



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS

LAÍS CRISTINA LEITE PEREIRA

**INTEGRAÇÃO DE DADOS AEROGEOFÍSICOS E DE SENSORIAMENTO
REMOTO PARA A CARATERIZAÇÃO GEOLÓGICA DA REGIÃO DE ITAPETIM
(PE) E TEIXEIRA (PB), E SELEÇÃO DE ALVOS PRIORITÁRIOS PARA
MINERALIZAÇÃO DE OURO**

Recife

2020

LAÍS CRISTINA LEITE PEREIRA

**INTEGRAÇÃO DE DADOS AEROGEOFÍSICOS E SENSORIAMENTO
REMOTO PARA A CARATERIZAÇÃO GEOLÓGICA DA REGIÃO DE ITAPETIM
(PE) E TEIXEIRA (PB), E SELEÇÃO DE ALVOS PRIORITÁRIOS PARA
MINERALIZAÇÃO DE OURO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Geociências.

Área de concentração: Geoquímica, Geofísica e Evolução Crustal.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Thais Andressa Carrino.

Coorientador: Prof. Dr. João Adauto de Souza Neto.

Coorientador: Prof. Dr. Lauro Cézar Montefalco de Lira Santos.

Recife

2020

- P436i Pereira, Laís Cristina Leite.
Integração de dados aerogeofísicos e sensoriamento remoto para a caracterização geológica da região de Itapetim (PE) e Teixeira (PB), e seleção de alvos prioritários para mineralização de ouro / Laís Cristina Leite Pereira - 2020.
169 folhas, il., gráfs., tabs.
- Orientadora: Profa. Dra. Thais Andressa Carrino.
Coorientador: Prof. Dr. João Adauto de Souza Neto.
Coorientador: Prof. Dr. Lauro César Montefalco de Lira Santos.
- Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Geociências, 2020.
Inclui Referências e Apêndice.
1. Geociências. 2. Geofísica. 3. Sensoriamento remoto. 4. Ouro. 5. Província Borborema. I. Carrino, Thais Andressa (Orientadora). II. Souza Neto, João Adauto de (Coorientador). III. Santos, Lauro César Montefalco de Lira (Coorientador). IV. Título.
- UFPE
- 551 CDD (22. ed.) BCTG/2020-252

LAÍS CRISTINA LEITE PEREIRA

**INTEGRAÇÃO DE DADOS AEROGEOFÍSICOS E DE SENSORIAMENTO REMOTO PARA
A CARATERIZAÇÃO GEOLÓGICA DA REGIÃO DE ITAPETIM (PE) E TEIXEIRA (PB), E
SELEÇÃO DE ALVOS PRIORITÁRIOS PARA MINERALIZAÇÃO DE OURO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Mestra em Geociências.

Aprovada em: 17/01/2020.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Lauro César Montefalco de Lira Santos (Coorientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Adejardo Francisco da Silva Filho (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^a. Dr^a. Rosa Elvira Correa Pabón (Examinadora Externa)
Instituto Tecnológico Vale

Dedico esta obra ao meu avô paterno Abdon Pereira (*In memorium*)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por tudo de bom que tive até hoje em minha vida. Segundo, ao meu eterno avô paterno, Abdon Pereira, por ter me ensinado desde cedo a importância do estudo. Sem seu apoio nada seria como é hoje. A todos os outros integrantes da Família Leite (irmão, tias, tios, primos), em especial minha mãe, Suelene; meu pai, Fernando, e minha vó, Haydee por tudo que eles me proporcionaram. Ao meu namorado e amigo, Luís, por seu companheirismo, paciência e generosidade de sempre. Obrigada por ter estado ao meu lado durante todos os contratempos que aconteceram até a finalização do projeto. Agradeço também à minha sogra, Andrea, por tantas coisas boas que fez por mim.

Meus sinceros agradecimentos à professora e orientadora Thais Carrino por ter me proporcionado crescimento profissional e, acima de tudo, pessoal. Obrigada pela experiência de trabalho nesses dois anos e meio, sinto que cresci e amadureci muito durante este tempo sob sua orientação. Ao professor e co-orientador Lauro Santos, agradeço por sua grande ajuda desde o início do projeto quando fomos a campo e por sua disponibilidade e paciência ao corrigir os artigos frutos da presente dissertação. Ao professor João Adauto, muito obrigada pelos esclarecimentos principalmente sobre a gênese depósitos de ouro.

Por fim, agradeço aos órgãos CPRM – pela disponibilização dos dados geofísicos, à Unicamp – pelas análises espectrais, à UFPE e CAPES pelo apoio e concessão de bolsa de estudos, ao LABGEM – pela disponibilização de microscópios para tirar fotomicrografias das lâminas.

A todos, meu muitíssimo obrigada!

RESUMO

As geotecnologias têm desempenhado um papel de grande importância no âmbito da geologia econômica. Dados de geofísica e sensoriamento remoto (a exemplo de imagens multiespectrais do sensor *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer - ASTER* e espectroscopia de reflectância), por proporcionarem ampla cobertura e determinação composicional sem contato direto com objetos e sem destruição de amostras, facilitam a identificação e caracterização de novos alvos prospectivos. Neste contexto, a presente pesquisa mostra uma abordagem envolvendo descrição detalhada de dados de magnetometria, gamaespectrometria, espectroscopia de reflectância e imagens multiespectrais, balizados por dados de campo e petrografia referentes à área do Distrito de Itapetim, localizado na porção central entre os estados de Pernambuco e Paraíba. Os dados de magnetometria mostram o predomínio de lineamentos magnéticos de direções NE-SW e E-W, os quais apresentam correlação com zonas de cisalhamento e falhas da região, indicando, também, que os principais controles para as ocorrências de ouro estão representados por áreas fortemente magnetizadas. Dados radiométricos indicam que as áreas mineralizadas apresentam enriquecimento em potássio, correlacionáveis a uma assembleia mineral dominada por quartzo, feldspato potássico e turmalina. Dados de espectroscopia de reflectância foram utilizados para caracterizar litologias de unidades regionais e as rochas alteradas de setores de garimpos (Santo Aleixo e Degredo). As curvas espectrais de rochas alteradas são dominadas pela presença de turmalina (~2200, ~2245, ~2300 e ~2366 nm) e sericita (~1900, ~2200 nm), no setor Degredo, e epidoto (~2250 e ~2340 nm) e biotita (~2250 e ~2350 nm), no setor Santo Aleixo, tais fases representam a principal assembleia de minerais hidrotermais com feições de absorção características na faixa espectral entre 1000 e 2500 nm. Dados de imageamento provenientes do sensor ASTER, permitiram, através da técnica aritmética de bandas (na faixa entre 350 e 2500 nm), a delimitação de zonas ricas em vegetação, óxidos de ferro e caulinita. Áreas enriquecidas neste último mineral cartografam, indiretamente, os principais corpos graníticos da região, cuja gênese é tida como concomitante às ocorrências de ouro de Itapetim. Os resultados atestam que os dados geofísicos mostram padrões confiáveis relacionados às mineralizações de ouro, bem como indicam a viabilidade de utilização de espectroscopia de reflectância e imageamento multiespectral em estudos de depósitos de ouro similares ao de Itapetim.

Palavras-chave: Geofísica. Sensoriamento remoto. Ouro. Província Borborema.

ABSTRACT

Geotechnologies have played an important role in economic geology. Geophysics and remote sensing data (such as multispectral images from the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer - ASTER sensor and reflectance spectroscopy), provide wide coverage and compositional determination without direct contact with objects and without destruction of samples, facilitating identification and characterization of new prospective targets. In this context, the present research shows an approach involving detailed description of magnetic, radiometric, reflectance spectroscopy and multispectral imagery data, validated by field and petrographic data related to the area of the Itapetim District, located in the central portion between the states of Pernambuco and Paraíba, Brazil. The magnetic data show the predominance of magnetic lineaments along NE-SW and EW directions, which correlate with main shear zones and faults of the region, also indicating that the main controls for gold occurrences are represented by strongly magnetized areas. Radiometric data indicate that the mineralized areas are enriched in potassium and correlate to a mineral assembly dominated by quartz, potassium feldspar and tourmaline. Reflectance spectroscopy data were used to characterize lithologies of regional units and altered rocks from mining sectors (Santo Aleixo and Degredo). The spectral curves of altered rocks are dominated by the presence of tourmaline (~ 2200 , ~ 2245 , ~ 2300 and ~ 2366 nm) and sericite (~ 1900 , ~ 2200 nm), in the Degredo sector, and epidote (~ 2250 and ~ 2340 nm)) and biotite (~ 2250 and ~ 2350 nm), in the Santo Aleixo sector, these phases represent the main assembly of hydrothermal minerals with characteristic absorption features in the spectral range between 1000 and 2500 nm. Imaging data from the ASTER sensor, allowed, through the band arithmetic technique (in the range between 350 and 2500 nm), the delimitation of areas rich in vegetation, iron oxides and kaolinite. Areas enriched in this last mineral map indirectly the principal granitic bodies in the region, whose genesis is considered to be concomitant with the occurrences of gold in Itapetim. The results attest that the geophysical data show reliable patterns related to gold mineralizations, as well as indicate the feasibility of using reflectance spectroscopy and multispectral imaging in studies of gold deposits similar to those of Itapetim District.

Keywords: Geophysics. Remote Sensing. Gold. Borborema Province.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Principal modelo acerca das fontes de fluidos mineralizantes em sistemas orogênicos.	18
Figura 2 - Mapa de localização da área de estudo na região limítrofe dos estados de Pernambuco (PE) e Paraíba. (PB).	22
Figura 3 - Subprovíncia Central da Província Borborema e seus terrenos.....	23
Figura 4 - Mapa geológico da região do Distrito aurífero de Itapetim sobreposto ao modelo digital do terreno do SRTM (<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>) filtrado na direção 45 Az.	25
Figura 5 - Diagrama esquemático mostrando o modelo de mineralização de ouro no Depósito aurífero de Itapetim.	30
Figura 6 - Esquema ilustrado acerca da metodologia utilizada no primeiro artigo, resultante do presente projeto de mestrado.	35
Figura 7 - Esquema ilustrado acerca da metodologia utilizada no segundo artigo, resultante do presente projeto de mestrado.	36

ARTIGO 1

Figure 1. (A) Simplified map of Borborema Province and subprovinces (modified from Santos <i>et al.</i> 2014). (B) Geologic map of the Itapetim Gold District region (modified from Ferreira & Santos 2000, Archanjo <i>et al.</i> 2008) and the location of the gold occurrences. PB = State of Paraíba, PE = State of Pernambuco. Obs.: Gold sectors non-referenced with numbers do not have a specific nomenclature.	42
Figure 2. Magnetic anomalies image of Itapetim gold District region and location of gold occurrences. PB = State of Paraíba, PE = State of Pernambuco.	44
Figure 3. Magnetic images of (A) analytic signal amplitude (ASA), and (B) first vertical derivative (DZ), and interpretation of magnetic lineaments from (C) ASA and (D) DZ images. Rose diagrams show NE-SW and E-W trends. SCSZ = Serra do Caboclo Shear Zone, TSZ = Tendó Shear Zone, ISZ = Itapetim Shear Zone, JBSZ = Juru-Belém Shear Zone, PB = State of Paraíba, PE = State of Pernambuco.	46
Figure 4. Radiometric images of Itapetim gold District showing the location of gold occurrences and the main domains (1 to 7). (A) Potassium map, (B) thorium map, (C) uranium map, (D) K/eTh ratio. PB = State of Paraíba, PE = State of Pernambuco, ISZ = Itapetim Shear Zone, SCSZ = Serra do Caboclo Shear Zone. Numbers indicate domains relative to radiometric responses individually interpreted in each image.	48
Figure 5. (A) Ternary image (RGB composition) of K, eTh and eU, and (B) litho- geophysical	

domains and radiometric lineaments. L = low, ML = medium to low, M = medium, MH = medium to high, H = high. PB = State of Paraíba, PE = State of Pernambuco..... 50

Figure 6. Microscopic textures associated with mylonites of the Serra do Caboclo Shear Zone:

(A) Phyllite fabrics from the Riacho Gravatá Complex, composed by muscovite, biotite and chlorite presenting S-C fabrics (indicated by red lines and white dotted lines). (B) Type δ porphyroclast in quartz crystal from phyllonite of the Riacho Gravatá Complex, showing sinistral strike-slip movement. Bt = biotite, Chl = chlorite, Ms = muscovite, Qz = quartz. 53

Figure 7: Structural characteristics of mylonitic rocks along the Itapetim Shear Zone. (A)

Overview of mylonite outcrop oriented in NE direction (70Az/ 90°) and strike-slip foliation is marked by highly stretched crystals of quartz and feldspar. (B) Protomylonitic schist showing horizontal lineation. (C) Oblique oriented mineral stretching lineation in vertical foliation planes. (D) Syn-kinematic chevron folds with vertical- to subvertical axial planes. (E) Mica-fish marked by deformed muscovite crystal showing an evidence of sinistral deformation. (F) Protomylonite showing augens of potassium feldspar (developing pressure shadow - red arrow) and quartz ribbons with polygonal texture. Chl= chlorite, Kfs = potassium feldspar, Ms = muscovite, Qz = quartz. A.P.T. = axial plane trace. 55

Figure 8: Samples collected in mineralized areas. (A) Sample showing contact between quartz

vein and mylonitic host rock, and layer composed by pyrite and arsenopyrite. (B) Zoom of sample shown in Figure 8A presenting fine layer of pyrite and arsenopyrite. (C) Host rock exhibiting mylonitic foliation marked by alignment of quartz crystals, and presence of veinlet of quartz, parallel to the mylonitic foliation. (D) Quartz veins concordant to the mylonitic foliation exhibiting saccharoidal texture. (E) Aggregate of quartz, tourmaline and potassium feldspar with pegmatitic texture. (E) Assemblage quartz+tourmaline+potassium feldspar showing mylonitic texture. Apy = Arsenopyrite, Kfs = potassium feldspar, Py = pyrite, Qz = quartz, Tur = tourmaline. Sm = Mylonitic foliation..... 56

Figure 9. Microscopic aspects of hydrothermal minerals in Itapetim gold District. (A) Sample of

quartz vein showing a polygonal arrangement, containing crystals of potassium feldspar almost completely transformed into sericite (see red arrows). (B) Aggregate of prismatic tourmaline crystals, in quartz vein, exhibiting a blue to green pleochroism. Zoning is observed in basal section (see red arrow). (C) Quartz vein containing tourmaline porphyroclasts (type σ) evidencing sinistral deformation. (D) Quartz vein showing the association of biotite (in tiny crystals) and tourmaline. (E) Assemblage Bt+Czo+Ep, observed in Santo Aleixo Sector, filling fracture in quartz vein. (F) Layer composed by chlorite, product of biotite alteration, in quartz vein. Small crystals of titanite are seen right in contact with chlorite (see red arrows). Bt = biotite, Chl =

chlorite, Czo = clinozoisite, Ms = muscovite, Qz = quartz, Ser = sericite, Ttn = titanite, Tur = tourmaline.....	57
Figure 10. Integrated map (fusion of DZ and ternary images) showing the main interpretations made from airborne magnetic and gamma-ray spectrometric data. The hatched zones represent favorable areas for gold mineralization, considering the principal pathfinders identified in the study area. SCSZ = Serra do Caboclo Shear Zone, TSZ = Tendó Shear Zone, ISZ = Itapetim Shear Zone, JBSZ = Juru-Belém Shear Zone.....	61

ARTIGO 2

Figure 1. (A) Simplified map of the Borborema Province and its subprovinces (Modified from Santos et al. 2014). The red box highlights the Itapetim gold district. (B) Regional geologic map of the Itapetim gold district (modified from Ferreira and Santos 2000; Archanjo et al. 2008). PE: state of Pernambuco; PB: state of Paraíba.....	75
Figure 2. Field aspects and thin section features of the geological units of the studied area. <i>Augen</i> gneiss from the Cariris Velhos Suite (A) and the associated foliation marked by biotite and chlorite alignments (B). (C) Phyllite layers from the Riacho Gravatá Complex, composed by folded muscovite, chlorite and biotite lamellae (D). Garnet-biotite- muscovite schist from the São Caetano Complex, interleaved with metamafic rock layer (E), and detail of coronitic garnet crystals and tourmaline prisms indicated by red arrows (F). Bt: biotite; Chl: chlorite; Ms: muscovite; Qz: quartz; Tur: tourmaline.....	78
Figure 3. Field and petrographic aspects of the metasedimentary and granitic units. Overview of slate outcrop from Santana dos Garrotes Formation (A) and microscopic details such as alternating layers of muscovite and biotite in very fine quartz matrix (B). Overview of Brejinho Pluton's outcrop marked by common mafic enclaves (see red arrows) (C), and microscopic characterization of granite from this unit containing porphyroclast of potassium feldspar, hornblende, biotite and epidote (D). Teixeira Batholith outcrop (E), marked by monzogranite characterized by epidote, hornblende and sericitization of feldspar (F). Bt: biotite; Ep: epidote; Hbl: hornblende; Kfs: potassium feldspar; Ms: muscovite; Pl: plagioclase; Qz: quartz; Ser: sericite.....	80
Figure 4. Stacked reflectance spectra of geological units: (A) Cariris Velhos Suite (C.V.S.), São Caetano Complex (S.C.C.) and Riacho Gravatá Complex (R.G.C.); (B) Santana dos Garrotes Formation (S.G.F), Brejinho Pluton (B.P.), Brejinho Pluton enclaves (B.P.*) and Teixeira Batholith (T.B.). Bt: biotite; Chl: chlorite; Gth: goethite; Hbl: hornblende; Kln: kaolinite; Ms: muscovite; Ser: sericite.....	84

Figure 5. Types of soil present in the studied area. (A) Type 1: sandy to sandy-clay whitish soil. (B) Type 2: sandy-clay reddish soil. (C) Type 3: gravelly sand textured, reddish soil. (D) Type 4: light brown, sandy-clay soil. (E) Type 5: dark-red sandy-clay soil. (F) Type 6: light yellow, argillaceous soil.	86
Figure 6. Stacked reflectance spectra of soils from the Itapetim region. Gth: goethite; Kln: kaolinite.	87
Figure 7. Rock samples from the Santo Aleixo mineralized sector. (A) Quartz vein hosted by mylonite, and detail of ENE-WSW oriented mylonite (B). (C, D) Thin sections showing hydrothermal alteration mineralogy marked by epidote and biotite, with minor titanite. Bt: biotite; Ep: epidote; Ttn: titanite.....	88
Figure 8. Rock samples from Degredo mineralized sector. (A) Mylonite in contact with quartz vein, and detail of the foliation marked by biotite and some quartz and feldspar crystals (B). (C) The most common type of hydrothermal alteration, depicted by feldspathic rock, and detail of potassium feldspar crystals partially altered to sericite and thin layer of tourmaline (D). (E) Hydrothermal tourmaline exhibiting a typical blue-green pleochroism. (F) Aggregate of biotite and titanite in contact with mylonite. Bt: biotite; Kfs: potassium feldspar; Qz: quartz; Tur: tourmaline.....	89
Figure 9. Stacked reflectance spectra of hydrothermally altered rocks from the Santo Aleixo sector, dominated by epidote and biotite absorption features (A). Examples of Santo Aleixo sector rocks, composed essentially by quartz, epidote and biotite (B, C, D), and photomicrograph of sericite in quartz vein (E). Bt: biotite; Ep: epidote; Qz: quartz; Ser: sericite.....	90
Figure 10. Stacked reflectance spectra of hydrothermally altered rocks from the Degredo sector, dominated by tourmaline (schorlite) and sericite absorption features (A). Examples of altered rocks in the Degredo sector, composed of quartz, potassium feldspar and tourmaline, are shown in (B), (C) and (D). Kfs: potassium feldspar; Qz: quartz; Ser: sericite; Tur: tourmaline.....	91
Figure 11: Stacked reflectance spectra of mylonites from the Degredo sector, dominated by biotite, muscovite and minor kaolinite (A, B). Examples of hydrothermally altered gneisses (C, D), characterized by muscovite, quartz and biotite (E). Bt: biotite; Kln: kaolinite; Ms: muscovite; Qz: quartz.	92
Figure 12. Band7/band6 ratio result integrated with ASTER band 3, overlain by main Neoproterozoic granitic bodies and alluvial deposits. The highest concentration of kaolinite-bearing pixels is indicated in red. B.P. = Brejinho Pluton; C.G.= Calc-alkaline granite; I.S.Z. = Itapetim Shear Zone; T.B. = Teixeira Batholith; T.G.= Trondhjemitic Granite.	93
Figure. 13 Field aspects related to kaolinite-bearing areas in the Teixeira Batolith region. Soil	

cover representing (A) the type 1 (sandy to sandy-clay whitish soil) and (B) type 2 (sandy-clay reddish soil). It is also possible to observe the typical shrub vegetation. 94

Figure 14. Results from the band 3/band 2 ratio, highlighting the vegetation cover (A), and from the band 4/band 3 ratio, indicating iron-bearing mineral related pixels (B). All results are integrated with the ASTER band 3. (C) ASTER band 4, 3, 2 (RGB) color composite of the studied area, with interpretation of the NE trending lineaments related to Itapetim Shear Zone. B.P. = Brejinho Pluton; C.G.= Calc-alkaline granite; I.S.Z. = Itapetim Shear Zone; T.B. = Teixeira Batholith; T.G.= Trondhjemitic Granite..... 95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características dos principais setores garimpeiros do Distrito aurífero Itapetim.....	28
--	----

ARTIGO 1

Table 1: Intensities of radioelements used to define the qualitative interpretation of radiometric maps.....	48
Table 2: Detailed description of radiometric litho-geophysical domains interpreted in the study area.....	50

ARTIGO 2

Table 1. Specification of VNIR and SWIR spectral bands of the ASTER sensor (Abrams et al. 2002).....	77
Table 2. Summary of the main spectral responses related to the main regional geological units of the studied area.	81

LISTA DE ABREVIATURAS

ASA	Amplitude do Sinal Analítico
ASTER	<i>Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer</i>
CPRM	Serviço Geológico do Brasil
DZ	Derivada Vertical
ISZ	<i>Itapetim Shear Zone</i>
ISZ	<i>Itapetim Shear Zone</i>
JBSZ	<i>Juru-Belém Shear Zone</i>
NSP	<i>Northern Subprovince</i>
Pa-Lin	<i>Patos Lineament</i>
Pe-Lin	<i>Pernambuco Lineament</i>
SCSZ	<i>Serra do Caboclo Shear Zone</i>
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
SSP	<i>Southern Subprovince</i>
SWIR	Infravermelho de Ondas Curtas
TAM	Terreno Alto Moxotó
TAP	Terreno Alto Pajeú
TPAB	Terreno Piancó-Alto Brígida
TRC	Terreno Rio Capibaribe
TSP	<i>Transversal Subprovince</i>
TSZ	<i>Tendó Shear Zone</i>
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
UNICAMP	Universidade Estadual de Campinas
VNIR	Visível e Infravermelho Próximo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.2	JUSTIFICATIVA.....	19
1.3	OBJETIVOS	20
1.3.1	Objetivo geral.....	20
1.3.2	Objetivos específicos.....	20
2	LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	22
3	GEOLOGIA REGIONAL	23
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA MINERALIZAÇÃO DE OURO	28
3.1.1	Gênese de ouro	29
4	MATERIAL E MÉTODOS	32
4.1	ANÁLISE GEOFÍSICA.....	32
4.2	IMAGEAMENTO	32
4.3	ETAPAS DE CAMPO	32
4.4	AMOSTRAGEM.....	32
4.5	ANÁLISES DE ESPECTROSCOPIA DE REFLECTÂNCIA	33
4.6	PETROGRAFIA.....	33
5	RESULTADOS	34
5.1	THE ROLE OF AIRBORNE GEOPHYSICS ON THE INVESTIGATION OF GOLD OCCURRENCES IN THE ITAPETIM REGION, BORBOREMA PROVINCE, NE BRAZIL	37
5.2	GEOLOGICAL AND SPECTRAL CHARACTERIZATION OF THE ITAPETIM GOLD DISTRICT, NORTHEASTERN BRAZIL, USING REFLECTANCE SPECTROSCOPY AND ASTER DATA	71
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	106
6.1	RECOMENDAÇÕES.....	107
	REFERÊNCIAS	108
	APÊNDICE A – RELATÓRIO DE CAMPO	114

1 INTRODUÇÃO

O Distrito de Itapetim, localizada na porção central da Província Borborema ao longo dos estados de Pernambuco e Paraíba, é conhecido por sua mineralização de ouro desde a década de 1940 (SCHEID & FERREIRA, 1991) e, atualmente, possui 21 ocorrências de ouro registradas (SCHEID & FERREIRA, 1991; COUTINHO, 1994; FERREIRA & SANTOS, 2000). O metal encontra-se hospedado, principalmente, em rochas supracrustais e graníticas na região de influência da Zona de Cisalhamento Itapetim e do Batólito Teixeira (COUTINHO & ALDERTON, 1998a, b). Na década de 1980, a região passou a ser objeto de estudos em projetos inicialmente realizados pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM) (SCHEID & FERREIRA, 1991). Esses estudos, além da caracterização geológica, tiveram (1) cunho prospectivo envolvendo, entre outros aspectos, a localização dos depósitos e a determinação do teor de ouro (*e.g.* CPRM, 1984; SILVA FILHO, 1989; WANDERLEY, 1999), e (2) uma linha geoquímica e genética, referente a alterações minerais, fluidos mineralizantes e deformação (*e.g.* COUTINHO, 1994; COUTINHO & ALDERTON, 1998a, b; MAIA, 2002; LIMA et al., 2000; ALMEIDA, 2003).

