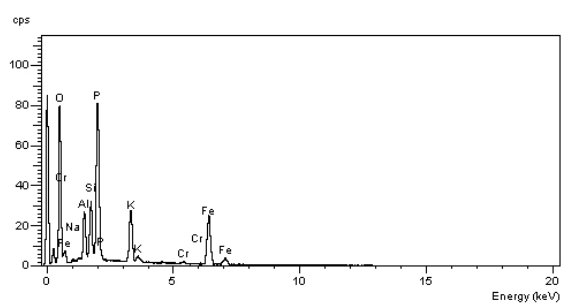
O segundo estudo de caso se refere à interação entre excrementos percolados e fraturas com alterações geoquímicas suficientemente perceptíveis ao ponto de interferir nas formas de fosfatização. Para tal, tem-se uma situação bastante próxima àquela apresentada no item 3.1.3, destacando-se dela, entretanto, por evidenciar a cobertura de uma litorrelíquia por uma massa fosfática bastante reativa (Figura 24). A litorrelíquia é uma cromita com altos teores de Al₂O₃ (P1) envolvida por uma fina camada de taranakitas (P2) mineralizadas a partir do P e K provenientes das excreções e Fe, Al e Si da rocha. No entorno, encontram-se concreções silicosas, ora fosfatizadas (P3), ora não fosfatizadas (P4). Novamente percebe-se que a maior distância do fraturamento condiciona a redução dos teores de fósforo e de minerais fosfáticos.



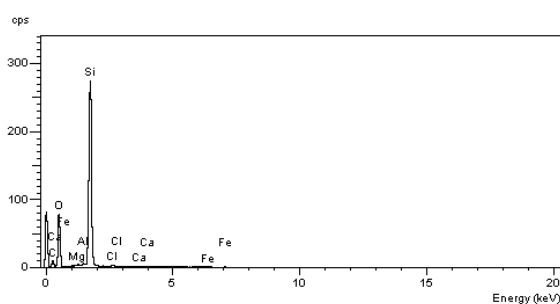
P1



P3



P2



P4

Figura 24 – Fotomicrografia em retroespalhamento eletrônico (MEV) e pontos da análise química por meio de EDS com respectivos espectrogramas. Material correspondente à amostra R7, evidenciando veio serpentínico decomposto com litorrelíquia com fosfatização nas bordas.

O terceiro e último estudo de caso, ilustra a remoção de grande parte dos veios serpentíníticos e seu preenchimento por soluções que não os excrementos das aves, culminando na precipitação de formas minerais diferenciadas dos fosfatos. Estes, por sua vez, têm sua origem relacionada a processos anteriores à fosfatização, mas já começam a sofrer alterações geoquímicas impulsionadas por ela. Trata-se da formação de calcita no interior das fraturas esvaziadas de serpentinitos que começam a ser parcialmente substituídas por fluxos percolantes saturados de P, onde já é possível identificar a mineralização de apatita (Figura 25).

Tal processo de substituição se desenvolve de acordo com a seguinte seqüência: primeiro ocorre o intemperismo dos veios de serpentinito via influência da água do mar, onde é removida, por decomposição química, a maior parte dos minerais que os constituem. No lugar, formam-se fraturas por vezes centimétricas, haja vista que as menores tramas serão aquelas mais rapidamente atacadas. Em seguida, acompanhando um processo que caracterizaria a sedimentação carbonática dos conglomerados e arenitos da Formação São Pedro e São Paulo (CAMPOS et al., 2002), parte desses veios é preenchida por fluidos ricos em Ca, dando ensejo à precipitação de calcita. Campos et al. (2005) reconheceram a formação dessa massa branca carbonática que corta a serpentina como a quinta seqüência paragenética das rochas do ASPSP (Figura 26).

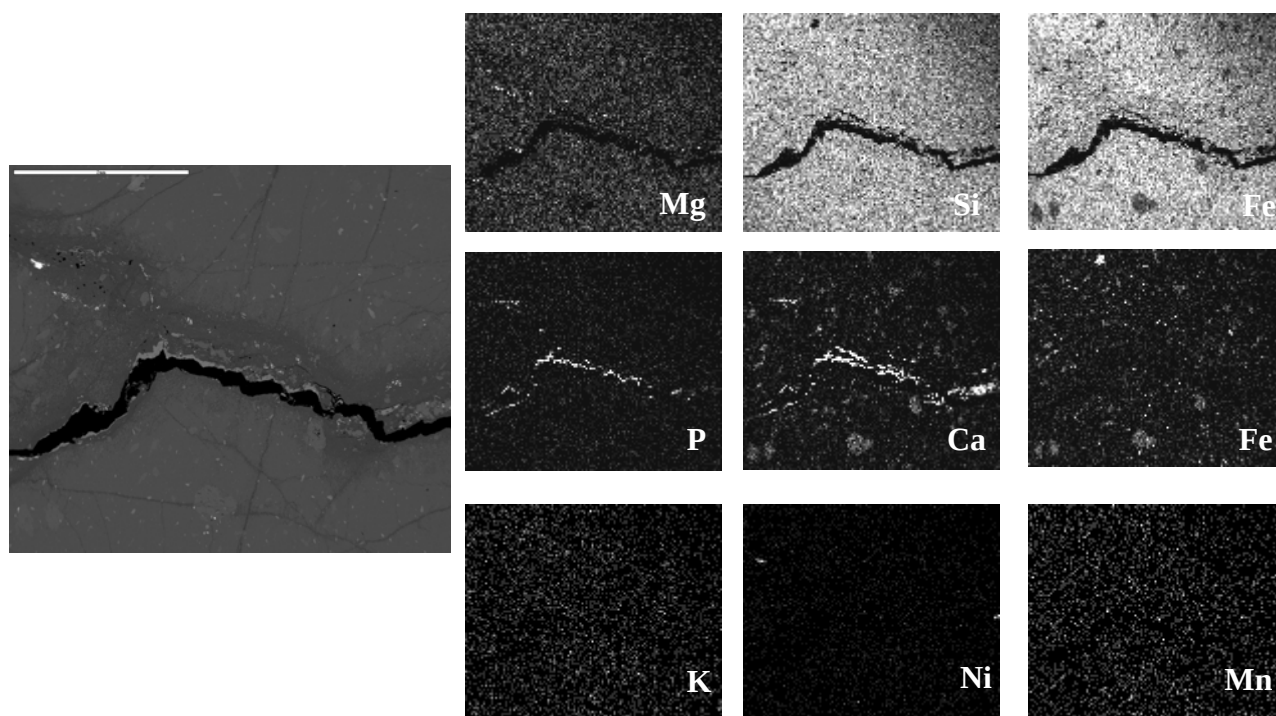
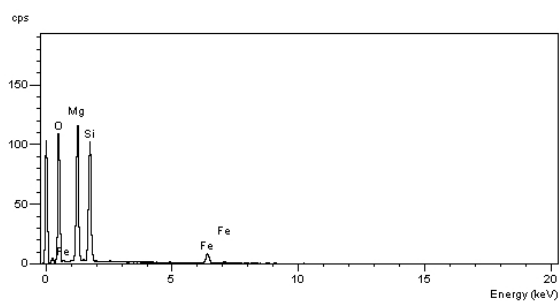
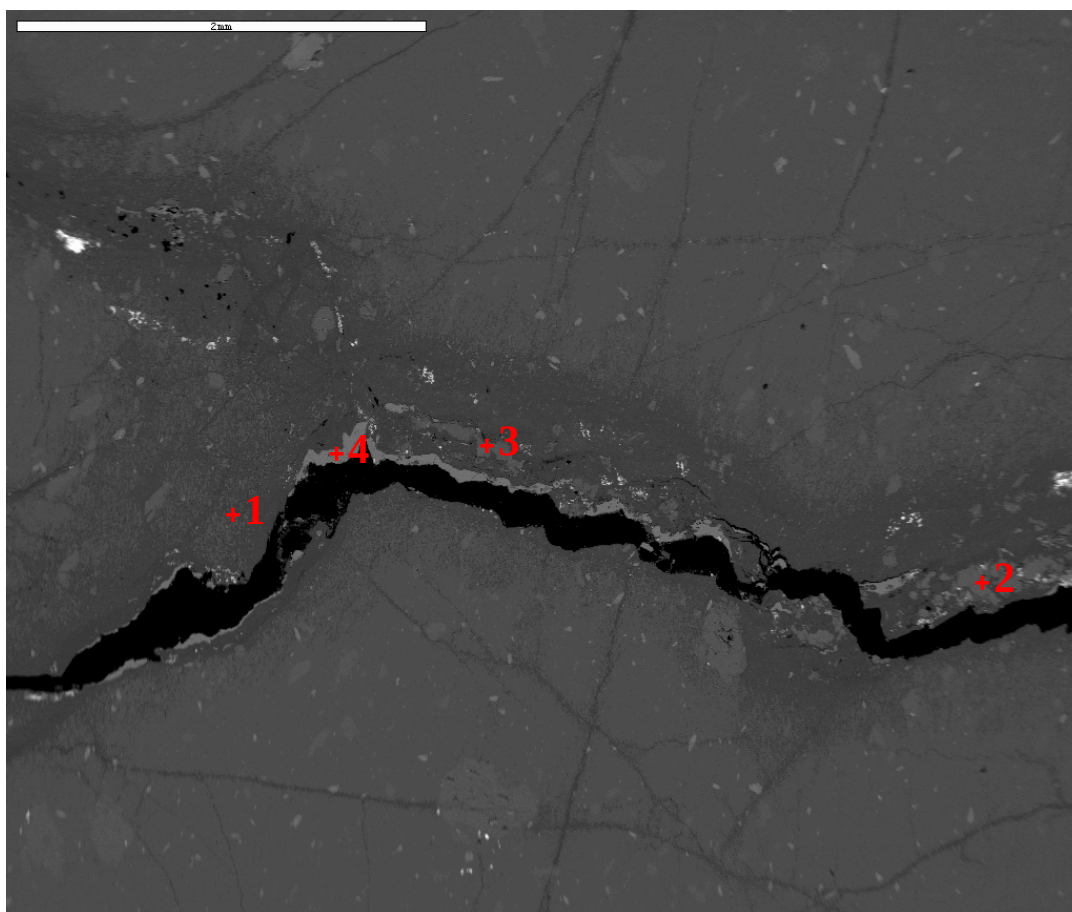


Figura 25 – Fotomicrografia em retroespalhamento eletrônico (MEV) e mapas microquímicos evidenciando a substituição da calcita pela apatita (as feições mais claras indicam a distribuição e a maior quantidade relativa do elemento na lâmina analisada).

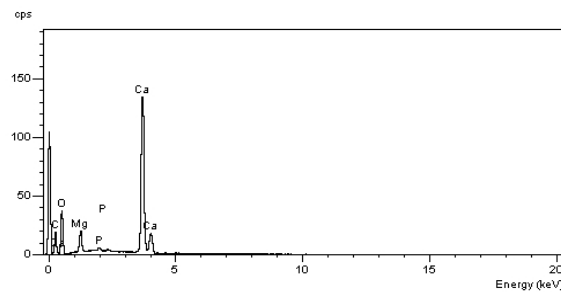


Figura 26 – Em destaque, preenchimento carbonático dos veios esvaziados de serpentinitos.

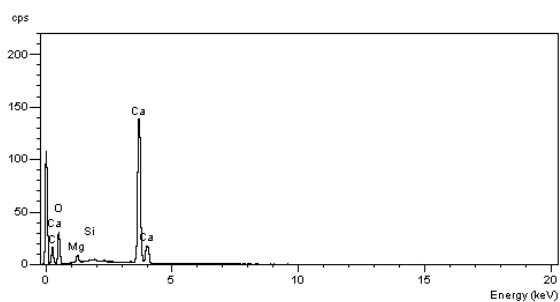
Mais recentemente, quando tais rochas são expostas à superfície, o início da interação com as aves provoca a percolação dos excrementos e, por consequência, impregnação do P nas estruturas mineralógicas já cristalinizadas. A análise seqüencial dos pontos e de seus espectros geoquímicos expostos na Figura 27 demonstra tal processo. Em P1, a composição química indica a existência de uma serpentina ainda preservada. P2 localiza uma calcita recobrindo as bordas da fratura. De P3 para P4 observam-se fosfatos interagindo com a massa carbonática e formando apatitas. Nesse sentido, a tendência é de que, permanecidas as condições de percolação dos excrementos, as bordas de calcita sejam completamente fosfatizadas.



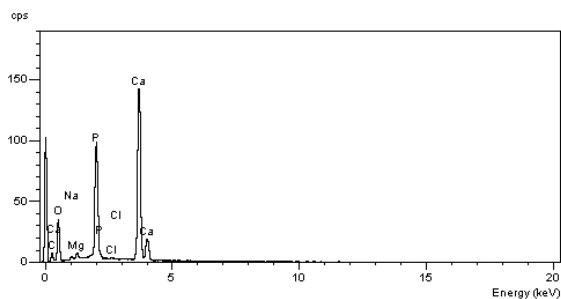
P1



P3



P2



P4

Figura 27 – Fotomicrografia em retroespalhamento eletrônico (MEV) e pontos da análise química por meio de EDS com respectivos espectogramas. Material correspondente à amostra R7, evidenciando veio serpentínico esvaziado com preenchimento de carbonatos sendo fosfatizados.

4.1.4. Crostas esverdeadas sobre peridotitos

A exposição diferenciada deste produto da fosfatização, embora a formação de crostas sobre a rocha já tenha sido apresentada, deve-se à existência de algumas amostras recobertas por um capeamento fosfático superficial singular, de coloração esverdeada sem que se observe a formação de uma crosta espessa indissociada da rocha. Neste caso, o recobrimento superficial apresenta-se mais integrado ao saprolito, sendo identificado em algumas amostras de peridotitos com serpentinização.

A análise da composição química deste material, cuidadosamente separado na superfície, revelou ser ele composto predominantemente por P, K, Mg e Fe e Si, com valores menos expressivos para Ca e Na (Tabela 2). Chama atenção os altos teores de NiO (1,14%) e Cr₂O₃ (1,45%) se comparados à crosta fosfática sobre os peridotitos apenas milonitizados. Tais dados indicam uma crosta formada através da interação geoquímica com o saprolito e não somente por acumulação superficial de excrementos. As evidências que comprovam se tratar de uma crosta fosfática de interação são demonstradas através da comparação dos dados químicos nas três seções analisadas (Tabela 2) e pelos mapas microquímicos da interface entre a crosta e a rocha subjacente (Figura 28).

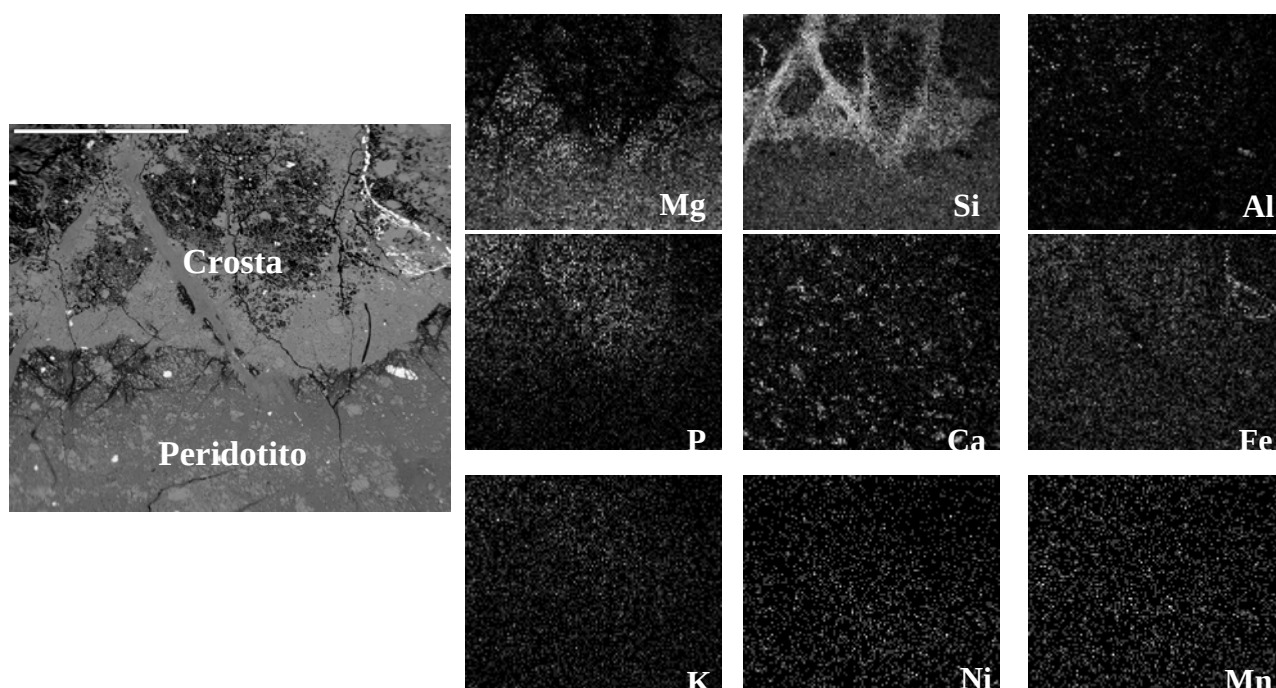


Figura 28 – Fotomicrografia em retroespalhamento eletrônico (MEV) e mapas microquímicos de EDS evidenciando crosta fosfática de interação no contato com o peridotito milonitizado serpentinizado (as feições mais claras indicam a distribuição e a maior quantidade relativa do elemento na lâmina analisada).

Nas análises laboratoriais, os valores de P decrescem da primeira para a terceira seção (Tabela 2) ao passo que nas imagens observam-se os fosfatos recobrindo a superfície em associação com diversos outros elementos. As imagens revelam, ainda, a existência de fenocristais de silicato com fosfatização no interior e borda silicificada.

A mineralogia das três seções (Figura 29) evidencia a coexistência de apatitas e taranakitas férricas, indicando que pode estar ocorrendo um processo de substituição da primeira pela segunda. Isso acontece à medida que aumentam as fontes de Fe_2O_3 pelo intemperismo das rochas ricas neste elemento. Tem-se como argumentação o aumento da intensidade dos picos da taranakita nas seções em que os piroxênios e as olivinas se fazem mais presentes (Seções 02 e 03). A coloração esverdeada destas crostas é, possivelmente, produto dos altos teores de Cr e Ni, cuja fonte é o intemperismo das cromitas, olivinas com Cr e Ni e possíveis silicatos hidratados de níquel e magnésio nela presentes.

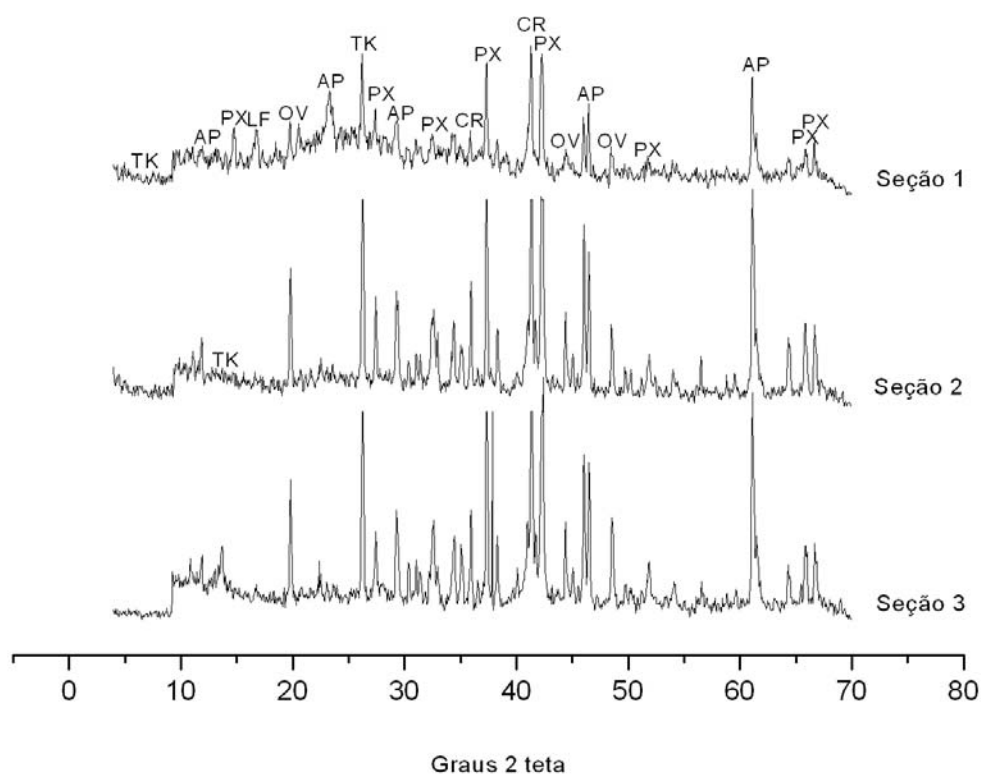


Figura 29 – Difratograma de raios-X (radição $\text{CoK}\alpha$) das seções 1 (superfície recoberta por capeamento esverdeado); 2 (manto de intemperismo superior) e 3 (rocha menos intemperizada) da amostra R8, sendo AP – apatita; LF – Leucofosfita; OV – olivina; PX – piroxênio; TK – Taranakita e CR – Cromita.

4.1.4.1. Processo proposto para a formação de crostas de interação esverdeadas

Embora o comportamento esperado para a maior parte dos peridotitos serpentinizados seja uma menor concentração dos fosfatos na superfície em razão das possibilidades de percolação e interação via fraturamento, é possível que em alguns casos, submetidas a determinadas condições topográficas e do grau de desenvolvimento da rocha (mais ou menos intemperizada), ocorra uma incrustação superficial.

