

CARACTERIZAÇÕES PETROGRÁFICA E GEOFÍSICA DAS UNIDADES LITOLÓGICAS DO MUNICÍPIO DE BANANAL, LESTE DO ESTADO DE SÃO PAULO, E CORRELAÇÃO COM OCORRÊNCIAS DE ILMENITA

PETROGRAPHIC AND GEOPHYSICAL CHARACTERIZATION OF LITHOLOGICAL UNITS IN THE MUNICIPALITY OF BANANAL, EAST OF SÃO PAULO STATE, AND CORRELATION WITH ILMENITE OCCURRENCES

Roney Almeida do Santos CHAGAS, Marcelo dos Santos SALOMÃO, Luiz Carlos BERTOLINO, Daniel Augusto Bozoti PASIN

Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Faculdade de Geologia. Rua São Francisco Xavier, 524 - Maracanã, Rio de Janeiro – RJ.
E-mails: ralmeidachagas@gmail.com; salomao.mss@gmail.com; lcberto@uerj.br; danpasin@hotmail.com

Introdução
Localização da área de estudo
Contexto geológico regional
Geologia local
Metodologia
Resultados
 Minerais pesados obtidos em concentrado de bateia
 Características petrográficas das unidades litológicas
 Granitos Bananal
 Granitos Resgate
Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)
Caracterização das assinaturas aerogeofísicas dos litotipos da área de estudo
Conclusões
Agradecimentos
Referências

RESUMO - O mineral ilmenita (FeTiO_3) corresponde a um dos principais portadores de Ti, e perfaz 90% do consumo mundial desse elemento. China e Austrália detém 50% das reservas mundiais medidas de ilmenita. No Brasil, as principais jazidas estão localizadas nos municípios de Mataraca (PB), São Francisco de Itabapoana e São João da Barra (RJ), todas em ambiente do tipo placer. Os granitos e pegmatitos são importantes depósitos desse elemento e, no município de Bananal (SP), há registro dos granitos Bananal e Resgate. Os estudos foram realizados em três etapas: integração de dados geológicos, aerogeofísicos e geomorfológicos; realização de campanhas de campo, tendo a ilmenita sido identificada em cinco concentrados; e análise dos grãos de ilmenita por meio de MEV, visando à identificação qualitativa do mineral e de suas inclusões sólidas. Os grãos de ilmenita apresentaram dimensões entre 0.05mm e 2mm e composição química de 9,85% a 69,48% de Fe e de 5,99% a 26,18% de Ti. A presença de ilmenita está associada aos corpos graníticos Resgate e Granito Bananal. As assinaturas geofísicas em ambos os métodos indicam composições mineral e químicas heterogêneas ao longo dos corpos graníticos.

Palavras-chave: Bananal. Ilmenita. Titânio. MEV/EDS.

ABSTRACT - The mineral ilmenite (FeTiO_3) corresponds to one of the main containing Ti, and accounting for 90% of the world's consumption of this element. China and Australia hold 50% of the world's measured reserves of ilmenite. In Brazil, the main deposits are located in the municipalities of Mataraca (PB), São Francisco de Itabapoana and São João da Barra (RJ), all in a placer-type environment. Granites and pegmatites are important deposits of this element and, in the municipality of Bananal (SP), there are records of granites Bananal and Resgate units. The studies were carried out in three stages: integration of geological, aerogeophysical and geomorphological data; field campaigns, with the ilmenite being identified in five heavy concentrates; and chemical analysis of ilmenite grains by means of MEV, aiming at the qualitative identification of the mineral and its solid inclusions. The ilmenite grains had dimensions between 0.05mm and 2mm and chemical composition from 9.85% to 69.48% of Fe and 5.99% to 26.18% of Ti. The presence of ilmenite is associated with Resgate and Granito Bananal granite bodies. The geophysical signatures in both methods indicate heterogeneous mineral and chemical compositions along the granitic bodies.

Keywords: Bananal. Ilmenite. Titanium. MEV/EDS.

INTRODUÇÃO

O mineral ilmenita (FeTiO_3) corresponde a um dos principais minerais econômicos portadores de Ti. O titânio é o nono elemento mais abundante na crosta terrestre e é encontrado também em minerais como o rutilo (TiO_2), anatásio (TiO_2), brookita (TiO_2), perovskita (CaTiO_3) e titanita (CaTiSiO_5), além de minerais de alteração como o leucoxênio (IGNS, 1998). Por conta de sua

tenacidade e estabilidade em temperatura ambiente, o elemento é utilizado principalmente nas indústrias química e aeroespacial, na forma de óxido e na forma metálica, respectivamente (Baltar et al., 2008). A ilmenita possui composição teórica de Fe (36,8%), Ti (31,6%) e O (31,6%) (Mcqueen, 2014). Exibe cor preta, brilho metálico a submetálico, clivagem ausente, cristalizado

no sistema trigonal e ocorre sob hábito lamelar, compacto, granular e prismático tabular. Sua dureza varia de 5 a 6 na escala de *Mohs* e possui densidade de 4,7 g/cm³. Através de sua alteração o ferro é lixiviado, aumentando o teor de titânio e resultando em espécies como o rutilo, o anatásio e o leucoxênio, adquirindo cor amarronzada e brilho fosco.

Os granitos e pegmatitos são importantes depósitos de elementos raros com importância econômica. Corpos granitoides podem ser classificados em série da magnetita e série da ilmenita. A geração desses tipos de rochas depende principalmente fugacidade de oxigênio do magma granítico.

Chappell & White (1974) definiram a classificação de granitos em função de sua fonte, exibindo distintas características geoquímicas e mineralógicas: tipo S, produto de fusão metassedimentar (crustal) e; tipo I, originados da fusão de rochas ígneas. Ishihara (1977) propôs, a partir de Chappell & White (1974), a classificação dos granitos em função de conteúdo de magnetita, das razões Fe₂O₃/FeO em rocha total e da susceptibilidade magnética, denominando-os de “ilmenita granito” e “magnetita granito”.

De uma forma geral, as rochas da série da ilmenita são originadas em profundidades mais rasas (crustal), sob a presença de carbono orgânico das rochas encaixantes e condições mais redutoras. E os granitoides da série da magnetita são gerados em situações mais oxidantes, em maiores profundidades e sem a presença de material carbonáceo, apresentando acima de 0,1% de magnetita em volume (Ishihara, 1977).

As jazidas mais expressivas de titânio conhecidas relacionam-se majoritariamente a depósitos magmáticos ou a depósitos sedimentares associados à linha de costa. Ambos são gerados por processos mecânicos e a remobilização química do elemento não forma depósitos importantes (Force, 1991). Portanto, depósitos econômicos de

Ti dependem do tipo de rocha fonte e da concentração de minerais que favoreçam a incorporação do elemento em suas estruturas.

Apesar desse panorama, outros tipos podem se tornar economicamente importantes. Devido à resistência ao intemperismo químico dos minerais de óxidos de titânio, Force (1991) elenca que o acúmulo do elemento pode ocorrer de forma *in situ* ou em ambientes fluvial, sedimentar interdiário e costeiro.

A ilmenita perfaz 90% do consumo mineral mundial de titânio. China e Austrália são os países com as maiores reservas medidas do mineral-minério, englobando 30% e 20% do total, respectivamente.

Quanto à produção mundial de ilmenita (em 2020), China (30%) e África do Sul (15%) lideram (USGS, 2020). As principais jazidas brasileiras estão localizadas no município de Mataraca (PB), São Francisco de Itabapoana e São João da Barra (RJ), todas em placer (DNPM, 2010).

O município de Bananal, leste do estado de São Paulo, possui ocorrências de granitos sincolisionais do tipo S, como as rochas das unidades Granito Bananal e Granito Resgate. A presença de pegmatitos granitoides na área de estudo ocorre com notável controle estrutural, sob direção NE-SW, entre os municípios de Bananal, Embu-Guaçu, Mogi das Cruzes, Santa Branca, São Luiz do Paraitinga, Perus, Guarulhos e Socorro (Mello et al., 1994).

Alguns corpos pegmatíticos no município de Bananal também foram estudados por Etchebehere et al. (1985).

No presente trabalho foram realizadas novas campanhas prospectivas no município de Bananal por meio de concentrados de minerais pesados em leito ativo de drenagem e em afloramentos de rochas intemperizadas, visando às caracterizações mineralógica e química da ilmenita e de suas potencias rochas-fonte.

LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área da pesquisa está localizada no município de Bananal, leste do estado de São Paulo, distante 150 km da capital do estado Rio de Janeiro e a 325 km da cidade de São Paulo (Figura 1). Localizada em altitude média de 600 metros, está inserida na unidade de relevo das

Serras e Planaltos do Atlântico Leste e Sudeste, e é caracterizada pela presença de colinas arredondadas e suaves, denominadas de “mar de morros” (Ross, 1990). Os principais corpos hídricos presentes no município correspondem aos rios Bananal, Turvo e Pirapitinga.

CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

O contexto geológico do extremo leste do estado de São Paulo é representado pela Faixa Ribeira (FR), integrante do sistema orogênico

denominado Província Mantiqueira (Almeida et al., 1981).

A FR corresponde a uma faixa de dobramentos

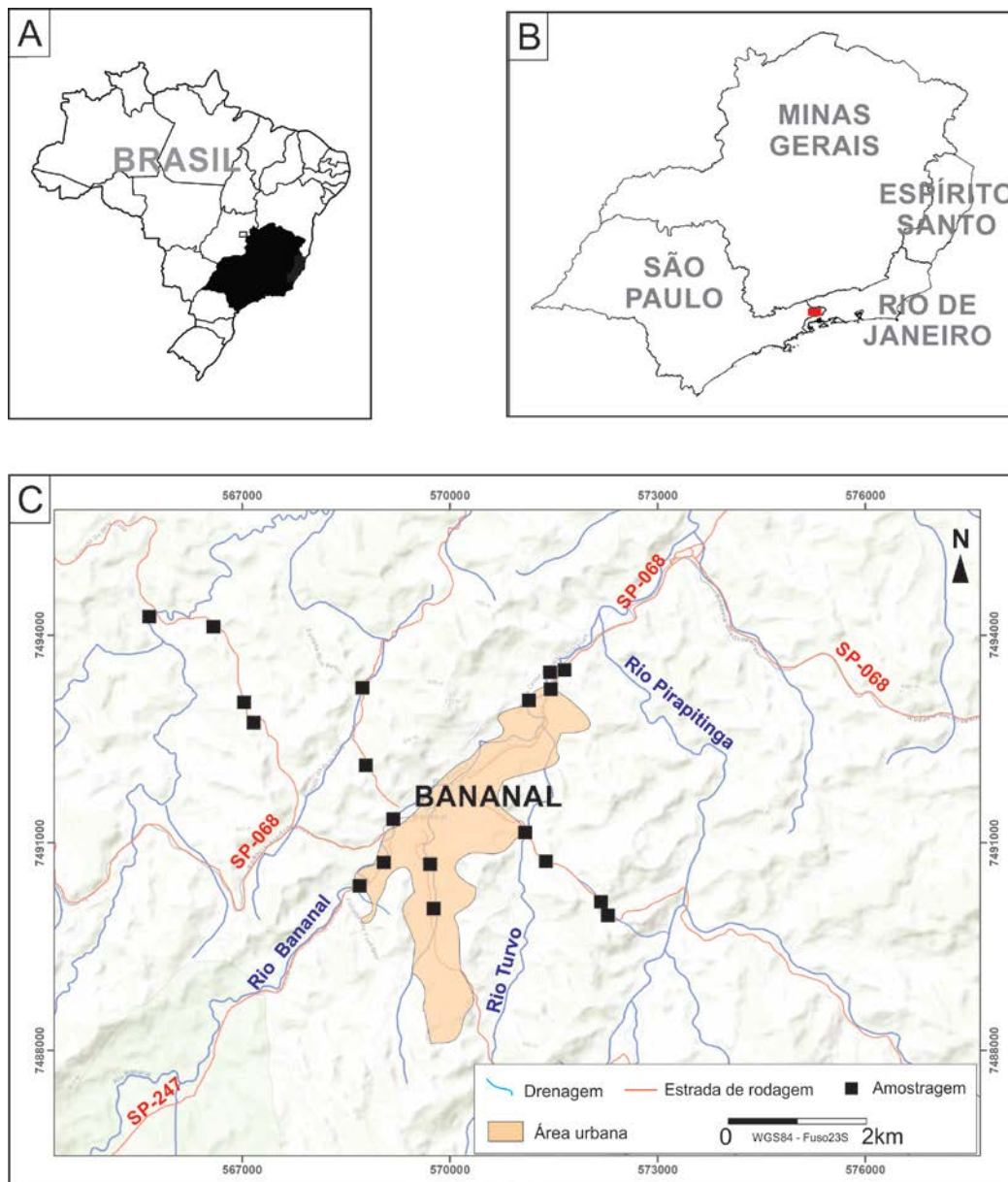


Figura 1 – A) e B) Localização da área do presente trabalho no Brasil e na região sudeste do país; C) Localização dos pontos de amostragem no município de Bananal, leste do estado de São Paulo. Fonte: os autores, a partir de IBGE (1982).

resultante de eventos orogênicos desenvolvidos durante o Ciclo Brasileiro-Pan Africano, e que originaram o paleocontinente Gondwana Ocidental entre o Neoproterozoico e o Eopaleozoico (Heilbron & Machado, 2003).

Estruturalmente, a FR tem 1400 km de extensão de direção NE ao longo das costas sul e sudeste brasileira, limitada pelo Cráton Luís Alves, pela Faixa Dom Feliciano e pela Faixa Araçuaí. A FR é composta por terrenos tectônico-estratigráficos delimitados por falhas de empurrão e/ou por zonas de cisalhamento oblíquas (Heilbron et al., 2004).

Sua compartimentação compreende os terrenos Ocidental, Paraíba do Sul, Oriental e Cabo Frio (Campos Neto, 2000; Heilbron et al., 2000; Heilbron & Machado, 2003). Sua amalgamação foi progressiva desde o Neoproterozoico, com subducção da Placa São Franciscana sob o

Terreno Oriental (790 a 590 Ma); amalgamação do Terreno Paraíba do Sul (620 a 600 Ma) e colisão do Terreno Cabo Frio (entre 535 e 510 Ma) (Heilbron et al., 2008). Diversos corpos granitoides foram gerados como resultado da convergência neoproterozoico-eopaleozoica na porção central da Faixa Ribeira.

O município do presente trabalho, Bananal (SP), está localizado no Terreno Paraíba do Sul (TPS) da Faixa Ribeira (Figura 2), amalgamado entre ca. 600 e 570 Ma.

Este terreno registra metamorfismo sob condições de fácies anfíbolito, com anatexia, e contemporâneo a uma fase de deformação D1+D2. O TPS ocorre como uma *klippe* sinformal complexamente dobrada sobre o Terreno Ocidental, sendo constituído por uma cobertura metassedimentar (Complexo Paraíba do Sul) e um embasamento

ortoderivado, denominado de Complexo Quirino (Heilbron et al., 2000; Heilbron et al., 1991, 1993; Almeida et al., 1993; Valladares et al., 2002). Destacam-se também ocorrências de granitos sin-colisionais do tipo S, como as rochas das unidades Granito Bananal e Granito Resgate.

Diversos corpos pegmatíticos, distribuídos entre o leste do estado de São Paulo e o oeste do estado do Rio de Janeiro, foram catalogados por

Etchebehere et al. (1985) e Mello et al. (1994). A região de Bananal (SP) foi descrita por Mello et al. (1994) como uma área com predomínio de pegmatitos constituídos por quartzo, feldspato, muscovita, turmalina, piropo, apatita e metais raros, geralmente discordantes às rochas encaixantes (xistos e gnaisses milonitizados). Apresentam forma tabular e lenticular, com dimensões variando entre 5 e 10 metros.