Em 1984, a CPRM lançou um programa de lavra experimental que incluiu a reavaliação do Depósito de Itapetim, sondagens, planos de lavra e testes de beneficiamento. As pesquisas resultaram numa planta piloto que tentou mecanizar a exploração do ouro. Entretanto, grande parte da extração do metal da região foi realizada em processos manuais em garimpos. Os principais setores alvos de estudos foram os garimpos Sertãozinho, Pimenteiras, Degredo e Gurguéia. Coutinho (1994) focou sua pesquisa envolvendo, entre outros temas, petrologia, geoquímica, dados isotópicos e análise de deformação, relativos à porção do Distrito aurífero de Itapetim, principalmente, nos setores de Pimenteiras e Sertãozinho. Scheid & Ferreira (1991) revisaram as características da mineralização do Distrito de Itapetim, e apresentaram uma descrição contendo as principais características litológicas e estruturais de todas as ocorrências de ouro registradas. Lima et al. (2000) estudaram anomalias de susceptibilidade magnética no Batólito Teixeira, considerado a provável fonte dos fluidos mineralizantes na região, e identificaram áreas de maior susceptibilidade magnética nas proximidades de zonas de falhas e fraturas. Maia (2002) baseou seu estudo (envolvendo deformação, fluxo de fluidos e formação de depósitos de ouro) nos setores garimpeiros de Gurguéia, Piedade, Sertãozinho e Pimenteiras, enquanto Almeida (2003) fez uma abordagem relativa ao setor Sertãozinho elucidando, sobretudo, aspectos microestruturais.

Grande parte das ocorrências de ouro do Distrito de Itapetim são encontradas ao longo da porção central da Zona de Cisalhamento Itapetim, em uma área de 25 km de comprimento por 0,2 km de largura (WANDERLEY, 1999). A mineralização de ouro está associada a veios de quartzo hospedados em xisto ou gnaiss, orientados aproximadamente na direção N70°E (COUTINHO, 1994). As ocorrências têm sido classificadas como do tipo *lode* (ou orogênico) e, em certos pontos, estão associadas a zonas de alteração hidrotermal marcadas por enriquecimento em turmalina, feldspato potássico, clorita, entre outros (COUTINHO, 1994). Estes minerais de alteração apontam para uma assinatura química dos fluidos auríferos contendo fases como boro (B), potássio (K) e água (H₂O).

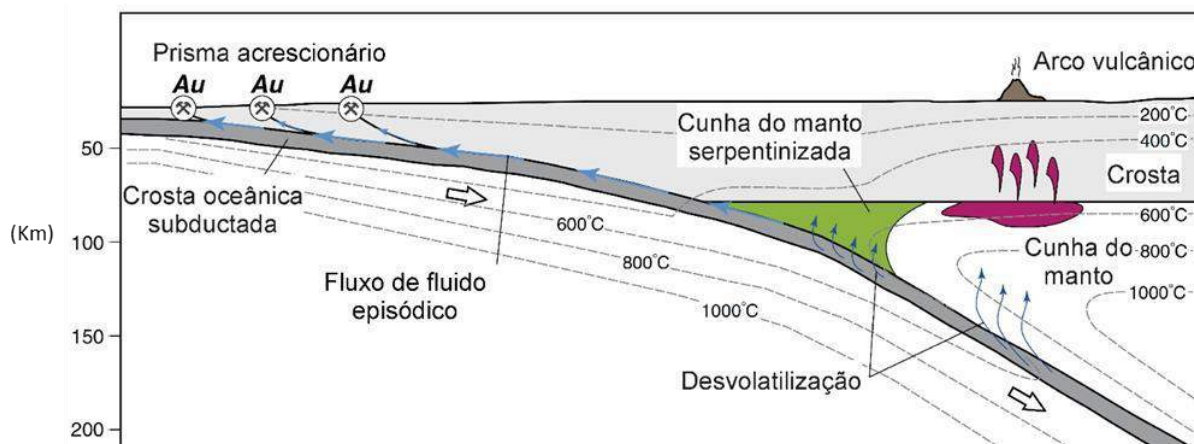
O termo mineralização do tipo *lode* é caracterizado como um sistema mineralizante controlado por estruturação local, como zonas de cisalhamento secundárias ou de mais alta ordem (HODGSON, 1989). Zonas de cisalhamento dúcteis de larga escala são consideradas corredores tectônicos para percolação de fluidos hidrotermais (em geral, aquo-carbônicos com até 5% de NaCl) e subsequente concentração de metal durante fases de magmatismo e metamorfismo (HRONSKY & GROVES, 2008; GROVES & SANTOSH, 2015).

Os aspectos geológicos mais comuns apresentados por depósitos do tipo *lode* compreendem (1) associação com zonas de falha transilitosféricas, (2) ocorrência em terrenos que sofreram metamorfismo de fácies xisto verde, (3) alteração hidrotermal, (4) paragênese dominada por quartzo, carbonato, mica, clorita, pirita e turmalina e (5) mineralização geralmente relacionada a processos sin- e pós-pico de metamorfismo (MCCUAIG & KERRICH, 1998). Para este tipo de sistema, Groves et al. (1998) utilizam o termo orogênético, o qual estabelece uma associação, em tempo e espaço, a processos orogênicos acrescionários e colisionais.

Um dos modelos mais aceitos acerca da origem dos fluidos mineralizados em ouro, no sistema mineralizante tipo *lode*, envolve uma série de processos desencadeados por desvolatilização metamórfica em ambiente de subducção (Figura 1). De acordo com Goldfarb & Groves (2015), fluidos liberados por desvolatilização de placa subductada (associados a sedimentos com alto teor de enxofre (S) - ricos em pirita), a temperaturas de aproximadamente 650 °C e 100 km de profundidade, podem ascender e (1) fertilizar a cunha do manto ou, (2) quando a placa oceânica é rica em água (H₂O), seguir ao longo da interface serpentizada da cunha do manto ou da base da litosfera. Quando estes fluidos interceptam falhas profundas, eles migram para níveis crustais mais rasos (através de processos de advecção) e formam os depósitos de ouro orogênicos. Em zonas onde há um aumento suficiente de temperatura, a

adição de fluidos (via desvolatilização) pode causar fusão Goldfarb & Groves (2015).

Figura 1 - Principal modelo acerca das fontes de fluidos mineralizantes em sistemas orogenéticos.



Fonte: Adaptado de Goldfarb; Groves, 2015.

As características apresentadas por depósitos do tipo *lode*, como as listadas acima, propiciam a aplicação de geotecnologias na investigação de novos alvos mineralizados. Dados aerogeofísicos e de sensoriamento remoto têm sido utilizados em campanhas prospectivas ao redor do mundo com a finalidade de identificar estruturas e áreas de alteração hidrotermal indicativas de presença de mineralização. Como exemplo, Holden et al. (2012) utilizaram dados aeromagnéticos para investigar zonas de cisalhamento ou falhas em áreas do Cráton Yilgarn (Austrália) e Cráton Superior (Canadá). Como resultado, os autores mapearam áreas de alta densidade de interseção de lineamentos (representando zonas de grande permeabilidade) e áreas com uma diversidade de orientação de lineamentos (prováveis condutos de fluidos mineralizantes), as quais mostram boa correlação com depósitos de Ouro previamente mapeados. Ramos et al. (2014) analisaram estruturas magnéticas e domínios gamaespectrométricas do Arco Magmático de Arenópolis (centro-oeste do Brasil), proporcionando a delimitação de zonas de cisalhamento e corpos graníticos, ambos ligados à mineralização de Ouro na região. Da mesma forma, Elkhateeb & Abdellatif (2018) utilizaram os referidos métodos geofísicos na porção central do *Eastern Desert*, Egito, para melhorar a delineação de unidades litológicas, compreender a assinatura radiométrica e a orientação preferencial de ocorrências Ouro previamente mapeadas, a fim de identificar novas zonas de mineralização deste metal.

Em geral, estudos prospectivos que envolvem uso de sensoriamento remoto são realizados em terrenos bem expostos, em regiões de clima árido e semiárido (os quais

apresentam pouca cobertura vegetal e de solo). Neste contexto, Bierwirth et al. (2002) utilizaram sensoriamento remoto hiperespectral para a caracterização de zonas de alteração de depósitos de ouro do tipo *lode* em Pilbara (Austrália), cartografando e priorizando áreas marcadas por assembleia principal do tipo mica-clorita-carbonato- turmalina. Embora pesquisas com imagens de sensoriamento remoto em regiões intemperizadas ainda sejam pouco usuais, pois a cobertura da vegetação e solos tende a mascarar algumas respostas mineralógicas de interesse à prospecção, alguns estudos realizados sob estas condições têm mostrado bons resultados. A exemplo, tem-se a pesquisa conduzida por Natelo et al. (2019), no Maciço Tróia (CE), em que foram investigados os padrões espectrais de minerais de alteração, em escala regional e local, relacionados com mineralização de Au *lode* em ambiente *greenstone belt*, e representados, majoritariamente, por caulinita e nontronita. Os resultados obtidos foram integrados com dados de campo, petrografia e geoquímica culminando na identificação de alvos possivelmente mineralizados.

Como evidenciado nos estudos relatados acima, as geotecnologias representam uma ferramenta importante na descoberta de novos alvos e depósitos minerais. Seguindo esta linha, a presente dissertação apresenta um estudo geológico, geofísico regional e espectral da região do Distrito aurífero de Itapetim, a fim de caracterizar as principais estruturas e unidades geológicas, fomentando o conhecimento geológico da área e apontando possíveis alvos mineralizados.

1.2 JUSTIFICATIVA

Apesar de o Distrito aurífero de Itapetim já ter sido alvo de estudos nas décadas passadas (*e.g.* COUTINHO, 1994; MAIA, 2002; ALMEIDA, 2003), a região ainda tem potencial para novas descobertas de alvos exploratórios e carece de investigações de maior detalhe. A configuração geológica da região (mineralização associada a zonas de cisalhamento e de alteração hidrotermal) favorece o uso de geotecnologias com a finalidade de priorizar áreas prospectivas para se realizar investigações geológicas de detalhe, como já feito em várias pesquisas de caráter exploratório ao redor do mundo (*e.g.* SHIVES et al., 2000; AIRO, 2002; FORD et al., 2007; AIRO & MERTANEN, 2008; HOLDEN et al., 2012; RAMOS et al., 2014; WEMEGAH et al., 2015; BEDINI & RASMUSSEN, 2018).

Neste contexto, o emprego de dados geofísicos, de sensoriamento remoto e espectroscopia de reflectância (aproximadamente entre faixa espectral desde 350 a 2500 nm)

se destaca, pois estas metodologias permitem a cobertura de amplas áreas – possibilitando a determinação de corpos magnéticos, zonas de alteração hidrotermal e identificação de unidades litológicas. Outra vantagem da utilização destes métodos é a determinação composicional sem contato direto com objetos e sem destruição de amostras. Desta forma, viabilizam a obtenção de informações estruturais, geomorfológicas e composicionais, permitindo uma caracterização de cunho geológico-estrutural de maneira mais rápida e assertiva, levando à definição de alvos exploratórios com mais chances de resultados positivos.

1.3 OBJETIVOS

Os objetivos do trabalho foram divididos em geral e específicos como seguem nos tópicos seguintes.

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo principal desta pesquisa abrange a integração de dados aerogeofísicos e de sensoriamento remoto (metodologias de estudo alternativas pouco utilizadas na região de Itapetim (PE) e Teixeira (PB) como forma de prospecção mineral) com dados de geologia de campo e petrografia para contribuir com conhecimento geológico e metalogenético da área de estudo.

1.3.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos da pesquisa são:

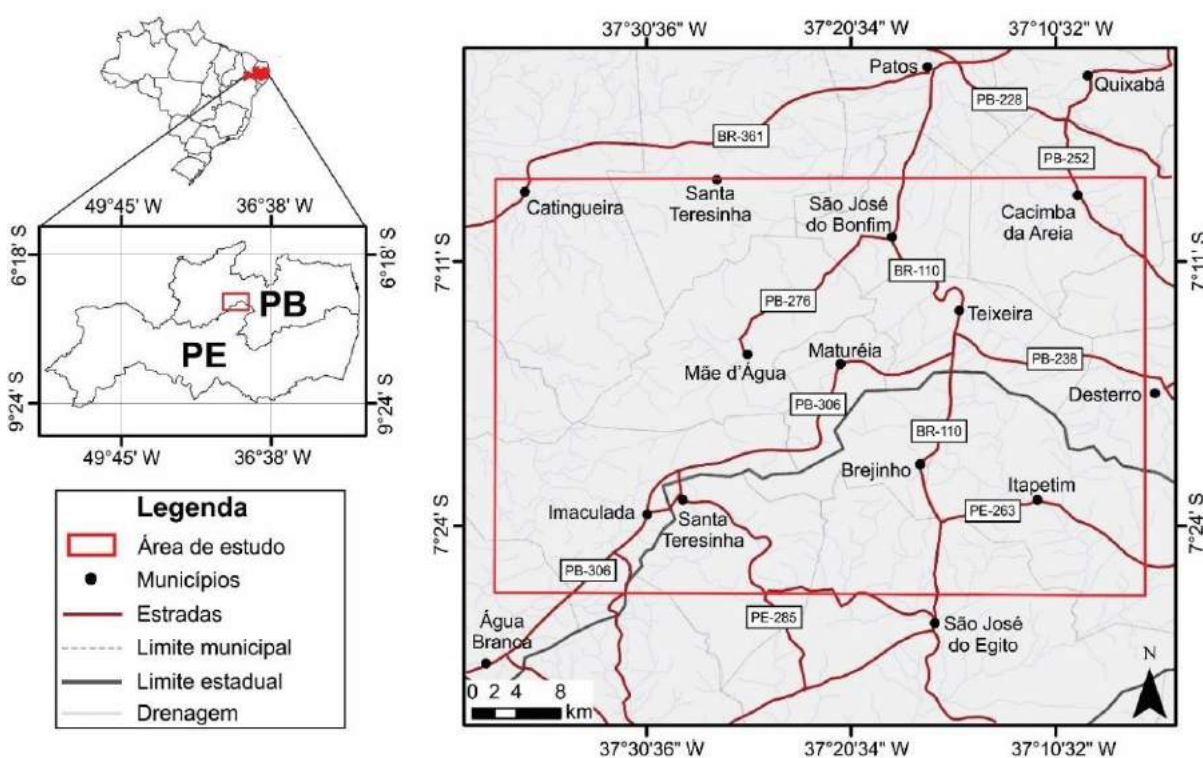
- a) determinar sítios potenciais/prioritários a ocorrências de mineralizações de ouro, com base na interpretação de dados aeromagnetométricos e aerogamaespectrométricos;
- b) gerar uma biblioteca espectral de referência (na região VNIR-SWIR) acerca das fases minerais de caráter regional e local (hidrotermal/metamórfica de garimpos da região) para servir como referência ao estudo de outros alvos similares presentes na Província Borborema;
- c) determinar os minerais de alteração associados com as mineralizações de ouro da área em apreço, assim como o controle estrutural;

- d) cartografar corpos graníticos através da identificação de fases minerais provenientes de intemperismo, com uso de imagens do sensor ASTER na região do VNIR-SWIR.

2 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo apresenta cerca de 2000 km² e está localizada no limite central entre os estados de Pernambuco e Paraíba, no Nordeste do Brasil (Figura 2). As principais vias de acesso são a BR-101 (via que liga Recife-PE a João Pessoa-PB), BR- 230, PB-228 e PB-238 (vias que ligam João Pessoa a Teixeira-PB).

Figura 2 - Mapa de localização da área de estudo na região limítrofe dos estados de Pernambuco (PE) e Paraíba (PB).

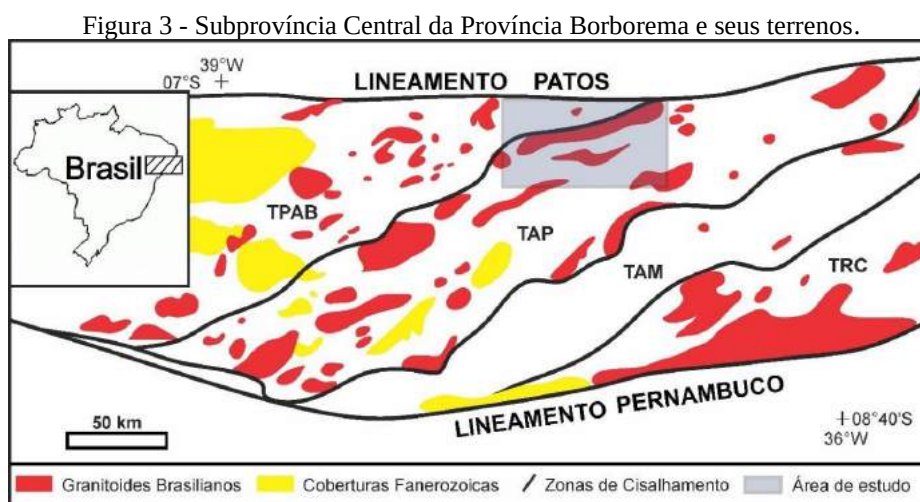


Fonte: A Autora, 2019.

*A base dos mapas é proveniente do banco de dados do IBGE.

3 GEOLOGIA REGIONAL

A Província Borborema (ALMEIDA et al., 1981), localizada na porção nordeste do Brasil, é caracterizada por um embasamento formado, essencialmente, por rochas gnáissicas e migmatíticas paleoproterozoicas, além de núcleos arqueanos disseminados (*e.g.* DANTAS et al., 2013; COSTA et al., 2015; SANTOS et al., 2017; LIMA et al. 2019). Estas sequências são cobertas por rochas metassedimentares e metavulcânicas Meso a Neoproterozoicas, as quais foram intrudidas por plútons graníticos associados à Orogênese Brasileira (VAN SCHMUS et al., 1995, 2008, 2011; BRITO NEVES et al., 2000, 2014, 2016; NEVES et al., 2006; SIAL & FERREIRA, 2016; BASTO et al., 2019; SANTOS et al., 2018). Cinco subprovíncias compõem a Província Borborema: Médio Coreaú, Ceará Central, Rio Grande do Norte, Central e Meridional (SANTOS et al., 2000; BRITO NEVES et al., 2000). O Distrito Aurífero de Itapetim localiza-se na Subprovíncia Central (Figura 3). Esta subprovíncia é delimitada pelos lineamentos (de direção E-W) Patos, ao norte, e Pernambuco, ao sul, e compreende os seguintes terrenos: São José do Caiano, Alto Pajeú, Alto Moxotó, Rio Capibaribe (SANTOS et al., 2010; VAN SCHMUS et al., 2011; SIAL & FERREIRA, 2016).



Fonte: Adaptado de Medeiros *et al.*, 2011.

*TPAB – Terreno Piancó-Alto Brígida, TAP – Alto Pajeú, TAM – Alto Moxotó e TRC – Rio Capibaribe.

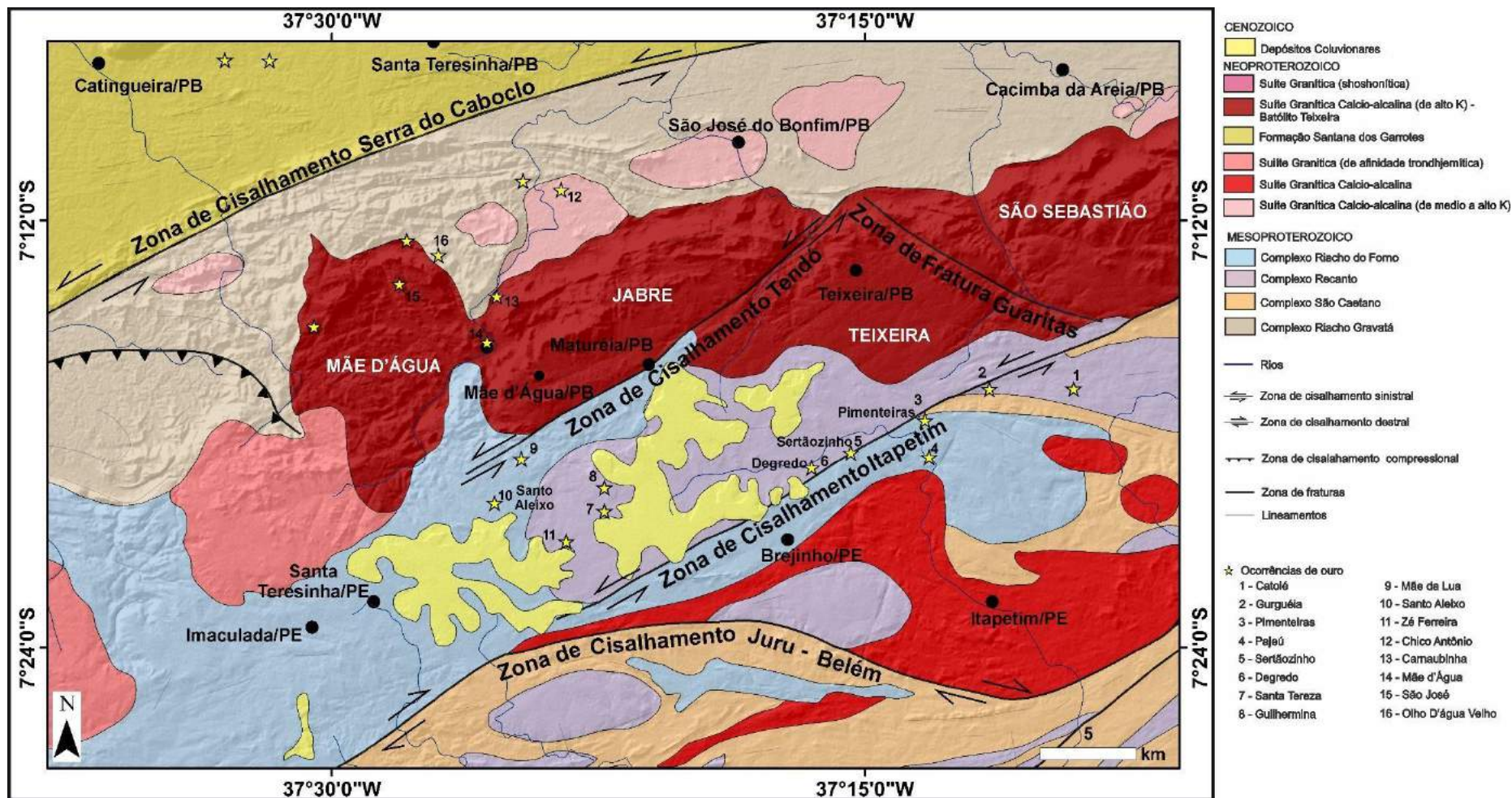
Interpreta-se que o desenvolvimento da Província Borborema é resultado da acreção de terrenos estabelecida em diferentes eventos orogenéticos (*e.g.*, SANTOS, 1995; BRITO NEVES et al., 2000, 2014). A Subprovíncia Central, particularmente, originou-se a partir de duas orogêneses: Cariris Velhos e Brasileira (SANTOS et al., 1997). Durante o período Toniano, a Orogênese Cariris Velhos foi responsável pela formação de *augen* gnaisses (a partir

do metamorfismo de antigos plútons graníticos) os quais encontram-se intrudidos em sucessões vulcânicas na porção central da Subprovíncia Central (CAMPOS NETO et al., 1994; SANTOS et al., 2010). A Orogênese Brasileira marca os estágios finais do Neoproterozoico, sendo responsável pelo desenvolvimento de uma complexa rede de zonas de cisalhamento de escala continental dispostas nas direções E-W (dextral) e NE-SW (sinistral), colocação de plútons graníticos e sieníticos e metamorfismo de baixo a alto grau (NEVES et al., 2006). Este último ciclo orogênico tem sido atribuído como concomitante aos principais eventos de formação de minérios na Província de Borborema, como os depósitos de Au-W-Mo do Cinturão de dobramentos do Seridó (Subprovíncia Rio Grande do Norte) (ARAÚJO, 2005; SOUZA NETO et al., 2008; SANTOS et al., 2014) e alguns depósitos de Ouro na Subprovíncia Central (COUTINHO, 1994).

O arcabouço litoestratigráfico da área estudada consiste numa sucessão de rochas graníticas, datadas do Neoproterozoico, intrudidas em complexos metavulcanossedimentares e gnáissico-migmatíticos mesoproterozoicos (FERREIRA & SANTOS, 2000; MEDEIROS, 2004) (Figura 4). Essas rochas são representadas por unidades, listadas da mais velhas para a mais nova, como: Complexo Riacho Gravatá, Complexo São Caetano, Complexo Recanto, Complexo Riacho do Forno, Formação Santana dos Garrotes e pulsos graníticos que incluem como representantes mais expressivos, o Plúton Brejinho e o Batólito Teixeira.