Tais coberturas de fosfatos (R8) são encontradas na face norte - noroeste da elevação do farol e em posições no terço superior da face leste, sempre em faces bastante íngremes (Figura 6). Acredita-se que as condições de exposição ao sol sejam essenciais para que se forme esse capeamento esverdeado. Isso acontece porque a maior incidência de radiação tende a evaporar a água contida nos excrementos antes que o mesmo se interaja com o saprolito em profundidade, ficando somente a parte superior da rocha fosfatizada.

A análise fotomicrográfica por MEV revelou que esse capeamento superior de fosfatos não é contínuo, existindo em níveis intercalados de rocha com fosfatos em teores variados. As partes mais escuras indicam áreas de maior concentração do elemento, sendo a superfície predominantemente esverdeada (Figura 30). Percebe-se, por consequência, um manto de intemperismo superior, já bastante empobrecido em Mg e Fe e rico em sílica, onde existem camadas interagidas com as soluções de P.



Figura 30 – Em detalhe, superfície de coloração esverdeada, sustentada em encostas bastante íngremes, evidenciando crosta fosfática de interação com peridotito serpentizado (Amostra R8).

As microsondagens pontuais confirmam tais pressuposições revelando que no ponto 1 (P1), por exemplo, no âmbito da rocha, existem minerais ferromagnesianos menos intemperizados, associados a outros com remoção de Mg e concentração de sílica evidente (P2). Esse ponto microsondado, localiza-se numa fratura e, possivelmente, representa uma espécie de canal de lixiviação das soluções do intemperismo. A seta indicada na Figura 31 demonstra o sentido do fluxo dessas soluções. Como os fosfatos ficam retidos na parte superior, dão-se as condições de separação de uma crosta superficial de um material pobre em P adjacente a ela. As alternâncias de teores de fósforo estão evidenciadas nas composições químicas (Tabela 4) dos pontos 3, 4 e 5. No ponto P5, observa-se recobrindo de maneira bem delgada essa crosta uma camada de fenocristais de silício com valores relativamente elevados de Fe_2O_3 . A localização destes pontos é apresentada na Figura 32.

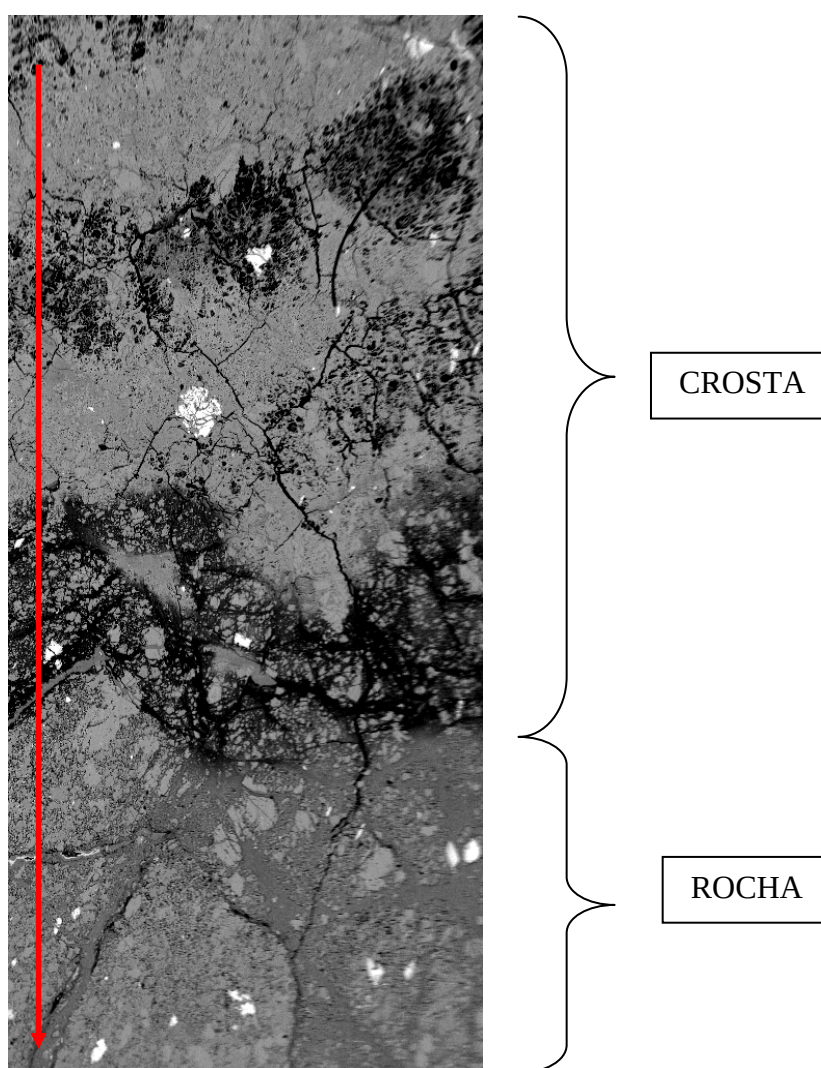


Figura 31 – Crosta com níveis diferenciados de P e fluxo de lixiviação pelas zonas de fraturamento no sentido indicado pela seta.

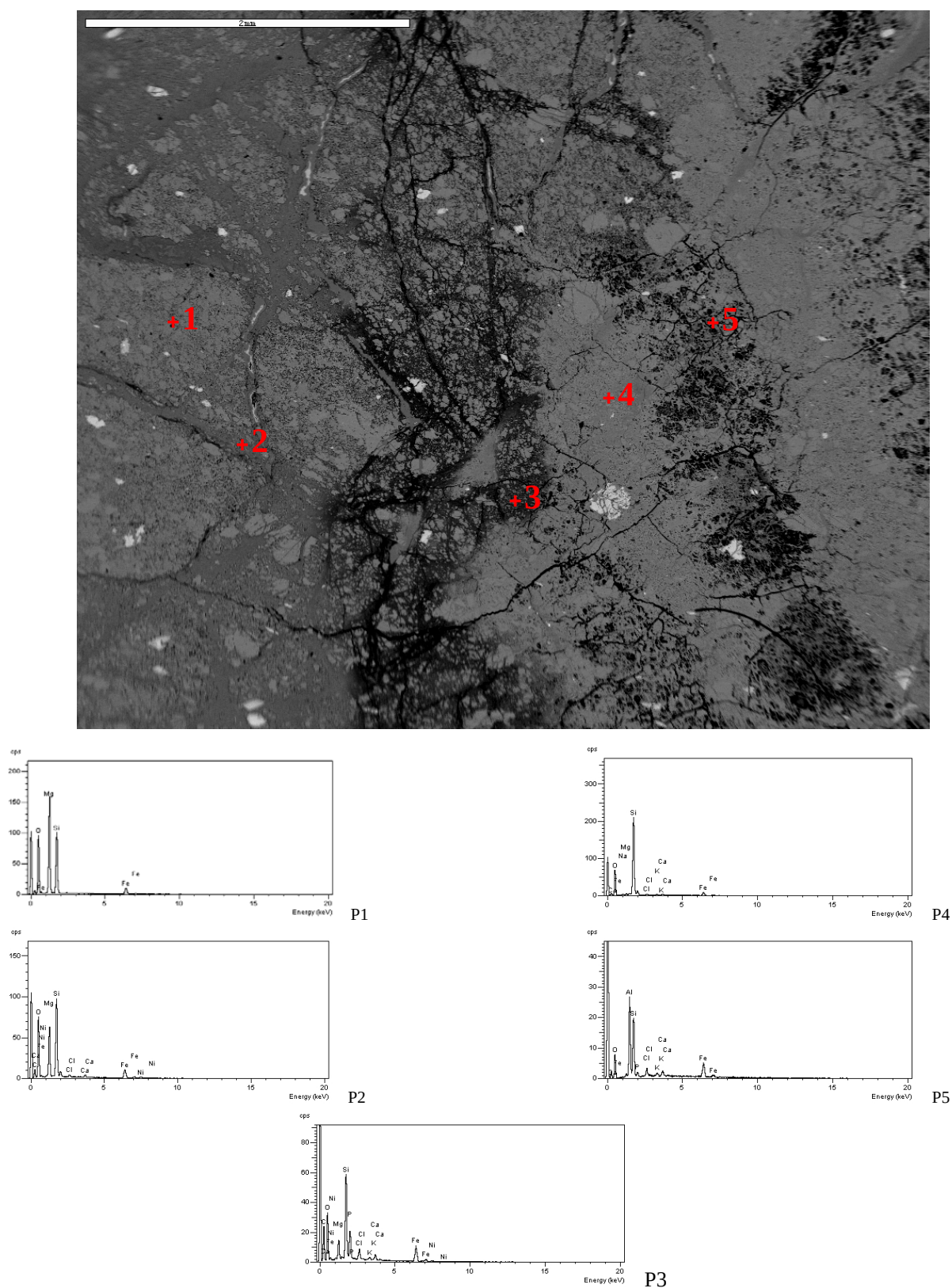


Figura 32 – Fotomicrografia em retroespalhamento eletrônico (MEV) e pontos da análise química por meio de EDS com respectivos espectogramas. Material correspondente à amostra R8, evidenciando crosta fosfática esverdeada.

4.1.5. Guano: caracterização e formação

Definidos como materiais formados pela acumulação de excrementos de aves marinhas em ilhas oceânicas e/ou regiões costeiras e por morcegos em cavernas (HUTCHINSON, 1950), os guanos são geralmente encontrados em regiões de climas semi-áridos e de escassa umidade, ou, ao contrário, como acontece no litoral nordeste do Brasil, em regiões de elevada precipitação. O que os difere, é a espessura do pacote de deposição, ou seja, tanto maior quanto menor forem os índices pluviométricos, uma vez que a água pode remover o material por erosão.

A exploração até o momento realizada de guano baseia-se, sobretudo, na oportunidade de sua utilização como fertilizante, à medida que as reservas de nitrogênio e fósforo acontecem em concentrações elevadas, oportunas para a produção de superfosfatos. Embora sua utilização remonte à antiguidade, sendo um material prioritário na atividade agrícola das civilizações Maia e Inca (HUTCHINSON, 1950), é efetivamente a partir dos trabalhos realizados pelo naturalista Alexander Von Humbolt que foram feitas as primeiras inferências sobre a composição química do material, cujas coletas na América Latina e análises químicas feitas na França evidenciaram a significância nutricional do material. Em termos da composição, destacam-se no guano os ácidos fosfórico, oxálico, carbônico, além de sais e impurezas da terra (fragmentos de rochas, sedimentos, etc).

No ASPSP, em razão da intensidade de chuvas nas condições climáticas atuais e interferência constante das ondas em maior parte das áreas emersas das ilhas, são encontrados depósitos muito pouco espessos, localizados em posições abaciadas ocupadas por ninhais recentes próximas à Estação Científica. O trabalho de campo realizado revelou profundidades máximas de 20 cm.

A análise da amostra G1 revelou se tratar de material terroso formado por apatita biogênica e fragmentos de rochas (Figura 33). A mineralogia pode comprovar tal composição (Figura 34), na medida em que foram identificados picos de apatitas associados à olivinas, piroxênios e plagioclásios (Labradorita - $(\text{Na}_{0,5-0,3}, \text{Ca}_{0,5-0,7})\text{Al}(\text{Al}_{0,5-0,7}, \text{Si}_{0,5-0,3})\text{Si}_2\text{O}_8$). Tal composição indica que a formação deste pequenos depósitos se dá pelo arraste de material das elevações para as baixadas, assim como pelo incremento de material (principalmente excremento) onde eles se depositam.

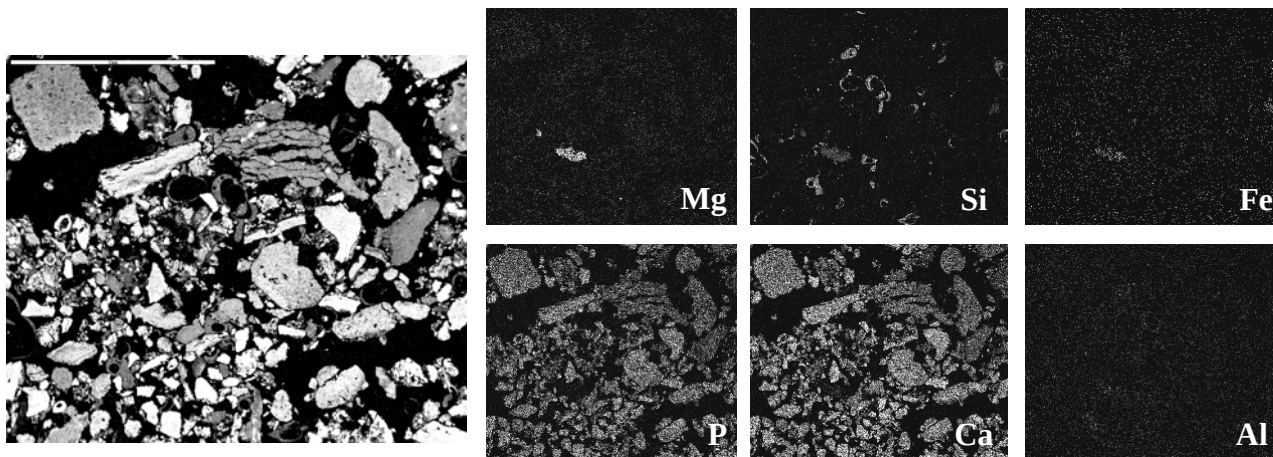


Figura 33 – Fotomicrografia em retroespalhamento eletrônico (MEV) e mapas microquímicos de EDS evidenciando amostra de guano coletado em depósitos com profundidade de 20 cm (as feições mais claras indicam a distribuição e a maior quantidade relativa do elemento na lâmina analisada).

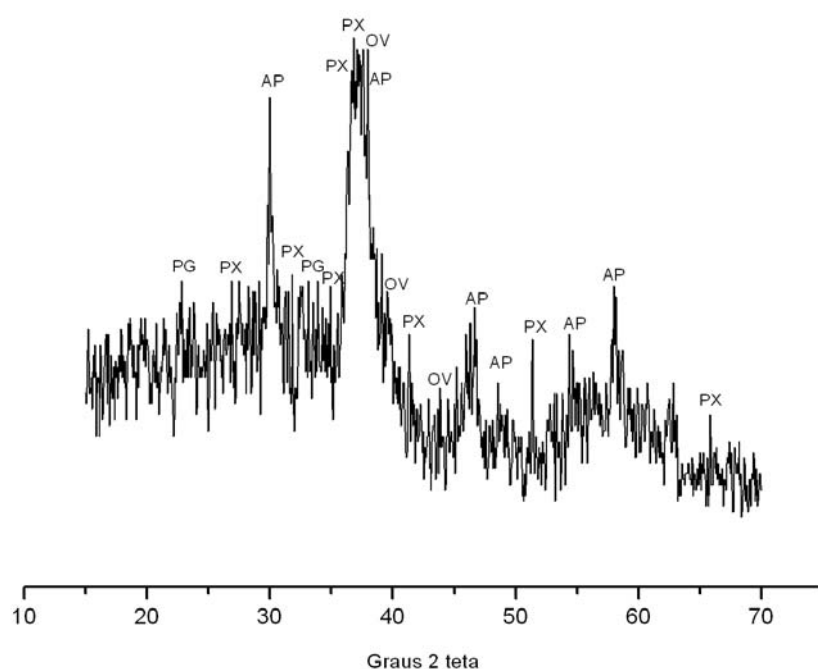


Figura 34 – Difratoograma de Raios-X (radiação $\text{CoK}\alpha$) da amostra G1 – guano, sendo AP – Apatita; OV – Olivina; PX – Piroxênio; PG – Plagioclásio.

4.1.6. Solos Fosfatizados

Embora não seja conhecida na literatura referência sobre a existência de solos no ASPSP, a interferência antrópica ou processos locais de pedogênese que caracterizam a dinâmica do meio físico no arquipélago foram responsáveis pela formação de alguns “bolsões” de solos localizados pontualmente na elevação da Ilha Belmonte, faces

noroeste e sudoeste. Alguns, caracterizam-se por entulhos depositados para a construção do farol que, após serem submetidos a determinados processos pedogenéticos, desenvolveram atributos que contemplam os requisitos necessários a sua classificação como solo. Isto é, apresentam diferenciação de horizontes cuja origem está relacionada a tais processos e sustentam ou são capazes de sustentar plantas ao ar livre (EMBRAPA, 2006). A cobertura vegetal do ASPSP está, inclusive, restrita aos locais onde estes solos ocorrem.

Por consequência, os solos atuais do ASPSP devem ser entendidos como produtos indiretos do intemperismo dos peridotitos, muito embora sua interação com o saprolito subjacente tenha condicionado modificações nas suas propriedades morfológicas, químicas e físicas. Além disso, a deposição constante de excrementos sobre esses materiais condicionou sua fosfatização, constituindo a formação do que se reconhece como um solo ornitogênico.

A amostra S1 é, a partir de tais considerações iniciais, mais um produto da fosfatização no ASPSP, podendo ser enquadrada como um perfil de NEOSSOLO LITÓLICO Distrófico fragmentário. Trata-se de um solo mineral raso que apresenta como seqüência de horizontes A1 – A2 – R/C (Figura 35), sendo o horizonte A1 de 0 a 8 cm e horizonte A2 de 8 a 15 cm. Chama atenção o fato de apresentar contato lítico fragmentado em matacões e calhaus da rocha peridotítica, tal como fora encontrado por Ribeiro et al (2003) e Marques (2004) pra Neossolos do Arquipélago Fernando de Noronha. Conforme estes autores, grande parte dos Neossolos da ilha principal do Arquipélago possuem contato lítico não caracterizado por rocha contínua, o que os descaracterizaria em comparação com aqueles que transitam para um substrato são e contínuo, principalmente por possibilitarem maior penetração das raízes e comportamento diferenciado da infiltração da água. Quando da identificação deste atributo diagnóstico para os solos noronhenses, isso fora feito de forma pioneira, não havendo, por consequência, sub-níveis categóricos no até então vigente Sistema Brasileiro de Classificação de Solo que os contemplasse (EMBRAPA, 1999). Com as reformulações do SiBCS e nova publicação em 2006 (EMBRAPA, 2006) essas contribuições foram incorporadas.

O Neossolo do ASPSP possui cores bruno-acinzentadas e texturas que variam de franco-arenosa a franco-argilo-arenosa (Tabela 5). Possui, também, alta relação silte-argila, (superior a 0,84), denunciando incipiente grau de evolução pedogenética. Predomina a textura areia grossa (2,0 a 0,2 mm) em todo o perfil, destacando-se a elevação dos teores de argila (de 19 para 25 dag/kg) do horizonte A1 para o horizonte

A2. Tais características podem ser entendidas como evidências da influência exercida pelo material saprolítico no enriquecimento com argila do material mais arenoso depositado pela atividade antrópica.

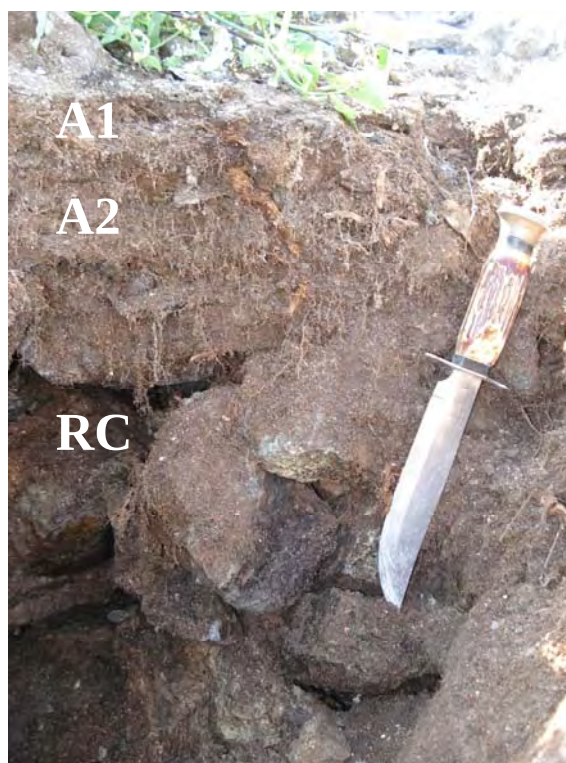


Figura 35 – Perfil de NEOSSOLO LITÓLICO Distrófico fragmentário e seus respectivos horizontes A1, A2 e RC.

Os principais atributos químicos deste solo traduzem um comportamento ácido com valores de pH em água bastante próximos dos valores de pH em KCl, embora sejam ligeiramente maiores (Tabela 5). O ΔpH negativo indica o predomínio de cargas negativas. Possui índice de saturação por bases inferior a 50%, sendo classificado como distrófico, assim como valores pouco expressivos de Mg e Al no complexo de troca (Tabela 5), embora, para o Mg total os valores sejam altos por causa da grande concentração deste elemento na rocha (Tabela 6). Os altos teores de Na disponível, condicionando, inclusive, uma saturação em torno de 12 a 13% (caráter solódico), bem como os altos teores de K, provêm da influência constante dos sprays salinos sobre a área onde o perfil se localiza, confirmando uma contribuição alóctone de cátions tal como fora identificado por Ibraimo et al. (2004) para solos da Região dos Lagos, RJ. É provável que os teores altos de Na provenham exclusivamente de tais fontes externas, pois os teores totais deste elemento demonstraram-se muito baixos (Tabela 6).

Tabela 5 – Atributos físicos e químicos dos horizontes A1 e A2 da amostra S1, ASPSP, Atlântico Norte.