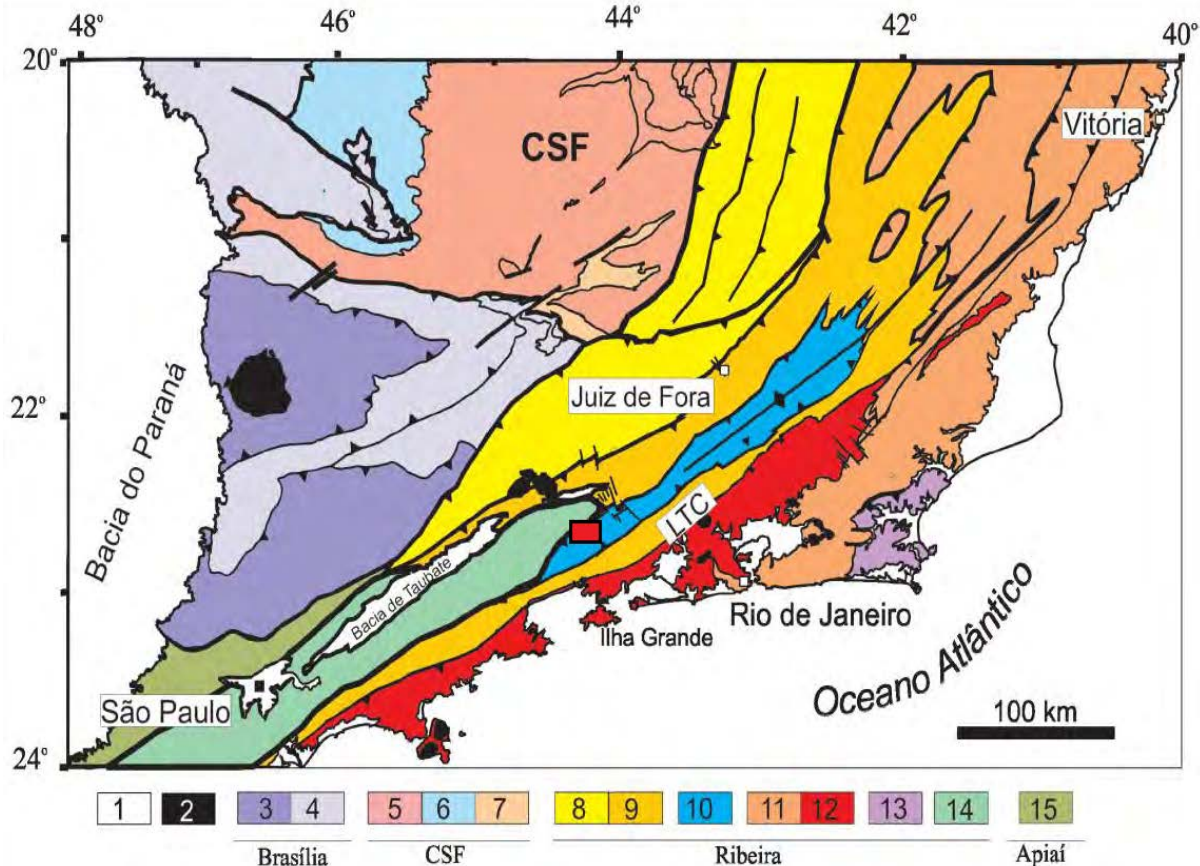


Figura 2 - Mapa tectônico do sudeste brasileiro com as principais unidades do setor central do Sistema Orogênico Mantiqueira. A área de estudo está indicada pelo polígono vermelho. 1) Bacia do Paraná e sedimentos cenozoicos; 2) Rochas alcalinas do Cretáceo e Terciário; Orógeno Brasília: 3) nappes inferiores, (4) nappes superiores; Cráton do São Francisco (CSF): 5) embasamento, 6) Supergrupo São Francisco, 7) rochas metassedimentares do Domínio Autóctone; Orógeno Ribeira: 8) e 9) Terreno Ocidental (Domínios Andrelândia e Juiz de Fora), 10) Terreno Paraíba do Sul, 11) Terreno Oriental incluindo 12) arco magmático Rio Negro, 13) Terreno Cabo Frio, 14) Terreno Embu; 15) Orógeno Apiaí (Terreno São Roque). LTC – Limite Tectônico Central da Faixa Ribeira. Polígono vermelho: área da pesquisa. Fonte: adaptado de Heilbron et al. (2004).

GEOLOGIA LOCAL

Na área do presente trabalho está inserida no Terreno Paraíba do Sul (TPS) da Faixa Ribeira, constituído por uma cobertura metassedimentar (Complexo Paraíba do Sul) e unidades do embasamento ortoderivado, denominadas de Complexo Quirino e Suíte Campinho (Figura 3). O Complexo Paraíba do Sul foi subdividido em três unidades litoestratigráficas (basal, mediana e de topo), representadas, respectivamente, por: i) biotita gnaiss bandado migmatítico, com intercalações métricas a centimétricas de silimanita-muscovita-biotita gnaiss ou xisto, assim como lentes

de rochas calciossilicáticas e níveis de pórfiroblastos de feldspato; hornblenda pode ocorrer nas proximidades do contato com o Complexo Quirino; ii) granada-silimanita-muscovita-biotita gnaiss migmatítico com níveis porfiroblásticos, intercalado com sillimanita-muscovita-biotita xisto, lentes de rochas calciossilicáticas bandadas ou maciças e gondito e; iii) intercalação de granada-biotita gnaisses e xistos/gnaisses pelíticos com sillimanita, muscovita e biotita, com lentes de rochas calciossilicáticas, gonditos, mármore, quartzitos e anfibolitos. Veios pegmatí-

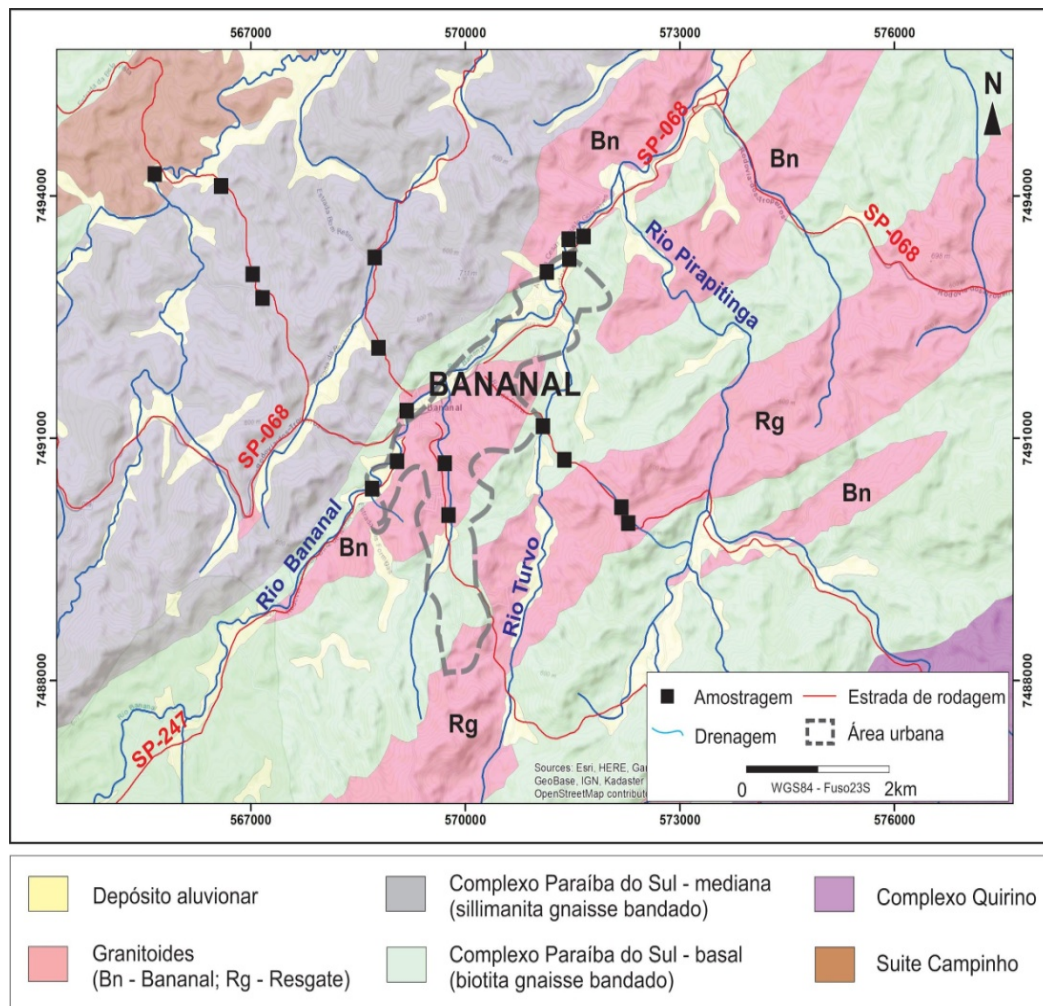


Figura 3 – Mapa geológico da área de Bananal, leste do estado de São Paulo, com os pontos de amostragem. Modificado de CPRM (2007).

tos ocorrem de forma discordante à foliação em todas as unidades (Eirado et al., 2006).

O Complexo Quirino é formado por gnaisses migmatíticos graníticos e com idade de 2.18 Ga (Valladares et al., 1997) e representa o embasamento paleoproterozoico do Terreno Paraíba do Sul. Ocorrem também unidades sin-colisionais, representados pelos granitos Bananal e Resgate, ambos do tipo S. A Suíte Campinho é representada por ortognaisses ricos em hornblenda intercalados com as rochas metassedimentares do CPS. O litotipo predominante corresponde a hornblenda-biotita gnaíse, de composição granítica a granodiorítica, com enclaves de gnaisses mesocráticos de composição tonalítica a diorítica (CPRM, 2007).