O Complexo Riacho Gravatá (*ca.* 920 Ma) representa uma unidade metavulcanossedimentar formada, essencialmente, por metapsamitos e metapelitos (apresentando estrutura rítmica e composição indicando a contribuição de rochas metavulcânicas ácidas, intermediárias e básicas), apresentando, geralmente, intercalações com lentes de rochas calcissilicáticas e carbonáticas (BITTAR, 1999).

Figura 4 - Mapa geológico da região do Distrito aurífero de Itapetim sobreposto ao modelo digital do terreno do SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) filtrado na direção 45 Az.



Fonte: Adaptado de Ferreira & Santos, 2000 e Archanjo *et al.*, 2008.

Obs.: As ocorrências de ouro não indicadas por números, não possuem denominação específica.

O Complexo São Caetano (ca. 856 Ma) compreende uma sequência metassedimentar, metamorfizada em fácies anfibolito (dominada por biotita-muscovita xisto ou metagrauvaca com granada, muscovita xisto e mármore), intercalada por rochas metavulcânicas que apresentam composições variando entre riolíticas, dacíticas ou basálticas (BRITO NEVES et al., 2005; SANTOS et al., 2017).

Os complexos Recanto e Riacho do Forno representam um conjunto de rochas graníticas que fazem parte da Suíte Cariris Velhos (FERREIRA & SANTOS, 2000; BRITO NEVES, 2005). O Complexo Recanto é representado por biotita e biotita-muscovita ortognaisses, com composição quartzo-monzonítica a monzogranítica, eventualmente, com textura de *augen*. Já o Complexo Riacho do Forno é representado por gnaisses equigranulares de composição sieno à monzogranítica (SANTOS, 1995; FERREIRA & SANTOS, 2000). Em geral, ambos os complexos são leucocráticos e, eventualmente, apresentam granada, turmalina e silimanita como minerais acessórios (BRITO NEVES, 2005).

A Formação Santana dos Garrotes é caracterizada por sequências de turbidíticas representadas, predominantemente, por biotita-muscovita xisto e filito com sericita e clorita, intercaladas com metagrauvaca e metassedimentos químicos ricos em Fe subordinados, contendo intercalações de rochas metavulcânicas básicas, intermediárias e ácidas (BITTAR, 1999; MEDEIROS, 2004).

Segundo Sial & Ferreira (2016), o magmatismo granítico na área de estudo ocorreu em três intervalos de tempo principais. O magmatismo inicial (620-650 Ma) é representado por plútons cálcio-alcálicos de alto-K (com epidoto magmático). O pulso seguinte (560-590 Ma) é dominado por magmas cálcio-alcálicos e ultrapotássicos sem epidoto magmático. O pulso magmático final (510-550 Ma) consiste em um conjunto de diques sieníticos peralcalinos/ultrapotássicos.

Especificamente, o Batólito de Teixeira, datado de 591 Ma (ARCHANJO et al., 2008), representa o pulso granítico mais expressivo da região estudada. Archanjo et al. (2008), considerando aspectos estruturais como a presença de zonas de estrangulamento e zonas de fraturas, dividem o Batólito de Teixeira em quatro segmentos: Mãe d'Água, Jabre, Teixeira e São Sebastião. O batólito foi definido, apesar de seu tamanho considerável (80 km de comprimento por 10 km de largura), como um corpo homogêneo de composição granítico-granodiorítica e textura equigranular fina a média, com exceção da região de Mãe d'Água, a qual apresenta textura porfirítica (MEDEIROS, 1995; SIAL & FERREIRA, 2016). Estudos de susceptibilidade magnética mostram que o Batólito Teixeira apresenta um comportamento

dominantemente paramagnético, havendo aumento de susceptibilidade magnética apenas em proximidade a zonas de fraturas (LIMA et al., 2000; ARCHANJO et al., 2008).

A evolução estrutural da área envolveu dois principais eventos deformacionais distintos (MEDEIROS, 2004; MEDEIROS et al., 2011). O primeiro, representado como evento tectônico tangencial (600-610 Ma), é marcado por foliação de baixo ângulo e por dobras em escala micro, meso e macro de direção NE-SW (MEDEIROS, 2004). Este padrão estrutural é observado no Complexo Riacho Gravatá e na Formação Santana dos Garrotes. As principais estruturas, associadas a este evento, observadas através de imagens multifonte (*e.g.* imagens de satélite e geofísica aérea) são lineamentos curvilíneos e esparsos (MEDEIROS, 2004; MEDEIROS et al., 2011). Durante este primeiro evento deformacional, foi formada a Zona de Cisalhamento sinistral Serra do Caboclo, que é caracterizada como uma estrutura extensa que representa o limite dos terrenos de Piancó-Alto Brígida e Alto Pajeú (MEDEIROS, 2004; SANTOS et al., 2010; SANTOS et al., 2017).

O segundo evento estrutural (580 ± 10 Ma) é marcado por foliação de alto ângulo associada à cinemática transcorrente e dobras simétricas (MEDEIROS, 2004; SANTOS, 2010). Alta densidade de lineamentos retilíneos a curvilíneos representa a característica mais evidente identificada através de análise de imagens de sensoriamento remoto óticas (MEDEIROS, 2004; MEDEIROS et al., 2011). As principais estruturas associadas a este evento na região do Distrito de Itapetim são a Zona de Cisalhamento Juru-Belém e o Lineamento Patos (ao norte da área de estudo) (MEDEIROS, 2004). Outras estruturas menores são a Zona de Fratura Guaritas e as zonas de cisalhamento Tendó e Itapetim (estas últimas de cinemática sinistral e direção NE-SW) (ARCHANJO et al., 2008). As duas primeiras estruturas cortam o Batólito Teixeira, enquanto a Zonas de Cisalhamento Itapetim corta, além deste batólito, os complexos Recanto, Riacho do Forno e São Caetano (FERREIRA & SANTOS, 2000).

Três fases de metamorfismo foram identificadas na área de estudo. A primeira alcançou fácies anfibolito superiores ($\sim 4,5$ Kbar e 700°C) e está indicada por um conjunto de rochas migmatíticas (COUTINHO, 1994; BITTAR, 1999). A segunda fase de metamorfismo está relacionada a um estágio de tectônica transcorrente, desenvolvido sob fácies anfibolito, responsável pela formação de rochas miloníticas (com temperatura e pressão chegando a 600°C e 5 Kbar, respectivamente). A terceira fase é resultante da alteração hidrotermal (processos de retrometamorfismo) em fácies sub xisto-verde, a temperaturas em torno de 340°C (COUTINHO, 1994). Além disto, Maia (2002) observou que processos de silicificação, carbonatação, cloritização, argilização e turmalinização, comumente observados nos setores

ricos em ouro, estão associados à última fase metamórfica.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA MINERALIZAÇÃO DE OURO

O ouro do Distrito de Itapetim está associado a veios de quartzo dispostos na direção N70°E (COUTINHO, 1994). Estes veios apresentam cor branca a cinza, mostram textura sacaroidal a maciça, podem apresentar geometria em *boudin* e estão dispostos, em geral, em concordância com a foliação milonítica (WANDERLEY, 1999). O setor garimpeiro Sertãozinho é caracterizado por *boudins* amendoados (o eixo mais longo é paralelo à foliação da rocha hospedeira) (SILVA FILHO, 1989). O setor Pimenteiras mostra *boudins* cilíndricos verticalizados (*pipes*), em que o eixo mais longo faz um ângulo alto com a foliação da rocha hospedeira (SILVA FILHO, 1989). A tabela 1 mostra as principais características destes e de outros importantes setores de ouro do Distrito de Itapetim, como, por exemplo, Degredo e Santo Aleixo.

Tabela 1 – Características dos principais setores garimpeiros do Distrito aurífero Itapetim.

Setor	Teor de ouro	Reserva de ouro	Rocha encaixante	Controle estrutural
Sertãozinho	5 g/t ^a	607 kg ^b	Biotita gnaiss ^e	<i>Boudins</i> amendoados ^b
Pimenteiras	4.1 g/t ^b - 8.5 g/t ^c	Não reportado	Biotita- muscovita xisto ^e	<i>Boudins</i> verticais ^b
Degredo	3 g/t ^c	158 kg ^d	Biotita gnaiss ^e	Veios de quartzo ^f
Santo Aleixo	Não reportado	Não reportado	<i>Augen</i> gnaiss ^f	Veios de quartzo ^f
Gurguéia	0.73 g/t ^b - 2 g/t	Não reportado	Biotita- muscovita xisto ^c	<i>Boudins</i> de quartzo ^c

Fonte: Adaptado de ^a CPRM, 1984; ^b Wanderley, 1999; ^c Silva Filho, 1989; ^d CPRM, 1985; ^e

Scheid & Ferreira, 1991; ^f Coutinho, 1994.

Ocasionalmente, auréolas de alteração hidrotermal são observadas em contato com veios de quartzo, seus tamanhos variam de 0,40 a 4,0 m e são caracterizadas, da porção proximal à distal, por zonas enriquecidas em (1) quartzo, (2) turmalina e quartzo, e (3) K-feldspato e

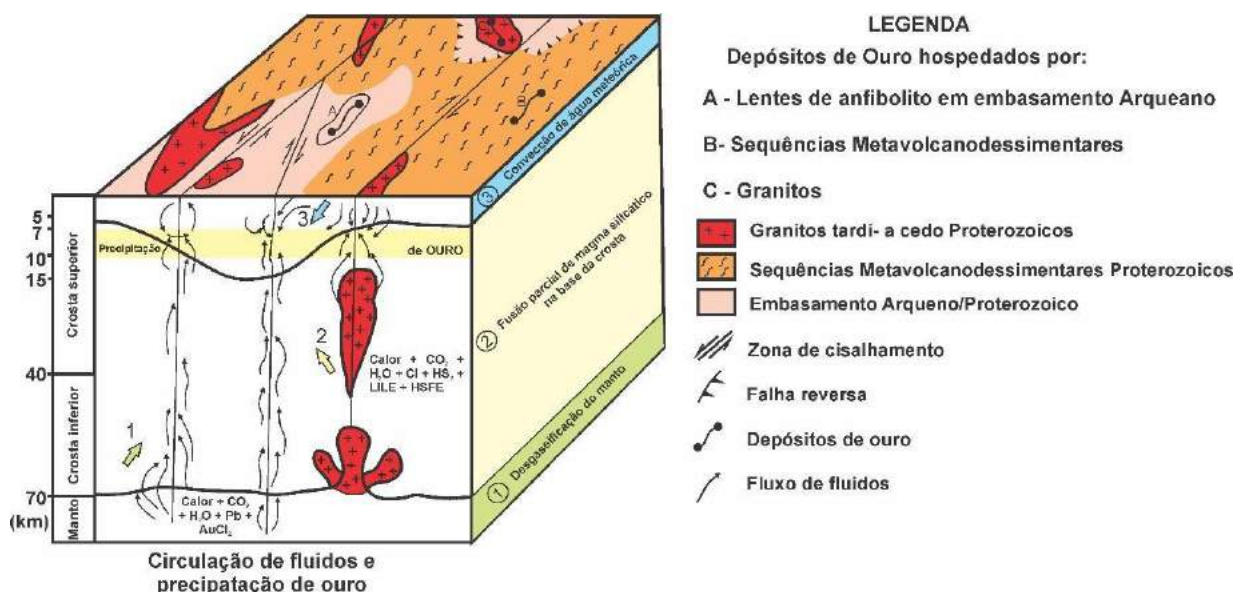
albita e (subordinadamente) quartzo e sericita (COUTINHO, 1994; COUTINHO & ALDERTON, 1998b). Este padrão de alteração é observado em diferentes rochas hospedeiras (*e.g.* xisto, gnaiss), o que sugere que a composição de fluido não foi afetada pela composição das rochas hospedeiras (COUTINHO, 1994; COUTINHO & ALDERTON, 1998b). Durante o evento hidrotermal, houve uma intensa adição de K, B e Si (e, subordinadamente, de Ti, Fe e Mn) que é associada ao desenvolvimento de feldspato potássico, muscovita, turmalina e quartzo (COUTINHO, 1994; COUTINHO & ALDERTON, 1998a).

Coutinho & Alderton (1998b) identificaram que os minerais de ganga presentes nos diferentes setores do Distrito aurífero de Itapetim são, além do quartzo, a turmalina (schorlita), feldspato potássico, muscovita, clorita e fluorita. Adicionalmente, Silva Filho (1989) observou, como minerais primários subordinados, pirita, pirrotita, calcita, arsenopirita, scheelita, ilmenita, magnetita, galena, molibdenita, zirconita e granada. Dentre os minerais secundários estão goethita, maghemita, covelita, calcocita, jarosita e piromorfita (COUTINHO & ALDERTON, 1998b).

3.1.1 Gênese de ouro

O ouro do Distrito aurífero de Itapetim é entendido como resultado de uma série de processos ocorridos durante a Orogênese Brasileira (COUTINHO, 1994; MAIA, 2002). De forma geral, tal evento colisional desencadeou a formação de zonas de cisalhamento de escala continental, bem como local, além da colocação de plútons graníticos (NEVES et al., 2006). Grande quantidade de fluidos foi formada a partir de desvolatilização do manto. Durante este processo, zonas de cisalhamento subsidiárias atuaram como condutos para passagem de tais fluidos hidrotermais, os quais transportaram uma variedade de metais para níveis crustais mais elevados, incluindo o ouro. A figura 5 sintetiza o modelo de mineralização.

Figura 5 - Diagrama esquemático mostrando o modelo de mineralização de ouro no Depósito aurífero de Itapetim.



Fonte: Adaptado de Coutinho, 1994.

De acordo com Maia (2002), o transporte e a deposição do ouro de Itapetim envolveu pelo menos três fatores principais previamente definidos por McCuaig e Kerrich (1998):

- interação entre fluido e a rocha encaixante: o ouro é transportado para níveis mais elevados da crosta, como um complexo tiosulfetado ($\text{Au}(\text{HS})^-$) e a interação entre tal complexo e silicatos/óxidos de ferro das rochas encaixantes, levam a desestabilização do ouro, como mostrado na reação: $\text{Au}(\text{HS})^- + \text{FeO} \rightarrow \text{Au} + \text{FeS}_2$ (McCuaig e Kerrich, 1998). A comum identificação de pirita em associação aos veios mineralizados na região de Itapetim representa o principal indício que tal reação hidrotermal atuou na precipitação de ouro na região.
- variação de pressão causada pelo processo de *crack seal*: durante o crescimento de veios, variação de pressão pode levar à imiscibilidade de fases. Tal mecanismo provoca uma redução na temperatura do fluido e na concentração de H_2S (liberado por desgasificação), além de subsequente aumento no pH do fluido, que provocaria a desestabilização do $\text{Au}(\text{HS})^-$, levando à precipitação de ouro. Em Itapetim, o mecanismo de *crack seal* é identificado através de veios "fitados" ou brechados e a imiscibilidade, marcada por dados de inclusões fluidas.
- mistura de fluidos de fontes profundas com águas meteóricas: inclusões fluidas

aquosas e dados isotópicos indicam a existência de interação e mistura de fluidos de fontes distintas, com provável interação de fluidos meteóricos (rico em água (H₂O) e baixa salinidade) a pressões mais baixas. As novas condições físico-químicas do sistema (temperatura mais baixa e ambiente oxidante) levaram a desestabilização de sulfetos e liberação de ouro.

De acordo com Coutinho (1994), três estágios de mineralização de ouro são observados a nível regional. O primeiro estágio, formado sob deformação frágil e atividade hidrotermal, é marcado pelo desenvolvimento e precipitação de minerais de titânio, óxidos de ferro, sulfetos e metais (como ouro (Au) e prata (Ag), precipitados como partículas micrométricas nas superfícies de sulfetos). O segundo estágio, ocorreu sob influência plutônica, e é caracterizado pela correlação positiva de ouro (Au) e chumbo (Pb) (galena) e deposição de sulfetos, óxidos e teluretos. Nesta fase, ouro (visível) foi liberado de sulfetos, sendo associado a sulfetos recristalizados (pirita e calcocita) e minerais de bismuto (Bi), selênio (Se) e telúrio (Te). O terceiro estágio apresenta o enriquecimento em chumbo (Pb), telúrio (Te), ouro (Au) e flúor (F).

Com relação à classificação genética da mineralização, alguns autores (*e.g.* COUTINHO, 1994; MAIA, 2002; ALMEIDA, 2003), considerando características como (1) associação com lineamentos regionais e zonas de cisalhamento secundárias presentes em terrenos metavulcanossedimentares, (2) atividade magmática concomitante com a mineralização de ouro (bem como associação espacial entre veios de quartzo e corpos graníticos), e (3) presença de fluidos aquo-carbônicos de baixa salinidade, classificam a mineralização do Distrito aurífero de Itapetim como um tipo *lode*, seguindo os fundamentos propostos por autores especialistas em ouro desta natureza, como Roedder (1984), Groves et al. (1998), McCuaig e Kerrich (1998), Hronsky & Groves (2008), Groves & Santosh (2015).

4 MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia utilizada nesta pesquisa foi composta por atividades de gabinete, campo e laboratório, detalhadas nas seguintes etapas enumeradas de acordo com a ordem de execução:

4.1 ANÁLISE GEOFÍSICA

A etapa envolveu análise qualitativa de dados aerogeofísicos – métodos magnetométricos (mapas de campo magnético anômalo, da amplitude do sinal analítico e da primeira derivada vertical) e gamaespectométricos (mapas de canais de K, Th e U, e de composição ternária), cedidos pela CPRM. Os dados geofísicos foram obtidos do Projeto Aerogeofísico Pernambuco-Paraíba, realizado entre 2009 e 2010 (LASA & PROSPECTORS, 2010).

4.2 IMAGEAMENTO

Análise de imagem do sensor ASTER de 06 de dezembro de 2006, em nível 7XT, representada por 9 bandas da faixa do visível ao infravermelho de ondas curtas corrigidas para refletância e *crosstalk*. Esta imagem foi processada por meio das técnicas de composição colorida no espaço de cores RGB e aritmética de bandas, a fim de destacar áreas marcadas por vegetação fotossinteticamente ativa, caulinita e óxidos de ferro.

4.3 ETAPAS DE CAMPO

Duas etapas de campo foram realizadas nos meses de Fevereiro/2018 e Maio/2018. As etapas tiveram 4 e 3 dias de duração, respectivamente. Foram visitados 48 pontos, os quais foram devidamente georreferenciados, utilizando o GPS *Garmim eTrex 10*, fotografados, amostrados e descritos. Outros equipamentos usados em campo foram: bússola, lupa de bolso, martelo estratigráfico e marreta. Na descrição de afloramentos, foram incluídos aspectos como tipo de rocha, mineralogia, texturas e estruturas (lineação, foliação, fraturas, falhas, dobras).

4.4 AMOSTRAGEM

A etapa de amostragem incluiu a coleta de 77 amostras de rocha e 7 de solo. Tais amostras representam os principais litotipos associados às unidades regionais e às áreas de garimpos.

4.5 ANÁLISES DE ESPECTROSCOPIA DE REFLECTÂNCIA

Foram realizadas análises espectrais das 84 amostras (rocha e solo) coletadas em campo no Laboratório de Espectroscopia de Reflexão do Instituto de Geociências da UNICAMP, em junho de 2018. O equipamento utilizado foi o espectrorradiômetro portátil *FieldSpec®4 Standard Resolution*, da *Analytical Spectral Devices*. O aparelho é caracterizado por 2151 canais espectrais que fazem leituras de refletância num intervalo entre 350 e 2500 nm. Na faixa VNIR (visível e infravermelho próximo: 350 a 1000 nm), a resolução espectral é de 3 nm, enquanto na faixa SWIR (infravermelho de ondas curtas: 1000 a 2500 nm), a resolução espectral é de 10 nm (MALVERN PANALYTICAL, 2018). As medidas foram adquiridas com uma sonda de contato e a calibração do equipamento foi feita com uso de placa lambertiana *Spectralon®* da *Labsphere*. A quantidade de medidas de refletância obtidas em cada amostra variou entre 3 e 16, totalizando 491 espectros.

4.6 PETROGRAFIA

A etapa envolveu a descrição de 40 lâminas delgadas, dentre as quais, 20 relacionadas às unidades litológicas regionais e 20 de amostras de rochas nas proximidades dos setores garimpeiros Santo Aleixo e Degredo. Além de tomada de fotomicrografias para ilustração dos principais aspectos observados.

5 RESULTADOS

Os principais resultados da presente dissertação de mestrado estão compilados em dois artigos científicos. O tópico 5.1 contém os resultados referentes às análises dos dados aerogeofísicos, os quais estão apresentados no artigo intitulado “*The role of airborne geophysics on the investigation of gold occurrences in the Itapetim region, Borborema Province, NE Brazil*”, publicado na revista *Brazilian Journal of Geology* (Figura 6).

Neste primeiro artigo, é mostrada uma análise combinada de dados geofísicos aéreos (magnetometria e gamaespectrometria) e aspectos de campo da região de Itapetim. O objetivo principal desta abordagem foi a identificação de zonas deformadas e zonas de alteração hidrotermal que podem revelar a ocorrência de mineralização de ouro. Os resultados mostram que há predomínio de lineamentos geofísicos orientados nas direções NE-SW e E-W, sendo que estas estruturas apresentam correlação com as principais zonas de cisalhamento e falhas da região. Além disto, os dados de magnetometria indicam que áreas fortemente magnetizadas, posicionadas ao longo da Zona de Cisalhamento Itapetim e no contorno externo do Batólito de Teixeira, representam os principais controles para as ocorrências de ouro. Nos dados radiométricos, é possível observar o enriquecimento de K que é correlacionado, em campo, a regiões marcadas por assembleia mineral hidrotermal dominada por quartzo, feldspato potássico e turmalina. Com base na integração dos dados obtidos, foi produzido um mapa integrado no qual foram apontados dez novos alvos de possível mineralização de ouro.

O tópico 5.2 contém os resultados referentes às análises de dados de espectroscopia de reflectância e dados do sensor ASTER, unificados no manuscrito intitulado “*Geological and spectral characterization of the Itapetim gold District, Northeastern Brazil, using reflectance spectroscopy and ASTER data*”, submetido na revista *Anais da Academia Brasileira de Ciências* (Figura 7).

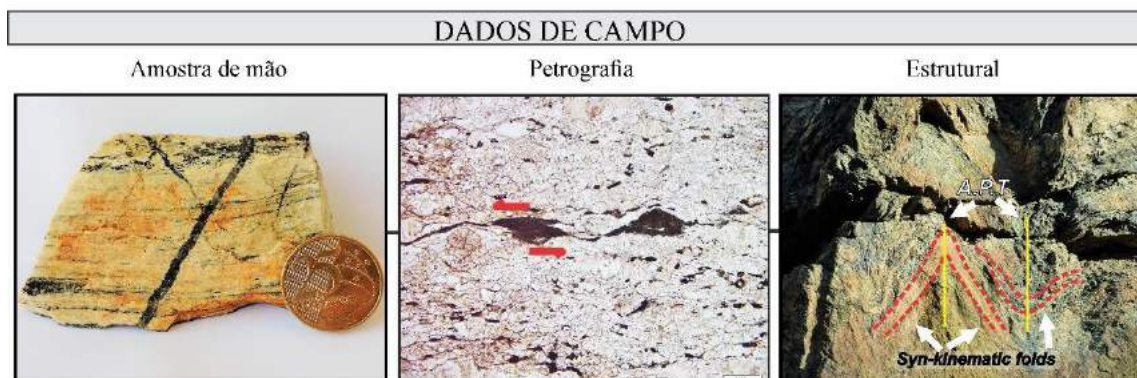
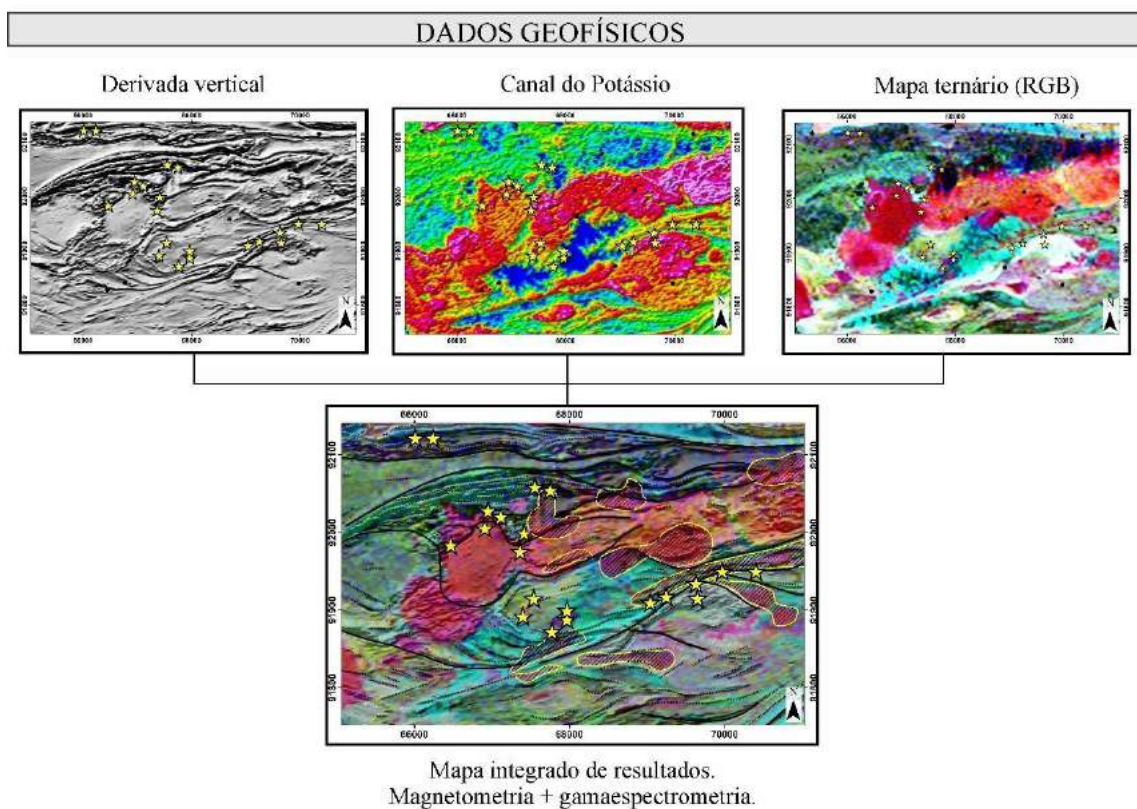
O segundo artigo trata da caracterização geológica e espectral das unidades regionais e litologias locais associadas às áreas mineralizadas em ouro, inclui também dados do sensor ASTER usados para cartografar corpos graníticos através da presença de minerais resultantes do intemperismo, como a caulinita. A caracterização geológica envolveu descrição de dados de campo e análise de 40 lâminas delgadas das litologias mais representativas. A caracterização espectral foi baseada na análise de 491 curvas espectrais, interpretadas visualmente e balizadas por estudos espectrais de referência (*e.g.* PONTUAL *et al.* 2008). Através desta análise, os principais minerais associados a cada litologia foram identificados. Pôde-se, também, avaliar a

resposta espectral de diferentes setores garimpeiros (Santo Aleixo e Degredo) e, assim, constatar os principais minerais hidrotermais (e.g. turmalina, epidoto). Resultados de aritméticas de bandas aplicadas em imagem ASTER mostram boa correlação entre áreas enriquecidas em caulinita e corpos graníticos.