Hor	Prof.	Textura	Cor	pH		P	Na	K	Ca	Mg	Al	H + Al	SB	t	T	V	m	ISNa	MO
	cm			KCl	H ₂ O	mg/dm ³			cmol _c /dm ³							%		dag/kg	
S1 – NEOSSOLO LITÓLICO Distrófico fragmentário																			
A1	0-8	Franco-Arenosa	10YR5/2	4,44	4,70	8899,4	294,5	119	7,66	0,79	0,58	13,2	10,0 3	10,6	23,23	43,2	5,5	12,07	6,13
A2	8-15	Franco-Argilo-Arenosa	10YR5/2	4,66	4,86	9006,1	294,5	70	7,27	0,61	0,48	13,5	9,34	9,8	22,84	40,9	4,9	13,04	4,56

Tabela 6 – Teores químicos totais dos horizontes A1 e A2 da amostra S1, ASPSP. Atlântico Norte

Seções	P	K	Ca	Mg	Al	Na	Fe	Zn	Pb	Ni	Cr	Cd	Cu
mg/kg													
R2 - Peridotito Milonitizado coberto por deposição de excrementos recentes													
A1	66.273,70	10.577,92	44.577,08	2.117,82	3.652,03	5939,93	20.15,10	1046,39	nd	128,38	2.075,00	nd	nd
A2	97.739,44	10.189,61	99.767,32	3.503,68	4.559,22	2922,68	17.283,54	2184,82	nd	112,47	2.102,03	nd	nd

O Ca, embora apresentasse altos teores totais como explicitado no Tabela 6, demonstrou valores baixos de troca em relação aos Neossolos fragmentários provenientes de rochas vulcânicas de Fernando de Noronha, onde os valores ficaram em torno de 17 a 19,6 cmol_c.Kg⁻¹ (MARQUES, 2004). Se comparadas, as rochas vulcânicas possuem muito mais feldspatos (fonte de Ca) em sua composição que os peridotitos. É provável que a principal fonte de Ca para o solo do ASPSP sejam os excrementos das aves e que o mesmo seja rapidamente mineralizado formando apatitas. Demais valores totais para Cr, Ni e Zn são altos em razão da presença de muitos fragmentos de minerais ultramáficos nestes solos (Tabela 6). O conteúdo de matéria orgânica apresenta-se baixo em comparação com outros solos ornitogênicos, provavelmente em razão da maior atividade microbiológica (Simas, 2006).

Chamam atenção, em solos tão ácidos, os extremos valores de P no complexo de troca (Tabela 5). Embora sejam teores evidenciados por metodologia não adequada ao estudo de solos com grandes quantidades deste elemento, haja vista que incorrem na possibilidade de superestimação a partir da remoção indevida de fósforo não lábil ligado ao cálcio (NOVAIS & SMYTH, 1999), os valores chegam a 9.006 mg/dm³ no horizonte A2, demonstrando claramente a influência da deposição de excrementos no processo de fosfatização deste solo. Os valores totais deste elemento também são bastante altos, perfazendo cerca de 6,6% da composição química do horizonte A1 e 9,7% do A2.

No estudo da fosfatização deste perfil, foram analisadas lâminas de seções delgadas de amostras indeformadas do horizonte A2. Observaram-se (Figura 36) fragmentos de rocha ultramáfica com fosfatos nas câmaras e fraturas. Nas câmaras eles assumem a forma de micronódulos de P-Fe e P-Al. Nas fraturas, há um revestimento fosfático das bordas com P-Fe. É provável que nestes solos ocorra a seguinte seqüência de fosfatização: fosfatos de cálcio → fosfatos de ferro → fosfatos de alumínio.

A análise pontual por MEV confirmou os dados dos mapas microquímicos (Figura 37). No mesmo horizonte A2, foram identificados fragmentos de magnetita (P1) como minerais primários em processo de decomposição. Estes estão associados à taranakitas férricas tanto no revestimento das fraturas como em formações globulares, identificadas nos pontos 2, 4 e 6. Uma matriz silicosa, indicando composição química de quartzo (P3), também pode ser constatada, confirmando as referidas interferências antrópicas através do depósito de areia de praias continentais no local. A composição química em porcentagem de óxidos pode ser vista no Tabela 7.

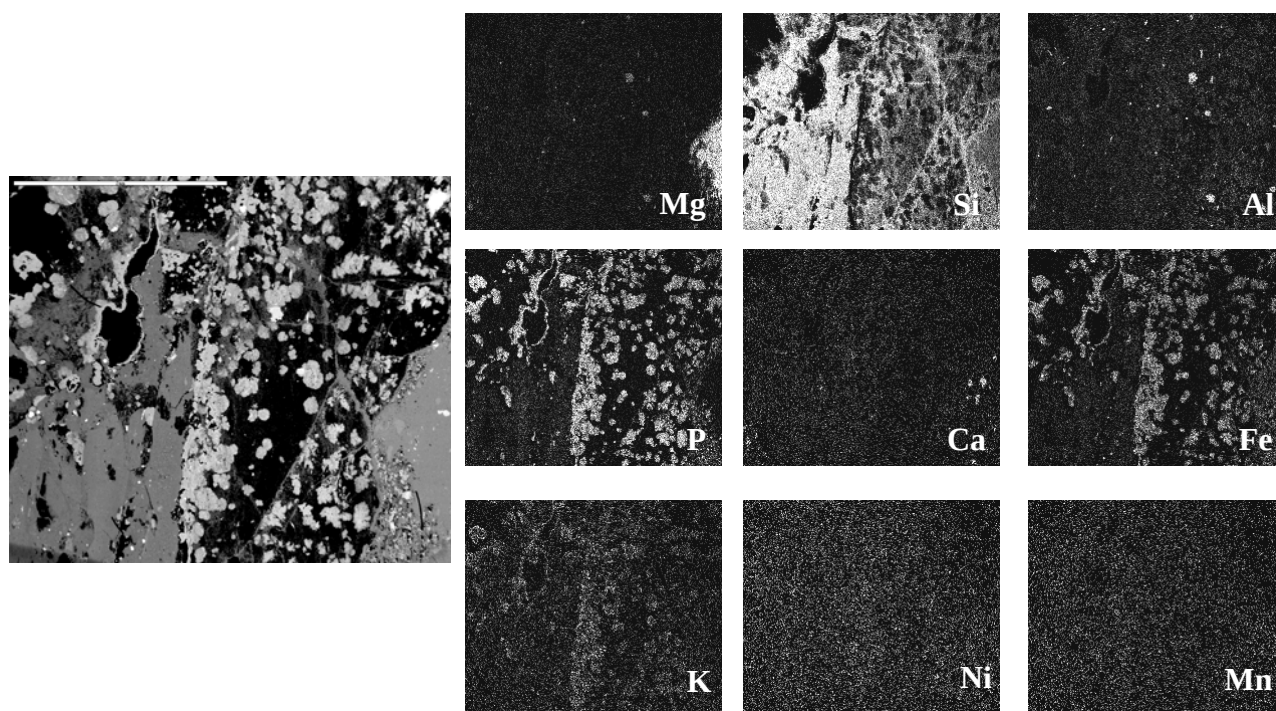


Figura 36 – Fotomicrografia em retroespalhamento eletrônico (MEV) e mapas microquímicos de EDS do horizonte A2 da amostra S1 – NEOSSOLO LITÓLICO Distrófico fragmentário (as feições mais claras indicam a distribuição e a maior quantidade relativa do elemento na lâmina analisada).

Tabela 7 – Composição Química das Análises Pontuais da Figura 33

Análises Pontuais	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Cr ₂ O ₃	TiO ₂
%											
Figura 33 – Horizonte A2 de NEOSSOLO LITÓLICO Distrófico fragmentário											
1	-	-	-	0,61	-	-	81,81	-	1,07	-	-
2	35,86	-	-	0,95	3,58	-	-	27,51	16,65	-	-
3	-	0,20	-	0,23	-	-	-	-	89,22	-	-
4	40,67	2,79	0,28	1,16	2,30	-	-	32,75	0,70	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-	-	9,72	-	-
6	39,43	1,74	-	0,60	1,85	-	-	32,91	2,25	-	-

4.2 – Implicações paleogeográficas da ocorrência de fosfatização no ASPSP

A ocorrência do processo de fosfatização está subordinada à acumulação dos excrementos sobre o material a interagir com os mesmos. Por consequência, níveis avançados deste processo, entendidos aqui como a identificação de feições, produtos e formas cuja existência se deve a ele, só ocorrerão em áreas cujas condições climáticas forem menos úmidas. Tal como Flicoteaux e Melfi (2005) expuseram para a formação de crostas fosfáticas nos saprolitos basálticos de Abrolhos, a fosfatização no ASPSP tem como característica sua intensificação em condições climáticas diferentes das atuais,

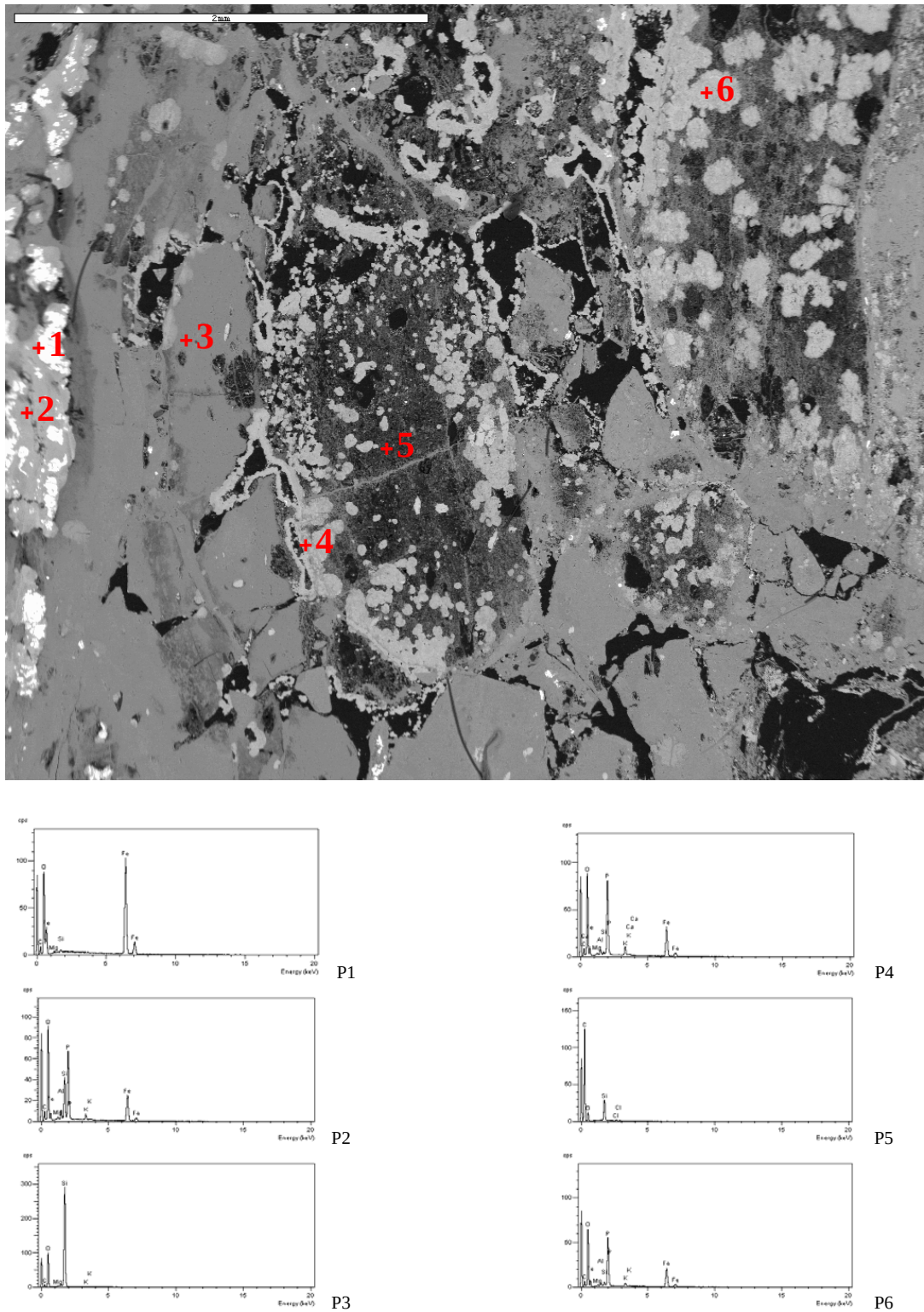


Figura 37 – Fotomicrografia em retroespalhamento eletrônico (MEV) e pontos da análise química por meio de EDS com respectivos espectrogramas. Material correspondente à amostra Si evidenciando horizonte A2 do perfil de NEOSSOLO LITÓLICO Distrófico fragmentário.

haja vista que, por influência da Zona de Convergência Tropical, a região onde o arquipélago se encontra é reconhecida na atualidade como uma das áreas de maior pluviosidade de todo Oceano Atlântico (CAMPOS et al, 2005).

Alguns geoindicadores presentes no local de estudo, sobretudo aqueles relacionados às rochas, solos e guano analisados confirmam tais evidências. É provável que algumas fases se sucedam no processo que leva à formação dos produtos da fosfatização destacados neste trabalho. Isto é, um intenso processo intempérico, sobretudo nas rochas mais fraturadas, em condições úmidas, seria reconhecido como uma primeira fase da fosfatização. Neste processo, ocorreria a formação de saprolitos identificados na maior parte da Ilha Belmonte. Modificações geoquímicas substanciais haveriam ocorrido com as rochas do ASPSP nessa primeira fase, principalmente a remoção de grande parte de alguns elementos químicos via solubilização dos minerais ultramáficos. É necessário, novamente, salientar que tal processo fora tão mais intenso nas rochas mais fraturadas.

O segundo estágio, por sua vez, corresponderia à fosfatização das rochas pelo aumento do aporte de excrementos sobre elas em condições climáticas áridas. Nessa fase ocorria o grande *input* de soluções saturadas de P nas fraturas e também via acumulação superficial sobre as rochas mais homogêneas. Os silcretes identificados nas análises microscópicas também teriam sua gênese relacionada a essa fase mais seca. A fonte de sílica provinda da solubilização dos silicatos de ferro e magnésio, seria acompanhada por sua acumulação e progressiva precipitação em concreções que envolveriam as zonas de lixiviação, principalmente àquelas no entorno de fissuras. A oxidação do ferro proveniente do intemperismo dos minerais ferromagnesianos seria condição sem a qual não teriam se formadas as supostas *taranakitas férricas* ou o mineral identificado sem referência na literatura, pois sua composição apresenta também Si e Mg. Sua formação concomitantemente aos silcretes responderia o porquê de tanto silício na sua estrutura, uma vez que a taranakita conhecida não possui esse elemento em sua composição. O terceiro e último estágio corresponderia às condições úmidas atuais que se caracterizam pela destruição (decomposição e degradação) dos minerais formados na fase anterior. É possível que esta fase tenha sido responsável pela erosão de perfis de solos formados no arquipélago em condições pretéritas e também pela cominuição dos depósitos de guano.

Associações entre a fase atual e sua predecessora também podem ser feitas na interpretação da importância do processo de fosfatização na evolução da paisagem da Ilha Belmonte. Como no período mais seco grande parte das rochas (Peridotitos Milonitizados) foi revestida por crostas espessas e outra parte (Peridotitos Milonitizados Serpentinizados) permitiu a percolação dos fluidos sem sua concentração na superfície, salvo a crosta esverdeada formada pela interação em algumas posições mais íngremes voltadas ao norte da ilha, a atuação dos processos erosivos nessa fase de maior dissecação se processa de maneira diferenciada nessas rochas. Observa-se que na área onde há o recobrimento pelas crostas que a vertente é mais estrutural, apresentando faces angulosas e declividade muito acentuada (Foto 38a). Do outro lado, face leste (Foto 38b), onde o saprolito ficava em exposição, a vertente é mais suavizada, descrevendo um perfil côncavo até se tornar íngreme na sua base onde estão os costões rochosos.



Foto 38 – a: Vertente oeste, mas suave e concavizada, saprolito exposto à erosão.
b: Vertente oeste, mais íngreme e com rochas cobertas por crostas e verniz.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

1 - Os produtos da fosfatização no ASPSP são bastante variados na medida em que os excrementos interagem com rochas e solos de composição e estrutura variadas, destacando-se a formação de crostas fosfáticas espessas, espeleotemas de fosfatos, formas de fosfatos percolados associados às fraturas intemperizadas, crostas superficiais de interação com coloração esverdeada, guano e solos fosfatizados.

2 - De uma maneira geral, quando os fluidos ricos em P provenientes das excreções das aves são depositados sob rochas homogêneas e com baixo grau de fraturamento, ocorre uma acumulação superficial cujo limite de percolação é o manto de intemperismo superior da rocha, quase sempre mais fragmentado que decomposto. Formam-se crostas cuja mineralogia fosfática é constituída por apatitas mais recalcitrantes, como a F-apatita e a OH-apatita. Quando a interação ocorre com rochas fraturas, sendo essas intemperizadas e com caráter ferruginoso, a tendência é que se formem novos minerais fosfáticos percolados que preenchem essas fraturas ou assumem crescimento framboidal nas suas bordas. Dentre tais minerais se destacam os fosfatos de ferro, tal como uma provável *taranakita férrica*. Quando tais fluidos se concentram em fraturas mais expostas e abertas, podem se precipitar formando inflorescências de fosfatos.

3 - O solo fosfatizado do ASPSP pode ser classificado como um NEOSSOLO LITÓLICO Distrófico fragmentário, e possui como características mais relevantes seu caráter descontínuo de contato do horizonte superficial com a rocha e os altos teores de P e minerais raros em ambientes naturais por causa do processo de fosfatização.

4 - Por se tratar de um processo condicionado à climas mais secos, a fosfatização acentuada das rochas do Arquipélago de São Pedro e São Paulo comporta-se como um excelente indicador paleoclimático de que condições mias áridas já afetaram a pedogênese naquele local, e que as condições úmidas atuais são responsáveis pela erosão dos paleo-produtos da fosfatização. Tal inferência encontra respaldo na endêmica geologia da Formação São Pedro e São Paulo, formada nas fases semi-áridas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALCOVER NETO, A.; NEUMANN, R. Caracterização de concentrado de fosfato de Catalão I.(Goiás Fértil). Relatório Técnico, CETEM. 1997. Série Boletins e Documentos.
- BLUME, H.P., BEYER, L., KALK, E., KUHN. Weathering and soil formation. In: Beyer, L., Bölter, e.M. (Eds.), *Geoecology of Antarctic Ice-Free Coastal Landscapes*. Springer-Verlag, Berlin, 2002. pp. 114–138.
- BOTH, R.; FREITAS, T.R.O. A dieta da *Sula leucogaster*, *Anous stolidus* e *Anous minutus* no Arquipélago de São Pedro e São Paulo, Brasil. In.: ALBUQUERQUE, J. B.; CANDIDO JUNIOR, F. C.; ROSS, A. L. (Eds). *Ornitologia e Conservação: da ciência às estratégias*. Tubarão. Ed. Unisul. 2001. pp. 313-337.
- BRINDLEY, G.W., BROWN, G.. *Crystal Structures of Clay Minerals and Their X-ray Identification*. Monograph 5. Mineralogical Society, London. 1980.
- CAMPOS, T.F.C.; SRIVASTAVA, N.K.; MACAMBIRA, M.J.B PETTA, R.A. ; AMARAL, R.; DAS VIRGENS NETO, J. 2002. A Formação São Pedro e São Paulo: Uma Nova Unidade Litoestratigráfica Quaternária do Atlântico Equatorial Brasileiro. *XLI Congresso Brasileiro de Geologia*, João Pessoa (PB) Setembro de 2003. Anais: 353.
- CAMPOS, T. F. da C.; VIRGENS NETO, J.; SRIVASTARA, N. K.; PETTA, R. A.; HARTMANN, L. A.; MORAES, J. F. S.; MENDES, L.; SUSAN, R. M. Arquipélago de São Pedro e São Paulo: soerguimento de rochas infracrustais no Oceano Atlântico. In: Winge,M.; Schobbenhaus,C.; Berbert-Born,M.; Queiroz,E.T.; Campos,D.A.; Souza,C.R.G.; Fernandes,A.C.S. (Edit.) *Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil*. Publicado na Internet em 24/12/2005 no endereço <http://www.unb.br/ig/sigep/sitio002/sitio002.pdf>
- DARWIN. C. S. *Geological observations on the volcanic islands, visited during the voyage of HMS Beagle, together with some brief notices on the geology of Australia and the Cape of Good Hope*. London: Smith, Elder and Co. 1844. 175 p.
- DEFELIPO, B. V.; RIBEIRO, A. C. *Análise química de solo (metodologia)*. Viçosa, UFV, Imprensa Universitária, 17 p, 1981.
- EMBRAPA – Centro Nacional de Pesquisa de Solos. *Manual de métodos de análise de solo*. 2 ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212p.
- EMBRAPA – Centro Nacional de Pesquisa de Solos. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. Brasília: EMBRAPA-SPI, 1999, 350 p.
- EMBRAPA – Centro Nacional de Pesquisa de Solos. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. 2 ed. Brasília: EMBRAPA-SPI, 2006, 420 p.
- FLICOTEAUX, R.; MELFI, A. Les croûtes phosphates des basalts de l’archipel d’Abrolhos (Bahia, Brésil): des roches formées au Quaternaire récent à partir de guanos. In.: *Earth and Planetary Sciences*. v. 330. 2005. pp 193-200.
- FITZPATRICK, E.A. Soil microscopy and micromorphology. New York: John Wiley & Sons, 1993. 304p.
- GREEN, D. H. The petrogenesis of the high-temperature peridotite inclusion in the Lizard área Cornwall. In.: *Journal of Petrology*, v. 5, 1964. pp. 134-188.