METODOLOGIA

Os estudos foram realizados em três etapas. A primeira correspondeu à integração de dados geológicos, aerogeofísicos e geomorfológicos, em ambiente georreferenciado, e indicou os alvos para as atividades de campo. Os dados aerogeofísicos provieram do Projeto Aerogeofísico São José dos Campos-Resende (CPRM, 2013), com

O Granito Resgate corresponde a granada-turmalina-biotita-muscovita xisto granito, com aproximadamente 2 km de espessura e direção NE-SW, com textura pegmatítica, ocasionalmente falhado, e encaixado nos níveis metassedimentares do CPS. O Granito Bananal, formado por granada-biotita gnaíse porfiroblástico granítico, exibe textura porfiroblástica definida por cristais de K-feldspato de até 5 cm de comprimento. Possui enclaves de paragnaisses, rochas calciossilicáticas e gonditos, sugerindo a fusão parcial dos paragnaisses pelíticos e psamíticos do CPS (Eirado et al., 2006). Depósitos aluvionares quaternários-holocênicos ocorrem em trechos dos leitos de corpos hídricos.

o objetivo de identificar os padrões de assinaturas das principais estruturas e unidades geológicas da área do presente trabalho. Foram utilizados dados Magnetométricos (Mapa da Amplitude do Sinal Analítico) e Gamaespectrométrico (Mapa da razão dos elementos U/Th). Os resultados foram inseridos em ambiente georreferenciado

visando à integração com as demais informações coletadas.

Durante as campanhas de campo (segunda etapa) foram coletadas treze amostras de rocha e nove de leito ativo de drenagem, visando a identificar a presença de ilmenita e demais minerais que compõem a paragênese. Em cada amostragem de drenagem foram coletados 20 litros de material.

A terceira etapa correspondeu à fase laboratorial, com a separação das frações magnéticas e paramagnéticas no Laboratório de Exploração Mineral (LEXMIN) da Faculdade de Geologia da

UERJ. Em seguida, os grãos de ilmenita foram analisados Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) visando à identificação qualitativa do mineral e de suas inclusões sólidas. Foi utilizado o equipamento Hitachi Modelo TM3030 Plus, com sistema de microanálise química por dispersão de energia (EDS) Bruker Quantax, do Laboratório Multiusuário de Caracterização Tecnológica (LMCT) do Centro de Tecnologia Mineral (CETEM). A descrição petrográfica microscópica foi realizada em lâminas delgadas, produzidas no Laboratório Geológico de Processamento de Amostras (LGPA/FGEL/UERJ).

RESULTADOS

Minerais Pesados obtidos em Concentrado de Bateia

Foram produzidos dezenove concentrados de minerais pesados em bateia, sendo onze provenientes de rocha (saprólito) e oito de leito ativo de drenagem, visando a identificar a presença de

ilmenita e demais minerais que compõem a paragênese. Em cada amostragem de drenagem foram coletados 20 litros de material. A ilmenita foi encontrada em cinco concentrados de minerais pesados, com duas ocorrências em rochas intemperizadas e três em drenagens (Figura 4).

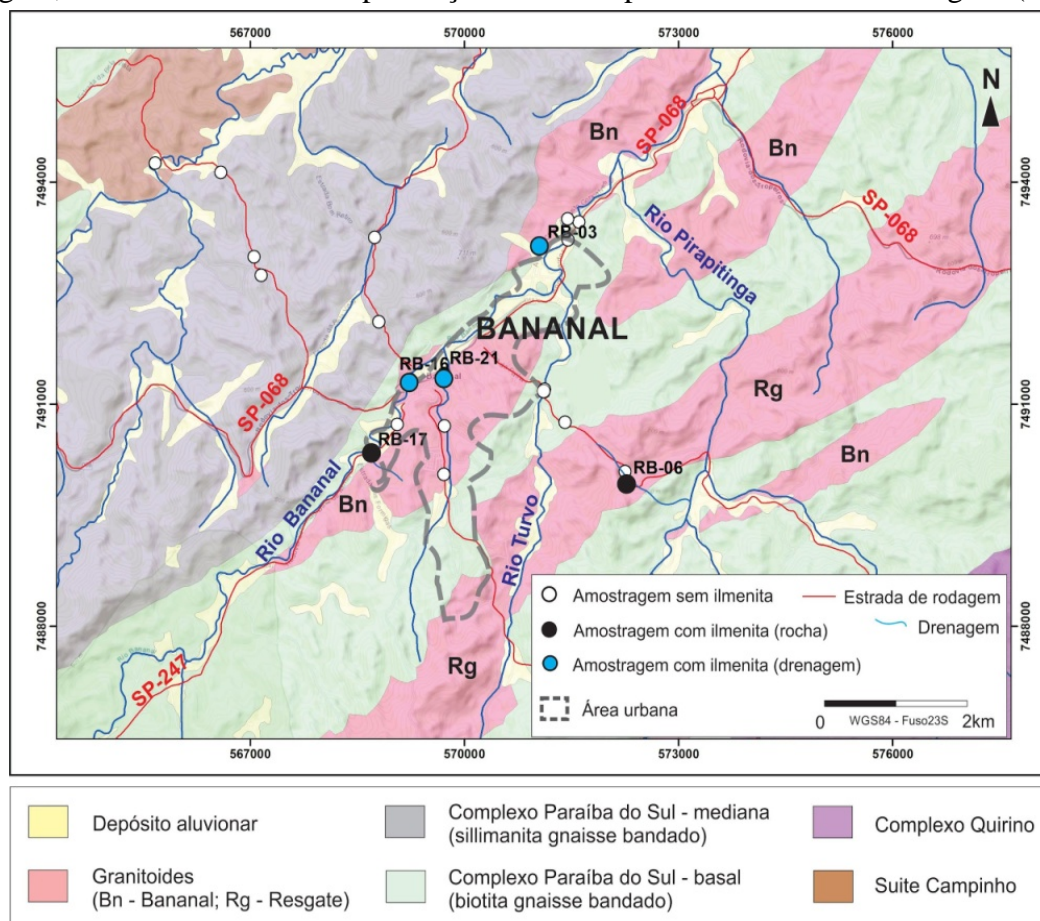


Figura 4 – Mapa geológico da área de Bananal, leste do estado de São Paulo, com os pontos de amostragem e ocorrência de ilmenita (em rocha e em leito ativo de drenagem). Modificado de CPRM (2007).

A ilmenita apresenta coloração acinzentada a preta, brilho metálico, forma tabular e prismática, além de aspecto sub-regular a irregular. As dimensões variam de 0,05 mm a 2 mm. Minerais como turmalina, granada, piroxênio e magnetita

também foram frequentes nos concentrados de bateia. Zircão e limonita foram observados em apenas um dos concentrados (Figura 5). A tabela 1 reúne a mineralogia em cada amostragem com ocorrência de ilmenita.