Figura 6 - Esquema ilustrado acerca da metodologia utilizada no primeiro artigo, resultante do presente projeto de mestrado.

“THE ROLE OF AIRBORNE GEOPHYSICS ON THE INVESTIGATION OF GOLD OCCURRENCES IN THE ITAPETIM REGION, BORBOREMA PROVINCE, NE BRAZIL”

(O papel da aerogeofísica na investigação de ocorrências de ouro na Região de Itapetim, Província Borborema, NE, Brasil)

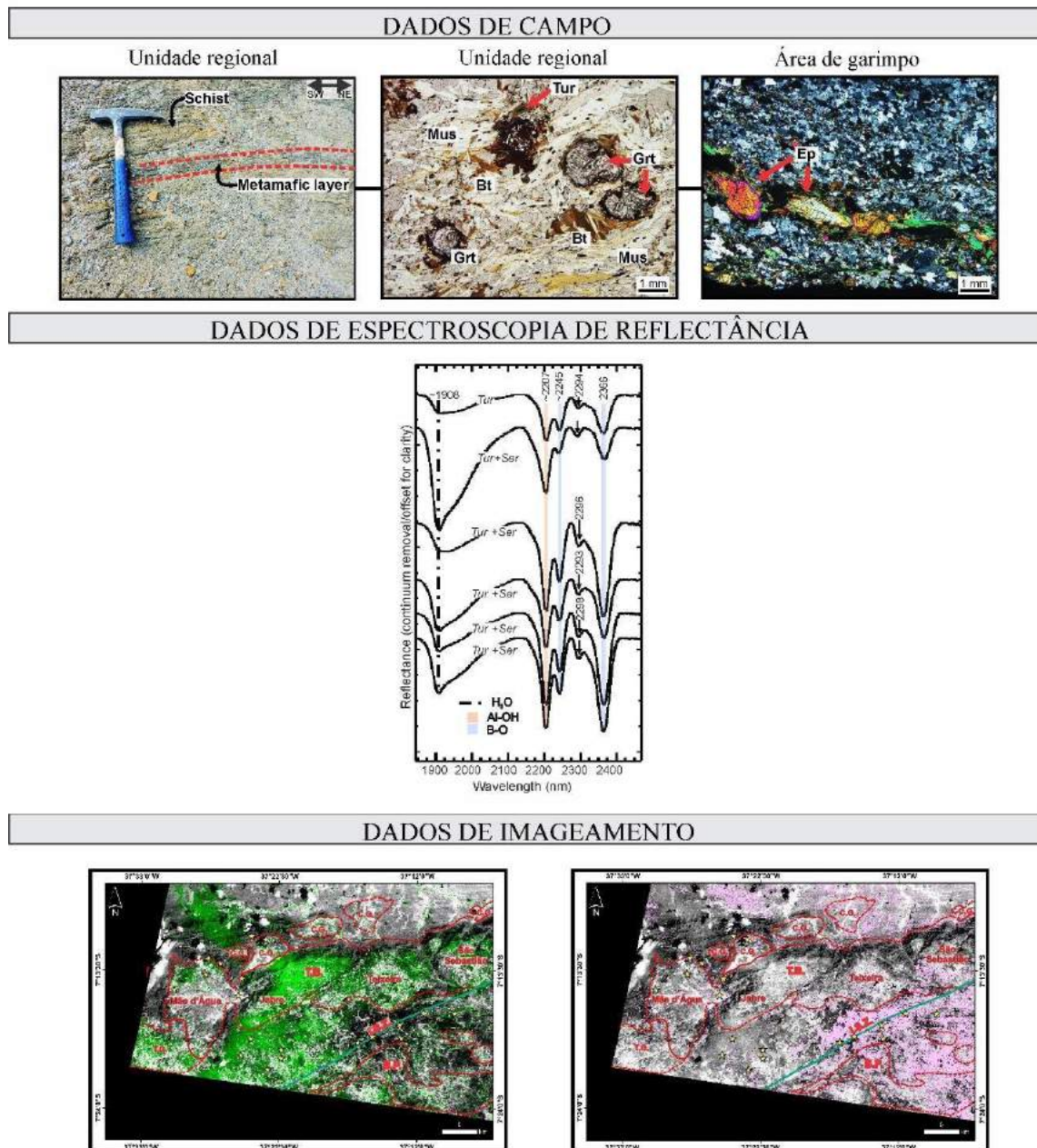


Fonte: A Autora, 2019.

Figura 7 - Esquema ilustrado acerca da metodologia utilizada no segundo artigo, resultante do presente projeto de mestrado.

“GEOLOGY AND SPECTRAL CHARACTERIZATION OF THE ITAPETIM GOLD DISTRICT REGION, NORTHEASTERN BRAZIL, USING REFLECTANCE SPECTROSCOPY AND ASTER DATA”

(Caracterização espectral da região do distrito aurífero de Itapetim, nordeste do Brasil, usando espectroscopia de reflectância e dados do ASTER)



Fonte: A Autora, 2019.

5.1 THE ROLE OF AIRBORNE GEOPHYSICS ON THE INVESTIGATION OF GOLD OCCURRENCES IN THE ITAPETIM REGION, BORBOREMA PROVINCE, NE BRAZIL

Artigo publicado na revista *Brazilian Journal of Geology* em setembro de 2019.

Authors:

Laís Cristina Leite Pereira¹

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1811-7015>

Lauro Cézar Montefalco de Lira Santos¹ **ORCID ID:** <http://orcid.org/0000-0001-6098-1873> **Thais Andressa Carrino¹**

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-8528-5225>

¹ Departamento de Geologia, Universidade Federal de Pernambuco, Av. da Arquitetura, s/n, 50740-550, Recife (PE), Brazil

Corresponding author: Laís Cristina Leite Pereira

E-mail: leite_lais@hotmail.com

ABSTRACT

We present a combined analysis of airborne geophysical data (magnetics and gamma-ray spectrometry) and field aspects of the Itapetim lode gold District region aiming the identification of structurally deformed and hydrothermally altered zones, which are suggestive of gold mineralized sectors. The main geophysical lineaments are oriented in NE-SW and E-W directions and display a clear correlation to the major gold-bearing structures in the region. In the magnetic maps, the key pathfinder for gold occurrences is their association with strongly magnetized areas positioned along the Itapetim Shear Zone and outer contour of Teixeira Batholith. In the field, such structures are materialized in protomylonitic and mylonitic rocks presenting evidence of ductile and brittle deformation, whereas kinematic criteria are suggestive of a transpressional tectonic regime. In addition, the main radiometric pattern is characterized by K enrichment, which is correlated to a hydrothermal mineral assemblage dominated by quartz, potassium feldspar and tourmaline. Based on the integration of the obtained data, we produced an integrative map, locating ten new target areas of possible gold mineralization, which is correlative to other well-known lode deposits in NE Brazil and Africa.

Keywords: Airborne geophysics, lode-type gold deposits, Itapetim gold District, Borborema Province, hydrothermal alteration.

INTRODUCTION

The occurrence and concentration of gold in the continental crust requires a combination of several geological processes, including specific tectonic settings, unique structural framework and successive episodes of rock-fluid interaction (Groves *et al.* 2003 and references therein). Orogenic-related (lode-type) deposits are established in accretionary and collisional orogenic systems, mainly in the late stages of subduction, triggered by crustal shortening via compressional and transpressional/transcurrent regimes (Groves *et al.* 2003, 2018, Goldfarb & Groves 2015). General geological aspects of these deposits comprehend (1) association with translithospheric faults, (2) occurrence in terranes that experienced greenschist facies metamorphism, (3) hydrothermal alteration, and (4) a predominant quartz, carbonate, mica, chlorite, pyrite, scheelite and tourmaline paragenesis (McCuaig & Kerrich 1998). Large-scale ductile shear zones are regarded as tectonic corridors for fluid percolation and subsequent metal concentration during metamorphism of oceanic rock sequences or de-volatilization of the sediment wedge above subduction slabs (Hronsky & Groves 2008, Groves & Santosh 2015).

The Borborema Province in NE Brazil is a complex Neoproterozoic orogenic system that has experienced several episodes of collision and accretion tectonics resulting in a complex array of deep-seated shear zones that present continuity along major African mobile belts (Santos & Medeiros 1999, Brito Neves *et al.* 2000, Archanjo *et al.* 2008, Santos *et al.* 2017a). Important mineralization sites in the province are restricted to some domains, including the Seridó Belt (Northern Borborema Province) that hosts Be-Ta-Sn- Li-bearing pegmatites (*e.g.*, Baumgartner *et al.* 2006, Santos *et al.* 2014) and W-Mo-Au- Bi-Te in skarns lenses (*e.g.*, Souza Neto *et al.* 2008, Hollanda *et al.* 2017). On the other hand, Au-bearing lithotypes are present in the Central Borborema Province, usually associated to large-scale shear zones (Coutinho 1994, Coutinho & Adherton 1998, Santos *et al.* 2014). Between the Pernambuco and Paraíba states, gold mineralization is related to the Itapetim gold District, which is considered the best-known example of Au mineralized quartz lodes hosted in supracrustal (*e.g.*, biotite-muscovite schist and biotite gneiss) and granitic rocks of the central Borborema Province (Scheid & Ferreira

1991, Coutinho 1994, Santos *et al.* 2014). In the region, gold-bearing rocks occur discontinuously along an area 25 km long by 0.2 km wide (Wanderley 1999), being considered as a classical example of orogenic gold deposit (Coutinho 1994, Maia 2002, Almeida 2003).

Over the last decades, airborne magnetic and gamma-ray data has been widely applied in different areas of earth sciences, such as geological mapping (*e.g.*, Dickson & Scott 1997, Madrucci *et al.* 2003, Metelka *et al.* 2011) and tectonic studies (*e.g.*, Patra *et al.* 2016, Oskooi & Abedi 2015, Santos *et al.* 2017b). Concerning exploration targets, they have been successfully applied in the study of gold deposits associated with major structures and/or to hydrothermally altered areas over the globe (*e.g.*, Shives *et al.* 2000, Airo 2002, Airo & Mertanen 2008, Holden *et al.* 2012, Ramos *et al.* 2014, Wemegah *et al.* 2015, Bedini & Rasmussen 2018).

In general, the geological characteristics of the Itapetim region (*i.e.*, association of gold mineralization to shear zones and granitic bodies) are favorable to the use of airborne geophysics as a tool to provide a better geological and structural background to this important economic district. In this paper, we aim to (1) determine the main general and local structural framework of the area using airborne magnetics and (2) to analyze the main characteristics of radiometric images, including maps of individual counts, K/eTh ratio and ternary composition. Such data are integrated mesoscopic and microscopic structural observations as an attempt to foment new information for further prospective campaigns.

GEOLOGICAL SETTING

The Borborema Province is located in the northeastern portion of Brazil and represents one of the major Neoproterozoic structural provinces of South America (Almeida *et al.* 1981). In general, it comprises basement domains formed by Paleoproterozoic gneissic and migmatitic rocks and some Archean nuclei (Dantas *et al.* 2013, Costa *et al.* 2015, Santos *et al.* 2015, 2017a, Lima *et al.* 2019) that are interleaved or partially covered by Meso- to Neoproterozoic metasedimentary and metavolcanic sequences and terranes, being later intruded by several Ediacaran granitic plutons associated to the Brasiliano Orogeny (Van Schmus *et al.* 1995, 2008, 2011, Brito Neves *et al.* 2000, 2014, 2016, Neves *et al.* 2006, Sial & Ferreira 2016, Basto *et al.* 2019, Santos *et al.* 2018). Based on the general displacement of the major shear zones (*i.e.* Patos and Pernambuco lineaments), the province is divided into three subprovinces: Northern,

Transversal and Southern (Santos *et al.* 2000, Brito Neves *et al.* 2000) (Fig. 1A).

The development of Borborema Province has been interpreted as a result of systematic episodes of terranes accretion during the Neoproterozoic in the light of the West Gondwana Assembly (Santos 1995, Brito Neves *et al.* 2000, 2014, Santos *et al.* 2018). See Neves (2003, 2018) and Neves *et al.* (2006) for a different interpretation for the Neoproterozoic evolution of the province. During the Brasiliano orogenic cycle, several strike-slip, thrust and suture zones (Cordani *et al.* 2013, Ganade de Araújo *et al.* 2014) were developed, and part of them has been attributed as coeval with the main Neoproterozoic ore-forming events in the province, such as the Au, W-Mo and W-Mo- gold deposits in the Northern Subprovince (Luiz-Silva *et al.* 2000, Araújo *et al.* 2005, Souza Neto *et al.* 2008, Santos *et al.* 2014, Hollanda *et al.* 2017) and gold and sulfide occurrences in the Central Subprovince (Coutinho 1994, Coutinho & Alderton 1998).

The Central Subprovince cover the São José do Caiano, Piancó-Alto Brigída, Alto Pajeú, Alto Moxotó and Rio Capibaribe terranes, that are limited by regional shear zones. The studied area is located in the northern boundary of the Alto Pajeú Terrane and its lithostratigraphic framework consists of Meso- to early Neoproterozoic gneissic- migmatitic and metavolcanosedimentary complexes that are intruded by late Neoproterozoic granitic suites (Bittar 1999, Santos 1996, Ferreira & Santos 2000, Medeiros 2004, Fig. 1B). The most important unit of this terrane is the *ca.* 856 Ma São Caetano Complex, that is composed by pelitic metasedimentary (muscovite-biotite gneiss with garnet, muscovite schist, marble) and meta-volcanoclastic rocks. The Riacho Gravatá Complex (*ca.* 920 Ma) is another important metavolcanosedimentary unit constituted by basic to acidic metavolcanic rocks, metapelites and metapsamites. Other late Mesoproterozoic to early Neoproterozoic units are the Riacho do Forno and Recanto metagranitic and migmatitic rocks, whose protoliths are related to the Cariris Velhos orogeny (*ca.* 1000-920 Ma; Santos *et al.* 2010).

The youngest supracrustal unit of the region is the Santana dos Garrotes Formation (*ca.* 730 Ma), formed by metaturbidites (biotite-muscovite schist and phyllite with sericite and chlorite) and acidic to intermediate metavolcanic rocks (Medeiros 2004). The intrusive late Neoproterozoic granitic rocks in the area have calc-alkalic, shoshonitic, and trondhjemitic affinities (Ferreira & Santos 2000, Sial & Ferreira 2016). The Teixeira Batholith (*ca.* 591 Ma) represents one of the most expressive granitic pulses in the study area. Archanjo *et al.* (2008)

divided the batholith into four major regions: Mãe d'Água, Jabre, Teixeira and São Sebastião, considering structural aspects as the presence of pinched, sheared and fractured zones (Fig. 1B).

The studied area is marked by gentle to vertical dipping foliation as well as NE- SW trending regional folds, which are related to regional scale shear zones (Medeiros 2004). For instance, the NE-SW sinistral trending Serra do Caboclo Shear Zone represents the limit of the Piancó-Alto Brígida and Alto Pajeú terranes, whereas the Patos Lineament marks the boundary between the Northern and Central subprovinces (Santos & Medeiros 1999, Brito Neves *et al.* 2000).

GENERAL ASPECTS OF THE ITAPETIM GOLD DISTRICT

Early regional investigations describe the gold mineralization in the Itapetim District as associated with quartz veins that occur along strongly deformed schists of the São Caetano Complex and metagranites and orthogneisses related to Neoproterozoic orogenic episodes (Coutinho 1994). These veins occasionally present slight wall-rock alteration characterized from the inner to distal parts by zones enriched in (1) quartz, (2) tourmaline and some quartz, and (3) potassium feldspar and albite, and minor quartz and sericite (Coutinho 1994, Coutinho & Alderton 1998). This pattern is noticed in different host lithotypes (*e.g.*, schist, gneiss), which suggests that the fluid content was not affected by the chemistry of host rocks (Coutinho 1994, Coutinho & Alderton 1998).

Ferreira & Santos (2000) registered 21 gold occurrences over the Itapetim gold District (Fig. 1B) and three of them exhibit significant gold content values: Degredo, Sertãozinho and Pimenteiras. The Degredo and Sertãozinho sectors are hosted in by biotite gneisses (Scheid & Ferreira 1991), and presented an average gold content of 3 g/t (Silva Filho 1989) and 5 g/t (CPRM 1984), respectively, whilst the Pimenteiras sector, which is hosted by biotite-muscovite schists (Scheid & Ferreira 1991), reached up 4.1 g/t (Wanderley 1999).

The mineralized bodies show variable dimensions. Their length and width achieved, respectively, 10 to 12 m and 1.5 to 2.0 m (Wanderley 1999). In general, they show a boudin geometry concordant to the mylonitic foliation (Wanderley 1999). Sertãozinho sector is characterized by almond-shaped boudins, while Pimenteiras sector shows cylindrical boudins (pipes) disposed in the vertical direction (Silva Filho 1989).

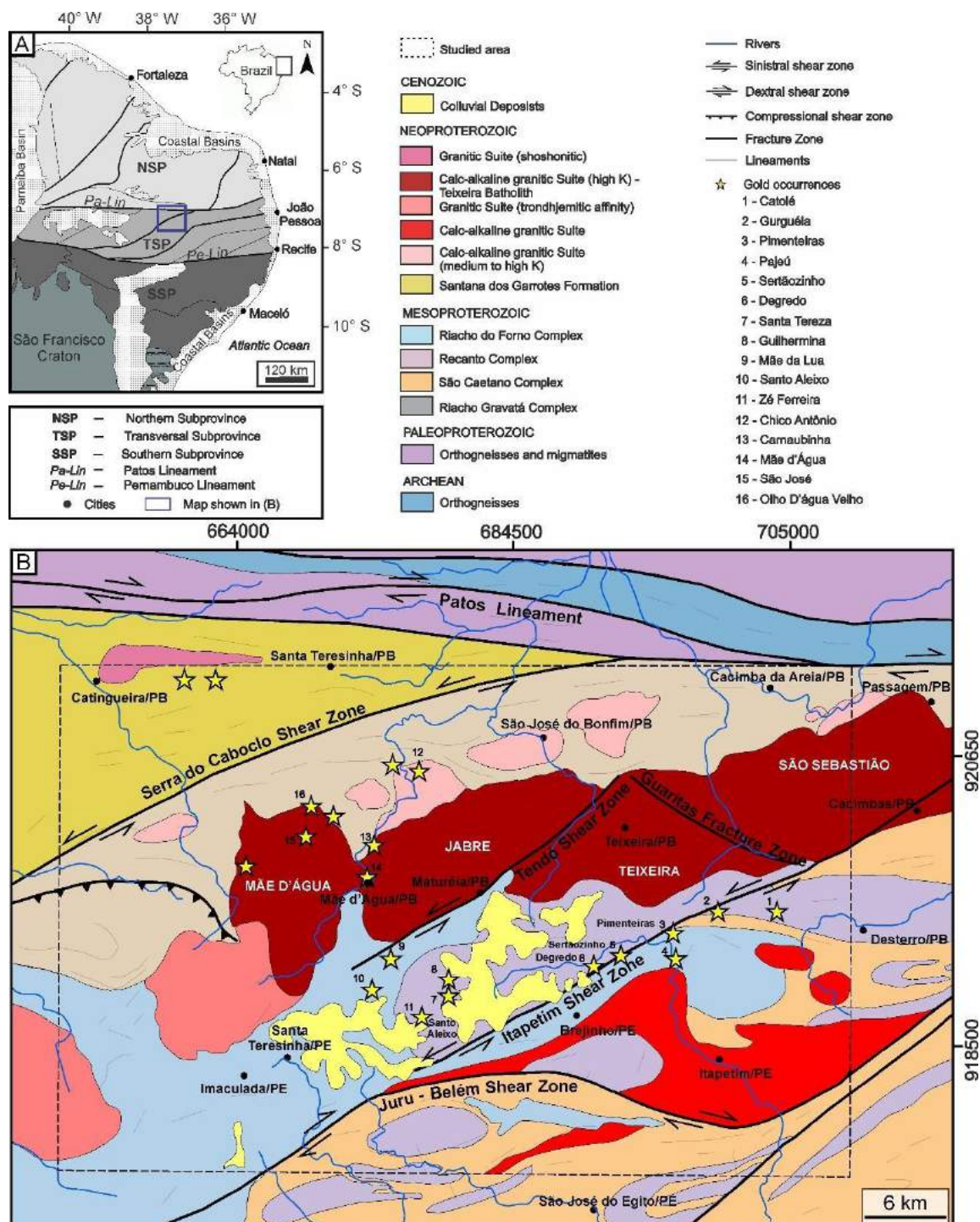


Figure 1. (A) Simplified map of Borborema Province and subprovinces (modified from Santos *et al.* 2014). (B) Geologic map of the Itapetim Gold District region (modified from Ferreira & Santos 2000, Archanjo *et al.* 2008) and the location of the gold occurrences. PB = State of Paraíba, PE = State of Pernambuco. Obs.: Gold sectors non-referenced with numbers do not have a specific nomenclature.

MATERIAL AND METHODS

The geophysical data used in this study was obtained through the Pernambuco- Paraíba Airborne Geophysical Project managed by the Geological Survey of Brazil (CPRM) between 2009 and 2010 (LASA & Prospectors, 2010). The flight (N-S) and tie (E-W) lines were spaced at 500 and 10,000 m, respectively. The nominal flight height was 100 m and the interval of the measurements was 0.1 s for magnetic and 1 s for gamma-ray spectrometry. The data related to gamma-ray spectrometry (K, eTh, eU channels) and magnetics (anomalous magnetic field) were previously gridded by CPRM using the minimum curvature and the bidirectional techniques, respectively, and a cell size of 125 m.

In relation to the magnetic data, the anomalous magnetic field and the images of the first vertical derivative (DZ) and the analytic signal amplitude (ASA) were used for visual interpretation of structural pattern, revealing the location and major direction of shear and faults zones, as well as the anomalies associated to granitic bodies, and their relations with gold occurrences. The DZ filter is used to enhance high frequencies, in order to eliminate long-wavelength regional effects and attenuate the effects of adjacent anomalies (Milligan & Gunn 1997). In general, ASA filter is used as an edge-detection tool (*e.g.* Roest *et al.* 1992) however, it might have been carefully used, mainly in low latitude areas, because of its dependency on aspects as observation surface, dipping and proximity of magnetic bodies in the area (*e.g.*, Huang & Guan 1998, Li 2006).

The airborne gamma-ray spectrometry data was used to identify the distribution and intensities of radioactive elements (K, eTh and eU) over the main lithologies through the qualitative analysis of individual channels and RGB ternary composition image of K, eTh and eU, leading to set up a litho-geophysical map. In addition, the K/eTh ratio image was also analyzed to determine where the relative concentrations of K were elevated compared to Th.