- GUIMARÃES, Djalma. Rochas provenientes dos rochedos São Pedro e São Paulo. In.: Anais da Academia Brasileira de Ciências, t. IV, nº 1, 1932, págs 20 a 30.
- HEDLEY, M. J.; STEWART, J. W. B.; CHAUHAN, B. S. Changes in organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and laboratory incubations. *Soil Science Society of America Journal*, 46. 1982. pp. 970-976.
- HEKINIAN, R.; JUTEAU, T.; GRACIA, E.; SIC S. E.; UDINTSEV, G.; APPRIOUAL, R.; LIGI, M. Submersible Observations of Equatorial Atlantic Mantle: The St. Paul Fracture Zone Region. *Marine Geophysical Researches*, 21 (6), 2000. pp. 529-560.
- HUTCHINSON, G. E. *The biogeochemistry of vertebrate excretion*. Bulletin of the American Museum of Natural History. v. 96. New York: 1950. 554 p.
- IBRAIMO, M.M.; SCHAEFER, C. E. G. R.; KER, J. C.; LANI, J. L.; ROLIN-NETO, F. C.; ALBUQUERQUE, M. A.; MIRANDA, V. J. Gênese e Micromorfologia de solos sob vegetação Xeromórfica (Caatinga) na Região dos Lagos (RJ)..In.: Revista Brasileira de Ciência do Solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 28, n. 4, 2004. 585-796.
- LAPIDO-LOUREIRO, F. E.; MELAMED, R. O fósforo na agricultura brasileira: uma abordagem minero-metalúrgica. 2006. Disponível em http://www.cetem.gov.br/publicação/cetem_sed_70_pdf. Acesso em 12/10/2007.
- LEMOES, R. C. de; SANTOS, R. D.; dos, SANTOS, H. G. dos; KER, J. C. & dos ANJOS, L. H. C.. *Manual de descrição e coleta de solo no campo*. 5 ed. rev. ampl. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005. 100 p. : il.
- LINARES, F. G. *Recursos Minerales del Espana*. GUINEA, J. G.; FRIAS, J. M. (Coord.). Ed. Geológica. 1992. pp. 275-289.
- MARQUES, F.A. *Caracterização e classificação de solos da Ilha de Fernando de Noronha (PE)*. 101 f. Dissertação de Mestrado (Solos e Nutrição de Plantas). Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife-Pernambuco, 2004. 101 p.
- MELSON, W. G.; HART, S. R.; THOMPSON, Paul's Rocks, Equatorial Atlantic: Petrogenesis, Radiometric Ages, and Implications on Sea-floor Spreading. *Geological Society of America Memoir*, Boulder, 132. 1972. pp. 241-272.
- MUNSELL. *Soil Color Charts*. Maryland: 1994.
- MYRCHA, A., PIETR, S.J., TATUR, A. The role of Pygoscelid penguin rookeries in nutrient cycles at Admiralty Bay, King George Island. In: Siegfried, W.R., Condry, P.R., Laws, R.M. (Eds.), *Antarctic Nutrient Cycles and Food Webs*. Springer-Verlag, Berlin, 1983. pp. 156-163.
- NOVAIS, R. F.; SHYTH, T. J. *Fósforo em solo e planta em condições tropicais*. Viçosa: UFV, DPS, 1999. 399 p.
- NRIAGU, J.O., MOORE, P.B. *Phosphate Minerals*. Springer-Verlag, Berlin. 1984.
- ROBERTS, W. L.; RAPP, G. R.; WEBER, J. *Encyclopedia of minerals*. New York: Ed. Van Nostrand Reinhold. 1974. p. 604.
- SCHAEFER, C.E.G.R., SIMAS, F.N.B., ALBUQUERQUE-FILHO, M.R., MICHEL, R.F.M., VIANA, J., TATUR, H.M. Fosfatização: Processo de formação de solos na Baía do Almirantado e implicações ambientais. In: Schaefer, C.E.G.R., Francelino, R., Simas, F.N.B., Albuquerque Filho, R. (Eds.), *Ecossistemas Costeiros e Monitoramento Ambiental da Antártica*

Marítima, Baía do Almirantado, Ilha Rei George. NEPUT–Departamento de Solos, Viçosa Brasil, 2004. pp. 47–59.

SIMAS, F. B. *Solos da Baía do Almirantado, Antártica Marítima*: mineralogia, gênese, classificação e biogeoquímica. 153 f. Tese de Doutorado (Solos e Nutrição de Plantas). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2006. 153 f.

SIMAS Felipe N. B.; SCHAEFER Carlos Ernesto G. R.; MELO Vander F. ; ALBUQUERQUE-FILHO Manoel R.; MICHEL Roberto F. M.; PEREIRA Victor V.; GOMES Mariana R. M. ; DA COSTA Liovando M.; Ornithogenic cryosols from Maritime Antarctica : Phosphatization as a soil forming process. In.: *Geoderma*, v. 138, n^o3-4, 2007. pp. 191-203.

SOARES, L.de C. As ilhas oceânicas. In AZEVEDO A. de (ed.) *Brasil, a Terra e o Homem, Bases Físicas*. (volume 1). São Paulo: Companhia Editora Nacional, p. 341-378, 1964.

SPIER, C. A. Petrologia e metalogênese dos depósitos de cromita associados ao Complexo Máfico-Ultramáfico Bacuri, AP. 204 f. Tese (Doutorado em Prospecção e Geologia Econômica). Universidade de Brasília. Brasília, 1999. 204 p.

SUMMERFIELD, M. A. Petrography and diagenesis of silcrete from the Kalahari Basin and Cape coastal zone, Southern Africa. In.: *Journal of Sedimentary Research*; v. 53; no. 3; 1983. pp. 895-909

TATUR, A. Ornithogenic soils of the maritime antarctic. *Polish Polar Research* 4, 1989. pp. 481–532.

TATUR, A., BARCZUK, A. Ornithogenic phosphates on King George Island, Maritime Antarctic. In: Siegfried, W.R., Condry, P.R., Laws, R.M. (Eds.), *Antarctic Nutrient Cycles and Food Webs*. Springer-Verlag, Berlin, 1985. pp. 163–169.

TATUR, A., MYRCHA, A., NIEGODZISZ; J. *Formation of abandoned penguin rookery ecosystems in the maritime antarctic*. *Polar Biology* 17, .1997 pp. 405–417.

TATUR, A.. MYRCHA, A. Ornithogenic soils. In: Rakusa-Suszczewski (Ed.), *The Antarctic Coastal Ecosystem of Admiralty Bay S. Polish Academy of Sciences*, Warsaw, 1993. pp. 161–165.

WOLFE, C.J.; BERGMAN, E.A.; SOLOMON, S.C. Oceanic transform earthquakes with unusual mechanism or locations: Relation to fault geometry and state of stress in the adjacent lithosphere. *Journal of Geophysical Research*, 98, 16187-16211.

CAPÍTULO 2

SOLOS FOSFATIZADOS DA ILHA RATA, ARQUIPÉLAGO DE FERNANDO DE NORONHA, ATLÂNTICO SUL

1. INTRODUÇÃO

As ilhas oceânicas, em sua maioria, são caracterizadas por solos bastante atípicos se comparados àqueles existentes nos continentes. Associado ao isolamento geográfico, condições climáticas diretamente influenciadas pela maritimidade e litologias específicas (principalmente vulcânicas), os solos destes ambientes se formam com propriedades que os tornam, muitas vezes, passíveis de serem considerados endêmicos (CLEMENTE, 2006). Acrescenta-se a essas particularidades, as interferências diversas de fatores bióticos e não bióticos que cumprem a função de agentes pedogenéticos. Assim, o reconhecimento dos tipos de solos formados em áreas insulares deve contemplar, necessariamente, os mecanismos evolutivos pelos quais o material de origem esteve exposto até sua transformação em solo, tais como modificações no regime climático, perturbações na estrutura do embasamento por eventos sismo-vulcânicos e interferência da fauna e flora, dentre outros. Assim é o caso dos solos do Arquipélago de Fernando de Noronha.

Fernando de Noronha (AFN) é um arquipélago brasileiro localizado entre as coordenadas 3°50' e 3°52" de Latitude Sul e 32°24' e 32°58' de Longitude Oeste de Greenwich (Figura 1). Dista, aproximadamente, 345 km do Cabo de São Roque (RN), 361 km de Natal (RN), 541 km de Recife (PE) e 145 km do Atol das Rocas (MARQUES, 2004), perfazendo um conjunto de 21 ilhas, sendo a ilha principal (de mesmo nome do arquipélago) e 20 ilhotas e rochedos distribuídos ao longo de uma área emersa de mais de 20 km² no Atlântico Sul. A ilha principal possui 17,6 km² de extensão, com uma largura aproximada de 2,0 a 3,3 km (BATISTELA, 1993).

A formação do AFN está associada a distintos eventos vulcânicos impulsionados pela atuação de um *hot spot* ativo entre 34 milhões e 1,5 milhão de anos (TEIXEIRA et al., 1993). Após a edificação da primeira estrutura vulcânica e sua emergência acima do nível do mar, a maior parte das rochas antigas foi desgastada, restando apenas alguns

mesmo autor não puderam ser enquadrados no SiBCS (EMBRAPA, 1999), razão pela qual se reconhece a particularidade destes solos.

O atual estado dos solos do AFN ressalta a importância de preservá-los. A maior parte deles se encontra muito antropizada pelos cinco séculos de ocupação das ilhas, sendo perceptíveis, em alguns pontos, as conseqüências de uma ocupação predatória. Fernando de Noronha é um arquipélago que tem na conservação dos seus solos e vegetação uma das alternativas para o armazenamento de água doce. Existem na ilha principal apenas três riachos intermitentes (Boldró, Maceió e Mulungu), insuficientes para o abastecimento dos mais de 2.000 habitantes. A maior parte da água consumida é dessalinizada.

Embora se tenha produzido nos últimos anos um acervo de conhecimentos bastante valioso sobre os solos deste arquipélago (BATISTELLA, 1993; RIBEIRO et al, 2003; MARQUES, 2004; SCHAEFER, 2006), estes estão restritos à Ilha Fernando de Noronha. As demais ilhas do arquipélago (Rata, Maio, Lucena, Sela, Gineta e Rasa), de extensão menor, são quase completamente desconhecidas no seu aspecto pedológico. Tal lacuna se torna ainda maior em relação à caracterização dos processos pedogenéticos operantes nestas ilhas, principalmente na segunda maior delas: a Ilha Rata.

Conhecida pelos seus depósitos de guano, explorados pelo Exército dos EUA quando da ocupação norte-americana do Arquipélago, a Ilha Rata é palco de um processo pedogenético ainda pouco conhecido e muito importante na compreensão da biogeoquímica dos ecossistemas terrestres e marinhos de áreas afetadas pela deposição de excrementos de animais: a fosfatização. Por conseqüência, encontram-se nesta ilha, pedoambientes constituídos por solos ornitogênicos cujas propriedades químicas, físicas, mineralógicas e morfológicas ainda precisam ser estudadas.

A partir disso, este trabalho tem como objetivo proceder à caracterização dos solos fosfatizados da Ilha Rata, Arquipélago de Fernando de Noronha, visando, sobretudo, identificar as formas de fosfatização nestes solos e compreender sua gênese.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Dos estudos pedológicos realizados no Arquipélago de Fernando de Noronha, foram geradas informações bastante relevantes a serem contrastadas com aquelas expostas, a seguir, por este trabalho. Portanto, julga-se necessário a exposição, em linhas gerais, da caracterização dos principais tipos de solos já descritos no Arquipélago.

2.1. Solos de Fernando de Noronha

A primeira referência aos solos do AFN fora feita, segundo Marques (2004, p. 13), por Almeida (1955). De acordo com ele, este geólogo “relata a espessura dos regolitos que cobrem determinadas estruturas e faz menção à ausência completa de rochas quartzosas nesses, bem como de sua riqueza em produtos cauliniticos”. Outros estudos sobre os solos do AFN foram também realizados por Jacomine (1969), citado por Marques (2004), e por Teixeira (1993), onde fora enfatizada a fertilidade de tais solos. Mantovani (2003) estabeleceu nove associações entre os tipos de solos da ilha principal e Batistella (1993), numa cartografia ecológica, expôs que a variedade de solos não acompanha a variedade de rochas existente. Ribeiro et al (2003), Marques (2004) e Schaefer (2006) constituem os mais recentes levantamentos de solos no AFN. Neles podem ser encontradas caracterizações físicas, químicas, mineralógicas e micromorfológicas dos solos noronhenses, sobretudo da ilha principal, que permitem reconhecer a peculiaridade e importância ambiental dos solos do local. Em todos os estudos foram evidenciadas os Cambissolos, Vertissolos e Neossolos (Figura 2).

Os Cambissolos são identificados como os solos mais desenvolvidos de Noronha. Sendo em sua maioria Háplicos, possuem propriedades morfológicas bastante heterogêneas, fruto, segundo Marques (2004), da herança de distintos materiais de origem, às vezes alternados num mesmo perfil. Podem ser encontrados com caráter

vértico quando da descontinuidade de uma sequência em perfil de basaltos para tufos; ou distróficos quando derivados de fonolitos. Os Cambissolos de basaltos são eutroféricos, argilosos a muito argilosos e profundos (MARQUES, 2004). Do ponto de vista físico, são solos extremamente relacionados ao material de origem. Isto é, solos derivados de lavas ankaratritas se apresentam bem drenados, com texturas que variam de argilosa a muito argilosa, enquanto solos derivados de rochas fonolíticas são caracterizados por grande pedregosidade, fruto do intemperismo mecânico destas. Os piroclastos condicionam a formação de argilas de alta atividade, oferecendo propriedades vérticas aos Cambissolos deles originados. Alguns Cambissolos se expressam do ponto de vista de sua fertilidade, por elevada CTC, tais como 95,5 $\text{cmol}_c.\text{kg}^{-1}$ para o horizonte 2Cvn1 do CAMBISSOLO HÁPLICO Vértico (MARQUES, 2004, p. 51). Em contrapartida, existem no AFN Cambissolos de baixa fertilidade natural, distróficos e com caráter álico. Os solos eutroféricos exibem maiores potencialidades agrícolas da Ilha, sobretudo pelos teores elevados de cálcio, magnésio e fósforo, associada à ausência de alumínio trocável.

Legenda

- Cambissolos Distróficos
- Cambissolos Eutroféricos
- Cambissolos Vérticos
- Vertissolos Sódicos
- Vertissolos Crômicos
- Vertissolos Solódicos
- Neossolos Regolíticos
- Neossolos Litólicos



Figura 2 – Solos do Arquipélago de Fernando de Noronha.

Fonte: RIBEIRO, Mateus Rosa; MARQUES, Flávio Adriano; BITTAR, Sheila Maria B.; LIMA, José Fernando E. F. (2005).

Os Vertissolos, por sua vez, correlacionados com as depressões ou baixadas mal drenadas, caracterizam-se por serem cromados, profundos (+150 cm), com pouco mosqueados e com feições características, como as superfícies de fricção denominadas slickensides (MARQUES, 2004). Fisicamente são solos de textura muito argilosa,

baixa relação silte/argila, elevados teores de argila dispersa e muitos minerais 2:1, como esmectitas. São considerados por Marques (2004) bastante desfavoráveis à utilização geotécnica ou agronômica, mesmo que tenham sido identificados por esse autor como possuindo disponibilidade moderada de água e elevada soma de saturação por bases. Isso se explica pelos fenômenos de contração e expansão, muito ativos nestes solos. São solos, em alguns casos, com elevados teores de sódio, sendo necessária a classificação dos perfis quanto ao seu caráter sódico. Em contrapartida, podem ser observadas várias hortas sobre Vertissolos com horizonte A chernozêmico.

Os Neossolos compreendem a classe que mais chama a atenção no AFN. Isso porque, embora sejam solos pouco desenvolvidos, apresentam atributos que dificilmente os enquadravam no SiBCS quando foi realizado seu levantamento. Foram, por Marques (2004), classificados como NEOSSOLO LITÓLICO **Fragmentário** chernossólico e NEOSSOLO REGOLÍTICO Psamítico **bioclástico-carbonático**. O primeiro é derivado de lavas ankaratríticas, enquanto o segundo tem sua origem em sedimentos psamíticos marinhos. Os termos *fragmentário* e *bioclástico-carbonático* foram incluídos por Marques para evidenciar características particulares apresentadas por esses solos. Em outras palavras, no primeiro caso, o horizonte A não apresentou contato lítico abrupto com a rocha, mas sim com fragmentos de rochas do tamanho de matacões e calhaus entrememados por materiais saprolíticos. Tais características alteram o comportamento de tais solos, pois permitem um maior aprofundamento das raízes e maior circulação da água no perfil. Na versão do SiBCS de 2006 (EMBRAPA, 2006) o termo fragmentário foi incluído como um sub-nível categórico em razão destes trabalhos realizados em Noronha. O segundo caso, por sua vez, possui uma areia composta por formações bioclásticas provenientes de pedaços de conchas, recifes e corais, mas sem nenhum quartzo. A presença de tais areias biogênicas se dá ao processo de formação de zonas costeiras com transgressões e regressões marinhas ao longo do tempo geológico, que acabam por depositar tais materiais em ilhas e nas faixas litorâneas dos países (GOMES, 2004 apud MARQUES, 2004). O mesmo horizonte fragmentário fora observado na Ilha da Trindade (CLEMENTE, 2006).

De uma maneira geral, os Neossolos de Fernando de Noronha possuem uma alta relação silte/argila, grandes quantidades de fragmentos grosseiros (calhaus e cascalhos para o Neossolo Litólico e areia grossa para o Neossolo Regolítico), denunciando seu baixo grau evolutivo. Possuem baixos valores de CTC e valores altos de carbono orgânico para os perfis litólicos e baixos para os regolíticos. São, majoritariamente, desfavoráveis para a agricultura.

3. MATERIAL E MÉTODOS

A realização deste trabalho seguiu os procedimentos metodológicos descritos a seguir.

3.1. Área de Estudo

A Ilha Rata localiza-se no extremo nordeste do AFN e é a segunda maior ilha deste (Figura 3). Com aproximadamente 6,8 km², o nome atribuído ao local tem origem controvertida, sendo mais aceita a referência à “*Rapta*”, a Ilha dos Ratos, mencionada por Fr. André de Thevex em 1556. Embora seja atualmente protegida pelo IBAMA, possuindo acesso restrito e somente autorizado para atividades de vigilância, conservação e pesquisa, a Ilha já fora habitada por faroleiros e seus familiares, quando era necessária a presença humana para garantir o funcionamento do farol que lá existe. Foi, ainda, campo experimental de exploração de guano pela "Companhia de Guano", sendo o fosfato de cálcio retirado em grandes quantidades em vários pontos de sua superfície. Tal guano é o resultado do acúmulo de excrementos de aves marinhas solidificados, considerado "o maior depósito de fosfatos zoógenos do Brasil" conforme os estudos de Derby & Barros (1881).

A geologia da Ilha Rata (ALMEIDA, 1955) é constituída por derrames de lavas ankaratríticas alternados com piroclastos componentes da própria lava, constituindo a Formação Quixaba (ALMEIDA, 1955) e depósitos sedimentares pleistocênicos de constituição carbonática, formando os Calcarenitos das Caracas. Enquanto a primeira litologia é caracterizada por derrames horizontalizados ou com inclinações de até 30°, no sentido do escoamento das lavas, maciços em seu interior e vesiculares ou amigdaloidais na base e no topo, os arenitos são de coloração cor creme clara, majoritariamente formados por grãos calcários provenientes de algas (*Corallinaceae*) e misturados com alguns minerais de rochas magmáticas, excepcionalmente alcançando,

conforme Almeida (1955), 25 % da massa total. Quando o arenito repousa sobre área ankaratrítica, como é o caso de parte da Ilha Rata, ele é contaminado com minerais fêmicos. Na ilha Rata o arenito das Caracas tem sua parte superior substituída parcialmente por fosfato de cálcio originado de excrementos de aves marinhas, objeto de estudo deste trabalho. Em decorrência de tais formações, o relevo da ilha é baixo e tabular, margeada por falésias estruturais; ora formadas pelas lavas, ora pelos arenitos.



Figura 3 – Localização da Ilha Rata no Arquipélago de Fernando de Noronha.
Fonte: Ecosfera (2007).

3.2. Trabalho de Campo, Coleta e Preparo das Amostras

O trabalho de campo foi realizado em Maio de 2007. Após acesso ao local, com notáveis dificuldades logísticas, foram selecionados para o estudo solos em diferentes pedoambientes, resultantes de variações litológicas, topográficas e interferência dos fosfatos. Tais pedoambientes foram agrupados de maneira a constituir uma topossequência composta por quatro pontos. Em cada ponto foi descrito e coletado um perfil de solo representativo, compreendendo todos os horizontes pedogenéticos. A descrição de campo foi realizada segundo Lemos et al. (2005). As amostras de solos em cada ponto foram obtidas a partir de mistura homogênea de subamostras deformadas para as análises químicas e físicas e indeformadas para a micromorfologia por microscopia eletrônica de varredura (MEV). As amostras coletadas foram identificadas e acondicionadas em sacos plásticos e conduzidas aos respectivos laboratórios, sendo, então, triadas e processadas para a realização das análises. Como preparo, foram secas ao ar, destorroadas e passadas por peneiras de 2 mm (TFSA).

3.3. Análises Físicas e Químicas

Foram realizadas análises físicas e químicas para os solos coletados de acordo com a Embrapa (1997). As análises físicas consistiram na determinação da cor e da textura. A cor foi obtida pela Caderneta de Munsell (MUNSELL, 1994) e a granulometria conforme metodologia da Embrapa (1997) adaptada onde, após agitação vertical por 16h, determina-se o teor de argila e silte pelo método da pipeta, utilizando-se, como dispersante, solução de hexametáfosfato de sódio, sendo a areia determinada por pesagem e peneiramento, obtendo-se quatro frações (areias fina e grossa, silte e argila).