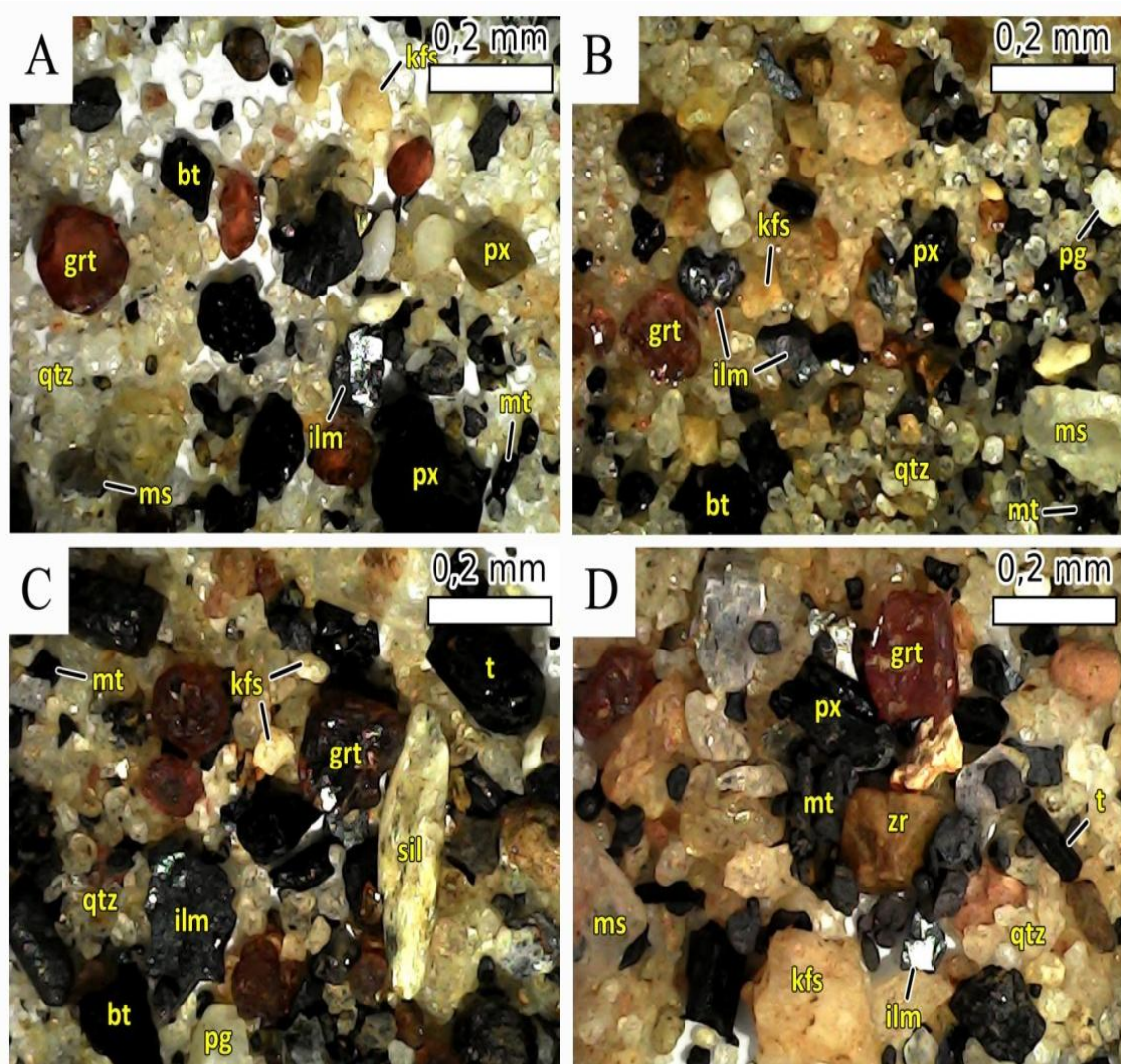


Figura 5 – Fotografias de grãos de concentrados de minerais pesados com ocorrência de ilmenita. Legenda: Pontos de amostragem com ilmenita - (A) RB-06; (B) RB-17; (C) RB-16 e (D) RB-21. Simbologia mineral segundo Kretz (1983): ilm – Ilmenita; bt – Biotita; grt - Granada; kfs - Feldspato alcalino; ms - Muscovita; mt - magnetita; pg - Plagioclásio; px - Piroxênio; qtz - Quartzo; sil - Silimanita; t- Turmalina; zir - Zircão.

Tabela 1 – Minerais pesados por ponto de amostragem com ocorrência de ilmenita. Legenda: Ilm – Ilmenita; Mag – Magnetita; Pxn – Piroxênio; Gra – Granada; Tur – Turmalina; Zir – Zircão; Lim – Limonita; Unidade: GBn – Granito Bananal; GRg – Granito Resgate.

Ponto	Amostragem/Unidade	Ilm	Mag	Pxn	Gra	Tur	Zir	Lim
RB-03	Drenagem	X	X	X	X	X	-	X
RB-16	Drenagem	X	X	X	-	X	-	-
RB-21	Drenagem	X	X	X	X	-	X	-
RB-17	Rocha (GBn)	X	X	X	X	-	-	-
RB-06	Rocha (GRg)	X	X	X	X	-	-	-

Características petrográficas das unidades litológicas

A análise dos minerais pesados em concentrados de bateia de rochas intemperizadas indicou uma correlação com os granitos Bananal e Resgate. As características litológicas macroscópicas e microscópicas dessas unidades estão descritas a seguir.

Granito Bananal

Corresponde a granada-biotita gnaiss granítico porfiroblástico (Figura 6A) em contato gradacional com rochas do Complexo Paraíba do Sul. A textura é dada por cristais de K-feldspato de até 5 cm de comprimento. A matriz possui granulação média a grossa. Exibe xenólitos centimétricos de paragneisses, rochas calciossili-cáticas e gonditos.

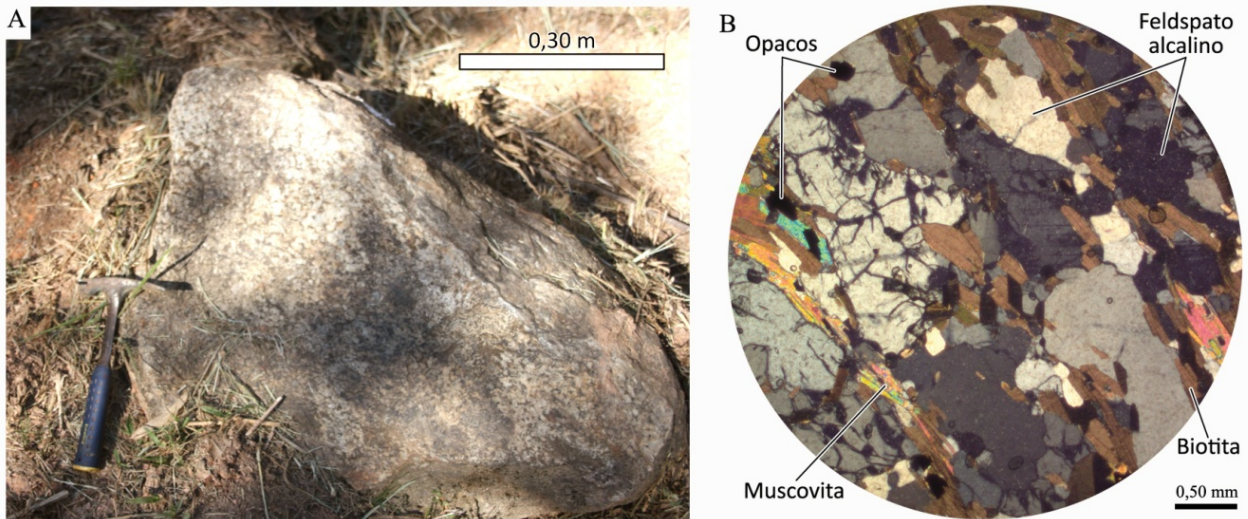


Figura 6 – Unidade Granito Bananal. Ponto de amostragem RB-17. (A) Afloramento parcialmente intemperizado; (B) Fotomicroscopia.

Microscopicamente, a matriz é constituída por feldspato potássico (55%), piroxênio (15%) e quartzo (30%). Alguns afloramentos exibem piroxênio e anfibólio. A microclínio ocorre em cristais de até 1 centímetro, com macla xadrez e formato irregular.

O clinopiroxênio, em formato irregular, encontra-se alterado e junto à ortopiroxênio, clorita e minerais óxidos. O quartzo ocorre intensamente recristalizado. Os minerais opacos correspondem à magnetita e ilmenita (Figura

6B).

Granito Resgate

É constituído por granada-turmalina-biotita-muscovita xisto/granito, foliado (S1), com granulometria média a grossa e textura pegmatítica quarto-feldspática. Assim como o Granito Bananal, esse também se encontra intrusivo nos níveis metassedimentares do CPS, exibindo, por vezes, um contato gradacional. Os afloramentos são intensamente caulinizados (Figura 7A).

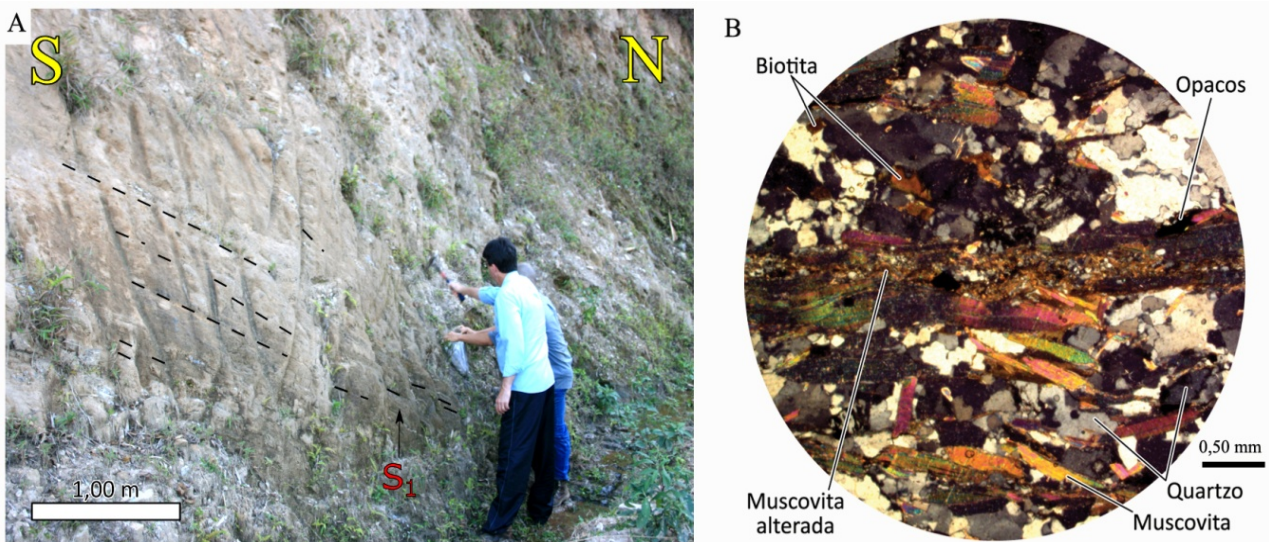


Figura 7 – Unidade Granito Resgate. Ponto de amostragem RB-17. (A) Afloramento parcialmente intemperizado; (B) Fotomicroscopia.