Magnetic and radiometric lineaments were qualitatively interpreted. These lineaments were divided into two categories: major, which are related to unit limits and/or shear zones, and secondary, which are associated to minor, linear/curvilinear segments. Rose diagrams made with the directions of magnetometric lineaments were also produced. All the presented maps are in UTM coordinates, placed on the WGS 84 datum and 24S zone.

In field, three of the 21 gold occurrences registered in Itapetim gold District were visited (Pimenteiras, Degredo and Santo Aleixo) and the major results obtained here about

hydrothermal mineral assemblages are related to these mineralized areas. Mineral abbreviations used in field and thin section pictures follow the standard suggested by Whitney & Evans (2010).

RESULTS

AIRBORNE MAGNETIC DATA

The structural pattern of the study area is marked by the predominance of NE-SW magnetic lineaments, but E-W and NW-SE alignments occur subordinately. The length of the lineaments varies from around 1 to 40 km, as observed in the magnetic anomalies image (Fig. 2). ASA and DZ images and the respective interpreted lineament maps are shown in Figure 3.

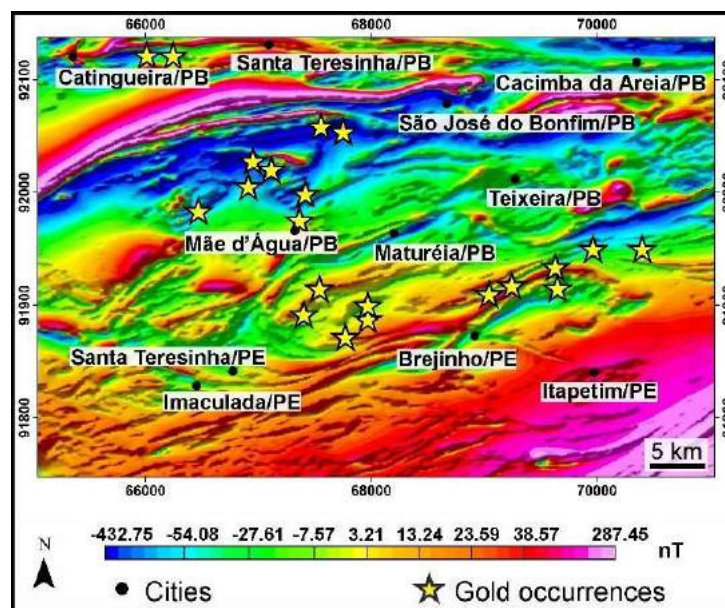


Figure 2. Magnetic anomalies image of Itapetim gold District region and location of gold occurrences. PB = State of Paraíba, PE = State of Pernambuco.

Two main types of magnetic anomalies could be distinguished: zones of strong gradient ($\sim 0.100\text{--}0.259$ nT/m), and zones of weak gradient (< 0.050 nT/m; Fig. 3A). The former is represented by linear structures occurring in the northern and southeastern portions of the area, generally showing a rough surface (high spatial frequency). The second type is more frequent in the central-south sectors and is characterized by smooth magnetic relief, showing, punctually, scattered magnetic highs. Close to Mãe d'Água, Teixeira and Itapetim cities, these zones of weak gradient have a relatively circular/ellipsoidal shape, outlined by strongly high gradients

(Figs. 3A and B) whose pattern is spatially related to the Teixeira Batholith. The gold occurrences registered around the batholith (about six) are associated with those magnetic highs and are concentrated in the north edge of Mãe d'Água sector.

The NE-SW Serra do Caboclo Shear Zone, indicated as a major lineament in the NW sector (Figs. 3C and D), shows the strongest and most continuous magnetic anomalies, being the wider structure of the region, also marking a series of secondary lineaments in its range of influence. The strong positive anomalies located in the north of study area (close to Santa Teresinha and Cacimba da Areia cities) coincide with mapped gold occurrences and are closely related to the crustal influence of the Patos Lineament. Despite the low coverage zone, it is still possible to observe that the magnetic lineaments are oriented E-W direction (Figs. 3C and D).

The signature of the NE-SW Itapetim Shear Zone is quite variable. It crosscuts the eastern part of study area and is characterized by medium magnetic gradients (~ 0.030 -

0.050 nT/m; Fig. 3A) in its boundaries and high gradients (~ 0.050 - 0.150 nT/m; Fig. 3A) in its central sector. The strongly magnetized region in the center of the Itapetim Shear Zone (~ 25 km by 3 km; Fig. 3A) has substantial importance because of the presence of gold occurrences (about six), including three of the most voluminous: Sertãozinho, Pimenteiras and Degredo (Silva Filho 1989, Wanderley 1999).

The Tendó Shear Zone is characterized as a narrow magnetic lineament that crosscuts and borders the Teixeira Batholith, in the NE-SW direction, between Maturéia and Teixeira cities (Figs. 3A and B). The contour of Juru-Belém Shear Zone, unlike the other structures, was poorly defined through the magnetic data. Only sparse medium to high gradients (~ 0.030 - 0.100 nT/m; Fig. 3A) were observed, possibly due to the low amount of magnetic minerals in its total length.

In spite of the existence of a set of three gold occurrences, associated with medium to low gradient (~ 0.010 - 0.020 nT/m; Fig. 3A) in the central region of study area, the majority of gold occurrences have in common the positioning in zones of high or extremely high gradient (~ 0.100 - 1.500 nT/m; Fig. 3A), and emplacement along Neoproterozoic structures, such as the ISZ or around Teixeira Batholith.

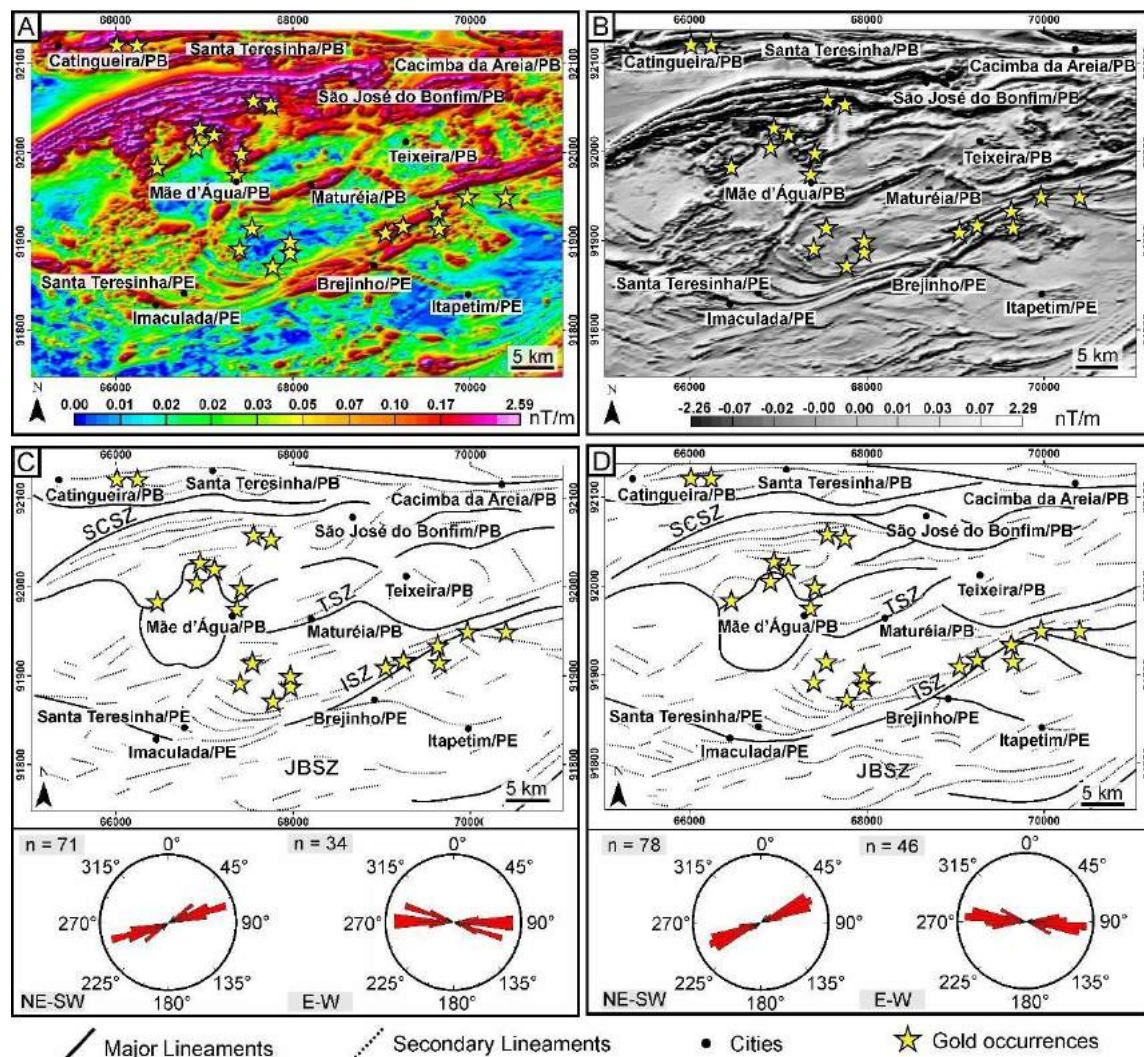


Figure 3. Magnetic images of (A) analytic signal amplitude (ASA), and (B) first vertical derivative (DZ), and interpretation of magnetic lineaments from (C) ASA and (D) DZ images. Rose diagrams show NE-SW and E-W trends. SCSZ = Serra do Caboclo Shear Zone, TSZ = Tendó Shear Zone, ISZ = Itapetim Shear Zone, JBSZ = Juru-Belém Shear Zone, PB = State of Paraíba, PE = State of Pernambuco.

AIRBORNE GAMMA-RAY SPECTROMETRIC DATA

Radiometric maps

The potassium map is strongly representative of major granitic bodies. For instance, the extensive NE-SW segment of high K measurements (Fig. 4A, domain 1) represents the Teixeira Batholith. Along this granitic domain, K concentration vary from ~4.40 to 10.75% in the NE portion, and from ~2.80 to 8.30% in the SW. The gold mineralizations linked to granites are concentrated in its SW part. Intermediate to strong K signatures (~3.50-8.30%; Fig. 4A, domains 2 and 3) are also verified in the central- southern region of the studied area and are closely related to the gneisses of Cariris Velhos Granitic Suite (Riacho do Forno and Recanto complexes) and other granites, as the Brejinho Pluton.

Nearby the ISZ, the gold occurrences are positioned in a NE-SW corridor, whose K contents vary from medium to very high (~3.40-8.30% K). Extremely low values on K (<1.22% K; Fig. 4A, domains 4 and 5) are correlated to colluvium deposits shown in the geological map (Fig. 1B).

In the thorium map, the highest values (~14.00-60.67 ppm) are concentrated in the southern portion of the studied area, and are mostly associated with the gneisses of Cariris Velhos Granitic Suite (Fig. 4B, domains 1 and 2). A significant part of gold occurrences associated with the ISZ is seen along a narrow and elongated body enriched in Th (~25-60 ppm; Fig. 4B, domain 2) and in U (~4-9 ppm; Fig. 4C, domain 1). The weaker signatures in thorium measurements (<0.17 ppm) are mostly associated with Teixeira Batholith, presenting an inverse correlation with the potassium map.

In spite of the presence of the common streaking pattern caused by the variations in atmospheric radon concentrations during data acquisition (Minty *et al.* 1997), the uranium map is characterized by high values along the ISZ and Brejinho Pluton (~2.00-9.27 ppm), in which some gold occurrences were registered (Fig. 4C, domains 1 and 2).

K/eTh ratio map

Considering that the K/eTh ratio can reveal possible zones of hydrothermal alteration and mineralization (*e.g.*, Galbraith & Saunders 1983), the form of gold occurrence in Itapetim gold District was analyzed in K/eTh image and two principal patterns were distinguished. The pattern 1 is related to the gold occurrences in close association with Teixeira Batholith and characterized by zones showing extremely high values of K/eTh ratios (>1000, near to Mãe d'Água sector, Fig. 4D, domain 1). The pattern 2, on the other hand, is related to the gold mineralization occurring along ISZ and are linked to a narrow zone of intermediate to high values of the K/eTh ratios (~500, Fig. 4D, domains 5 and 6). Both patterns repeat in other points of study area. For instance, pattern 1 reappears along regions at north and south borders of the Teixeira Batholith, whose locations are indicated by domains 2, 3 and 4 in Figure 4D. The pattern 2, moreover, repeats in an area located to the south of ISZ, assigned as domain 7 in Figure 4D.

Ternary image and interpreted litho-geophysical map

For this study, the ternary image was used mainly for geological mapping purposes. Eleven

litho-geophysical domains were classified according to the intensities (low, medium to low, medium, medium to high and high, see Tab. 1) on the three radioelements.

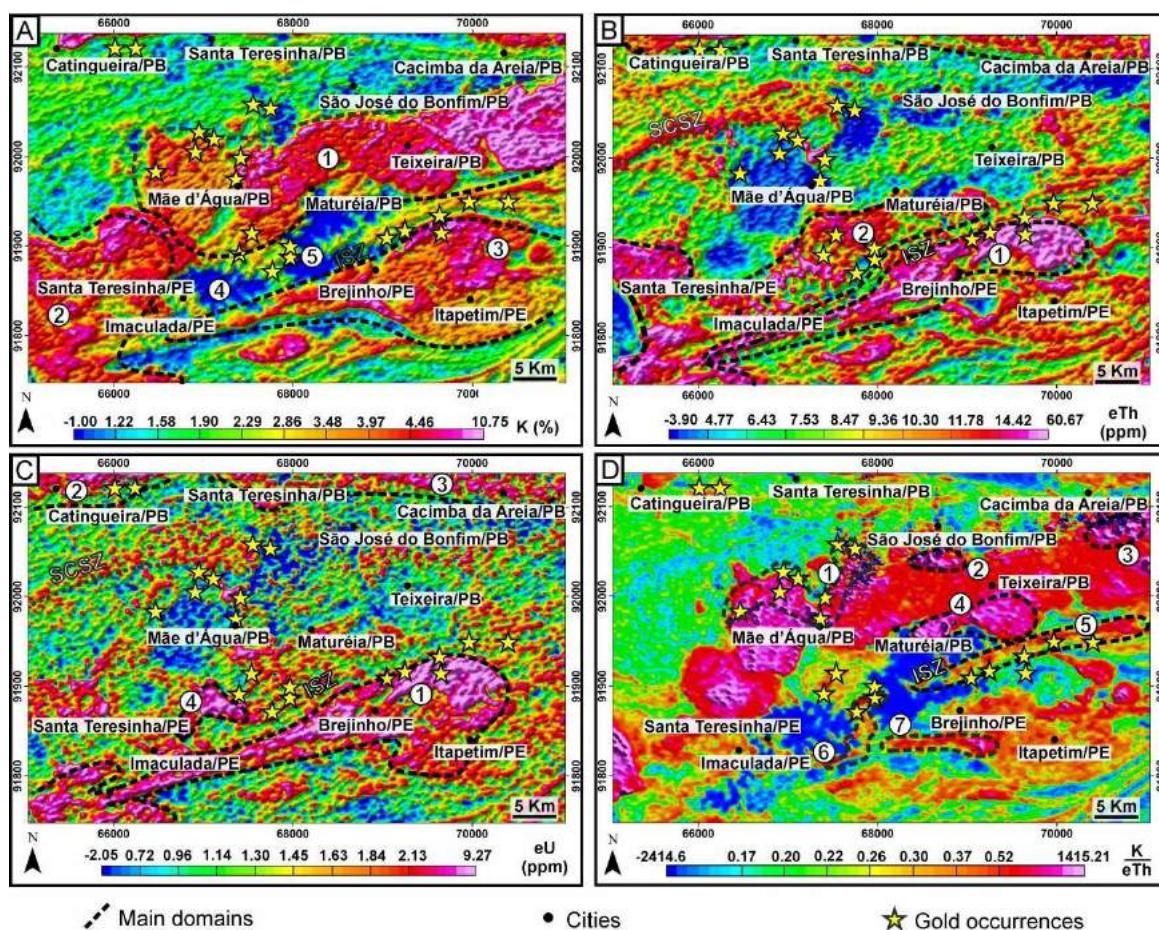


Figure 4. Radiometric images of Itapetim gold District showing the location of gold occurrences and the main domains (1 to 7). (A) Potassium map, (B) thorium map, (C) uranium map, (D) K/eTh ratio. PB = State of Paraíba, PE = State of Pernambuco, ISZ = Itapetim Shear Zone, SCSZ = Serra do Caboclo Shear Zone. Numbers indicate domains relative to radiometric responses individually interpreted in each image.

Table 1: Intensities of radioelements used to define the qualitative interpretation of radiometric maps.

Intensities	K (%)	eTh (ppm)	eU (ppm)	K/eTh
Low	<1.60	<6.50	<1.00	<0.15
Medium	1.60 - 3.50	6.50 – 14.00	1.00 - 1.80	0.15 - 0.30
High	3.50 – 5.00	10.00 – 14.00	1.80 – 3.00	0.30 - 0.70
Very high	5.00 - 10.75	14.00 - 60.67	3.00 - 9.27	>0.70

In spite of some divergences, a comparison between the ternary image (Fig. 5A) with the geological map (Fig. 1B) permits to notice a spatial correlation concerning on the litho-geophysical domains (Fig. 5B, Tab. 2) and lithological units. However, the ternary image also reveals its significance for this study for allowing to visualize internal variations within the units, not shown in previous geological mappings, and its relationships with important structures, and the combined behavior of the three radioelements in different gold mineralization sectors.

For instance, the Teixeira Batholith is characterized by strong values of K, with some increment of medium to low counts of eTh and eU in its eastern segment (Fig. 5B, domains 1, 2 and 3). The high counts on K are corroborated by the extensive presence of potassium feldspar (more than 30% in modal composition) and its shoshonitic affinity (Sial & Ferreira 2016). On the other hand, the Pluton Brejinho shows intermediate to high counts of the three elements (Fig. 5B, domain 4). This pluton has a monzogranitic composition and accessory minerals include epidote, apatite, titanite and zircon. As seen in the ternary map, it is characterized by an elongated shape controlled by the ISZ.

The radiometric signature presented by the gneisses, which have monzogranitic to sienogranitic compositions from the Cariris Velhos Granitic Suite (Santos 1995, Maia 2002) displays medium to high values of eTh associated to variations in eU (generally more expressive) and K contents (Fig. 5B, domains 6, 7, 8 and 9), appearing mostly in cyan, green or blue colors. The colluvial material deposited along those gneisses shows substantial contents of eTh and eU, indicating these rocks as probable sources, which is reflected in the composite map. Along the ISZ, these gneissic rocks show a significant increase in eU and K, appearing as whitish shades in the ternary image (Fig. 5B, domain 10).

The metasedimentary rocks also show variations in radiometric signatures. In certain regions (extreme south and northwest), they reveal a thorium-rich response (Fig. 5B, domains 5 and 6). Lastly, in the northern portion of the area, low counts of the three radioelements predominate (Fig. 5B, domain 11).

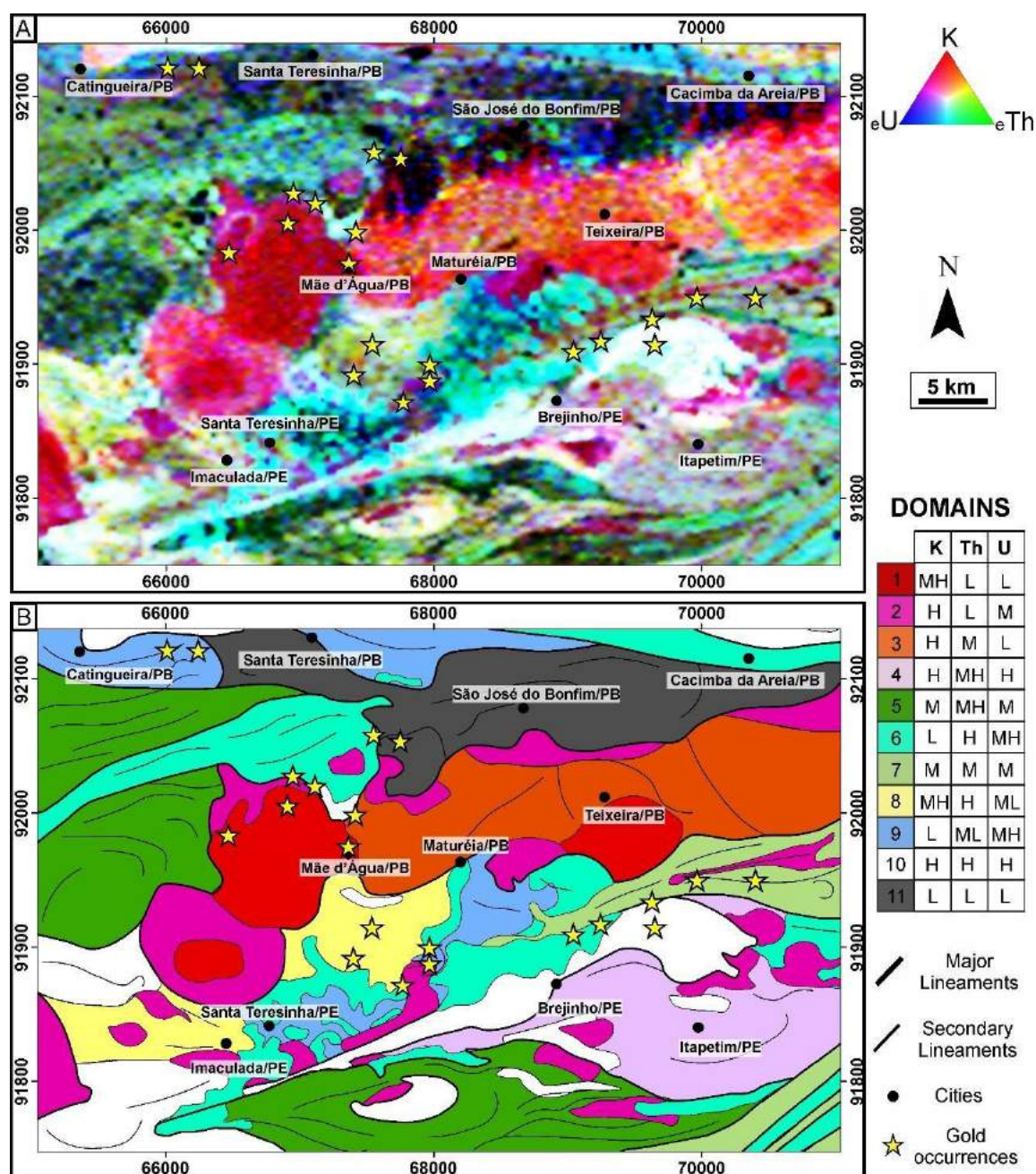


Figure 5. (A) Ternary image (RGB composition) of K, eTh and eU, and (B) litho-geophysical domains and radiometric lineaments. L = low, ML = medium to low, M = medium, MH = medium to high, H = high. PB = State of Paraíba, PE = State of Pernambuco.

Table 2: Detailed description of radiometric litho-geophysical domains interpreted in the study area.

Do mains	Description
1	Potassium-rich domain located in Mãe d'Água sector and in the central portion of the western, following granitic body (to the north of Imaculada city).
2	Potassium-rich domain (with medium counts of eU) in the borders of Teixeira Batholith, in

	some small bodies widespread along Cariris Velhos Granitic Suite, and close to Brejinho Pluton.
3	Potassium-rich domain (with medium counts of eTh) widespread in the NE and central portion of Teixeira Batholith.
4	Potassium and uranium-rich domain defining great part of Brejinho Pluton.
5	Thorium-rich domain (with intermediate amounts of K and eU) in the south and NW portion of the area, respectively, associated to (1) São Caetano Complex, and (2) Riacho Gravatá Complex and Santana dos Garrotes Formation.
6	Domain enriched in eTh and eU covering part of Riacho Gravatá Complex, areas of the Cariris Velhos Granitic Suite and colluvium material.
7	Domain showing intermediate values of radioelements (K, eTh and eU), located in the central NE portion of the area, covering part of Cariris Velhos Granitic Suite (Recanto Complex).
8	Thorium-rich domain (with intermediate amounts of K) along the coverage area of Cariris Velhos Granitic Suite (Riacho do Forno Complex).
9	Uranium-rich domain interpreted in the north portion of study area, associated with part of metasedimentary rocks from Santana dos Garrotes Formation and Riacho Gravatá Complex (at north), and to colluvium material (at south).
10	Domain enriched in K, eTh and eU, interpreted along ISZ, in two areas in SW region and in widespread small bodies close to Brejinho Pluton.
11	Domain showing a deficiency in radioelements (K, eTh and eU), present further north of study area, in part of metasedimentary rocks from Santana dos Garrotes Formation and Riacho Gravatá Complex.

STRUCTURAL ANALYSIS AND MINERAL ALTERATION DESCRIPTION OF THE ITAPETIM DISTRICT

The general distribution of gold occurrences in the studied area is concentrated in the NE-SW and E-W directions along well-marked lineaments in the geophysical maps (Figs. 2, 3, 4, 5). The E-W Patos Lineament is the most expressive structure of the region and forms a huge mylonitic corridor of several km wide. This structure is associated with the emplacement of the major granitic rocks, including the Teixeira Batholith, as well as the development of local migmatization and minor structural corridors development. Nevertheless, additional geophysical lineaments show a strong correlation with NE-SW trending shear zones, *i.e.* Itapetim, Serra do Caboclo, Tendó and Juru-Belém (see Fig. 1B). Mesoscopic and microscopic deformation markers are almost identical in all of the NE-oriented shear zones, suggesting that they are coeval and developed in the same strain and crustal conditions. Thus, NE-SW oriented shear zones are ascribed as the "Itapetim Shear System".