Sobre a análise química, foram determinados pH em água e em solução de KCl 1 mol. L⁻¹ com medição pelo método potenciométrico em suspensão solo:solução igual a 1:2,5. Bases trocáveis (Ca²⁺ e Mg²⁺) foram extraídos com solução de KCl 1 mol L⁻¹, na proporção solo:solução de 1:10 e quantificados por espectometria de absorção atômica e Na⁺ e K⁺ com Mehlich-1 (HCl 0,05 mol L⁻¹ + H₂SO₄ 0,025 mol L⁻¹) na proporção solo:solução 1:10, determinados por fotometria de chama. A acidez foi extraída com KCl 1 mol L⁻¹ na proporção solo:solução de 1:10 e titulada com NaOH 0,025 mol L⁻¹ na presença do indicador azul de bromotimol, expressa em Al³⁺ trocável; H⁺+Al³⁺ extraídos com acetato de cálcio 0,5 mol L⁻¹ a pH 7,0 e titulados com NaOH 0,0606 mol L⁻¹ na presença de fenolftaleína como indicador.

Realizou-se, também, a extração de P por Mehlich-1, determinando-o por colorimetria na presença de ácido ascórbico, como descrito por Defelipo e Ribeiro (1981). Ainda sobre P, foi realizada sua extração com resina trocadora de íons, onde amostras em triplicatas foram pesadas (0,5 g) e acondicionadas em tubos de centrífuga de 50 ml, juntamente com 30 ml de água deionizada e resina aniônica, sendo, então, submetidas a 16 horas de agitação. A determinação dos teores foi feita segundo Murphy e Riley (1962), após ajuste de pH, por fotocolorimetria.

A análise micromorfológica do solo foi realizada com base na microscopia eletrônica de varredura. Após coletadas amostras indeformadas de solos em caixas de Kubiena, elas foram impregnadas com resina (FILIZOLA & GOMES, 2004) e submetidas à confecção de lâminas polidas (seções-finas) nas dimensões de 3 x 6 cm, para posterior análise em microscópio petrográfico. Seleccionadas as feições mais características da fosfatização, as amostras foram levadas ao microscópio eletrônico para realização da microanálise e microsondagens geoquímicas com EDS. A caracterização seguiu as recomendações de Fitzpatrick (1993) e de padrões de literatura,

tais como os trabalhos sobre minerais fosfáticos desenvolvidos por Brindley e Brown (1980), Nriagu e Moore (1984) e Simas (2006; 2007).

3.3. Microanálise em seções finas

Seções finas, previamente estudadas em microscópio petrográfico com polimento manual, foram preparadas para microanálise em microscopia eletrônica de varredura. Após lavagem ultra-sônica final para remoção de resíduos do polimento, as seções finas foram recobertas com filme condutor de carbono e montadas em suporte metálico. As lâminas foram subsequentemente analisadas e fotografadas em microscópio eletrônico de varredura, modelo JEOL JSM 6400, com detector *backscattering* e acoplado a espectrômetro de dispersão de raios-X (PCXA - EDS). Foram realizados exames microquímicos das feições selecionadas, com ênfase para interação entre as diferentes formas de fosfatos e os constituintes da rocha. As análises microquímicas foram realizadas com voltagem de 15 kV, 5 A e a 39 mm de distância de trabalho (detector-superfície). A cada troca de amostras, o PCXA-EDS foi recalibrado com padrão de cobre.

Foi elaborado um menu dos principais elementos para análise quantitativa em EDS, tais como Si, Ca, Mg, P, Fe, K, Cu, Ni, Co, Al, entre outros. Destes foram produzidos mapas microquímicos das áreas selecionadas, e após a identificação de feições com características químicas distintas, procedeu-se à análise dessas feições em magnificação elevada, obtendo-se espectros quantitativos de EDS.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 – Topossequência de Solos Ornitogênicos da Ilha Rata

A distribuição de solos na Ilha Rata é relacionada com as variações do material de origem, da posição geomorfológica/altimétrica e das características da vegetação. De uma maneira geral, podem ser identificados alguns pedoambientes dispostos ao longo de uma topossequência cuja extensão vai desde as porções mais baixas da ilha, próximo às áreas carstificadas cercadas por falésias estruturais, até o topo, onde se localiza uma vegetação de maior porte e relevo suave (Figura 4). Dispostos neste sentido, quatro perfis são suficientes para expressar os referidos pedoambientes nas suas variações e diferentes formas de manifestação do processo de fosfatização. Assim, é apresentada na Tabela 01 uma descrição geral de cada perfil da topossequência enfatizando sua localização e o respectivo solo nele contido. Dos quatro perfis amostrados, um se enquadra na ordem dos Neossolos e três dos Cambissolos. A Figura 5 apresenta o aspecto geral dos pontos e dos perfis coletados.

Embora a variação do material de origem não implique numa diversificação acentuada das classes de solos existentes, sua influência sobre as propriedades físicas, químicas, mineralógicas e micromorfológicas destes solos é extremamente marcante, além de condicionar, também, as formas de fosfatização presentes. Os quatro perfis coletados dispostos na topossequência evidenciam as variações geológicas existentes na Ilha Rata. Nos perfis 1 e 2, observam-se solos originados do intemperismo diferencial dos arenitos carbonáticos, ao passo que no ponto 03 são encontrados arenitos carbonáticos associados com lavas ankaratríticas e no ponto 04 solos originados estritamente a partir das lavas ankaratríticas. A variação das classes encontradas pode ser atribuída mais como um produto do relevo e da forma como este condiciona a relação pedogênese *versus* morfogênese. Isto é, nas áreas planas e próximas ao mar, onde o escoamento da água é menos intenso, privilegiando sua acumulação superficial,

observa-se uma dissolução menos acentuada dos calcarenitos. Destas condições se formam solos mais rasos, localizados em bolsões preenchendo lapiás e micro-depressões isoladas, cuja formação pode estar relacionada a uma dissolução preferencial em áreas de maior fraturamento da rocha e/ou ausência de impurezas químicas na massa carbonática. Ainda sobre os arenitos, agora, porém, situados no terço inferior da encosta, o grau de declividade é suficiente para condicionar um melhor escoamento da água e, por conseqüência, maior dissolução da rocha. Tem-se nessas áreas a presença de Cambissolos. Os perfis 3 e 4 estão situados, respectivamente, nos terços médio e superior da encosta e se encontram em áreas de Cambissolos. A maior atividade intempérica nestes pontos se dá sob as rochas provindas de lavas ultrabásicas nefelínicas (PR4) ou sobre o contato delas com rochas sedimentares carbonáticas (PR3).



Figura 4 – Perfis da Topossequência de Solos Ornitógenicos da Ilha Rata, AFN, Atlântico Sul. Fonte: Ecosfera (2007).

A condição ornitógena dos solos amostrados é, à exceção do Neossolo (PR1), produto de uma interação pretérita com a avifauna do AFN. Isso porque somente nas baixadas observam-se ninhais recentes, com deposição de guano freqüente pelas espécies de atobás e fragatas. Nas demais localidades da ilha, embora os solos apresentem aspectos visuais de sua interação com produtos orgânicos, a fosfatização aconteceu sob condições ambientais diferentes das atuais. A vegetação, por exemplo, hoje em estrato arbustivo e arbóreo para os perfis 2, 3 e 4, foi, certamente, herbácea quando essas áreas estavam ocupadas pelos ninhos das aves. Um clima mais seco que o atual possibilitou o acúmulo do guano por sobre os solos. As evidências que comprovam se tratar de solos ornitógenicos fosfatizados serão discutidas adiante, basta antever que tais solos podem apresentar teores de fósforo disponível que

Tabela 1 – Descrição dos perfis da topossequência de solos ornitogênicos da Ilha Rata, AFN, Atlântico Sul.

Perfil	Classe	Coordenadas	Localização	Atitude (m)	Rochosidade	Material de Origem
PR1	NEOSSOLO	0563745 E 9574544 N	Área de relevo plano, em terraço marinho soerguido carstificado. Apresenta bolsões de solos entremeados em microrrelevo ruiforme de arenitos carbonáticos. Existem ninhais recentes no local.	10	Blocos angulosos de arenitos	Carste de arenitos calcíferos da Formação Caracas de idade pleistocênica.
PR2	CAMBISSOLO	0563746 E 9574545 N	Área de relevo suave, em terço inferior da encosta abaixo de vegetação arbórea aberta. Início da rampa pedimentada com vegetação arbustiva e arbórea. Não existem ninhais atuais, mas verifica-se a presença de muitas locas de caranguejos.	25	Blocos angulosos de calcarenito	Saprolito do calcarenito
PR3	CAMBISSOLO	0567874 E 9578560 N	Terço médio da vertente em área de contato litológico entre o arenito e os basaltos. Vegetação arbustiva e arbórea	38	Não Rochoso	Calcarenito sobre lavas ankaratríticas
PR4	CAMBISSOLO	0567955 E 9578652 N	Terço superior da vertente, em área de relevo ondulado, com vegetação de porte arbóreo e rampas mais declivosas	47	Blocos de basalto	Lavas ankaratríticas da Formação Quixaba

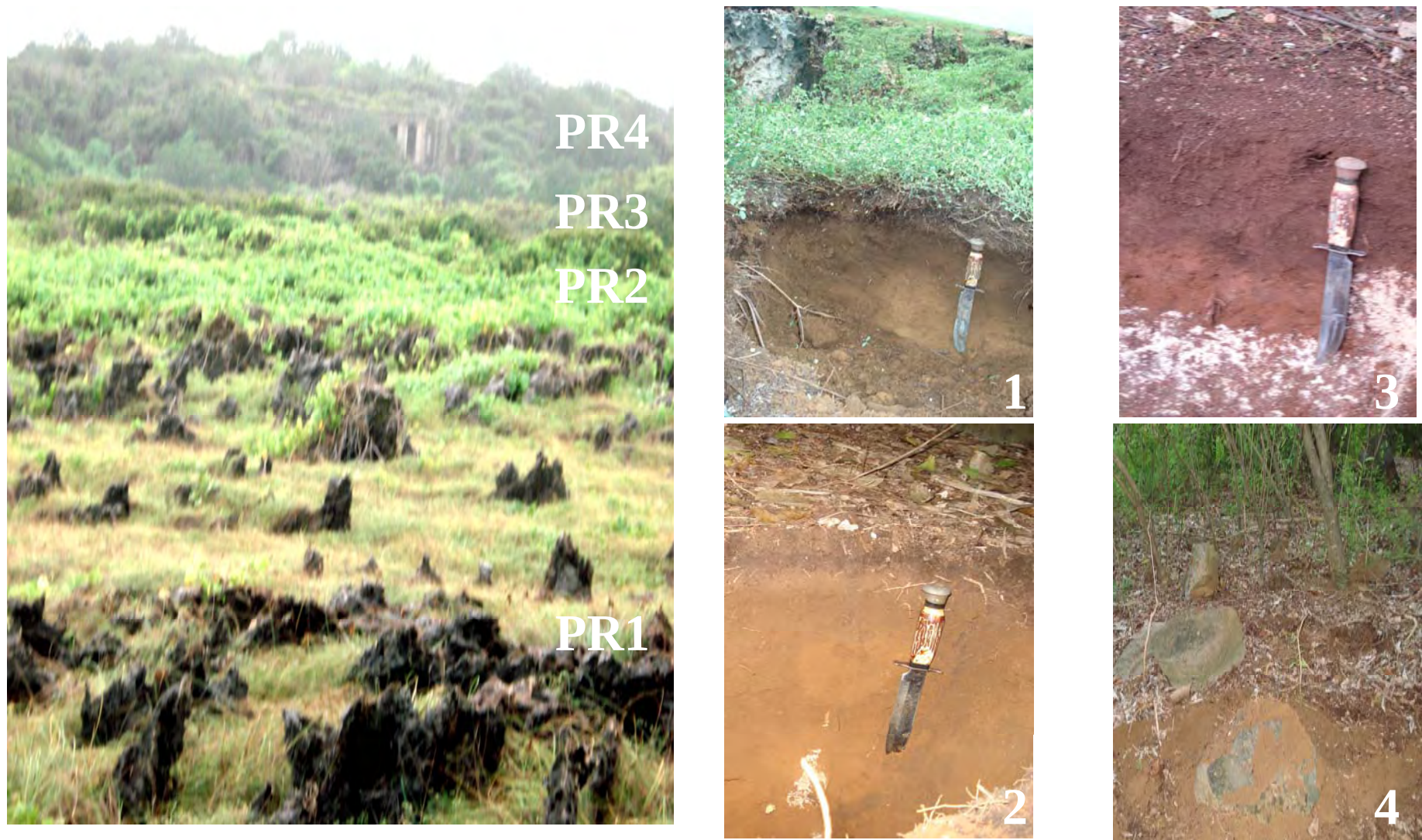


Figura 5 – Toposequência de solos ornitogênicos da Ilha Rata e seus respectivos perfis.

superam os 5.000 mg/dm³ quando, entretanto, são originados de rochas pobres neste elemento (ALMEIDA, 1955).

4.2 – Classificação dos Solos da Topossequência

Os solos amostrados foram classificados a partir de seus atributos físicos, químicos e morfológicos mediante utilização do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2006). Tal sistema foi satisfatório para a classificação dos perfis em análise sem que houvesse a necessidade de propor adaptações. As ordens e seus respectivos sub-níveis categóricos são apresentados na Tabela 02.

Tabela 2 – Classificação dos Solos da Ilha Rata, AFN, Atlântico Sul

Perfil	Classificação dos Solos
PR1	NEOSSOLO REGOLÍTICO Eutrófico léptico-sódico
PR2	CAMBISSOLO HÁPLICO Sódico típico
PR3	CAMBISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico solódico
PR4	CAMBISSOLO HÁPLICO Ta Distrófico típico

4.3 – Atributos Físicos e Químicos dos Solos da Topossequência

Os atributos dos solos da topossequência em análise na Ilha Rata refletem a influência marcante do material de origem. Os resultados das análises físicas e químicas são mostrados nas Tabelas 03 e 04, respectivamente.

O Neossolo apresenta cores bruno-amareladas, e texturas que variam de franco na superfície a franco-argilosa em subsuperfície. Destacam-se os valores de areia fina e silte (Tabela 3) indicando que o intemperismo tem impulsionado a transformação da primeira para a segunda fração. São solos que ocupam preferencialmente as partes baixas da Ilha, com climas mais sazonais e condições pedoclimáticas acentuadamente secas. A vegetação predominante é rasteira e pode ser identificada rochosidade elevada sobre a superfície como produto da fragmentação cárstica da área na qual ele está situado. Apresenta caráter léptico com contato lítico dentro de 100 cm da superfície.

O Neossolo Regolítico da Ilha Rata possui poucas semelhanças ao NEOSSOLO REGOLÍTICO psamítico bioclástico-carbonático descrito por Marques (2004) e

Tabela 3 - Atributos físicos dos solos da Ilha Rata, AFN, Atlântico Sul.

Horizonte	Profundidade (cm)	TFSA< 2mm				Classe Textural	Cor (Münsell)
		Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila		
		dag/kg					
Perfil 1 - NEOSSOLO REGOLÍTICO Eutrófico léptico-sódico (RRen)							
A1	0-4	12	35	35	18	Franco	7,5 YR 3/3 – Bruno-escuro
A2	4-12	11	24	43	22	Franco	10 YR 3/4 – Bruno-amarelado-escuro
C	12-30	11	21	40	28	Franco-Argilosa	10 YR 5/8 – Bruno-amarelado
Perfil 2 –CAMBISSOLO HÁPLICO Sódico típico (CXn)							
A1	0-3	29	18	27	26	Franco-Argilo-Arenosa	7,5 YR 2,5/3 – Bruno muito escuro
A2	3-13	26	23	22	29	Franco-Argilo-Arenosa	10 YR 3/4 – Bruno-amarelado-escuro
Bi	13-31	23	24	17	36	Argilo-Arenosa	10 YR 4/6 - Bruno-amarelado-escuro
C	31-45+	23	23	17	37	Argilo-Arenosa	10 YR 5/6 - Bruno-amarelado
Perfil 3 – CAMBISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico solódico (CXven)							
A1	0-10	23	14	48	23	Franco-Argilosa	10 YR 3/4 - Bruno-amarelado-escuro
A2	10-15	22	22	28	28	Franco-Argilosa	10 YR 3/6 - Bruno-amarelado-escuro
Bi	15-23	17	25	23	35	Franco-Argilosa	10 YR 5/6 – Bruno-amarelado
CR	23-35+	-	-	-	-	-	10 YR 8/2 – Bruno muito claro-acinzentado
Perfil 4 – CAMBISSOLO HÁPLICO Ta Distrófico típico (CXvd)							
A	0-18	15	14	48	23	Franco	7,5 YR 3/3 – Bruno-escuro
Bi	18-25	0	4	58	38	Franco-Argilo-Siltosa	10 YR 4/6 - Bruno-amarelado-escuro
C	25-50+	0	3	55	42	Argilo-Siltosa	10 YR 4/6 - Bruno-amarelado-escuro

Tabela 4 – Atributos químicos dos solos da Ilha Rata, AFN, Atlântico Sul

Hor	Prof.	pH		P	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H ⁺ + Al ³⁺	SB	t	T	V	m	ISNa	MO
	cm	KCl	H ₂ O	mg/dm ³			cmol _c /dm ³							%		dag/kg	
Perfil 1 - NEOSSOLO REGOLÍTICO Eutrófico léptico-sódico (RRen)																	
A1	0-4	5,48	6,01	7019,0	1001,9	164	8,14	11,66	0,00	7,8	24,58	24,58	32,38	75,9	0,0	17,72	13,04
A2	4-12	5,83	6,50	6716,2	1087,1	96	4,82	7,60	0,00	6,0	17,40	17,40	23,40	74,4	0,0	27,16	7,50
C	12-52+	6,12	6,35	6850,3	3261,3	170	3,31	6,76	0,00	5,4	24,68	24,68	30,08	82,0	0,0	57,45	3,65
Perfil 2 –CAMBISSOLO HÁPLICO Sódico típico (CXn)																	
A1	0-3	6,36	6,84	4209,1	230,4	239	4,69	5,36	0,00	3,5	11,66	11,66	15,16	76,9	0,0	8,59	29,35
A2	3-13	6,89	7,42	4305,3	490,8	219	3,32	3,23	0,00	1,6	9,24	9,24	10,84	85,2	0,0	23,09	5,87
Bi	13-31	6,83	7,61	3846,5	188,4	213	16,52	1,85	0,00	1,6	19,73	19,73	21,33	92,5	0,0	4,15	3,39
C	31-45+	6,96	7,59	3776,5	162,3	155	11,25	1,24	0,00	1,1	13,59	13,59	14,69	92,5	0,0	5,19	2,09
Perfil 3 – CAMBISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico solódico (CXven)																	
A1	0-10	6,89	7,56	3049,3	130,2	136	7,62	1,98	0,00	1,4	10,52	10,52	11,92	88,3	0,0	5,38	7,50
A2	10-15	6,94	7,72	2828,2	175,3	84	5,16	1,71	0,00	1,3	7,84	7,84	9,14	85,8	0,0	9,72	5,54
Bi	15-23	7,12	7,85	4423,6	166,3	38	13,74	1,25	0,00	1,1	15,81	15,81	16,91	93,5	0,0	4,57	3,65
CR	23-35+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Perfil 4 – CAMBISSOLO HÁPLICO Ta Distrófico típico (CXvd)																	
A	0-18	5,08	5,79	397,5	292,5	834	12,41	8,81	0,00	14,5	24,62	24,62	39,12	62,9	0,0	5,17	17,61
Bi	18-25	4,31	5,47	624,4	244,4	558	4,58	3,29	0,10	18,3	10,36	10,36	28,66	36,1	1,0	10,16	4,24
C	25-50+	3,46	4,75	1052,3	127,2	227	0,77	0,52	1,16	21,5	2,42	2,42	23,92	10,1	32,4	15,45	2,35

Schaefer (2006) na Ilha Fernando de Noronha e ao perfil de NEOSSOLO REGOLÍTICO psamítico fase campo de dunas descrito por Clemente (2006) para a Ilha da Trindade, estando elas restritas à matriz química e mineralógica do material de origem.

Segundo Ribeiro et al. (2003) e Marques (2004), os Neossolos Regolíticos encontrados em Fernando de Noronha apresentam seqüência de horizontes A/C, com textura arenosa, estrutura em grãos simples e outras características morfológicas típicas de Neossolos Quartzarênicos, dos quais se diferenciam pela ausência do quartzo nas frações areia e cascalho. Estas frações são constituídas por grãos calcários de origem biogênica, subarredondados e pouco trabalhados, provenientes de fragmentos de conchas de moluscos, crustáceos, corais, foraminíferos e algas carbonáticas. Clemente (2006) encontrou resultados semelhantes em Trindade, diferenciando-se de Noronha por identificar maior contribuição de grãos minerais de origem vulcânica nas frações areia e cascalho, correlacionado ao que Faria (1974) observou nos Neossolos Regolíticos da Ilha do Fogo, em Cabo Verde.

Os solos da Ilha Rata, por sua vez, não são desenvolvidos a partir de material remobilizado constituindo dunas atuais, mas da rocha psamítica carbonática da Formação Caracas *in situ*. Como consequência, são menos arenosos que os solos descritos e apresentam estrutura mais desenvolvida que grãos simples. A cor também se difere dos demais pela presença de minerais fêmicos na rocha, que, após intemperizados sob condições úmidas, atribuem tonalidades amareladas ao perfil. Um perfil também descrito por Clemente (2006) de Neossolo Regolítico Distrófico parece incorrer no mesmo processo, possuindo tonalidades em torno de 10 YR pela mesma mistura com minerais máficos e umidade.

Do ponto de vista químico, o Neossolo apresenta pH predominantemente neutro a ligeiramente ácido, mantendo-se os valores com pouca alteração ao longo do perfil (Tabela 4). Na comparação entre os valores obtidos pelo pH em H₂O e pH em KCl, observam-se diferenças pouco significativas, mas que evidenciam um predomínio de cargas negativas no complexo de troca. Para solos cujo material de origem é psamítico, o predomínio de cargas negativas pode ser compreendido como uma evidência do avanço do intemperismo por sobre este solo. Sua classificação como Neossolo Regolítico se dá pela existência de mais de 5% do volume da massa do horizonte C de fragmentos semi-intemperizados da rocha, mas são nítidas as evidências que apontam

para sua evolução, possivelmente para um Cambissolo, na medida em que tais fragmentos forem sendo decompostos.