Em lâmina, o feldspato alcalino (potássico) possui relevo baixo e formato irregular a sub-regular, com macla xadrez, pertítica. O quartzo exibe dimensões de até 3 mm, formato sub-regular, e compõe aproximadamente 20% da

rocha, frequentemente recristalizado. Alguns afloramentos exibem clinopiroxênio (grãos irregulares de até 1cm) e anfibólio. Os minerais opacos correspondem à magnetita e ilmenita (Figura 7B).

MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

Três amostras de concentrados de minerais pesados foram analisadas quimicamente por

Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), com uso do sensor Energy-Dispersive Detector

(EDS). Duas amostras (RB-06 e RB-17) correspondem a concentrados produzidos a partir dos granitos Resgate e Bananal, respectivamente; e uma amostra (RB-16) foi obtida em leito ativo de drenagem. A ilmenita exibe composição química de 9,85% a 69,48% de Fe, 5,99% a 26,18% de Ti; 9,77% a 38,25% de O; 1,17% a 10,52% de Si; e 0,80% a 10,24% de Al (Tabela 2). As variações nos espectros dos grãos analisados variam em função do grau de intemperismo ou da presença de inclusões. A análise Am-17a exibe um enriquecimento em

titânio (26,8% peso) e menores teores de ferro (9,85% peso), decorrentes da intemperismo nos grãos e da inclusão de outros minerais. As análises Am-06a, Am-06d, Am-06e (amostra RB-06), Am-16a, Am-16b (amostra RB-16) e Am-17a (amostra RB-17) apresentam valores baixos de titânio e maiores teores de silício, oxigênio, alumínio, zinco, cloro ou sódio, resultados da presença de inclusões nos grãos de ilmenita pesquisados. Essas inclusões são visíveis nas imagens de *backscatter* em função da diferença na coloração (Figura 8).

Tabela 2 – Composição química (MEV-EDS) dos grãos de ilmenita. Nota: Dados em porcentagem de massa normalizada. Amostras Am06-a, Am06-d, Am06-e, Am16-f e Am16-h possuem minerais inclusos, enquanto que Am06-c está alterada.

Ponto	Amostragem	Análise	O	Fe	Ti	Si	Al	Zn	Cl	Na
RB-06	Rocha (GRg)	Am-06a	16,3	63,57	17,36	1,17	1,59	-	-	-
		Am-06b	21,61	66,40	11,99					
		Am-06c	9,77	69,48	20,75					
		Am-06d	13,55	59,70	5,99	10,52	10,24			
		Am-06e	15,51	63,06	18,33	1,34	1,75			
RB-16	Drenagem	Am-16a	16,1	64,94	7,26	-	0,8	6,5	4,42	-
		Am-16b	22,48	49,87	9,1	3,9	1,14		6,1	7,41
RB-17	Rocha (GBn)	Am-17a	38,25	9,85	26,18	7,6	7,6		7,25	3,27

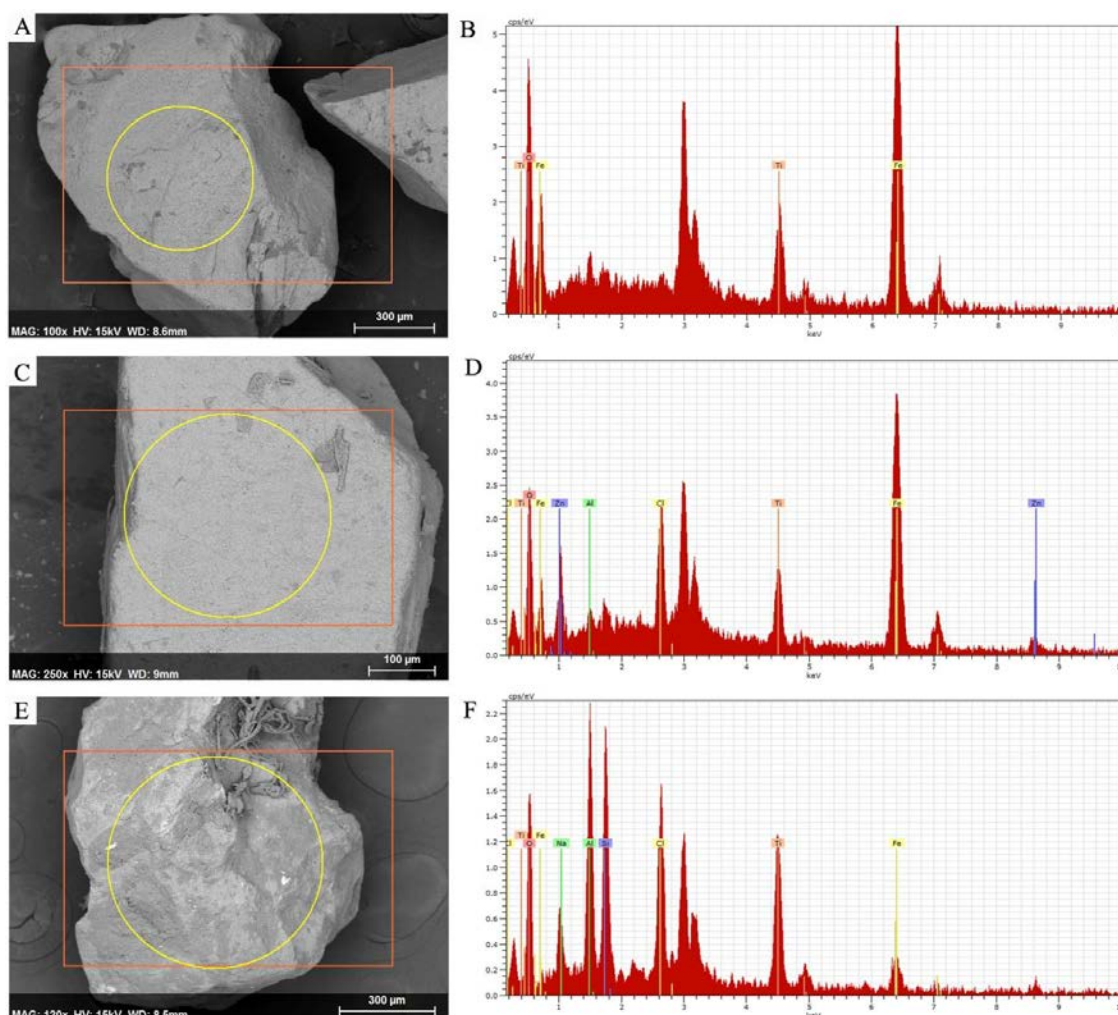


Figura 8 – Imagens e EDS de grãos de ilmenita com inclusões. Pontos de amostragem: A) RB-06 – Granito Resgate; B) RB-16 – Granito Bananal; C) RB-17 – leito ativo de drenagem. O círculo de borda amarela indica o local da análise.

CARACTERIZAÇÃO DAS ASSINATURAS AEROGEOFÍSICAS DOS LITOTIPOS DA ÁREA DE ESTUDO

Os dados aerogeofísicos provieram do Projeto Aerogeofísico São José dos Campos-Resende (CPRM, 2013) e objetivaram identificar os padrões de assinaturas principais estruturas e unidades geológicas da área do presente trabalho. Os mapas da Amplitude do Sinal Analítico (ASA) e da razão dos elementos Urânio/Tório indicaram estruturas NE-SW, concordantes com a orientação da Faixa Ribeira.

No mapa da ASA (Figura 9) o Granito Resgate exibe padrão de assinatura variando entre 0.248

e 1.760 nT/m, indicando uma possível variação no conteúdo de minerais magnético ao longo de seus limites. O Granito Bananal exibe diferentes padrões de assinatura da ASA em suas ocorrências. Os maiores valores (~ 1.114 nT/m) são observados na porção norte do mapa.

Nas demais ocorrências os valores inferiores a 0.491 nT/m podem refletir a menor presença de minerais magnéticos. Tanto o Granito Resgate como Bananal possuem, em mapa, uma orientação NE-SE, concordante com a estruturação da Faixa Ribeira.