In the northern portion of the studied area, the dextral Patos Lineament together with the sinistral Serra do Caboclo Shear Zone make up a local conjugated strike-slip system, whose influence is observed along the metasedimentary rocks of the Riacho Gravatá Complex and Santana dos Garrotes Formation. This system is also associated with punctual gold occurrences in the northern portion of the studied area. Associated rocks show medium angled to sub-vertical ENE-WSW foliation planes that present low- plunging mineral stretching lineations. Variable kinematic criteria within this shear system include the presence of anastomosed millimetric foliation banding, S-C fabrics defined by phyllosilicate crystals alignments (Fig. 6A), rotated quartz porphyroclasts (Fig. 6B) and folded quartz ribbons, as well.

The best-preserved gold-bearing rocks of the area are linked to the Itapetim Shear System. In the region, this system marks a narrow belt along rocks of the Riacho do Forno, Recanto and São Caetano complexes, forming a 4 km wide and 40 km long mylonitic corridor between the Teixeira and Brejinho granitic bodies. Mylonitic rocks associated with these shear system are mostly characterized by planar- to plano-linear fabrics (S- to SL mylonites), displaying a well-preserved flat to anastomosed protomylonitic to mylonitic foliation planes (Fig. 7A). Such planes are locally folded and associated with parallel horizontal to subhorizontal mineral stretching lineations marked by quartz- biotite-chlorite-epidote alignments that are abundant in protomylonitic members (Fig. 7B), whilst oblique alignments is present but not numerous on orthoderived mylonites, indicating lineation rotation during the shear development (Fig. 7C). Open to tight overturned symmetrical to asymmetrical folds are typical in zones of quartz-feldspar segregations. These structures present vertical to gentle plunging axial planes, being in a lesser extent, sub-parallel to the mylonitic foliation and interpreted as syn-kinematic. Punctual chevron (Fig. 7D), ptygmatic and sheath folds occur in strongly deformed members of the São Caetano Complex, which are suggestive of local crustal anatexis.

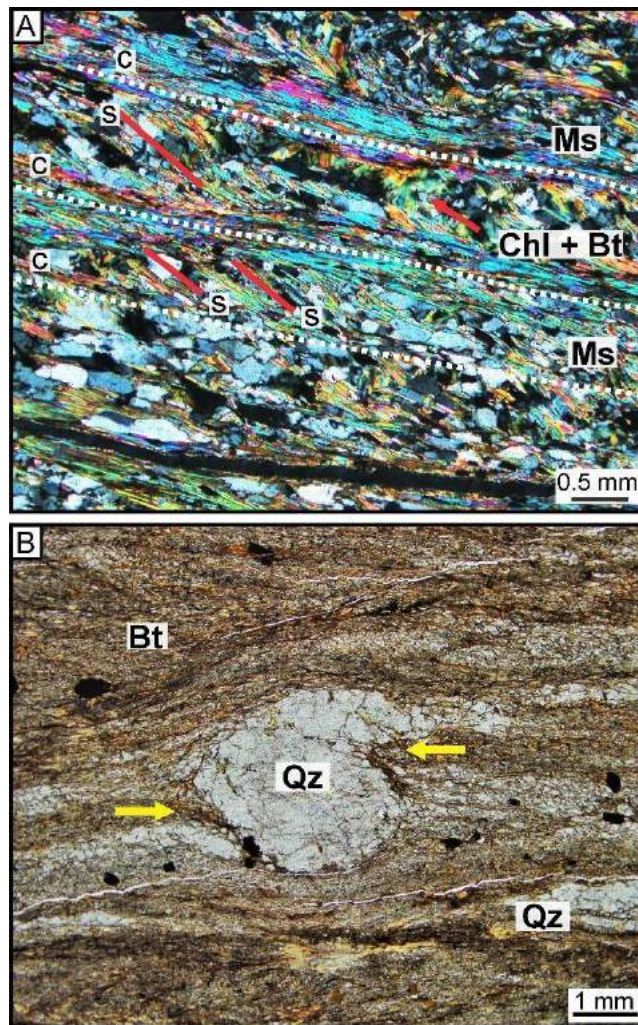


Figure 6. Microscopic textures associated with mylonites of the Serra do Caboclo Shear Zone: (A) Phyllite fabrics from the Riacho Gravatá Complex, composed by muscovite, biotite and chlorite presenting S-C fabrics (indicated by red lines and white dotted lines). (B) Type δ porphyroblast in quartz crystal from phyllonite of the Riacho Gravatá Complex, showing sinistral strike-slip movement. Bt = biotite, Chl = chlorite, Ms = muscovite, Qz = quartz.

Reliable mesoscopic kinematic criteria are scarce and include S-C surfaces and σ -type feldspar porphyroclasts that are only observed in well developed protomylonites. In contrast, well-preserved microtectonic markers are widespread. The most representative microstructures are S-C-C' surfaces, quartz ribbons, mica fish (predominately muscovite bents, Fig. 7E) and local kink bands. Recrystallization along shear planes, core-and-mantle structures and development of pressure shadows (Fig. 7F) are also present in zones where feldspar and quartz crystals are abundant. Quartz segregations are mostly characterized by neoformed tiny grains that present well-developed undulose extinction, which is also present, but not common, in folded muscovite lamellae.

Dilatation structures including quartz-bearing, aplitic and pegmatitic veins are always

present and closely related to mylonitic rocks. Although mineralization might occur along mylonitic foliation planes or hinge-lines of micro-folds, it is mostly associated with nucleated quartz or aplitic veins, especially with the presence pyrite and arsenopyrite alignments (Figs. 8A and B), that might develop *boudins* and minor veinlets parallel or sub-parallel to mylonitic foliation planes (Fig. 8C). Discordant mineralized veinlets are also present.

Along the Itapetim and adjacent shear zones, quartz veins are mostly characterized by saccharoidal to massive textures (Fig. 8D). In general, these veins are associated with two different gangue mineral assemblages that are interpreted as product of hydrothermal alteration and syn-tectonic deformation: (1) quartz+potassium feldspar+tourmaline (Fig. 8E) and (2) biotite+clinozoisite+epidote.

In the first paragenesis (most common), pink potassium feldspar is generally seen in association with quartz and tourmaline, which might show pegmatitic texture or disposition in micro-layers concordant to the mylonitic foliation (Fig. 8F). In thin section of veins, potassium feldspar is usually micro-fractured and altered to sericite or muscovite and dominantly displays, together with quartz, a polygonal arrangement (Fig. 9A). Tourmaline crystals are abundant and partially plastically deformed. Under microscope, they often exhibit a blue to green pleochroism (Fig. 9B), zoning in basal sections and *augen* texture (Fig. 9C). They occur as coarse-grained crystal aggregates or as micro- lenses (~0.1-1.0 mm thick), filling randomly oriented fractures along quartz veins. Moreover, in some occurrences, tourmaline is closely associated with tiny biotite crystals (~0.1 mm) (Fig. 9D).

The assemblage biotite+clinozoisite+epidote, identified particularly in Santo Aleixo sector, might occurs widespread in quartz veins matrix or filling fractures (Fig. 9E). Clinozoisite and epidote are observed mostly as anhedral grains (~0.2-1.0 mm), frequently showing zoning and micro-fractures. Related with them are subhedral biotite crystals, whose pleochroism varies from pale-yellow to green and, while in some samples, it varies from pale-yellow to reddish-brown. Locally well-developed crystals of chlorite, product of biotite alteration, are observed (Fig. 9F). Titanite is a common accessory mineral associated to this second mineral paragenesis, appearing usually close to biotite or chlorite crystals.

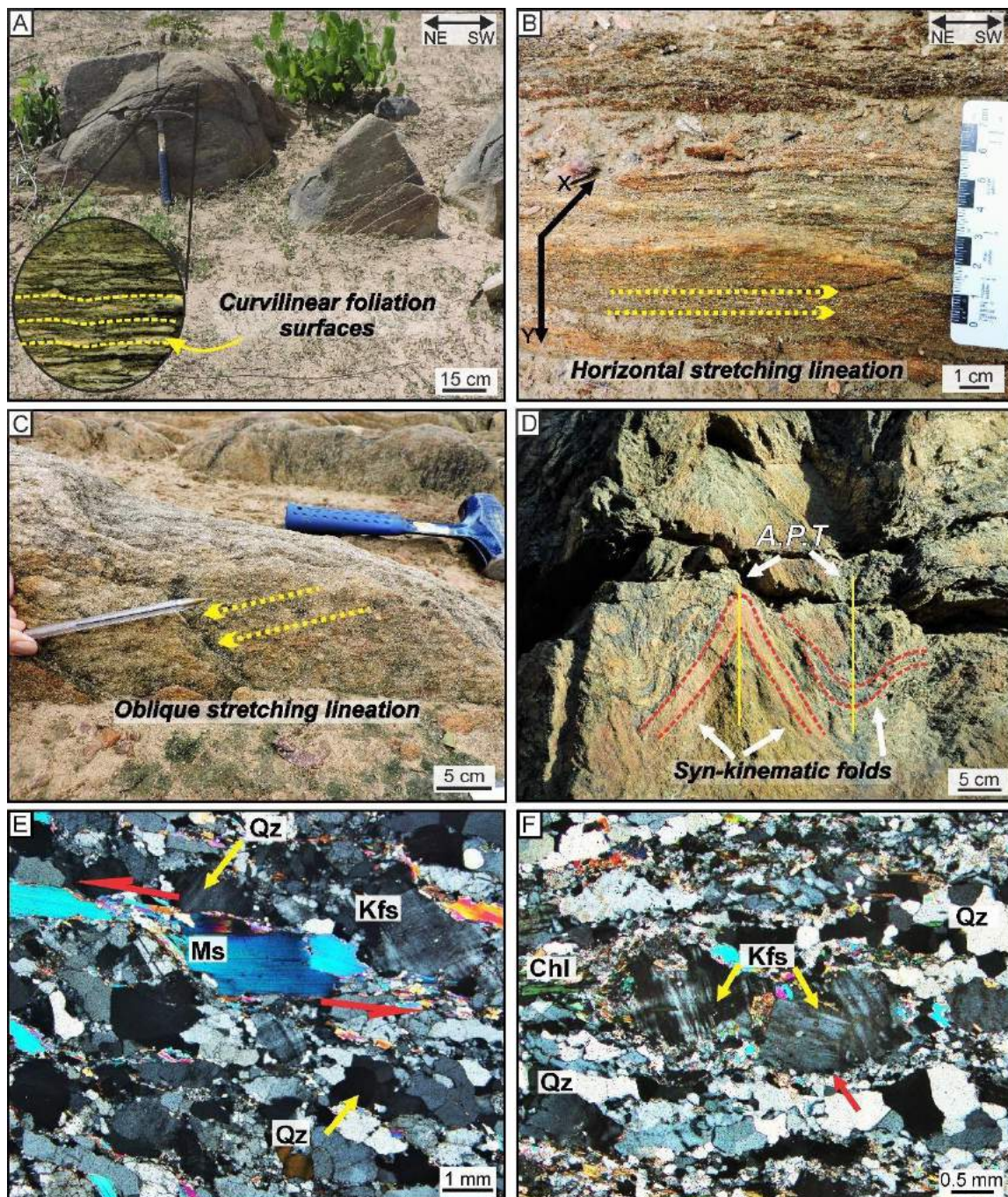


Figure 7: Structural characteristics of mylonitic rocks along the Itapetim Shear Zone. (A) Overview of mylonite outcrop oriented in NE direction (70Az/ 90°) and strike-slip foliation is marked by highly stretched crystals of quartz and feldspar. (B) Protomylonitic schist showing horizontal lineation. (C) Oblique oriented mineral stretching lineation in vertical foliation planes. (D) Syn-kinematic chevron folds with vertical- to subvertical axial planes. (E) Mica-fish marked by deformed muscovite crystal showing an evidence of sinistral deformation. (F) Protomylonite showing augens of potassium feldspar (developing pressure shadow - red arrow) and quartz ribbons with polygonal texture. Chl= chlorite, Kfs = potassium feldspar, Ms = muscovite, Qz = quartz. A.P.T. = axial plane trace.

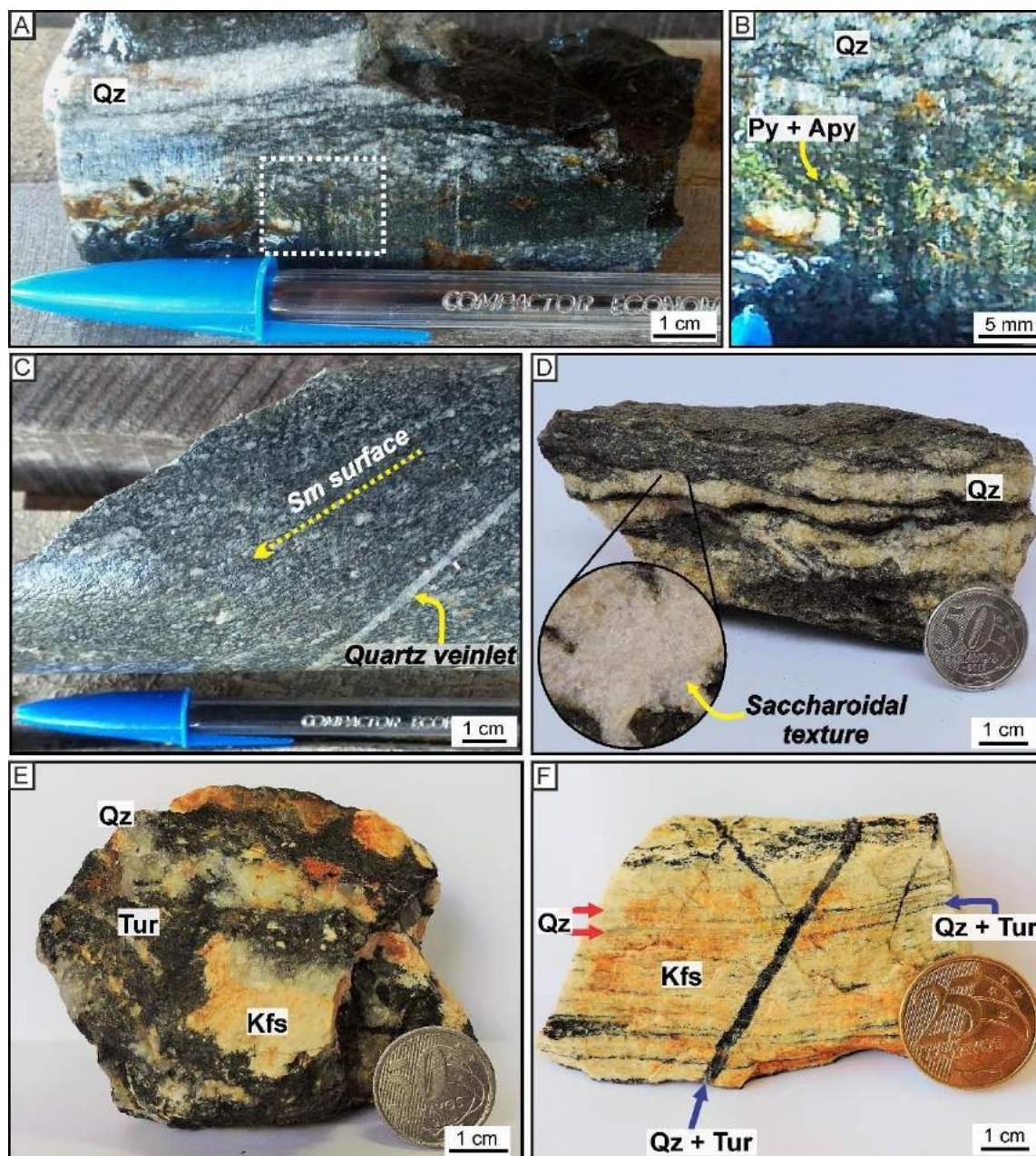


Figure 8: Samples collected in mineralized areas. (A) Sample showing contact between quartz vein and mylonitic host rock, and layer composed by pyrite and arsenopyrite. (B) Zoom of sample shown in Figure 8A presenting fine layer of pyrite and arsenopyrite. (C) Host rock exhibiting mylonitic foliation marked by alignment of quartz crystals, and presence of veinlet of quartz, parallel to the mylonitic foliation. (D) Quartz veins concordant to the mylonitic foliation exhibiting saccharoidal texture. (E) Aggregate of quartz, tourmaline and potassium feldspar with pegmatitic texture. (F) Assemblage quartz+tourmaline+potassium feldspar showing mylonitic texture. Apy = Arsenopyrite, Kfs = potassium feldspar, Py = pyrite, Qz = quartz, Tur = tourmaline. Sm = Mylonitic foliation.

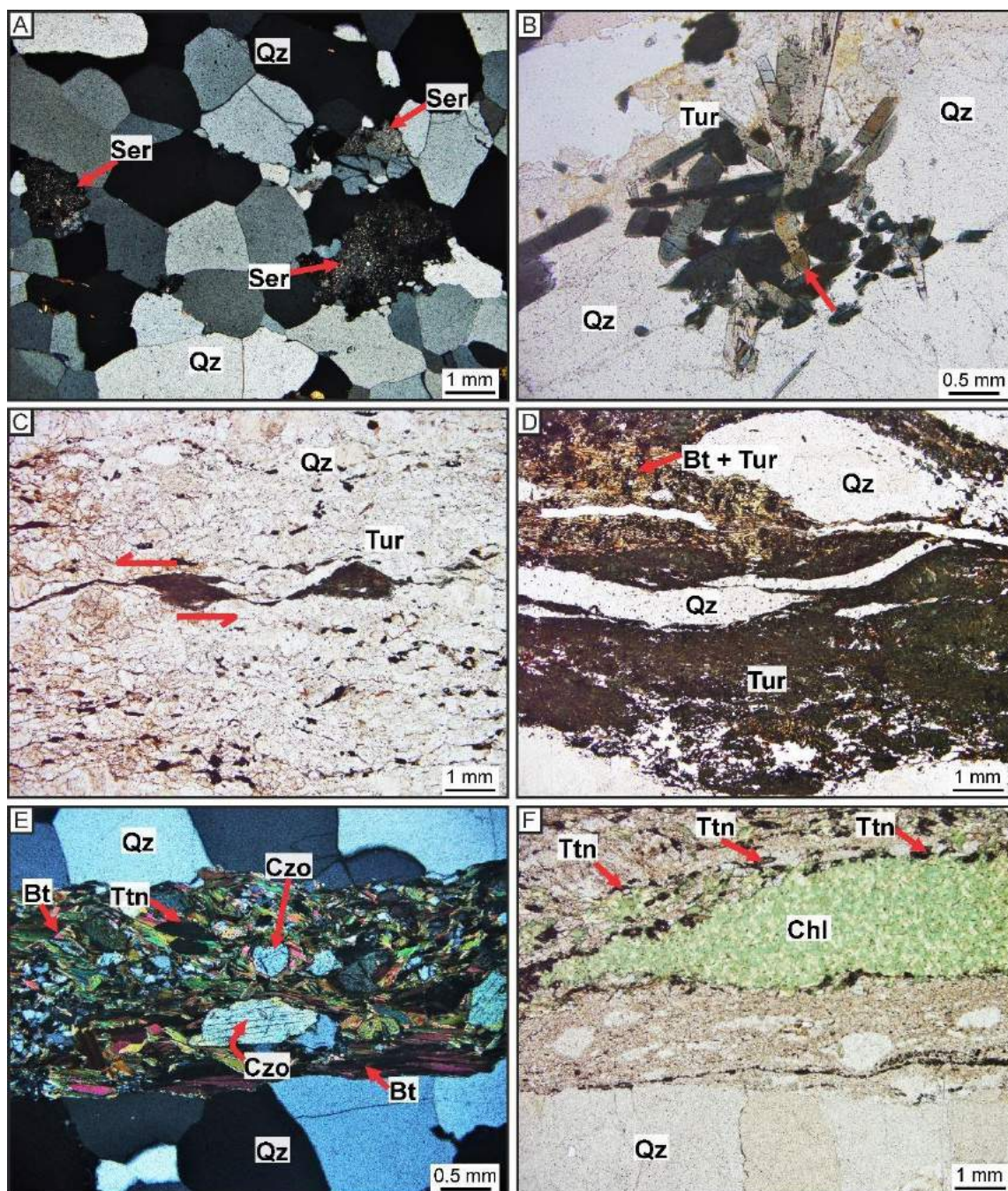


Figure 9. Microscopic aspects of hydrothermal minerals in Itapetim gold District. (A) Sample of quartz vein showing a polygonal arrangement, containing crystals of potassium feldspar almost completely transformed into sericite (see red arrows). (B) Aggregate of prismatic tourmaline crystals, in quartz vein, exhibiting a blue to green pleochroism. Zoning is observed in basal section (see red arrow). (C) Quartz vein containing tourmaline porphyroclasts (type σ) evidencing sinistral deformation. (D) Quartz vein showing the association of biotite (in tiny crystals) and tourmaline. (E) Assemblage Bt+Czo+Ep, observed in Santo Aleixo Sector, filling fracture in quartz vein. (F) Layer composed by chlorite, product of biotite alteration, in quartz vein. Small crystals of titanite are seen right in contact with chlorite (see red arrows). Bt = biotite, Chl = chlorite, Czo = clinozoisite, Ms = muscovite, Qz = quartz, Ser = sericite, Ttn = titanite, Tur = tourmaline.

DISCUSSION

Lode-type gold deposits usually have a close association with highly deformed regions, that might include one or more generations of faults or ductile shear zones (Groves *et al.* 2003, Suh *et al.* 2006, Holden *et al.* 2012, Wemegah *et al.* 2015). These structures are generally of continental scale and often act as conduits for hydrothermal fluids, that transport a variety of metals, such as Au, Ag, As, Sb, Te, W, Mo, Bi, and B (McCuaig & Kerrich 1998, Groves *et al.* 2003, Condie & Pease 2008).

According to the magnetic image analysis, the main regional pathfinders related to the previously mapped gold sectors are strongly magnetized liner/curvilinear structures, including (1) the major trace of Itapetim Shear System and the horsetail splays structures in its SW termination and (2) the contact zone of Teixeira Batholith, specifically in Mãe d'Água sector (Figs. 3A and B). Magnetic susceptibility studies performed by Lima *et al.* (2000) and Archanjo *et al.* (2008) attributed the magnetic behavior observed along the contour of Teixeira Batholith as resultant of magnetite formation during hydrothermal processes at shallow depths, which is in accordance with the paragenesis associated to the described gold-bearing rocks.

Those strongly magnetized areas represent reliable indicators of geological structures and, in field, are often linked to areas that underwent to ductile and brittle deformation. Protomylonites and mylonites showing sub- to vertical dipping foliation characterize the most frequent type of rock, which present a set of structures indicative of deep-seated ductile deformation, such as micro-folds, quartz ribbons, type δ porphyroclasts, S-C fabrics, bent-flake mica fish and shadow pressure texture. The brittle deformation phase is evidenced by fractures and micro-fractures (usually filled up with hydrothermal minerals as quartz and tourmaline), that reveals their importance since the formation of mineralized veins of the studied shear zones is associated with repeated episodes of hydrofracturing and circulation of hydrothermal fluids (crack-seal mechanism; Ramsay 1980, Maia 2002, Almeida 2003).

Indeed, magnetic data highly support that major shear zones control gold occurrences in the region. Foliation and lineation characters are suggestive of transcurrent corridors for gold percolation. Nevertheless, the presence of mylonites with oblique lineation and syn-kinematic NE-trending upright folds, even in the presence of vertical S-L mylonites is interpreted in the Borborema Province as strain partition of an initially protracted contractional regime (Neves *et al.* 2005). Thus, it is possible that the combination of contraction and strike-slip movements resulted in a transpressional regime that generated the studied shear zones.

According to all that had been described, based on the combination of magnetic data analysis as well as the recognition and geometric description of the region structures, strike-slip to transpressional shear zones and brittle faults that crosscut Teixeira Batholith are interpreted as the main pathways for the mineralized fluids, as early suggested by Lima *et al.* (2000).

Concerning the usage of airborne gamma-ray applied to gold prospecting, the contrasting behavior or antagonism between the radioelements K and Th defined by Ostrovskiy (1975) has been represented as a chief parameter. In fact, since its conception, this relationship became one of, if not the main pathfinder in gold prospective studies involving this methodology, and the K/eTh (or eTh/K) map has been exhaustive used (*e.g.*, Shives *et al.* 2000, Quadros *et al.* 2003, Almasi *et al.* 2015, Ohioma *et al.* 2017). The key feature recognized is, in general, zones of hydrothermal alteration evidenced by an increase of K even in high-potassium host rocks (Hoover & Pearce 1990).