Trata-se de um solo eutrófico com elevados teores de nutrientes e saturação por alumínio nula em razão do pH neutro. Tais características se contrastam com a mesma classe, também eutrófica, identificada por Clemente (2006) em Trindade onde os teores de nutrientes são baixos. Naquele caso, a autora atribui ao material de origem, formado de areias calcárias com pouca contribuição de sedimentos arenosos de rochas vulcânicas subordinadas e ao fato de ser um solo com textura arenosa e lixiviação mais acentuada, as razões para os baixos teores. Na Ilha Rata, entretanto, a maior parte dos campos de dunas que formaram a Arenito das Caracas sofreram contribuição de fragmentos de basaltos e outras rochas efusivas provindas do desgaste das estruturas vulcânicas. Adicionalmente, as áreas mais rebaixadas onde esse solo se localiza estão sujeitas à contribuição de material provindo das elevações. Mesmo que não seja proeminente na atualidade, é provável que a erosão já fora mais intensa na Ilha quando a vegetação era de menor porte. Os valores de nutrientes encontrados (Tabela 4), evidenciados na alta soma de bases, são próximos daqueles reportados a um perfil de Neossolo Litólico formando em condições menos sazonais e através da decomposição de lavas e escórias de um leque coluvial pedimentado na Ilha da Trindade, o que confirma que tais atributos químicos estão relacionados ao enriquecimento dos arenitos com materiais vulcânicos (CLEMENTE, 2006).

A proximidade do mar e, em menor escala, o material de origem, condicionam teores muito altos de Na trocável (Tabela 4) no perfil, resultando, inclusive, em índices de saturação de vão de 17% a 57%. Tal como reportado por Little & Roberts (1983) para solos da Austrália e Ibramo et al (2004) para a Região dos Lagos (RJ), a influência dos “spays salinos” é marcante na contribuição alóctone de cátions monovalentes como o Na e o K. Os teores deste segundo também são altos nos três horizontes e acompanham o mesmo comportamento, ou seja, são maiores no horizonte C que no horizonte superficial. É de se estranhar tais constatações, uma vez que se espera uma maior concentração no horizonte A por ser nele o primeiro contato com as soluções aspergidas ricas nestes elementos. O fato é que a maior concentração em subsuperfície pode indicar a saturação do próprio saprolito, muito poroso, antes mesmo que ele se transformasse em solo. Adiante serão apresentadas outras evidências expostas nos perfis 02 e 03 da topossequência que confirmam tais especulações. Do ponto de vista de sua

matéria orgânica, observa-se forte decréscimo no conteúdo de carbono orgânico total no intervalo que separa os horizontes A1 e A2 do horizonte C (Tabela 4).

Sobre os Cambissolos, destacam-se os Cambissolo Háplico Sódico típico (PR2); Cambissolo Háplico Ta Eutrófico típico (PR3) e Cambissolo Háplico Ta Distrófico típico (PR4). Tais classes apresentaram cores bruno-escuras na superfície e vão ficando mais amareladas na medida em que se aproximam do horizonte C e passam a sofrer menor influência da matéria orgânica (Tabela 4). Adicionalmente, possuem texturas mais argilosas no sentido de PR2 para PR4 (Tabela 3), sendo que este aumento nos teores de argila, deve-se à mudança do material de origem, ou seja, do arenito para o basalto. Confirma-se maior desenvolvimento pedogenético neste mesmo sentido pelo decréscimo nos valores da relação silte-argila, maior profundidade e menor rochosidade. Estão relacionados às posições geomórficas do terço médio a superior das encostas, em áreas pouco declivosas, e associados à vegetação de portes arbustivo e arbóreo.

Na ilha principal do mesmo arquipélago, Marques (2004) também encontrou apenas Cambissolos Háplicos, para os quais a localização foi atribuída como sendo nas áreas mais preservadas dos planaltos. Diferem-se, do ponto de vista físico, dos Cambissolos da ilha Rata por apresentarem textura franco-argilosa, argilosa a muito argilosa. Tais diferenças ocorrem nos solos cujos materiais de origem foram diferentes daqueles encontrados na Rata, ou seja, fonolitos e piroclástos, principalmente tufos. As semelhanças texturais persistem, por consequência, nos Cambissolos derivados de basaltos, encontrados nas duas ilhas. Não foram identificados Cambissolos originados de arenitos na Ilha principal.

Alguns Cambissolos analisados por Marques (2004) apresentaram propriedades vérticas em razão da existência de descontinuidades litológicas de lavas para tufos dentro do perfil. Na Ilha Rata, mesmo que uma mistura de materiais possa ser observada, sobretudo no perfil 3, esta não se configura como uma descontinuidade no perfil, mas um contato entre duas formações geológicas pela mistura de materiais associada aos sedimentos (colúvio) provindos dos basaltos (acima) e do arenito (abaixo), intemperizado *in situ*.

No que tange à fertilidade, os Cambissolos são solos férteis, em sua maioria eutróficos e com argila de atividade alta, à exceção do Perfil Rata 4 que, embora possua alta reatividade de argilas, apresenta valores de saturação por bases (V%) inferiores a 50%, sendo classificado como distrófico. Tal perfil (PR4) é semelhante àquele encontrado por Marques (2004), também classificado como CAMBISSOLO HÁPLICO

Tb Distrófico típico, em relação a sua posição na paisagem (partes mais altas) e ao fato de ser distrófico. São ambos os solos mais intemperizados do Arquipélago.

Os perfis 2 e 3 são solos neutros com valores de pH em H₂O entre 6 e 7. Em decorrência, apresentam saturação por alumínio nula. Ao contrário, o perfil 4, mais intemperizado, apresenta-se ácido, com pH decrescente do horizonte A para o horizonte C (Tabela 4) e seu valor m% pode chegar a 32,4% em subsuperfície, o que corresponde a teores disponíveis de Al próximos de 1,16 cmol_c/dm³. Não chega a constituir caráter álico, a exemplo do que acontece para a mesma classe identificada na Ilha principal por Marques (2004). Comparados os valores dos ΔpH destes solos, todos se afirmam como eletronegativos.

Observam-se, nos perfis 2 e 3, maiores valores de CTC e Soma de Bases para o horizonte Bi (13-31 cm) em comparação com o horizonte A (Tabela 4), mesmo que o conteúdo de matéria orgânica seja alto nos horizontes superficiais, contrastando com os Cambissolos de Fernando de Noronha e de Trindade. Acredita-se que por ser essa CTC controlada pelo Ca²⁺, elemento de maior disponibilidade em função do material de origem, a proximidade da rocha (arenito) justifica esses valores serem maiores nos horizontes subsuperficiais que naqueles com acúmulo de matéria orgânica. Deve-se, contudo, lembrar que muitos minerais facilmente intemperizáveis encontram-se aí localizados e que, mesmo que não representem cálcio disponível, podem ter sido solubilizados no momento da análise e interferido nos resultados. Em outras palavras, a maior CTC em Bi seguida de C e somente depois A (Tabela 4), pode não representar necessariamente nutrientes trocáveis, mas sim parte a composição química da rocha solubilizada durante os tratamentos. Semelhante anomalia não é verificada para o perfil 4, onde o horizonte de maior acúmulo de matéria orgânica (A) é também aquele com maiores valores de CTC. A maior concentração de cálcio no horizonte A, neste caso, deve-se às contribuições alóctones da deposição dos excrementos das aves.

A saturação por sódio, responsável pelo caráter sódico em PR2 e solódico em PR3, chama atenção por algumas peculiaridades. Em primeiro lugar, postula-se que os baixos teores deste elemento, assim como do potássio, na rocha sedimentar, confirma que são os *sprays salinos* os responsáveis por sua acumulação nos perfis. Diante disso, em análise do perfil 02, observou-se que o horizonte com maiores teores de sódio e, por consequência, maior porcentagem de saturação (23%) corresponde ao A2 (3-13 cm), diferenciando-se muito do horizonte A1 cujos valores decrescem para 8,59%. Assim é provável que sob condições ambientais pretéritas, o que hoje representa o horizonte A2

seria mais superficial (correspondendo ao horizonte A unicamente) e estaria mais exposto ao borrifamento dos *sprays*, constituindo uma paleosuperfície. Tais condições só podem ser explicadas, também, por uma vegetação de menor porte que a atual e por climas em condições mais áridas que, associados à baixa pluviosidade, aumentariam a salinidade das águas oceânicas. Além disso, a posição geomorfológica é fundamental para a maior ou menor salinização destes solos, haja vista que o caráter sódico tende a ser identificado apenas nos perfis 01 e 02, mais próximos do mar, sendo os perfis 3 e 4, mais distantes, solódicos. Não se observa o mesmo horizonte A2 salinizado em PR3 e o pouco aumento nos teores de sódio dos horizontes Bi e C em PR4 evidenciam contribuição autóctone do intemperismo de plagioclásios das rochas basálticas.

4.4 – Fósforo nos Solos da Topossequência

Os teores de fósforo disponível para todos os perfis são apresentados na Tabela 4. Tais teores, obtidos a partir do extrator Melich-1, revelaram-se bastante altos em todos os perfis, principalmente aqueles associados à deposição de excrementos mais recente. A utilização deste extrator é comum em solos com baixos valores de P, sobretudo solos tropicais férricos. Como se trata de uma reação extremamente ácida (pH < 2,0), a literatura adverte que poderá ocorrer uma superestimação na sua utilização em solos ricos neste elemento por causa da solubilização de formas de P-Ca, na prática não disponíveis às plantas (NOVAIS & SMYTH, 1999).

De maneira geral, nos solos menos intemperizados (PR1 e PR2) os teores encontrados nos horizontes superficiais são relativamente maiores que aqueles em subsuperfície. Ao contrário, os perfis 3 e 4, mais intemperizados, os valores são maiores nos horizontes subsuperficiais (Bi e C). Trata-se, provavelmente, da iluviação de fósforo depois de finalizadas a interferência das aves, tal como reportado por Simas (2006) para solos afetados por pinguineiras na Antártica. De acordo com este autor, os valores mais altos nos solos ornitogênicos antárticos foram obtidos para camadas superficiais de uma área recém abandonada, ao passo que os altos teores de P avaliados em profundidade indicaram iluviação de P depois do abandono do local pelos pingüins. Adicionalmente, acredita-se que a posição na paisagem tem forte influência na distribuição do P no perfil, uma vez que a maior altitude além de influenciar no comportamento da infiltração da água, irá também possibilitar maior lixiviação e/ou perda por erosão para as baixadas. É provável, também, que a intensidade de deposição nas partes mais altas da Ilha tenha sido menor em razão da vegetação de maior porte.

Em PR1 observa-se uma distribuição relativamente homogênea dos teores no perfil, com valores próximos de 7.000 mg/dm³ de fósforo. Em contraposição, nas elevações (PR4), os valores são bem inferiores, perfazendo 397,5 mg/dm³ no horizonte A, 624,4 mg/dm³ no horizonte Bi e 1.052,3 mg/dm³ no horizonte C. Nos perfis 2 e 3, esses valores focam em torno de 3.000 a 4.000 mg/dm³ (Tabela 4).

Foi também realizada a extração do P por resina trocadora de íons (Tabela 5). Os resultados obtidos são semelhantes ao Melich-1, principalmente para os perfis 1 e 2. Nestes, observa-se um decréscimo considerável nos valores de P disponível para o horizonte C se comparadas as duas metodologias. Isto é, enquanto a extração por Melich-1 revelou 3.776,5 mg/dm³ para o horizonte C em PR2, na extração com a resina esses valores foram reduzidos para 1.828,79 mg/dm³, confirmando a superestimação da primeira metodologia, pois o horizonte C é o horizonte de acumulação de minerais de P-Ca pouco resistentes.

Vale ressaltar as diferenças significativas obtidas para o perfil 04. Ao contrário do esperado, os valores de P pela resina foram bem maiores, mesmo que o aumento em profundidade tenha se preservado (Tabela 5). Trata-se do único solo ácido da topossequência, o que comprova que os altos teores de P trocável só existem em razão da fosfatização destes solos pela atividade da avifauna.

Tabela 5 – Teores de P disponível dos solos da Ilha Rata extraídos por Resina

Hor	Prof.	Resina-Pi
	cm	mg/dm ³
Perfil 1 (RRen)		
A ₁	0-4	6.136,92
A ₂	4-12	6.251,61
C	12-30	5.843,01
Perfil 2 (CXn)		
A ₁	0-3	4.473,84
A ₂	3-13	4.753,41
Bi	13-31	3.545,52
C	31-45+	1.828,79
Perfil 3 (CXven)		
A ₁	0-10	2.343,08
A ₂	10-15	5.470,25
Bi	15-23	4.854,23
CR	23-35+	1.101,32
Perfil 4 (CXvd)		
A	0-18	2.916,70
Bi	18-25	3.006,81
C	25-50+	3.037,58

4.5 – A Fosfatização nos Solos da Ilha Rata

Conforme observado no item anterior, os altos valores de P indicam uma interação entre os solos e a acumulação de excrementos depositados pelas aves. Entretanto, essa interação tende a se manifestar diferentemente conforme as condições ambientais, sobretudo em relação ao grau de intemperismo do substrato, às condições do relevo e aos regimes climáticos, atuais e pretéritos. Assim, as análises microscópicas realizadas por MEV e as microsondagens pontuais com quantificação geoquímica por EDS, evidenciaram formas de fosfatização muito interessantes nos solos da Ilha Rata e cuja ocorrência está diretamente ligada ao histórico de condições climáticas no qual a Ilha esteve inserida desde sua exposição à superfície. Neste contexto, uma seqüência descritiva foi elaborada a partir dos perfis 1, 2, 3 e 4, representando, respectivamente, os solos situados nos calcarenitos (PR1), no contato entre calcarenitos e basaltos (PR2 e PR3) e basaltos (PR4).

No perfil de solo 1, onde foi caracterizado um Neossolo Regolítico originado a partir de rochas psamo-carbonáticas, a análise do horizonte C pela microscopia confirmou a presença de fragmentos do calcarenito (Figura 6). Eles são arredondados e contêm pseudomorfos de basalto no seu interior, conforme revelam os mapas microquímicos, em fase de intemperismo avançado. O arredondamento dos grãos de areia é, provavelmente, produto do retrabalhamento eólico de paleodunas que, após processos diagenéticos, deram origem aos arenitos por todo o Arquipélago. Da mesma maneira, a presença de contribuições minerais máficas confirma serem os resultados químicos encontrados para esse perfil influenciados pela presença destes minerais misturados na matriz carbonática dos calcarenitos. Associado às litorrelíquias, observa-se um plasma fosfatizado com fosfato de alumínio (P-Al) na fração argila muito incipiente e fosfato de cálcio (P-Ca) degradado na fração areia fina até silte.

No perfil 2, foram realizadas análises do horizonte Bi. Observou-se neste Cambissolo, microestrutura composta por agregados de P-Ca recobertos por fosfato de alumínio com pouca cristalinidade nas bordas. Os agregados são arredondados e formados por fragmentos degradados de calcarenitos rapidamente envolvidos por acumulações concentriformes de P-Al (Figura 7). As microsondagens pontuais destes agregados confirmaram tais observações, revelando progressivo aumento dos teores de alumínio do centro para a borda. Os espectrogramas da Figura 8 ilustram tal situação, à medida que do Ponto 1 para o Ponto 3 observa-se um aumento na intensidade do pico do alumínio, corroborado pelos dados da Tabela 6.

200 μm

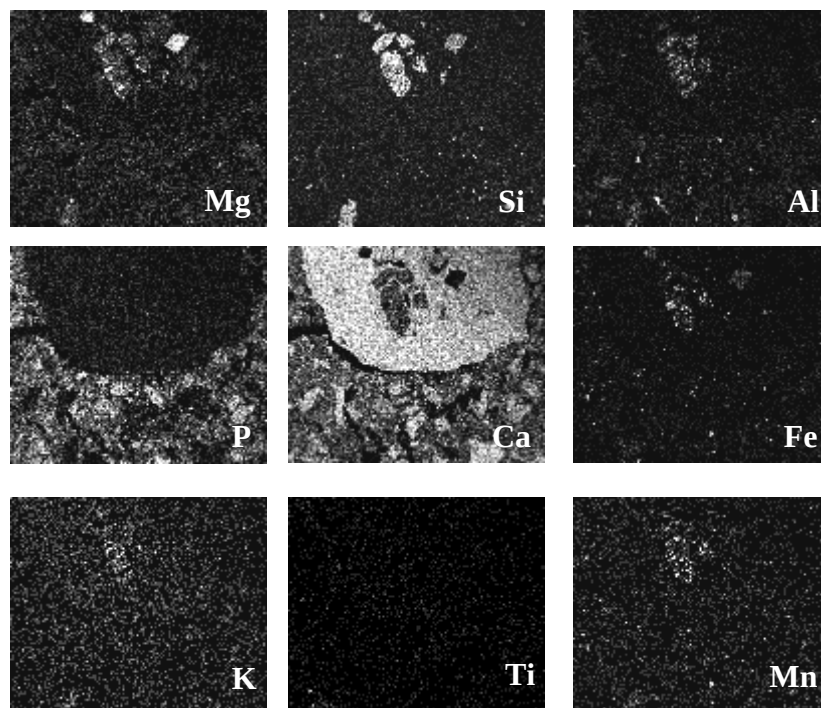
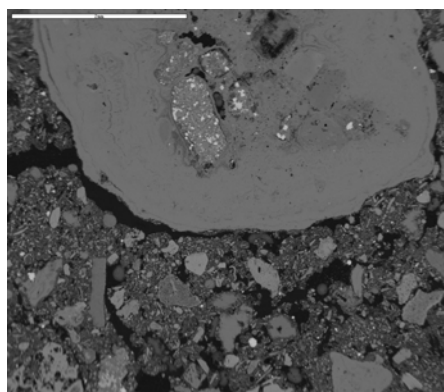


Figura 6 – Fotomicrografia em retroespalhamento eletrônico (MEV) e mapas microquímicos de EDS do horizonte C de NEOSSOLO REGOLITICO Eutrófico léptico-sódico, correspondente ao PR1 (as feições mais claras indicam a distribuição e a maior quantidade relativa do elemento na lâmina analisada).

200 μm

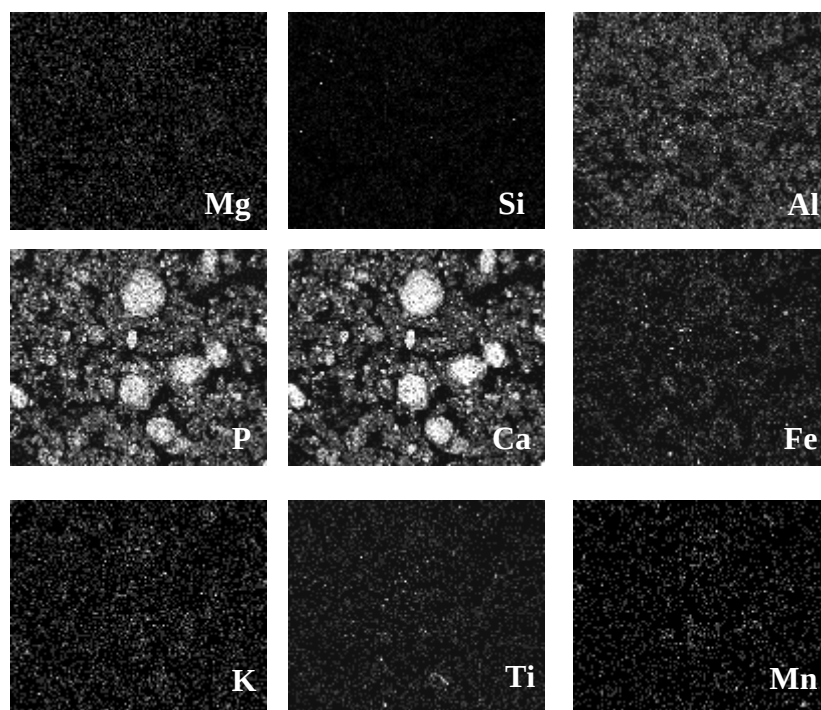
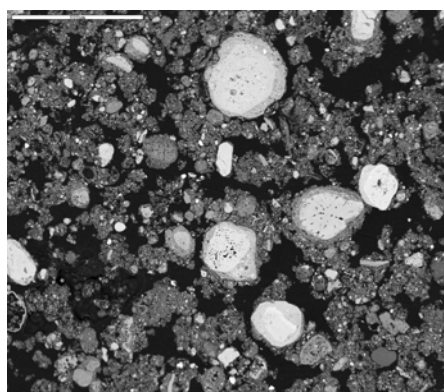
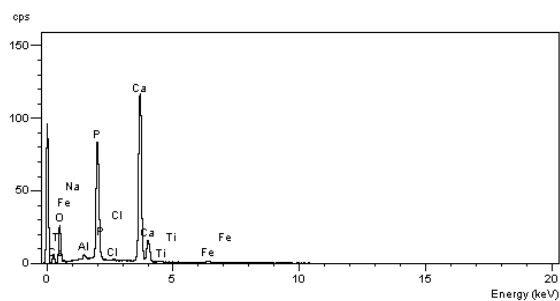
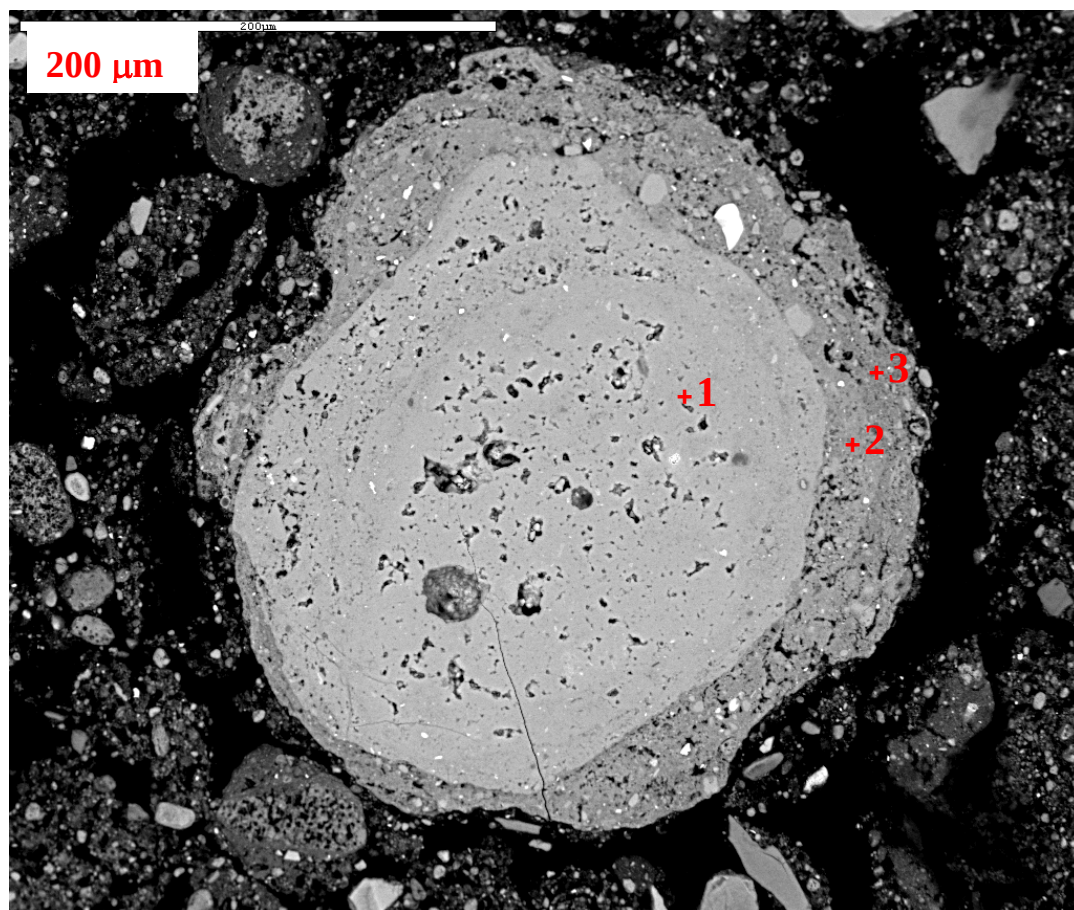
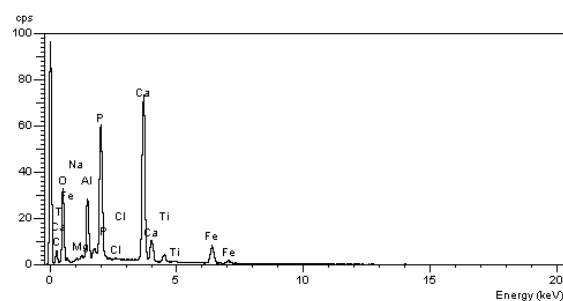