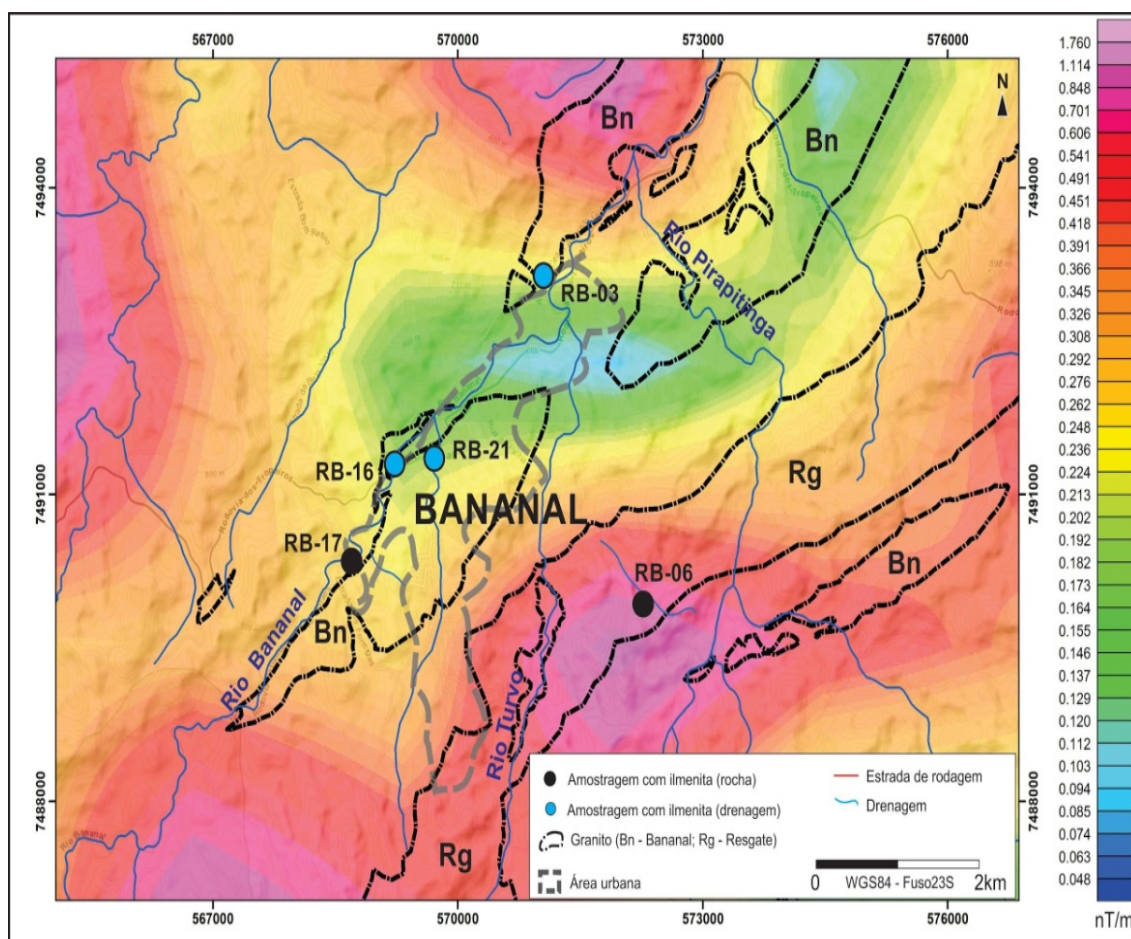


Figura 9 – Mapa da Amplitude do Sinal Analítico (ASA) da área do presente trabalho, com os pontos de amostragem com a presença de ilmenita. Os polígonos com contorno em preto representam os limites dos granitos Resgate (Rg) e Bananal (Bn).

No mapa da razão U/Th (Figura 10) há um predomínio do elemento Th em relação ao Urânio em toda a área do trabalho.

O Granito Bananal exibe maiores valores dessa razão ao longo de duas ocorrências mais expressivas em mapa, localizadas na porção central.

Nessas ocorrências os valores de Th são até 6 vezes superior ao de U. Os valores elevados na porção centro-norte do mapa podem indicar a

presença de corpos graníticos não cartografados.

Os corpos menores do Granito Bananal (a norte e a sul do mapa) registram os menores valores de U (até 15 vezes menores que de Th). No Granito Resgate predominam valores do elemento Th até dez vezes superior ao de U. Os valores mais baixos de U podem estar relacionados à lixiviação do solo pelos corpos hídricos que passam pelo Granito, transportando o elemento U.

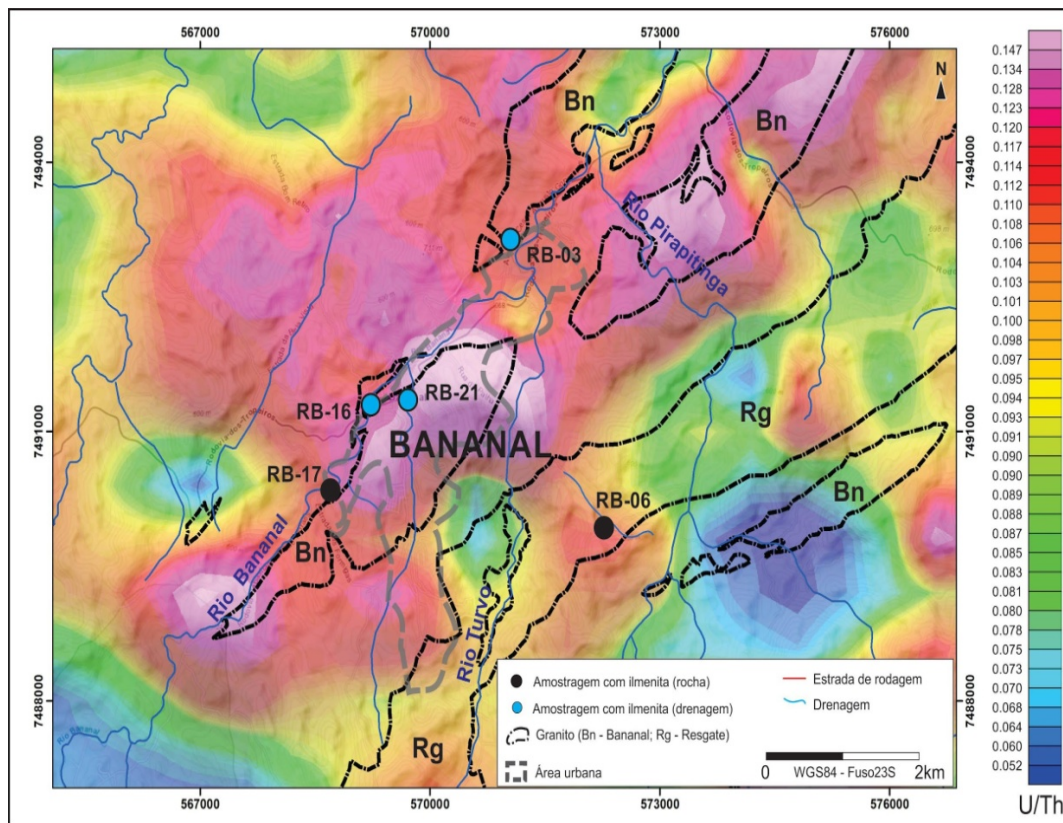


Figura 10 – Mapa da razão dos elementos Urânio e Tório (U/Th) da área do presente trabalho, com os pontos de amostragem com a presença de ilmenita. Os polígonos com contorno em preto representam os limites dos granitos Resgate (Rg) e Bananal (Bn).

CONCLUSÕES

Na área do município de Bananal, leste do estado de São Paulo, afloram as unidades Complexo Paraíba do Sul (CPS), Granito Resgate e Granito Bananal. O CPS é composto por biotita gnaiss migmatítico bandado com níveis pórfiroblásticos. A estrutura bandada e migmatítica milimétrica a centimétrica é fornecida por níveis de composição quartzo-feldspática e de biotita.

O Granito Resgate é constituído por granada-turmalina-biotita-muscovita granito, de direção NE-SW, com granulometria média a grossa e textura pegmatítica, contendo K-feldspato e quartzo. O Granito Resgate exibe, por vezes, um contato gradacional com o CPS. O Granito Bananal corresponde a granada-biotita gnaiss granítico porfiroblástico em contato gradacional com as

rochas do Complexo Paraíba do Sul. A textura é conferida por cristais de feldspato potássico de até 5 cm. Em ambos os granitos a magnetita e ilmenita ocorrem de forma disseminada.

A ilmenita foi identificada em afloramentos e leitões ativos de drenagem das unidades Granito Resgate e Granito Bananal. Os grãos de ilmenita exibem coloração acinzentada a preta, brilho metálico, forma tabular e prismática, além de aspecto sub-regular a irregular e dimensões de até 2mm. A presença de outros minerais nos concentrados de bateia (turmalina, granada, piroxênio, magnetita, quartzo, feldspato potássico, silimanita, zircão e limonita) reflete a paragênese das rochas da região, citadas em trabalhos da literatura geológica (Tabela 3).

Tabela 3 – Paragênese mineral dos concentrados de minerais pesados produzidos no presente trabalho comparada aos dados da literatura. Fonte: Eirado et al. (2006).