In the Itapetim gold District, Coutinho (1994) pointed out a substantial enrichment of K in mineralized areas (resultant of hydrothermal alteration) unveiled by a mineral assemblage dominated by tourmaline and potassium feldspar (similarly found in this study; Figs. 8D and E). Other evidences, here observed, that attest the occurrence of hydrothermal alteration are the chloritization of biotite, the blue-green pleochroism shown by tourmaline (typical of the hydrothermal varieties, Charoy 1979) and the transformation of potassium feldspar into sericite or muscovite. Particularly for the replacement of feldspar by sericite or muscovite, mass balance studies (*e.g.*, Craw *et al.* 2009, Li *et al.* 2013, Abdelnasser *et al.* 2014) have reported the possibility of a gain of K₂O during those transformations, which might have contributed to an increase in the amount this radioelement in study area, as well.

In the potassium and K/eTh ratio images, it is possible to realize this K enrichment along ISZ and Teixeira Batholith (Figs. 4A and B). Considering particularly the pattern of gold occurrence found in K/eTh ratio image (high values of K/eTh ratios >500), the zones where they recur were interpreted as potential hydrothermally altered areas given rise the possibility of gold mineralization.

The ternary image of K, eTh and eU (Fig. 5A) permits visualizing, in a general panel, the behavior of the three radioelements in the studied area, allowing the individualization of some geological units, despite the existence of internal variation in some of them. From the perspective of this image, the gold occurrences are largely related to domain 2 (Fig. 5B), whose K content varies between medium and high values (~3.5- 7.0 %).

In light of the above, the most precise pathfinder for the gold occurrences, in the studied area, is their association with structured zones. However, there is, as well, a good correlation between the K content and the mineralized areas (remarked in K and K/eTh maps). Thus, regarding these aspects, we produced an integrated map (fusion of DZ and ternary images) depicting the main results of airborne magnetic and gamma-ray spectrometric interpretation (lineaments and few radiometric domains of ternary and K/eTh ratio images) to locate new gold target areas. In this map, ten new zones of possible gold mineralization are indicated, based on the combined analysis of geophysical and geological features here presented (Fig. 10).

Within the Borborema Province, similar gold deposits are Neoproterozoic and occur in the Seridó Belt (Northern Borborema Province, Araújo *et al.* 2002). $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronological data from mica grains, point out that the minerals associated to gold occurrences are mostly Cambro-Ordovician (520-506 Ma), which is a fair estimation of shear zone development, thus, indicating that late gold concentration in the Borborema Province occurred in the last stages of the Brasiliano-Pan African orogeny (Araújo *et al.* 2005). In West Africa, correlative lode-type gold occurrences are also reported, including those from the Central African Belt, such as the Dimako-Mboscorro Deposit. Associated

rocks occur within wide developed shear zone corridors (Njome & Suh 2005) that probably extends from central Africa, across the Atlantic, into NE Brazil related gold-bearing rocks, such as those from the Itapetim (Suh *et al.* 2006, Takodjou Wambo *et al.* 2018).

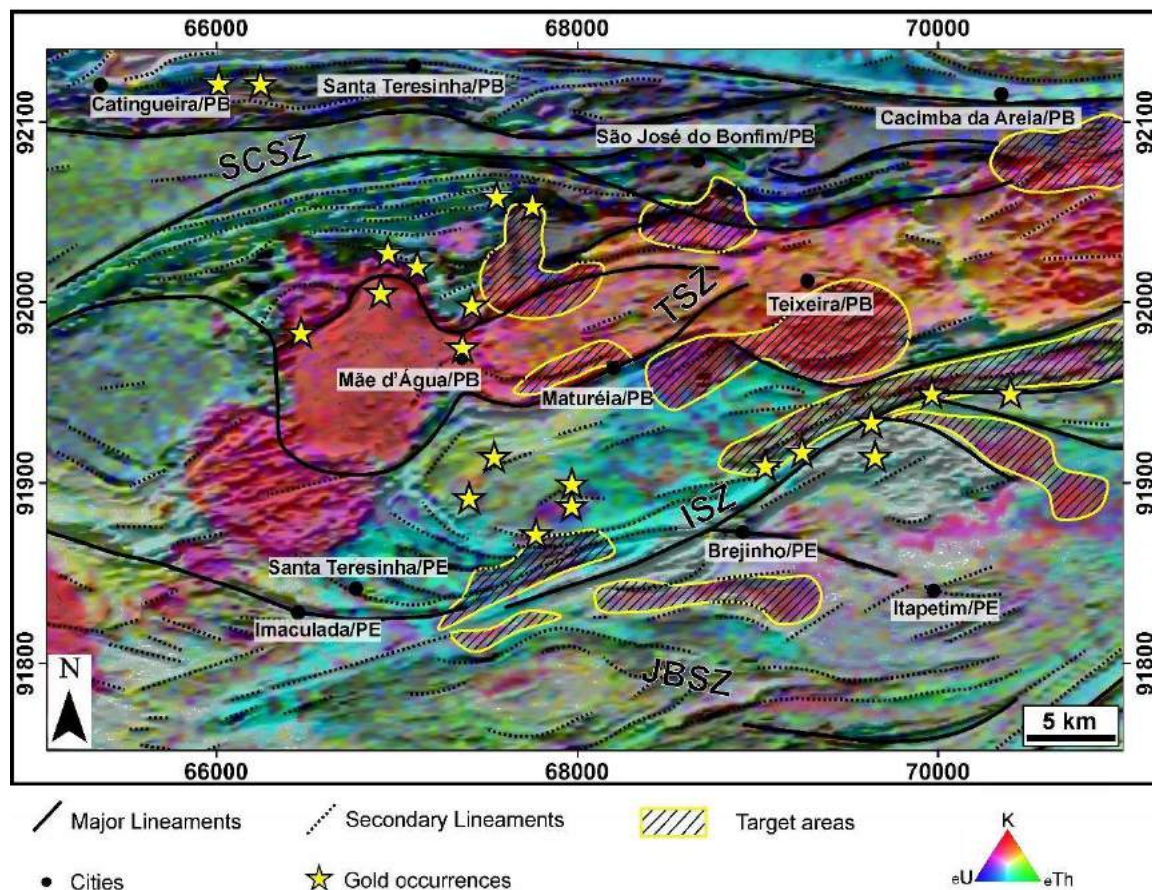


Figure 10. Integrated map (fusion of DZ and ternary images) showing the main interpretations made from airborne magnetic and gamma-ray spectrometric data. The hatched zones represent favorable areas for gold mineralization, considering the principal pathfinders identified in the study area. SCSZ = Serra do Caboclo Shear Zone, TSZ = Tendó Shear Zone, ISZ = Itapetim Shear Zone, JBSZ = Juru-Belém Shear Zone.

CONCLUSIONS

This contribution presents an integrated analysis of airborne magnetic and gamma-ray spectrometric data of the Itapetim gold District allied to the main field aspects observed in mineralized areas.

The magnetic data revealed the occurrence of major and secondary lineaments disposed mainly in NE-SW and E-W direction, which correlates spatially to the most significant structures of the studied area: Patos Lineament, Serra do Caboclo and Itapetim shear zones. Magnetic data indicated yet that gold occurrences are associated with strongly magnetized areas, whose locations in field correspond to ductile and brittle deformed regions containing protomylonitic and mylonitic rocks, eventually affected by fractures, in which hydrothermal fluids passed through and crystalized as mineralized veins.

The major mesoscopic structural aspects of the gold-bearing protomylonites and mylonites include sub- to vertical dipping foliation, local folding and horizontal to subhorizontal mineral stretching lineation. Microscopic features comprise, among others, quartz ribbons, mica fish, kink bands and core-and-mantle structures, besides the common fracturing observed in minerals (*e.g.*, potassium feldspar, tourmaline and clinozoisite) found in quartz veins.

Regarding the gamma-ray spectrometric data, it permitted to visualize the magnitude of each radiometric element and their combined behavior, as well, unveiling, as the most important results, the sites of K enrichment. Part of those areas shows an abundant presence of potassium-rich hydrothermal minerals such as tourmaline, potassium feldspar and sericite, occurring principally filling up fractures in quartz veins.

The airborne geophysical data (ternary composition and DZ images) were integrated in single map and ten target areas were selected based on the presence of structures (interpreted by the presence magnetic and radiometric lineaments) and possible hydrothermal alteration zones (inferred by potassium enrichment). This type of methodology showed its importance by providing unexpansive information about a broad mineralized area and supplying the geological dataset of Itapetim region for future gold prospective campaigns.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors are grateful to Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) for the scholarship and the Programa de Pós-graduação em Geociências (PPGEOC) of the Departamento de Geologia of the Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) for financial support. We also thank the Laboratório de Gemologia (LABGEM - UFPE) and its collaborators, for the use of microscopes and the Serviço Geológico do Brasil (CPRM) for providing the geophysical data used in this study.

REFERENCES

Abdelnasser A., Kumral M., Zoheir B., Weihed P., Kiran Y. D., Karaman M. 2014. Hydrothermal alteration geochemistry of Atud gold deposits at the central block of the Egyptian Eastern Desert, Egypt: Insights provided by mass-balance calculations. *In: Goldschmidt Abstracts (Goldschmidt Conference)*. Sacramento, California, p. 8-13.

Airo M.L. 2002. Aeromagnetic and Aeroradiometric Response to Hydrothermal Alteration. *Surveys in Geophysics*, **23**:273-302. <https://doi.org/10.1023/A:1015556614694>.

Airo M.L. & Mertanen S. 2008. Magnetic signatures related to orogenic gold mineralization, Central Lapland Greenstone Belt, Finland. *Journal of Applied Geophysics*, **64**:14-24. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2007.10.003>.

Almasi A., Jafarirad A., Afzal P., Rahimi M. 2015. Prospecting of gold mineralization in Saez area (NW Iran) using geochemical, geophysical and geological studies based on multifractal modelling and principal component analysis. *Arabian Journal of Geosciences*, **8**:5935-5947. <https://doi.org/10.1007/s12517-014-1625-2>.

Almeida F.F., Hasui Y., Brito Neves B.B., Fuck R.A. 1981. Brazilian structural provinces: an introduction. *Earth Sciences Reviews*, **17**:1-29. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(81\)90003-9](https://doi.org/10.1016/0012-8252(81)90003-9).

Almeida H. L., 2003. *Estudo microestrutural em mineralização aurífera do tipo-veio hospedada em zona de cisalhamento: caso do depósito Sertãozinho, Província Borborema, NE do Brasil*. PhD Thesis, Unesp, Rio Claro, São Paulo, 103 p.

Araújo M.N.C., Alves da Silva F.C., Jardim de Sá, E.F. Holcombe R.J. 2002. Geometry and structural control of Au Vein mineralizations In the Seridó Belt, Northeastern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, **15**:337-348. [https://doi.org/10.1016/S0895-9811\(02\)00040-8](https://doi.org/10.1016/S0895-9811(02)00040-8).

Araújo M.N.C, Vasconcelos P.M., Alves da Silva F.C., Jardim de Sá E., Sá J.M. 2005. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of gold mineralization in Brasiliano strike-slip shear zone in the Borborema Province, NE Brazil. *J S Am Earth Sci*, **19**:445-460. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2005.06.009>.

Archanjo C.J., Rodrigues S.W., Neves B.B.B. 2008. Fabrics of pre- and syntectonic granite plutons and chronology of shear zones in the Eastern Borborema Province, NE Brazil. *J. Struct. Geol.*, **30**:310-336. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2007.11.011>.

Basto C. F., Caxito F. A., Vale J. A. R., Silveira D.A., Rodrigues J.B., Alkmim A.R., Valeriano, C.M., Santos, E.J. 2019. An Ediacaran back-arc basin preserved in the Transversal Zone of the Borborema Province: Evidence from geochemistry, geochronology and isotope systematics of the Ipueirinha Group, NE Brazil. *Precambrian Res.*, **320**:213-231. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2018.11.002>.

Baumgartner R., Romer R. L. & Moritz R., Sallet R., Chiaradia M. 2006. Columbite- tantalite-bearing granitic pegmatites from the Seridó Belt, northeastern Brazil: Genetic constraints from U-Pb dating and Pb isotopes. *Canadian Mineralogist*, **44**:69-86. <http://doi.org/10.2113/gscanmin.44.1.69>.

Bedini E., Rasmussen T. M. 2018. Use of airborne hyperspectral and gamma-ray spectroscopy data for mineral exploration at the Sarfartoq carbonatite complex, southern West Greenland.

Geosciences Journal, 22(4):641-651. <https://doi.org/10.1007/s12303-017-0078-5>.

Bittar S.M.B. 1999. *Faixa Piancó-Alto Brígida: Terrenos tectono-estratigráficos sob regimes metamórficos e deformacionais contrastantes*. PhD Thesis. Institute of Geosciences, University of São Paulo, São Paulo, 126 p.

Brito Neves B.B., Fuck R.A., Pimentel M.M. 2014. The Brasiliano collage in South America: a review. *Braz. J. Geol.*, 44:493-518. <http://dx.doi.org/10.5327/Z2317-4889201400030010>.

Brito Neves B.B., Santos E.J., Fuck R.A., Santos L.C.M.L. 2016. A preserved early Ediacaran magmatic arc at the northernmost portion of the Transversal Zone central subprovince of the Borborema Province, Northeastern South American. *Braz. J. Geol.*, 46:491-508. <http://dx.doi.org/10.1590/2317-4889201620160004>.

Brito Neves B.B., Santos E.J., Schmus W.R.Q. 2000. Tectonic history of the Borborema province. In: Cordani U.G., Milani E.J., Thomaz-Filho A.; Campos D.A. (Org.). *Tectonic Evolution of South America. 31st International Geological Congress*. Rio de Janeiro, p. 151-182 (Special Publication).

Charoy B. 1979. *Definition et importance des phenomenes deutériques et des fluids associés dans les granites*. Conséquences métallogéniques. Nance. Mém. Sci. de la Terre, 37, p. 366. <http://www.sudoc.fr/042232392>.

Craw D., Upton P., MacKenzie D. 2009. Hydrothermal alteration styles in ancient and modern orogenic gold deposits, New Zealand. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 52:11-26. <https://doi.org/10.1080/00288300909509874>.

Condie K.C. & Pease V. 2008. When did plate tectonics begin on planet Earth? *Geological Society of America*, 440:281-294 (Special Publication). <https://doi.org/10.1130/SPE440>.

Coutinho M. G. N. 1994. *The geology of shear-zone hosted gold deposits in Northeast Brazil*. Ph.D. Thesis, London University, London, 391 p.

Coutinho M. G. N. & Alderton D. H. M. 1998. Character and genesis of Proterozoic shear zone-hosted gold deposits in Borborema Province, northeast Brazil. *Trans. Instit. Mining Metallurgy (Section B: Applied Earth Sciences)*, 107:109-119.

Cordani U.G., Pimentel M.M., Araújo C.E.G., Fuck R.A. 2013. The significance of the Transbrasiliano-Kandi tectonic corridor for the amalgamation of West Gondwana. *Brazilian Journal of Geology*, 43:583-597. <http://dx.doi.org/10.5327/Z2317-48892013000300012>.

Costa F.G., Palheta E.S.M., Rodrigues J.B., Gomes I.P., Vasconcelos A.M. 2015. Geochemistry and U–Pb zircon ages of plutonic rocks from the Algodões granite–greenstone terrane, Tróia Massif, northern Borborema Province, Brazil: Implications for Paleoproterozoic subduction-accretion processes. *J. South Am. Earth Sci.*, 59:45-68. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2015.01.007>.

CPRM (Brazilian Geological Survey). 1984. Projeto Itapetim, PE/PB Setor Sertãozinho Plano de Lavra Experimental: Alvarás 4282, 5296, 5353, 5413/83. Rio de Janeiro: CPRM. Internal

report. Open access.

Dantas E.L., Souza Z.S., Wernick E., Hackspacher P.C., Martin H., Xiadong D., Li J.W. 2013. Crustal growth in the 3.4-2.7 Ga São José do Campestre Massif, Borborema Province, NE Brazil. *Precambrian Res.*, **227**:12-156. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2012.08.006>.

Dickson B. & Scott K. M. 1997. Interpretation of aerial gamma-ray surveys - adding the geochemical factors. *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, **17**:187-199. [https://doi.org/10.1016/S0375-6742\(96\)00017-9](https://doi.org/10.1016/S0375-6742(96)00017-9).

Ferreira C.A. & Santos E.J., 2000. *Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil: Jaguaribe SE - Folha SC. 24-Z. Estados do Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba e Pernambuco. Escala 1:500.000. Geologia e metalogênese. Texto explicativo, Recife, CPRM, 121p.*

Galbraith J. H. & Saunders D. F. 1983. Rock classification by characteristics of aerial gamma ray measurements. *J. Geochem. Expl.*, **18**:49-73. [https://doi.org/10.1016/0375-6742\(83\)90080-8](https://doi.org/10.1016/0375-6742(83)90080-8).

Ganade de Araújo C.E., Cordani U.G., Weinberg R.F., Basei M.A., Armstrong R., Sato K. 2014. Tracing Neoproterozoic subduction in the Borborema Province (NE-Brazil): Clues from U-Pb geochronology and Sr-Nd-Hf-O isotopes on granitoids and migmatites. *Lithos*, **202-203**:167-189. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.05.015>.

Goldfarb R.J. & Groves D.I. 2015. Orogenic gold: common or evolving fluid and metal 702 sources through time. *Lithos*, **223**:2-26. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.07.011>

Groves D.I., Goldfarb R.J., Robert F., Hart C.J.R. 2003. Gold deposits in metamorphic belts: overview of current understanding, outstanding problems, future research, and exploration significance. *Economic Geology*, **98**:1-29. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.98.1.1>.

Groves D.I. & Santosh M. 2015. Province-scale commonalities of some world-class gold deposits: implications for mineral exploration. *Geoscience Frontiers*, **6**:389-399. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2014.12.007>.

Groves D.I., Santosh M., Goldfarb R.J., Zhang L. 2018. Structural geometry of orogenic gold deposits: Implications for exploration of world-class and giant deposits. *Geosci. Front.*, **9**:1163-1177. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.01.006>.

Holden E.J., Wong J. C., Kovesi P., Wedge D., Dentith M., Bagas L. 2012. Identifying structural complexity in aeromagnetic data: An image analysis approach to greenfields gold exploration. *Ore Geology Reviews*, **46**:47-59. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2011.11.002>.

Hollanda M. H. B. M., Souza Neto J. A., Archanjo C. J., Stein H., Maia A. C. S. 2017. Age of the granitic magmatism and the W-Mo mineralizations in skarns of the Seridó belt (NE, Brazil) based on zircon U-Pb (SHRIMP) and Re-Os determinations. *Journal of South American Earth Sciences*, **79**:1-11. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2017.07.011>.

Hoover D. B. & Pierce A. A. 1990, Annotated bibliography of gamma-ray methods applied to

gold exploration. U.S. Geol. Surv. Open-File Report 90-203, 23p. <https://doi.org/10.3133/ofr90203>

Hronsky J. M. A. & Groves D. I. 2008. Science of targeting: definition, strategies, targeting and performance measurement. *Aust. J. Earth Sci.*, **55**:3-12. <https://doi.org/10.1080/08120090701581356>.

Huang L., and Guan Z. 1998. Discussion on “Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal” by Walter R. Roest, Jacob Verhoef, and Mark Pilkington: *Geophysics*, **63**:667-670. <https://doi.org/10.1190/1.1444366>.

LASA Engenharia e Prospecções S/A e PROSPECTORS Aerolevantamentos e Sistemas Ltda. 2009. Projeto Aerogeofísico Paraíba - Rio Grande do Norte; Pernambuco - Paraíba: relatório final do levantamento e processamento dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos. Rio de Janeiro: Lasa Engenharia e Prospecções; Prospectors Aerolevantamentos e Sistemas. Programa Geologia do Brasil (PGB). Internal report. Open access.

Li X. 2006. Understanding 3D analytic signal amplitude. *Geophysics*, **71**(2):L16. <https://doi.org/10.1190/1.2184367>.

Li X.-C., Fan H., Santosh M., Hu F-F., Yang K-F. Lan T.-G. 2013. Hydrothermal alteration associated with Mesozoic granite-hosted gold mineralization at the Sanshandao deposit, Jiaodong Gold Province, China. *Ore Geology Reviews*, **53**:403-421. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.01.020>

Lima R.G., Archanjo C.J., Macedo J.W.P., Melo Jr. G. 2000. Anomalias de suscetibilidade magnética no batólito granítico de Teixeira (Província da Borborema, Nordeste do Brasil) e sua relação com a zona de cisalhamento de Itapetim. *Revista Brasileira de Geociências*, **30**(4):685-692. <http://dx.doi.org/10.25249/0375-7536.2000304685692>.

Lima H., Pimentel M., Santos L., Dantas, E. 2019. Isotopic and geochemical characterization of the metavolcano-sedimentary rocks of the Jirau do Ponciano dome: A structural window to a Paleoproterozoic continental ARC root within the Southern Borborema province, Northeast Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, in press. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2018.12.002>.

Luiz-Silva W., Michel Legrand J., Xavier R. 2000. Composição e evolução dos fluidos no Depósito Aurífero São Francisco, Faixa Seridó, Província Borborema, Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, **30**:579-588. 10.25249/0375-7536.2000304579588. <http://dx.doi.org/10.25249/0375-7536.2000304579588>.

Madrucci V., Veneziani P., Paradella, W. R. 2003..Caracterização geológica e estrutural através da interpretação do produto integrado TM-Landsat 5 e dados aerogamaespectrométricos, região de Alta Floresta - MT. *Rev. Bras. Geof.*, **21**(3):219- 234. <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-261X2003000300002>

Maia H.N. 2002. *Deformação e fluxo de fluidos em zonas de cisalhamento: a integração de estudos estrutural, inclusões fluidos e isótopos estáveis dos veios mineralizados em ouro posicionados na zona de cisalhamento de Itapetim (NE do Brasil)*. PhD Thesis. Unicamp. São Paulo, Brazil, 204 p.

McCuaig T & Kerrich R. 1998. P-T-t-deformation-fluid characteristics of lode gold deposits: Evidence from alteration systematics. *Ore Geology Reviews*, **12**:381-453. [https://doi.org/10.1016/S0169-1368\(98\)80002-4](https://doi.org/10.1016/S0169-1368(98)80002-4).

Medeiros V.C. 2004. *Evolução Geodinâmica dos Terrenos Piancó-Alto Brígida e Alto Pajeú, Domínio da zona Transversal, NE do Brasil*. PhD Thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Brazil, 198 pp.

Metelka V., Baratoux L., Naba S., Jessell M. W. 2011. A geophysically constrained litho-structural analysis of the Eburnean greenstone belts and associated granitoid domains, Burkina Faso, West Africa. *Precambrian Research*, **190**(1-4):48-69. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2011.08.002>.

Milligan P. R., Gunn P. J. 1997. Enhancement and presentation of airborne geophysical data. *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics*, **17**(2): 63-75. https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:28049084

Minty B.R.S., Luyendyk A.P.G., Brodie R.C. 1997. Calibration and data processing for airborne geophysical data. *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, **17**(2):51-62. https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:28049083.

Neves S.P. 2003. Proterozoic history of the Borborema Province (NE Brazil): correlations with neighboring cratons and Pan-African belts, and implications for the evolution of western Gondwana. *Tectonics*, **22** (4):1031-1044. <https://doi.org/10.1029/2001TC001352>.

Neves S.P. 2018. Comment on “A preserved early Ediacaran magmatic arc at the northernmost part of the transversal zone - central domain of the Borborema Province, Northeast of South America”, by B. B. de Brito Neves *et al.* (2016). *Brazilian Journal of Geology*, **48**(3):623-630. <http://dx.doi.org/10.1590/2317-4889201820180049>.

Neves S.P., Bruguier O., Vaucherz A., Bosch D., Silva J.M.R., Mariano G. 2006. Timing of crustal formation, deposition of supracrustal sequences and Transamazonian and Brasiliano metamorphism in easter Borborema Province (BE Brazil): Implications for western Gondwana assembly. *Precambrian Research*, **149**:197-216. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2006.06.005>.

Neves S.P., Silva J.M.R., Mariano G. 2005. Oblique lineations in orthogneisses and supracrustal rocks: vertical partitioning of strain in a hot crust (Borborema Province, NE Brazil). *Journal of Structural Geology*, **27**:1513-1527. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2005.02.002>.

Njome M.S. & Suh C.E. 2005. Tectonic evolution of the Tombel graben basement, southwestern Cameroon. *Episodes*, **28**:37-41.

Ohioma J.O., Ezomo F.O., Akinsunmade A. 2017. Delineation of Hydrothermally Altered Zones that Favour Gold Mineralization in Isanlu Area, Nigeria Using Aeroradiometric Data. *International Annals of Science*, **2**(1):20-27. <https://doi.org/10.21467/ias.2.1.20-27>.

Oskooi B., & Abedi M. 2015. An airborne magnetometry study across Zagros collision zone along Ahvaz–Isfahan route in Iran. *Journal of Applied Geophysics*, **123**:112-122. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jappgeo.2015.10.001>.

Ostrovskiy E.Y. 1975. Antagonism of Radioactive Elements in Wallrock Alterations Fields and its Use in Aerogamma Spectrometric Prospecting. *International Geology Review*. **17**:461-468. <https://doi.org/10.1080/00206817509471687>.