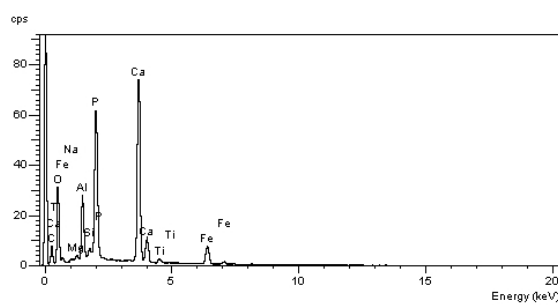
Figura 7 – Fotomicrografia em retroespalhamento eletrônico (MEV) e mapas microquímicos de EDS do horizonte Bi de CAMBISSOLO HÁPLICO Sódico típico, correspondente ao PR2 (as feições mais claras indicam a distribuição e a maior quantidade relativa do elemento na lâmina analisada).



P1



P2



P3

Figura 8 – Fotomicrografia em retroespalhamento eletrônico (MEV) e pontos da análise química por meio de EDS com respectivos espectogramas. Material correspondente ao PR2, horizonte Bi, evidenciando fragmento de P-Ca envolvido por P-Al pouco cristalino.

Tabela 6 - Composição química das análises pontuais da Figura 08.

Análises Ponuais	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Cr ₂ O ₃	TiO ₂
%											
Agregado do Perfil Rata 2 - CAMBISSOLO HÁPLICO Sódico típico											
1	43,03	nd*	52,99	0,21	1,26	0,70	nd	1,33	nd	nd	0,36
2	35,71	nd	35,74	0,76	12,67	0,95	nd	9,16	2,02	nd	2,82
3	37,27	nd	37,19	0,76	12,02	1,13	nd	8,62	1,62	nd	1,27

*nd – não detectado

No ponto 1, por exemplo, localizado na massa carbonática do fragmento de arenito degradado, os teores de Al₂O₃ são de 1,26% acompanhados de 43,03% de P₂O₅ e 52,99% de CaO (Tabela 6). Até mesmo o ferro apresenta valores maiores que o alumínio, com teores que chegam a 1,33% de Fe₂O₃. Baixos teores de MgO (0,21%) e TiO₂ (0,36%) aparecem como herança das *impurezas* basálticas do Arenito das Caracas. Em P2, por sua vez, a porcentagem de Al₂O₃ cresce para 12,67%, com redução do CaO para 35,74% e do P₂O₅ para 35,71%. Os valores de MgO continuam baixos, seguidos da presença de Na₂O acumulado na superfície. Os teores de TiO₂ e Fe₂O₃ crescem consideravelmente, representando nesse recobrimento superficial 2,82% e 9,16 %, respectivamente. O ponto 3, também na superfície do grânulo, confirma a acumulação de variscita, com teores de Al₂O₃ permanecendo altos (12,02%). Ainda que prevaleça um agregado formado por fosfato de cálcio, observa-se sua progressiva variscitização.

No perfil 3, um Cambissolo em altitude mais elevada, foi realizada análise por MEV do horizonte A e a mesma permitiu identificá-lo como sendo um horizonte fosfático. Observaram-se microagregados constituindo micronódulos oólitos cuja concentração de P-Al ocorre em toda a estrutura. Em outras palavras, verifica-se a presença de uma agregação fosfática com microagregados variscíticos formados pela variscitização dos arenitos calcários. A análise dos mapas microquímicos da Figura 9 evidencia tais observações e, ao contrário do que foi demonstrado no perfil 2 (CXn), a região central do agregado não é mais formada prioritariamente por fosfatos de cálcio provenientes de arenitos degradados, mas quase totalmente por fosfatos de alumínio já bem cristalizados.

Em todos os pontos amostrados no interior e bordas dos agregados deste horizonte (Figura 10), cuja quantificação é apresentada na Tabela 7, os espectros químicos apresentaram o mesmo comportamento. Isto é, os valores de Al₂O₃ são altos, variando em torno de 30 a 40% acompanhados pelos também altos teores de P₂O₅, cujos menores valores foram de 15,36% e maiores de 34,38%. Tal como nas bordas dos

agregados do perfil 2, crescem os teores de Fe_2O_3 e TiO_2 (Tabela 7). Neste mesmo agregado, é possível confirmar, ainda, que a variscitização tem substituído o fosfato de cálcio por fosfato de alumínio pela análise do comportamento químico sequencial no sentido borda do agregado → centro do agregado → borda do agregado (Figura 10). Em outras palavras, observa-se o aumento da intensidade dos picos do alumínio e do fósforo acompanhados pela também presença do cálcio, estando esse em processo de remoção. A mineralização de P-Al tende para a formação de agregados constituídos primordialmente por variscita - $\text{Al}(\text{PO}_4) \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$ - à medida que o processo de cristalização se desenvolve. Os eventuais picos de Fe, Mn, Si, Ti e K representam litorrelíquias de minerais máficos provindos das lavas ankaratríticas.

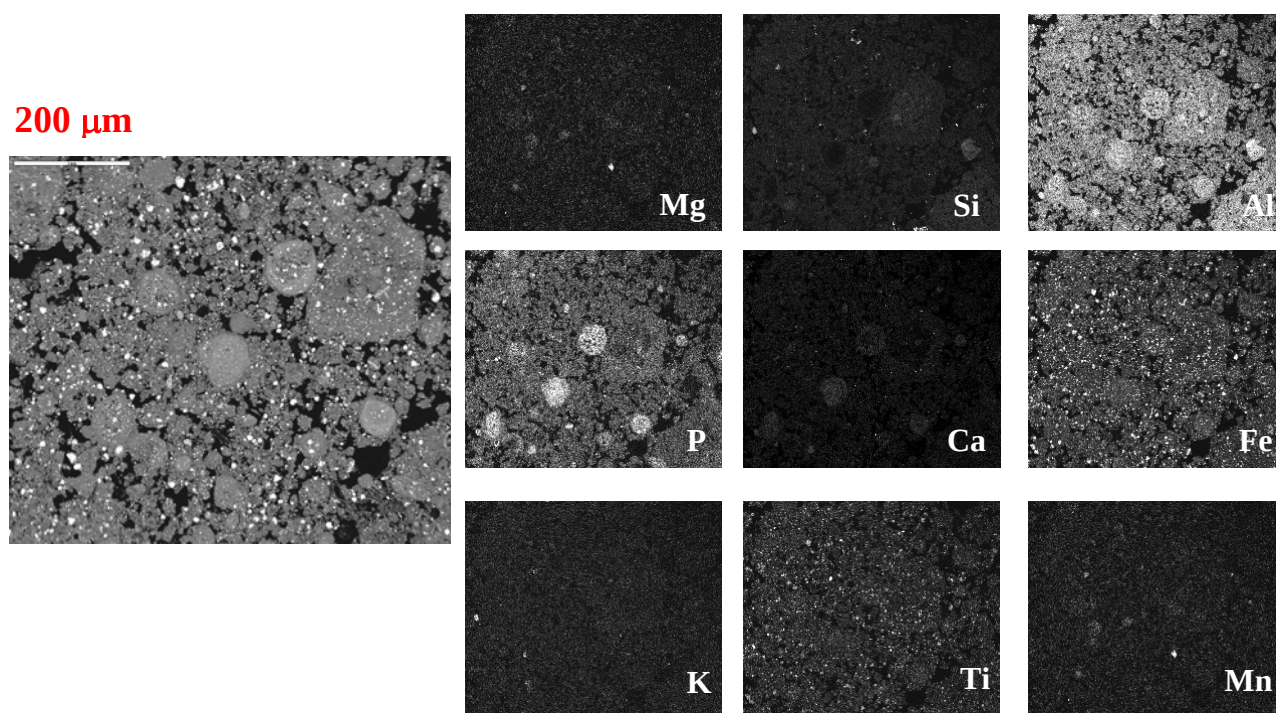
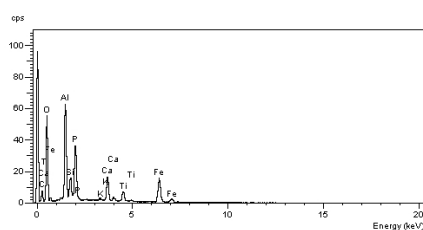
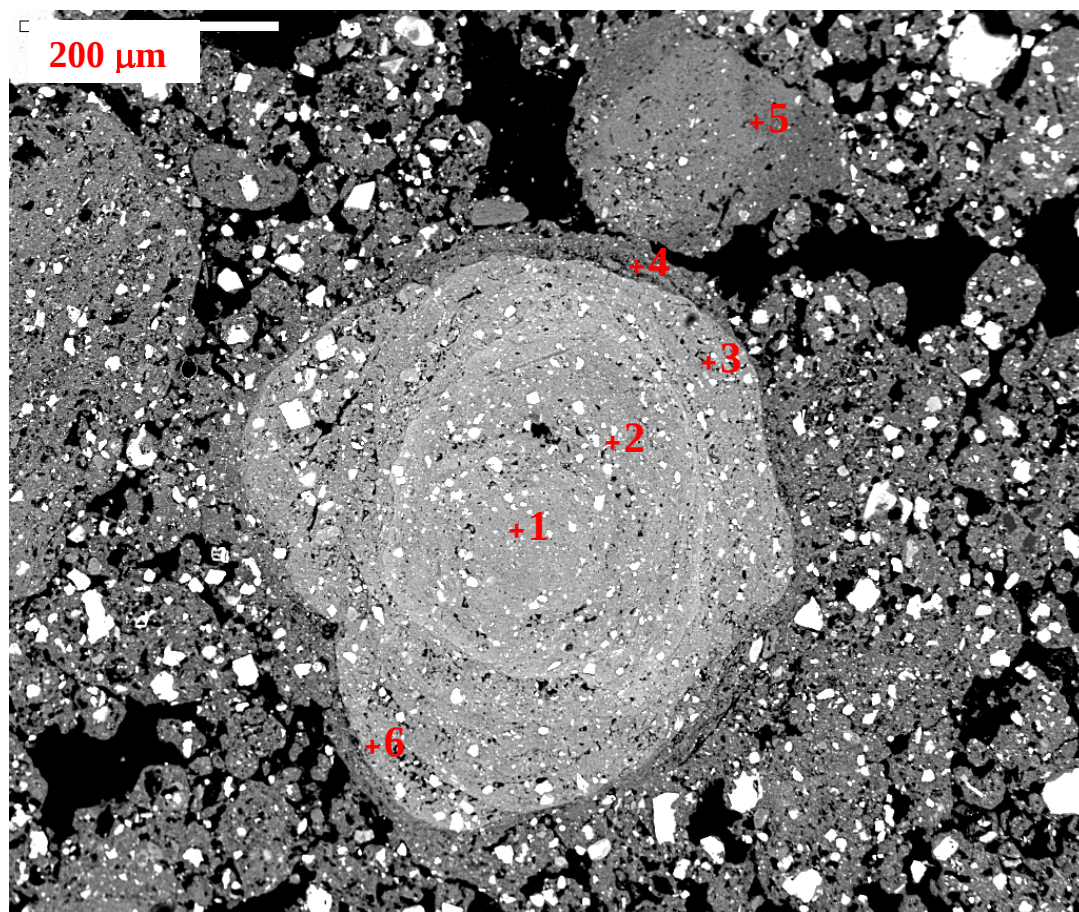
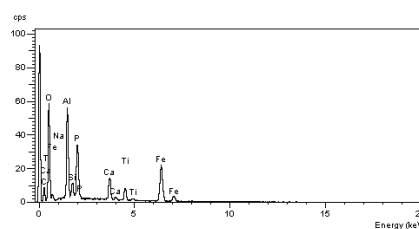


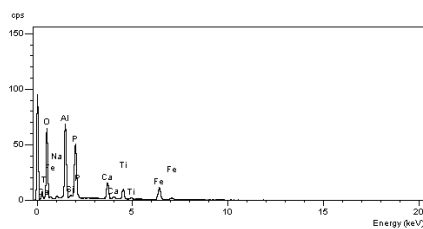
Figura 9 – Fotomicrografia em retroespalhamento eletrônico (MEV) e mapas microquímicos de EDS do horizonte A de CAMBISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico, correspondente ao PR3 (as feições mais claras indicam a distribuição e a maior quantidade relativa do elemento na lâmina analisada).



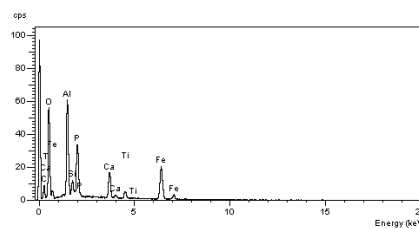
P1



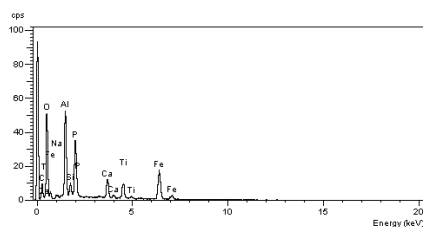
P4



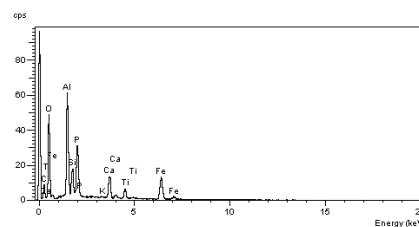
P2



P5



P3



P6

Figura 10 – Fotomicrografia em retroespalhamento eletrônico (MEV) e pontos da análise química por meio de EDS com respectivos espectogramas. Material correspondente ao PR3, horizonte A, evidenciando agregados de P-Al a partir de agregados de P-Ca.

Tabela 7 - Composição química das análises pontuais da Figura 10.

Análises Pontuais	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Cr ₂ O ₃	TiO ₂
%											
Agregado do Perfil Rata 3 - CAMBISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico solódico											
1	23,84	0,38	5,55	nd	45,41	1,31	nd	19,49	nd	nd	7,02
2	30,94	0,31	5,29	nd	30,10	3,73	nd	19,25	4,00	nd	6,08
3	26,12	nd*	7,75	nd	31,29	0,90	nd	20,93	5,87	nd	7,14
4	16,48	nd	4,43	nd	29,61	1,70	nd	17,01	20,28	nd	10,18
5	28,00	nd	5,20	nd	33,34	2,84	nd	13,12	12,82	nd	4,47
6	15,87	0,35	4,70	nd	32,89	0,80	nd	17,43	20,73	nd	7,22

*nd – não detectado

No perfil 04, o horizonte Bi do Cambissolo derivado de basalto apresenta como microestrutura agregados oólitos de P-Al com alguns fragmentos de aluminossilicatos em processo de intemperismo. É provável que tais agregados sejam produtos da fosfatização destes silicatos que, por sua vez, já representam produtos do intemperismo dos basaltos. As microsondagens (Tabela 8; Figura 11) revelam, na comparação entre os pontos 1 e 2, localizados, respectivamente, no interior e borda do aluminossilicato, uma progressiva remoção de sílica com concentração de alumina e reação com os fosfatos provindos das excreções. Ainda na Figura 11, chamam atenção os pontos 3 e 4, onde é possível perceber, do interior (P4) para a borda (P3), um decréscimo nos teores de Al, Ca, Si e P, e aumento de Fe e Ti marcando a deposição desses óxidos, típicos de material intemperizado, na superfície externa. Os altos teores de TiO₂ em quase todos os pontos chamam atenção. Trata-se de um elemento bastante residual capaz de permanecer no sistema até mesmo em solos muito intemperizados.

Tabela 8 - Composição química das análises pontuais da Figura 11.

Análises Pontuais	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Cr ₂ O ₃	TiO ₂
%											
Agregado do Perfil Rata 4 - CAMBISSOLO HÁPLICO Ta Distrófico típico											
1	15,36	0,39	4,35	nd	30,65	0,71	nd	22,33	21,27	nd	4,94
2	25,44	0,44	8,03	nd	32,42	0,90	nd	18,96	8,65	nd	5,16
3	24,55	0,24	7,44	nd	32,88	0,96	nd	17,35	11,49	nd	5,09
4	24,17	nd	6,77	nd	29,37	1,42	nd	26,27	6,02	nd	5,98
5	24,59	nd*	7,99	nd	32,05	0,76	nd	25,08	5,78	nd	3,75
6	26,47	nd	6,08	nd	29,59	1,88	nd	22,47	5,09	nd	8,43
7	34,38	nd	7,48	nd	33,39	2,34	nd	13,73	1,06	nd	7,62

*nd – não detectado

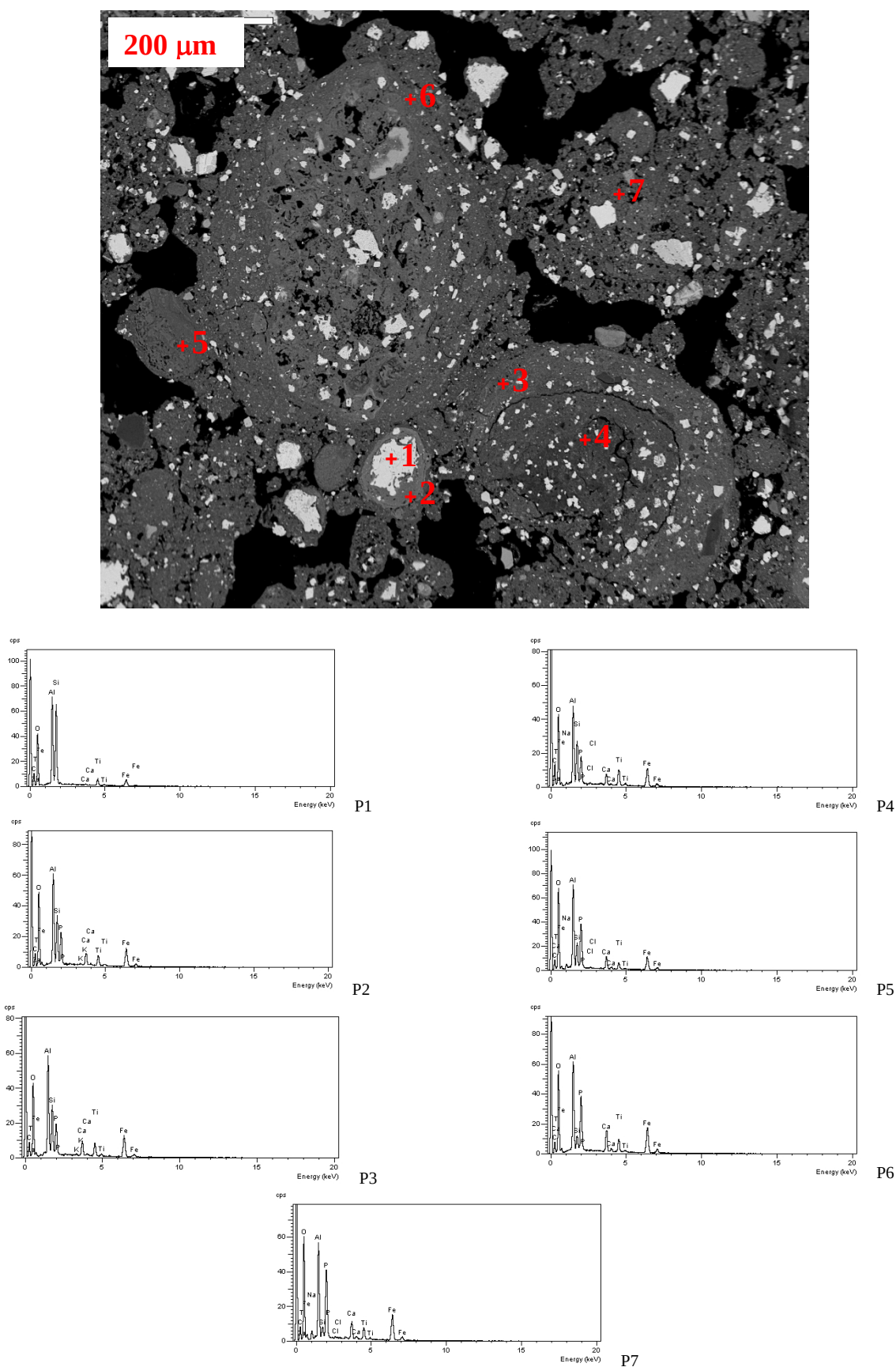


Figura 11 – Fotomicrografia em retroespalhamento eletrônico (MEV) e pontos da análise química por meio de EDS com respectivos espectogramas. Material correspondente ao PR4, horizonte Bi, evidenciando agregados de P-Al.