Unidade	Literatura	Presente trabalho	
	Rocha	Rocha	Concentrado de bateia
Granito Resgate	Granada-turmalina-biotita-muscovita granito	Álcali feldspato granito e álcali feldspato quartzo sienito com granada, turmalina e biotita como minerais acessórios	Quartzo, feldspato potássico, plagioclásio, muscovita, biotita, granada, piroxênio, ilmenita e magnetita
Granito Bananal	Granada-biotita gnaiss granítico porfiroblástico	Granada-turmalina-biotita-muscovita granito ou sienito	Quartzo, feldspato potássico, plagioclásio, biotita, turmalina, granada, piroxênio, ilmenita, magnetita, limonita, zircão e sillimanita

A presença de ilmenita na região do presente trabalho está associada aos corpos graníticos Resgate e Granito Bananal, produtos da fusão parcial das rochas metassedimentares do Complexo Paraíba do Sul. A situação redutora de formação de granitoides na série da ilmenita pode ter ocorrido em função da contribuição de material carbonáceo das rochas pelíticas do Complexo Paraíba do Sul ao magma originário, refletindo em uma menor fugacidade de oxigênio. Subsequentemente, a acumulação de minerais de Fe-Ti nos leitões amostrados foi resultado de processos derivados. No caso da ilmenita, seus grãos encontram-se frequentemente inclusos de outros minerais e raramente alterados

Análises químicas em MEV-EDS em grãos de ilmenita exibem composição química de 9,85% a 69,48% de Fe, 5,99% a 26,18% de Ti; 9,77% a 38,25% de O; 1,17% a 10,52% de Si; e 0,80% a

10,24% de Al. As variações composicionais dos grãos analisados variam em função do grau de intemperismo ou da presença de inclusões.

As anomalias geofísicas presentes nos mapas da Amplitude do Sinal Analítico e da razão dos elementos U/Th referentes aos corpos graníticos Resgate e Bananal exibem orientação NE-SW e refletem a estruturação da porção central da Faixa Ribeira. O Granito Resgate possui maiores valores do elemento Th em comparação com o Granito Bananal. A variação das assinaturas geofísicas indica composições minerais e químicas heterogêneas ao longo dos corpos graníticos Resgate e Bananal.

Os resultados do presente trabalho sinalizam que as cercanias da região de Bananal devem ser investigadas sob a ótica da prospecção mineral, a fim de delimitar os corpos graníticos associados à presença de ilmenita com teores mais elevados de Ti.

AGRADECIMENTOS

Ao Laboratório de Exploração Mineral (LEXMIN) da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, pelo apoio nas atividades de campo. Ao Laboratório Geológico de Processamento de Amostras (LGPA/UERJ), pela elaboração das lâminas petrográficas. Ao Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI), pela análise laboratorial. À FAPERJ - Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro, Processo E-26/200.965/2022. Aos avaliadores da Revista Geociências da UNESP, pelas valiosas contribuições e sugestões.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, F.F.M.; HASUI, Y.; PONÇANO, W.L.; DANTAS, A.S.L.; CARNEIRO, C.D.R.; MELO, M.S.; BISTRICH, C.A. **Mapa Geológico do estado de São Paulo em escala 1:500.000**. Nota explicativa. São Paulo, IPT, Monografias 6, v. 1, 126 p., 1981.
- ALMEIDA, J.C.H.; SILVA, L.G.E.; VALLADARES, C.S.O. Grupo Paraíba do Sul e Rochas Granitoides na Região de Bananal-SP e Rio Claro-RJ: Uma Proposta de Formalização Litoestratigráfica. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DE MINAS GERAIS, 7, Belo Horizonte, 1993. **Boletim de Resumos...** Belo Horizonte: Sociedade Brasileira de Geologia, 1993, p. 155-160.
- BALTAR, C.A.M.; SAMPAIO, J.A.; ANDRADE, M.C.; PINTO, D.C. Titânio: minerais de titânio. In: **Rochas e Minerais Industriais no Brasil: usos e especificações**. 2.ed, cap 37. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2008.
- CAMPOS NETO, M.C. Orogenic systems from southwestern Gondwana: an approach to Brasiliano-Pan African cycle and collage in southeastern Brazil. In: CORDANI, U.G.; MILANI, E.J.; THOMAZ FILHO, A.; CAMPOS, D.A. (Eds.), **Tectonic Evolution of South America**, p. 335-365, 2000.
- CHAPPELL, B.W. & WHITE, A.J.R. Two contrasting granite types. **Pacific Geology**, v. 8, p. 173-174, 1974.
- COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS – CPRM. **Projeto Aerogeofísico São José dos Campos-Resende: Relatório final do levantamento e processamento dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos**. Brasília: CPRM, v. 1, 2013.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL – DNPM. **Anuário Mineral Brasileiro**. Brasília: DNPM/MME, 2010.
- EIRADO, L.G.; HEILBRON, M.; ALMEIDA, J.C.H. Os terrenos tectônicos da Faixa Ribeira na Serra da Bocaina e na Baía da Ilha Grande, sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 36, p. 426-436, 2006.
- ETCHEBEHERE, M.L.C.; MAEYAMA, O.; SILVA, R.B. Pegmatitos do estado de São Paulo: característica geológicas e aspectos econômicos. In: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOLOGIA, 5, São Paulo, 1985. **Atas...** São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia, 1985. p. 411-425.
- FORCE, E. **Geology of titanium-mineral deposits**. Geological Society of America Special Paper 259, 112 p., 1991.
- HEILBRON M. & MACHADO, N. Timing of terrane accretion in the Neoproterozoic-Eopaleozoic Ribeira orogen (SE Brazil). **Precambrian Res.**, v. 125, p. 87-112, 2003.
- HEILBRON, M.; MOHRIAK, W.U.; VALERIANO, C.M.; MILANI, E.J.; ALMEIDA, J.C.H.; TUPINAMBÁ, M. From collision to extension: the roots of the southeastern continental margin of Brazil Atlantic rifts and continental margins. In: MOHRIAK, W.U.; TAIWANI, M. (Eds.). **Atlantic rifts and continental margins**. Washington: AGU, 2000. p. 1-34.
- HEILBRON, M.; SOARES, A.C.P.; CAMPOS NETO, M.C.; SILVA, L.C.; TROUW, R.A.J.; JANASI, V.A. Província Mantiqueira. In: **Geologia do continente Sul-americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**. São Paulo, Ed. DECA, 2004, p. 203-234.
- HEILBRON, M.; VALERIANO, C.M.; ALMEIDA, J.C.H.; TUPINAMBÁ, M.; VALLADARES, C.S.; SILVA, L.G.E.; NAVA, D.B.; DIOS, F.B. Compartimentação tectônica e evolução geológica do segmento central da Faixa Ribeira, ao sul do Cráton do São Francisco. In: SIMPÓSIO SOBRE O CRÁTON DO SÃO FRANCISCO, II, Salvador, 1993. **Anais...** Salvador: Sociedade Brasileira de Geologia, 1993, p. 263-265.
- HEILBRON, M.; VALERIANO, C.M.; ALMEIDA, J.C.H.;

- TUPINAMBÁ, M. A Megassinforma do Paraíba do Sul e sua implicação na compartimentação tectônica do setor central da Faixa Ribeira. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO SUDESTE, 2, São Paulo, 1991. **Atas...** São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia, 1991, p. 519-527.
- HEILBRON, M.; VALERIANO, C.M.; TASSINARI, C.C.G.; ALMEIDA, J.; TUPINAMBÁ, M.; SIGA J.; TROUW, R. Correlation of neoproterozoic terranes between the Ribeira Belt, SE Brazil and its African counterpart: comparative tectonic evolution and open questions. In: PANKHURST, R.J.; TROUW, R.A.J.; BRITO NEVES, B.B.; WIT, M.J. (Ed). **West Gondwana: Pre-Cenozoic Correlations Across the South Atlantic Region**. London: Geological Society, 2008. p. 211-237.
- INSTITUTE OF GEOLOGICAL & NUCLEAR SCIENCES – IGNS. **Mineral Commodity Report 16: Titanium**. Lower Hutt: IGNS, 1998.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Folha Bananal**. Rio de Janeiro: IBGE, 1982. Escala 1:50.000.
- ISHIHARA, S. The Magnetite-Series and Ilmenite-Series granitic rocks. **Mining Geology**, v. 27, p. 293-305, 1977.
- KRETZ, R. Symbols for rock-forming minerals. **American mineralogist**, v. 68, n. 1-2, p. 277-279, 1983.
- MCQUEEN, D.R. **The Mineral Book**. Master Books, 96 p., 2014.
- MELLO, I.S.C.; CABRAL JÚNIOR, M.; MOTTA, J.F.M. Terras-raras no estado de São Paulo: avaliação da potencialidade geológica. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 24, n. 4, p. 203-222, 1994.
- ROSS, J.L.S. Relevo Brasileiro: Uma nova proposta de classificação. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, v. 4, p. 25-39, 1990.
- UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY – USGS. **Mineral commodity summaries 2021**. Reston: USGS, 2020.
- VALLADARES, C.S.; SOUZA, S.F.; RAGATKY, D. The Quirino Complex: a Transamazonian Magmatic Arco of the Central Segment of the Brasiliano/Pan-African Ribeira Belt, SE Brazil. **Revista Universidade Rural, Série Ciências Exatas e da Terra**, p. 22, 2002.

*Submetido em 5 de março de 2023
Aceito para publicação em 25 de abril de 2023*