4.6 – Modelo de Fosfatização dos Solos da Ilha Rata

Diante de tais resultados apresentados no item anterior, torna-se válido sugerir que a fosfatização dos solos da Ilha Rata, tal como a observamos na atualidade, deve ser compreendida a partir de condições climáticas variadas e sob o condicionamento de formas de relevo específicas, sobretudo no que diz respeito ao desencadeamento de processos de coluvionamento na Ilha. A partir disso, torna-se válida a elaboração de um modelo capaz de explicar a fosfatização destes solos.

Num primeiro estágio, caracterizado por climas mais úmidos, ocorreria o aprofundamento do manto de intemperismo (saprolito) das rochas do AFN situadas nas partes mais altas e, em especial, dos basaltos do topo da Ilha Rata. Como consequência, estes saprolitos formaram solos distróficos, com remoção de bases e sílica e acumulação de óxidos de alumínio. Estes solos podem ser encontrados nas partes mais altas do AFN e foram, por Marques (2004), reportados através dos Cambissolos Háplicos distróficos típicos e, neste trabalho, pelo perfil 4. É provável que nesta mesma fase úmida, grande parte do cordão de calcarenito proveniente de paleodunas carbonáticas que interligavam muitas ilhas do AFN, tenha sido intemperizada, dissociando-se em ilhas isoladas. Na Ilha Rata, a forte dissolução e remoção deste material pode ter sido responsável por rebaixá-lo alguns metros do seu nível original sem que o mesmo formasse solos profundos, mas apenas saprolitos.

Um segundo estágio, por sua vez, seria demarcado por significativas alterações climáticas, onde as condições úmidas seriam substituídas por climas áridos ou semi-áridos. Nesta fase, consolidar-se-iam os fatores necessários à intensificação da fosfatização dos solos e saprolitos. Isto é, com baixos índices pluviométricos, a vegetação de médio a pequeno porte permitiria o estabelecimento dos ninhais por toda a Ilha Rata, bem como a acumulação dos excrementos não erodidos. No caso da Ilha Rata, em especial, recortes históricos apontam para a existência de ninhais mesmo em áreas com vegetação arbórea, sobretudo através dos ninhais das fragatas. Uma vez depositados, os excrementos das aves percolariam mediante soluções saturadas em P nos solos e saprolitos, fosfatizando-os. Na área de basaltos, a fosfatização seria caracterizada pela formação de fosfatos de alumínio. Nos calcarenitos, formas de fosfatos de cálcio seriam favorecidas.

Ainda nesse estágio, com climas semi-áridos, é plausível a existência de processos de coluvionamento que transportariam sedimentos das partes mais altas, como os fosfatos de alumínio, para as partes mais baixas, onde predominam fosfatos de

cálcio. Estes sedimentos transportados pela erosão seriam responsáveis pela mistura de materiais fosfatizados de gênese diversas (Al-fosfatos, Ca-fosfatos), constituindo pedimentos e rampas suavizadas ainda hoje observadas. Essa mistura entre o material provindo do basalto e o saprolito do arenito foi mais intensa nos terços médio e inferior da encosta, e deve ser responsável pela constituição de um plasma aluminoso que envolve os agregados de P-Ca arredondados. Nas baixadas, a erosão da superfície seria responsável pela exposição de um relevo cárstico.

O terceiro e último estágio corresponde às condições atuais, sendo caracterizado pelo aumento da precipitação e, por consequência, da umidade do ar. Nesta fase, novamente a vegetação adquire maior porte e os ninhais ficam restritos às áreas de menor incidência de solo, ou seja, sob o carste calcário. A maior infiltração proporciona um aceleração dos processos intempéricos e a lixiviação é novamente mais efetiva. Os fragmentos de calcarenitos sendo degradados e decompostos liberam carbonatos de cálcio no sistema, aumentando o pH destes solos. Com o pH mais elevado e quantidades expressivas de alumínio por causa do enriquecimento com sedimentos aluminosos das posições mais elevadas, ocorreria o processo de variscitização dos agregados de calcarenitos, com remoção do cálcio e constante incorporação do alumínio. Os altos valores de pH dos perfis 1 2 e 3 e a ausência de alumínio na solução do solo indicam sua mineralização em variscita.

Sob o aspecto pedogeomorfológico, o processo de transformação dos fosfatos de cálcio para fosfatos de alumínio, demonstrou-se mais intenso nos solos derivados do arenito situados nas posições mais elevadas na vertente em razão das melhores condições de infiltração e da maior proximidade dos solos de basalto, onde, por erosão, são fornecidos os materiais necessários à formação de um plasma aluminoso. Na seqüência de transformação de um fragmento de calcarenito, por exemplo, de uma massa carbonática, forma-se um agregado arredondado, acompanhando a forma adquirida por estes fragmentos quando do seu retrabalhamento eólico, fosfatizado constituído de P-Ca tal como aqueles existentes no horizonte C do perfil 1 (Figura 12a). Este tenderá a ser estabilizado por um recobrimento de um plasma aluminoso pouco cristalino, assumindo um aspecto semelhante aos agregados do horizonte Bi do perfil 2 (Figura 12b). Depois de envolvidos, o processo de remoção do Ca é acompanhado pela concentração do Al e, em menor escala, de elementos como o Fe e o Ti. Assim, forma-se agregados (oólitos) de fosfato de alumínio, como os agregados do horizonte A1 do perfil 3 (Figura 12c), cujo avanço do processo de cristalização tende a transformar em variscita.

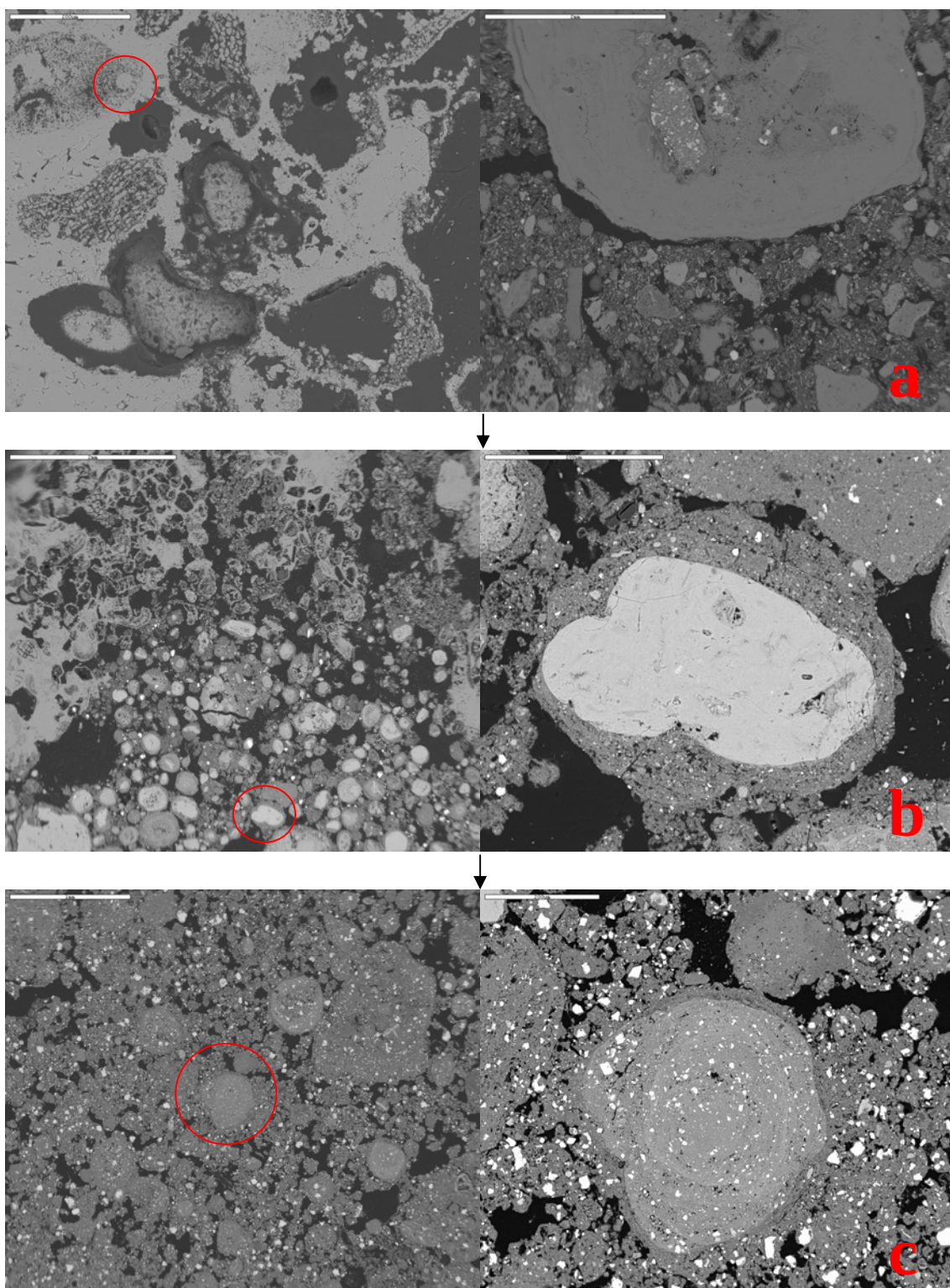


Figura 12: **a** – fragmento de fosfato de cálcio.
b – fragmento de fosfato de cálcio recoberto por fosfato de alumínio.
c – agregado de fosfato de alumínio.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

1 – A distribuição dos solos da Ilha Rata está intimamente relacionada com as condições do relevo e da geologia e, embora isso não implique numa diversificação de tipos de solos, os atributos químicos e físicos destes são avidamente influenciados pelas variações do material de origem e/ou variações da composição química e mineralógica dos mesmos.

2 – Existem na Ilha Rata duas classes de solos (Neossolo e os Cambissolo). Os Cambissolos ocupam a maior parte da ilha, ao passo que os Neossolo estão restritos às baixadas em áreas carstificadas e, mesmo assim, já apresentam sinais evidentes de sua transformação em uma ordem mais intemperizada.

3 – A fosfatização dos solos da Ilha Rata é um processo antigo, relacionado à condições climáticas diferentes das atuais. Isto é, em fases mais secas, com vegetação de menor porte e solos menos erodidos, a ilha foi quase completamente ocupada por ninhais. Como consequência seus solos são, na atualidade, ricos em P e minerais fosfáticos.

4 – Observa-se nos solos da Ilha Rata um processo de variscitização dos agregados de P-Ca com progressiva substituição do Ca pelo Al, cuja fonte são os sedimentos de P-Al trazidos pela erosão dos solos mais intemperizados localizados nas partes mais altas da ilha. Em consequência, há uma formação microestrutural de agregados de P-Al a partir dos, já arredondados, fragmentos de P-Ca.

5 – O processo de fosfatização pode ser compreendido como um excelente indicador ambiental, sobretudo de condições climáticas pretéritas. Permite, assim, a partir das formas de fosfatização observadas em solos, a reconstrução paleogeográfica de ambientes que, no passado, caracterizavam os pedossistemas em cada ponto da Ilha Rata.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, F. F. M.; *Geologia e Petrologia do Arquipélago de Fernando de Noronha*. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Prospeção Mineral (DNPM), 1955, 181 p. (Monografia XIII).
- BATISTELLA, M. *Cartografia Ecológica do Arquipélago de Fernando de Noronha*. 236 f. Dissertação de Mestrado (Biociências). Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.
- BRINDLEY, G.W., BROWN, G.. *Crystal Structures of Clay Minerals and Their X-ray Identification*. Monograph 5. Mineralogical Society, London. 1980.
- CLEMENTE, E. de P. *Ambientes Terrestres da Ilha Da Trindade, Atlântico Sul: Caracterização do Solo e do Meio Físico Como Subsídio Para Criação De Uma Unidade De Conservação*. 210f. Tese de doutorado (Solos e Nutrição de Plantas). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2006. 210 f.
- DEFELIPO, B. V.; RIBEIRO, A. C. *Análise química de solo (metodologia)*. Viçosa, UFV, Imprensa Universitária, 17 p, 1981.
- EMBRAPA – Centro Nacional de Pesquisa de Solos. *Manual de métodos de análise de solo*. 2 ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212p.
- EMBRAPA – Centro Nacional de Pesquisa de Solos. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. Brasília: EMBRAPA-SPI, 1999, 350 p.
- EMBRAPA – Centro Nacional de Pesquisa de Solos. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. 2 ed. Brasília: EMBRAPA-SPI, 2006, 420 p.
- FARIA, F.X. Os solos da Ilha do Fogo (Arquipélago de Cabo Verde). Junta de Investigações científicas do Ultramar. Rev.Estudos, Ensaios e Documentos, nº129, Lisboa.1974. 146 p.
- FILIZOLA, H. F.; GOMES, M. A. Coleta e Impregnação de Solos para Análise Micromorfológica. Jaguariúna (SP), EMBRAPA, 20. 2004. 4 p. (Comunicado Técnico).
- FITZPATRICK, E.A. Soil microscopy and micromorphology. New York: John Wiley & Sons, 1993. 304p.
- IBRAIMO, M.M.; SCHAEFER, C. E. G. R.; KER, J. C.; LANI, J. L.; ROLIN-NETO, F. C.; ALBUQUERQUE, M. A.; MIRANDA, V. J. Gênese e Micromorfologia de solos sob vegetação Xeromórfica (Caatinga) na Região dos Lagos (RJ)..In.: Revista Brasileira de Ciência do Solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 28, n. 4, 2004. 585-796.
- LEMO, R. C. de; SANTOS, R. D.; dos, SANTOS, H. G. dos; KER, J. C. & dos ANJOS, L. H. C.. *Manual de descrição e coleta de solo no campo*. 5 ed. rev. ampl. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005. 100 p. : il.
- LITTLE, I. P.; ROBERTS, G. M. Cations and silica in lake and creek in relation to atmospheric accretion from the ocean. *Royal Soc. Queensland*, 94: 1983, pp. 41-94.
- MANTOVANI, L. E.; FRITZONS, E.; BATISTELLA, M. Solos do Arquipélago de Fernando de Noronha. In.: XXIII CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29. 2003. **Anais...** Ribeirão Preto: SBCS. CD-ROM.

MARQUES, F.A. *Caracterização e classificação de solos da Ilha de Fernando de Noronha* (PE). 101 f. Dissertação de Mestrado (Solos e Nutrição de Plantas). Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife-Pernambuco, 2004. 101 p.

MUNSELL. *Soil Color Charts*. Maryland: 1994.

MURPHY, H.; RILEY, J. P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chem. Acta*, v. 26, n. 01. 1962. pp. 31-36.

NOVAIS, R. F.; SHYTH, T. J. Fósforo em solo e planta em condições tropicais. Viçosa: UFV, DPS, 1999. 399 p.

NRIAGU, J.O., MOORE, P.B. *Phosphate Minerals*. Springer-Verlag, Berlin. 1984.

RIBEIRO, M.R., MARQUES, F.A., BITTAR, S.M.B., FERRAZ, F.B., JACOMINE, P.K.T. & LIMA, JFWF. Caracterização e Classificação de Neossolos no Arquipélago de Fernando de Noronha. In.: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIENCIA DO SOLO, 29., 2003. *Anais*. Ribeirão Preto: SBCS, 2003. CD-ROM.

SCHAEFER, C. E. G. R.; Levantamento e Caracterização de Solos da Ilha Fernando de Noronha, Atlântico Sul. Projeto Solos das Ilhas Oceânicas. Universidade Federal de Viçosa. 2006. 102 p (relatório não publicado)

SCHAEFER, C.E.G.R., SIMAS, F.N.B., ALBUQUERQUE-FILHO, M.R., MICHEL, R.F.M., VIANA, J., TATUR, H.M. Fosfatização: Processo de formação de solos na Baía do Almirantado e implicações ambientais. In: Schaefer, C.E.G.R., Francelino, R., Simas, F.N.B., Albuquerque Filho, R. (Eds.), *Ecossistemas Costeiros e Monitoramento Ambiental da Antártica Marítima, Baía do Almirantado, Ilha Rei George*. NEPUT–Departamento de Solos, Viçosa Brasil, 2004. pp. 47–59.

SIMAS, F. B. *Solos da Baía do Almirantado, Antártica Marítima: mineralogia, gênese, classificação e biogeoquímica*. 153 f. Tese de Doutorado (Solos e Nutrição de Plantas). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2006. 153 f.

SIMAS Felipe N. B.; SCHAEFER Carlos Ernesto G. R.; MELO Vander F. ; ALBUQUERQUE-FILHO Manoel R.; MICHEL Roberto F. M.; PEREIRA Victor V.; GOMES Mariana R. M. ; DA COSTA Liovando M.; Ornithogenic cryosols from Maritime Antarctica : Phosphatization as a soil forming process. In.: *Geoderma*, v. 138, nº3-4, 2007. pp. 191-203.

TATUR, A. Ornithogenic soils of the maritime antarctic. *Polish Polar Research* 4, 1989. pp. 481–532.

TEIXEIRA, W.; CORDANI, U. G. MENOR, E. de A.; TEIXEIRA, M. G.; LINSKER, R. *Arquipélago de Fernando de Noronha: o paraíso do vulcão*. São Paulo: Terra Virgem, 1993. 168 p.

WOLFE, C.J.; BERGMAN, E.A.; SOLOMON, S.C. Oceanic transform earthquakes with unusual mechanism or locations: Relation to fault geometry and state of stress in the adjacent lithosphere. *Journal of Geophysical Research*, 98, 16187-16211.

2. CONCLUSÃO GERAL

A fosfatização, tal qual observada, promoveu a gênese de novos produtos e feições litopedológicas a partir da interação entre os excrementos dos animais e os substratos (solos, rochas e sedimentos), diferenciando-os de sua composição e aspectos originais. Essas diferenças são físicas, químicas, mineralógicas ou morfológicas, e ocorreram em razão das reações de intemperismo impulsionadas pela mineralização da matéria orgânica, rica em P, das excreções e/ou incorporação direta de fases minerais fosfatadas não eliminadas pelo trato digestivo das aves, como, por exemplo, apatitas biogênicas. A maneira como essa interação ocorreu variou, principalmente, conforme: a) as características do substrato; b) as condições climáticas presentes e pretéritas; c) a geomorfologia local e d) a intensidade e abrangência, no tempo e espaço, da deposição dos excrementos em função das modificações dos ninhais.

Neste contexto, tanto no Arquipélago de São Pedro e São Paulo, quanto na Ilha Rata, localizada no Arquipélago de Fernando de Noronha, foram observados produtos da fosfatização que confirmam positivamente as hipóteses testadas neste trabalho. No primeiro caso, tratando-se da gênese de novos produtos, os solos e rochas fosfatizados demonstraram-se bastante distintos de seus materiais de origem, embora fortemente influenciados pelos atributos destes. As rochas ultramáficas do ASPSP, por exemplo, originalmente caracterizadas por uma assembléia de minerais ferromagnesianos, foram recobertas por crostas fosfáticas em sua superfície ou tornaram-se saprolitos fosfatizados quando da percolação destes fluidos enriquecidos em fósforo por suas fraturas. Os solos aluminosos e carbonáticos da Ilha Rata, no Arquipélago de Fernando de Noronha, por sua vez, foram enriquecidos em fósforo sem que, entretanto, o material de origem apresentasse em sua composição altos teores deste elemento. Neste caso, processos de coluvionamento associados às condições climáticas atuais estão promovendo a formação de uma matriz mineral variscítica em área onde, originalmente, a fosfatização gerou fosfatos de cálcio.

No segundo caso, tratando-se dos aspectos que tornam a fosfatização um indicador paleoclimático, a identificação destes produtos, representantes de fases evoluídas do processo de fosfatização, em áreas cujas condições climáticas atuais não são favoráveis ao acúmulo do excremento sobre a superfície, permitiu reconhecer a existência de paleoambientes em que o conjunto de fatores ambientais era diferente daquele atualmente observado. Isso ocorre porque os tipos e produtos da fosfatização variam conforme o intemperismo diferencial do substrato associado às características do meio físico em cada contexto morfoclimático, tornando o processo em questão uma ferramenta para reconhecer estes contextos.