Patra I., Srinivas D., Tripathi S., Patel A.K. 2016. High resolution Airborne Gamma ray Spectrometric data in Geological mapping-A case study from parts of Shillong Basin, Meghalaya. *J. Geophys*, **3**:173-178. https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:47110784.

Quadros T.F.P., Koppe J.C., Strieder A.J., Costa J.C.L.C. 2003. Gamma-Ray Data Processing and Integration for Lode-Au Deposits Exploration. *Natural Resources Research*, **12**:57-65. <https://doi.org/10.1023/A:1022608505873>.

Ramos, L.N.R.A., Pires A., Toledo C. L. B. 2014. Airborne gamma-ray spectrometric and magnetic signatures of Fazenda Nova Region, East portion of Arenópolis magmatic arc, Goiás. *Revista Brasileira de Geofísica*, **32**:123-140. <http://dx.doi.org/10.22564/rbgf.v32i1.401>.

Ramsay J.G. The crack-seal mechanism of rock deformation. 1980. *Nature*, **284**:135-139. <https://doi.org/10.1038/284135a0>.

Roest W. R., Verhoef J., Pilkington M. 1992. Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal. *Geophysics*, **57**:116-125. <https://doi.org/10.1190/1.1443174>.

Santos E.J. 1995. *O complexo granítico Lagoa das Pedras: acreção e colisão na região de Floresta (Pernambuco), Província Borborema*. PhD Thesis, Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, São Paulo, p. 228.

Santos E. J. 1996. Ensaio preliminar sobre terrenos e tectônica acrescionária na Província Borborema. In: 39º Congresso Brasileiro de Geologia. Salvador, *Anais. Salvador: SBG*, **6**:47-50.

Santos E.J., Brito Neves B.B., Van Schmus W.R., Oliveira R.G., Medeiros V.C. 2000. An overall view on the displaced terrane arrangement of the Borborema Province, NE Brazil. In: *International Geological Congress, 31th, General Symposia, Tectonic Evolution of South American Platform*. Rio de Janeiro, Brazil, pp. 5-9.

Santos E.J. & Medeiros V.C. 1999. Constraints from granitic plutonism on Proterozoic crustal growth of the transverse zone, Borborema province, NE-Brazil. *Rev. Bras. Geociências*, **29**:73-84. DOI: [10.25249/0375-7536.1999297384](https://doi.org/10.25249/0375-7536.1999297384).

Santos E. J., Souza Neto J. A., Silva M. R. R., Beurlen H., Cavalcanti J. A. D., Silva M. G., Dias V. M., Costa A. F., Santos L. C. M. L., Santos R. B. 2014. Metalogênese das porções norte e central da Província Borborema. In: M. G. Silva, M. B. Rocha Neto, H. Jost, R. M. Kuyumijan (Eds.), *Metalogênese das províncias tectônicas brasileiras*, 343-388. Belo Horizonte: CPRM.

Santos E.J., Van Schmus W.R., Kozuch M., Brito Neves B.B. 2010. The Cariris Velhos tectonic event in Northeast Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, **29**:61-76. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2009.07.003>.

Santos L.C.M.L., Dantas E.L., Santos E.J., Santos R.V., Lima H.M. 2015. Early to late Paleoproterozoic magmatism in NE Brazil: the Alto Moxotó Terrane and its tectonic implications for the pre-Western Gondwana assembly. *Journal of South American Earth Sciences*, **58**:188-209. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2014.07.006>.

Santos L.C.M.L., Dantas E.L., Cawood P.A., Santos E.J., Fuck R.A. 2017a. Neoproterozoic crustal growth and Paleoproterozoic reworking in the Borborema Province, NE Brazil: insights from geochemical and isotopic data of TTG and metagranitic rocks of the Alto Moxotó Terrane. *Journal of South American Earth Sciences*, **79**:342-363. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2017.08.013>.

Santos L.C.M.L., Dantas E.L., Vidotti R., Cawood P., Santos E., Fuck R., Lima H. 2017b. Two-stage terrane assembly in Western Gondwana: Insights from structural geology and geophysical data of central Borborema Province, NE Brazil. *Journal of Structural Geology*, **103**:167-184. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2017.09.012>.

Santos L.C.M.L., Dantas E.L., Cawood P.A., Lages G.A., Lima H.M., Santos E.J. 2018. Accretion tectonics in western Gondwana deduced from Sm-Nd isotope mapping of terranes in the Borborema Province, NE Brazil. *Tectonics*, **37** (8): 2727-2743. <https://doi.org/10.1029/2018TC005130>.

Scheid C. & Ferreira C.A. 1991. *Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil: Estados de Pernambuco e Paraíba - Folha SB.24-Z-D-I-Patos. Escala 1:100.000*. Carta Geológica, Carta Metalogenético-previsional. Texto explicativo, Brasília, DNPM/CPRM, 140p.

Shives R. B. K., Charbonneau B. W., Ford K. L. 2000. The detection of potassic alteration by gamma-ray spectrometry-Recognition of alteration related to mineralization. *Geophysics*, **65**(6):2001-2011. <https://doi.org/10.1190/1.1444884>.

Sial A. & Ferreira V. 2016. Magma associations in Ediacaran granitoids of the Cachoeirinha-Salgueiro and Alto Pajeú terranes, northeastern Brazil: Forty years of studies. *Journal of South American Earth Sciences*, **68**:113-133. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2015.10.005>.

Silva Filho M. A. 1989. Projeto Itapetim: relatório final de pesquisa de ouro; DNPM 840280 e 286/85. Recife: CPRM. Internal report. Open access.

Souza Neto J., Legrand J., Volfinger M., Pascal M-L., Sonnet P. 2008. W-Au skarns in the Neoproterozoic Seridó Mobile Belt, Borborema Province in northeastern Brazil: An overview with emphasis on the Bonfim deposit. *Mineralium Deposita*, **43**:185-205. <https://doi.org/10.1007/s00126-007-0155-1>.

Suh C.E., Lehmann B., Mafany G.T. 2006. Geology and geochemical aspects of lode gold mineralization at Dimako- Mboscorno SE Cameroon. *Geochem. Explor. Environ. Anal.*, **6**:295-309. <https://doi.org/10.1144/1467-7873/06-110>.

Takodjou Wambo J. D., Ganno S., Djonthu Lahe Y. S., Kouankap Nono G. D., Fossi D. H., Tchouatcha M. S., Nzenti J. P. 2018. Geostatistical and GIS analysis of the spatial variability of alluvial gold content in Ngoura-Colomines area, Eastern Cameroon: Implications for the exploration of primary gold deposit. *Journal of African Earth Sciences*, **142**:138-157. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2018.03.015>.

Van Schmus W.R., Brito Neves B.B., Hackspacher P.C., Babinski M. 1995. U/Pb and Sm/Nd geochronologic studies of the eastern Borborema Province, Northeast Brazil: initial conclusions. *Journal of South American Earth Sciences*, **8**:267-288. [https://doi.org/10.1016/0895-9811\(95\)00013-6](https://doi.org/10.1016/0895-9811(95)00013-6).

Van Schmus W.R., Kozuch M., Brito Neves B.B. 2011. Precambrian history of the Zona Transversal of the Borborema Province, NE Brazil; Insights from Sm-Nd and U-Pb geochronology. *Journal of South American Earth Sciences*, **31**:227-252. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2011.02.010>.

Van Schmus W.R., Oliveira E.P., Silva Filho A.F., Toteu F., Penaye J., Guimarães I.P. 2008. Proterozoic links between the Borborema province, NE Brazil, and the central African fold belt. *Geological Society of London*, **294**:66-69. (Special Publication). <https://doi.org/10.1144/SP294.5>.

Wanderley A. A. 1999. Projeto Itapetim. Relatório Final de Pesquisa (alvarás: 721, 280, 281, 283/96). Serviço Geológico Brasileiro (CPRM), 24 p. Internal report. Open access.

Wemegah D., Preko K., Noye R., Boadi B., Menyeh A., Danuor S., Amenyoh T. 2015. Geophysical Interpretation of Possible Gold Mineralization Zones in Kyerano, South- Western Ghana Using Aeromagnetic and Radiometric Datasets. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, **3**:67-82. <http://dx.doi.org/10.4236/gep.2015.34008>.

Whitney D. L. & Evans B. W. 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, **95**(1):185-187. <https://doi.org/10.2138/am.2010.3371>.

5.2 GEOLOGICAL AND SPECTRAL CHARACTERIZATION OF THE ITAPETIM GOLD DISTRICT, NORTHEASTERN BRAZIL, USING REFLECTANCE SPECTROSCOPY AND ASTER DATA

Artigo submetido na revista Anais da Academia Brasileira de Ciências em Dezembro de 2019.

Laís Cristina Leite Pereira¹

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1811-7015> Thais Andressa Carrino¹

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8528-5225> Lauro César Montefalco de Lira Santos¹

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6098-1873>

¹Departamento de Geologia, Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Av. da Arquitetura s/n, 50740-550, Recife, Brazil

Key words: ASTER; hydrothermal alteration; lode gold; reflectance Running title: Spectral

characterization of the Itapetim district Academy section: Earth Sciences

Corresponding author:

Thais A. Carrino

E-mail: thais.carrino@gmail.com

ABSTRACT

The Itapetim district, NE Brazil, represents a favorable region to the use of remote sensing imaging and reflectance spectroscopy as tools for mineral investigation due to the occurrences of gold mineralization placed at a semi-arid climate area. We employed reflectance spectroscopy to characterize regional geological units (metaplutonic, granitic and metasedimentary rocks) and hydrothermal alteration assemblages. Spectral responses associated with two gold sectors, *i.e.* Degredo and Santo Aleixo, indicated, respectively, the presence of (1) tourmaline and sericite, and (2) epidote and biotite as the main SWIR- active hydrothermal assemblage. Signatures of each regional unit and soil cover were taken in order to understand the background spectral behavior in comparison with mineralized areas. The

main VNIR-SWIR active mineralogy includes biotite, muscovite, chlorite and hornblende in the regional units, whereas goethite and kaolinite are the most representative minerals in soil. ASTER data was employed to identify vegetation, iron oxides and kaolinite through the band rationing technique. Kaolinite related pixels were used as an indirect indicator of the presence of granites, the main source of hydrothermal fluids. The results obtained attest the reliability of using reflectance spectroscopy and multispectral imaging as methodologies in prospective campaigns in NE Brazil, as well as in similar gold deposits.

Key words: ASTER; hydrothermal alteration; lode gold; reflectance.

INTRODUCTION

Remote sensing has afforded, among additional benefits, to compile information over broad areas, characterizing geological features (*e.g.* fault systems), mineralogy and surface monitoring (Sabins 1999, Van der Meer et al. 2012, Raizer 2019). Over the last decades, it has been widely used on geologic mapping and ore exploration, mainly by the discrimination of potential mineralized settings based on their spectral signatures of related mineral assemblages or hydrothermally altered zones, for instance (Sabins 1999). Such studies usually apply integrated methodologies involving multi- and hyperspectral imaging and point analysis based on reflectance spectroscopy (*e.g.* Rowan et al. 2003, Ducart et al. 2006, Mars and Rowan 2006, Pour and Hashim 2012, Swayze et al. 2014, Kayet et al. 2018, Naletto et al. 2019, Ross et al. 2019).

Reflectance spectroscopy represents a nondestructive and relatively cheap technique capable of identifying mineral composition through their unique spectral signatures, which is based on the interaction between the target and the incident light in visible to near-infrared (VNIR) and short wave infrared (SWIR) spectral ranges (Clark 1999, Thompson et al. 1999).

Concerning gold mineralization, one of the main characteristics of Au deposits is the presence of hydrothermal alteration halos that may extend beyond the size of the ore body (McCuaig and Kerrich 1998, Groves et al. 2003). Spectral data have been widely used aiming to characterize hydrothermalized zones and to identify spectral responses of associated mineral paragenesis (Cudahy 1997, Bierwirth et al. 2002, Fresia et al. 2017, Lampinen et al. 2019). In some cases, mineralogical-spectral characterization is also obtained through processing techniques applied in multi- and hyperspectral images, such as band math,

supervised classification and principal component analysis (*e.g.* Crósta et al. 2003, Rowan et al. 2003, Carrino et al. 2015, 2018, Naleto et al. 2019). Remote sensing images are successfully applied in arid climates (*e.g.* Crósta et al. 2003, Di Tommaso and Rubinstein 2007, Swayze et al. 2014, Carrino et al. 2015, Adegoke and Bulus 2015), where rocks, hydrothermal alteration zones and other geologic features are well- preserved, and the vegetation and soil cover are poorly developed.

The present investigation aims the spectral characterization of an area of approximately 2000 km² along the Itapetim lode gold district, located in a semi-arid region of Northeastern Brazil, which is known by gold exploration since the 1940 decade. This region is marked by regional shear zones that cross-cut metavolcanosedimentary terranes, in which granitic rocks are coeval to gold mineralization (Pereira et al. 2019). For the spectral characterization, the analysis of the spectral reflectance signatures of the lithotypes, altered rocks and soils, integrated with multispectral imagery, was developed to contribute to the regional geological mapping and gold exploration in the NE Brazil.

GEOLOGICAL SETTING

The Itapetim gold district is located in the central portion of the Borborema Province (Figure 1A), along the border of the Pernambuco and Paraíba states (Figure 1B). This province corresponds to a large orogenic system, commonly divided into the Northern, Transversal and Southern subprovinces, that are bounded by the regional-scale E-W Patos and Pernambuco lineaments (Almeida et al. 1981, Van Schmus et al. 1995, Brito Neves et al. 2000). The subprovinces comprise basement domains characterized by Paleoproterozoic gneissic and migmatitic rocks and some Archean nuclei (*e.g.* Dantas et al. 2013, Santos et al. 2017, Lima et al. 2019). The basement sequences are partially covered or interleaved by Meso- to Neoproterozoic metasedimentary and metavolcanic rocks, which were intruded by several granitic plutons (Brito Neves et al. 2000).

The studied area is located in the Transversal Subprovince which comprises five terranes/domains (São José do Caiano/São Pedro, Piancó-Alto Brígida, Alto Pajeú, Alto Moxotó and Rio Capibaribe) limited by NE-SW shear zones (Brito Neves et al. 2000, Santos and Medeiros 1999, Santos et al. 2000, Medeiros 2004).

The oldest rocks are represented by the Cariris Velhos metaplutonic units (*ca.* 1000–920 Ma, Santos et al. 2010) that is represented by Recanto Complex, formed essentially by biotite or biotite-muscovite orthogneisses, and Riacho do Forno Complex, composed of

garnet-biotite-muscovite gneisses (Santos 1995). The metasedimentary rocks are represented by Riacho Gravatá Complex (*ca.* 920 Ma; Guimarães et al. 2012), São Caetano Complex (*ca.* 856 Ma; Guimarães et al. 2012) and Santana dos Garrotes Formation (*ca.* 620-660 Ma; Medeiros 2004). The former is characterized by metavolcanosedimentary members dominated by muscovite schists (Bittar 1999). The São Caetano Complex comprises a sequence of muscovite-biotite schists, interleaved with metavolcanic rocks (Santos et al. 2017 and references therein). The Santana dos Garrotes Formation is characterized by turbidity sequences represented by biotite- muscovite schists and phyllites (Bittar 1999, Medeiros 2004).

The late Neoproterozoic granitic bodies are mainly represented by the Brejinho Pluton (*ca.* 638 Ma; Guimarães et al. 2004), which is composed of porphyritic granodioritic to monzogranitic rocks containing mafic enclaves, and the NE-SW trending Teixeira Batholith (*ca.* 591 Ma; Archanjo et al. 2008), whose composition vary among granitic, quartz monzonitic and quartz syenitic (Sial et al. 2008, Guimarães et al. 2004, Archanjo et al. 2008, Sial and Ferreira 2016). This batholith has been divided into four different facies: Mãe d'Água, Jabre, Teixeira and São Sebastião (Archanjo et al. 2008). Minor granitic bodies are part of the granitic suites with trondhjemitic and calc-alkaline affinities composed respectively by granodiorites, tonalities, and quartz diorites (Ferreira and Santos 2000, Sial and Ferreira 2016).

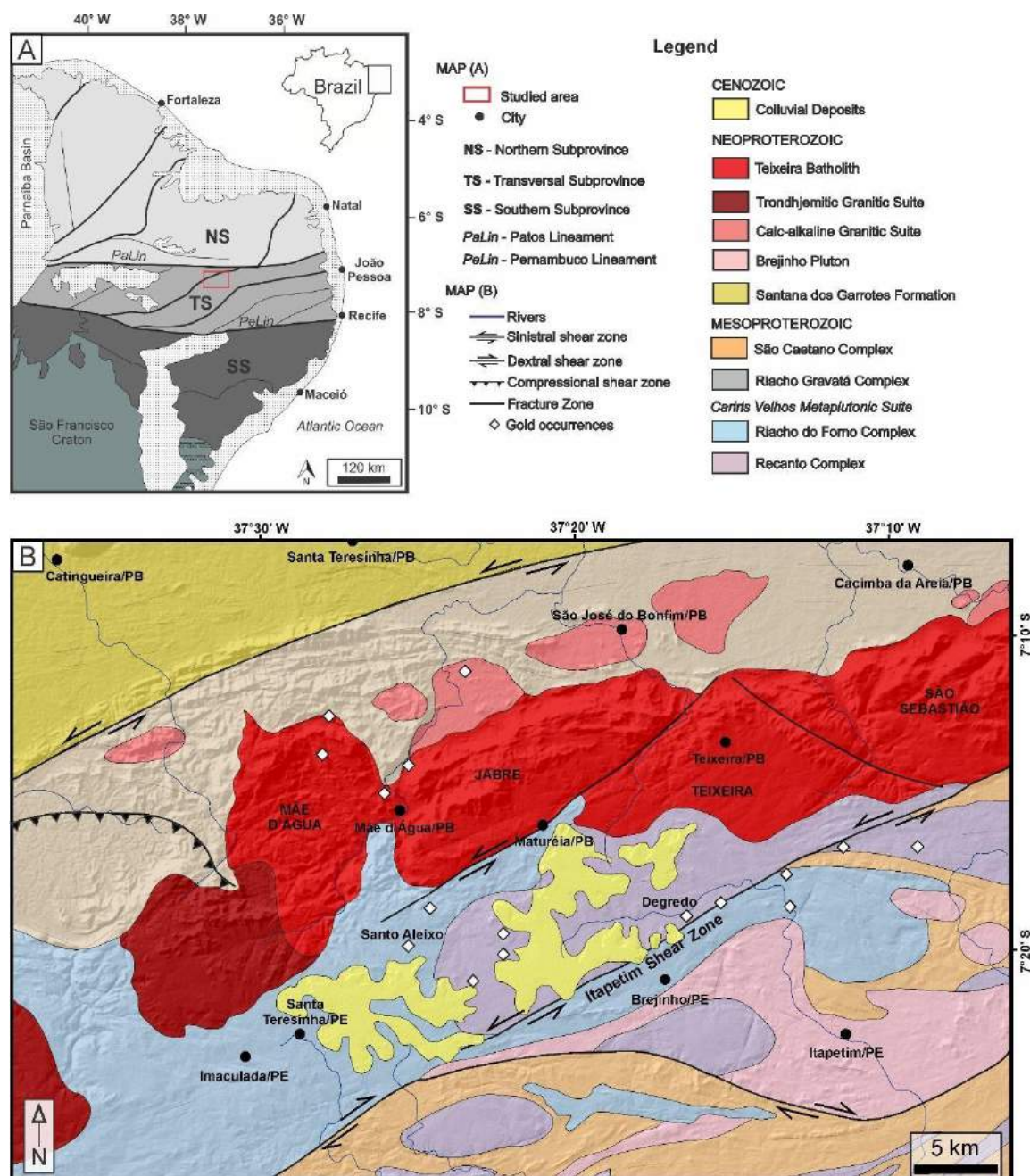


Figure 1. (A) Simplified map of the Borborema Province and its subprovinces (Modified from Santos et al. 2014). The red box highlights the Itapetim gold district. (B) Regional geologic map of the Itapetim gold district (modified from Ferreira and Santos 2000; Archanjo et al. 2008). PE: state of Pernambuco; PB: state of Paraíba.

The Itapetim gold mineralization is interpreted as a complex hydrothermal system resulted from the mantle degassing and lower crust melting, associated with lithosphere convergence during the Brasiliano Orogeny (650–500 Ma; Coutinho 1994, Maia 2002). It is suggested that the mineralizing fluids, genetically linked with calc-alkaline magmas, percolated through a net of shear zones, incorporating additional gold from supracrustal lithotypes, which was precipitated in sulfide surface's (commonly pyrite and arsenopyrite) in quartz veins, at shallow levels (Coutinho 1994). During the system evolution, there was an

extensive addition of K, B, Si and minor in Ti, Fe and Mn, which is linked to the growth of the most abundant gangue hydrothermal minerals such as sericite, chlorite, tourmaline and quartz (Coutinho 1994, 1995, Coutinho and Alderton 1998).

The mineralized quartz veins occur discontinuously along schist and gneiss over an area of 25 km long by 0.2 km wide, in the central portion of the N70°E oriented Itapetim Shear Zone (Figure 1B). The orebodies show commonly almond-shaped or cylindrical boudin geometry concordant to the mylonitic foliation (Silva Filho 1989, Pereira et al. 2019).

METHODOLOGY

REFLECTANCE SPECTROSCOPY AND PETROGRAPHY

Rock (n=77) and soil (n=7) samples were analyzed using the portable ASD FieldSpec® 4 Standard Resolution spectroradiometer at the Institute of Geosciences, University of Campinas, Brazil. This instrument measures 2151 spectral channels, acquiring a continuous spectrum with a 3 nm sampling interval in the VNIR range (350 to 1000 nm) and a 10 nm interval in the SWIR range (1000 to 2500 nm) (Malvern Panalytical 2018). The number of measurements varied between 3 and 16 for each sample, totalizing 491 reflectance spectra. The spectra were interpreted qualitatively using the ENVI® software, and references such as Hunt (1977), Hunt and Ashley (1979), Clark et al. (1990, 2007), Clark (1999), Bierwirth (2008) and Pontual et al. (2008) were used as a guide for the spectral interpretations. The continuum removal technique (hull quotient) was applied for the spectra normalization, enhancing the absorption features, mainly their characteristic shape and depth (Clark and Roush 1984).

Besides, 40 rock thin sections were produced for petrographic and textural investigations. The abbreviations used to point out minerals in field and thin section pictures follow the standard suggested by Whitney and Evans (2010). For the purpose of this research, we have visited two of the major mineralized sectors in studied area: the Santo Aleixo and Degredo sectors (see Figure 1).

ASTER DATA

ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) data were acquired on December 6, 2006, and comprise AST_7XT VNIR-SWIR crosstalk-

corrected reflectance data. The scene covers an area of 60x60 km² and it is characterized by three visible to near-infrared (VNIR) bands and six shortwave infrared (SWIR) bands, marked by spectral resolution of 15 m and 30 m, respectively (Table 1). Band math was used to emphasize the vegetation, iron oxides and kaolinite. The vegetation cover was enhanced by using the band 3/band 2 ratio due to the contrast of high and low reflectance, respectively, in the regions of 780-860 nm (red edge) and 630- 690 nm (chlorophyll absorption; Bannari et al. 1995). Kaolinite-bearing pixels, on the other hand, were identified by the band 7/band 6 ratio, since its most pronounced absorption feature is placed at band 6 (~2200 nm) derived from Al-OH bonds (Pontual et al. 2008) and the interval between 2235-2285 nm (band 7) represents the most reflective. The ratio of band 4/band 3 was used to identify iron-bearing minerals (*e.g.* goethite, hematite), by highlighting the ferric iron response (Gozzard 2006). For a better regional visualization of band rationing results, the data were integrated with the ASTER band 3 through the IHS technique (Harris 1999) for image sharpening. In addition, ASTER band 4, 3, 2 (RGB) color composite was also produced to highlight the main spectral responses from the studied area.

Table 1. Specification of VNIR and SWIR spectral bands of the ASTER sensor (Abrams et al. 2002).

Subsystem	Band	Spectral range (nm)	Spatial resolution
VNIR	1	520 – 600	15 m
	2	630 – 690	
	3	780 – 860	
SWIR	4	1600 – 1700	30 m
	5	2145 – 2185	
	6	2185 – 2225	
	7	2235 – 2285	
	8	2295 – 2365	
	9	2360 – 2430	

RESULTS

CHARACTERIZATION OF THE GEOLOGICAL UNITS

Local geology and petrography

The Cariris Velhos metaplutonic Suite (Recanto and Riacho do Forno complexes) are represented by metagranites, *augen* gneisses (Figure 2A) and mylonites. The main minerals comprise quartz (40-55%), potassic feldspar (20-40%), biotite (5-15%), epidote (1-3%), muscovite (1-2%), chlorite (1-2%), titanite and apatite (<1%). The foliation is frequently marked by the alignment of biotite and chlorite (Figure 2B), with local magnetite. Main petrographic aspects include recrystallization of quartz, chloritization of biotite and sericitization of potassium feldspar.

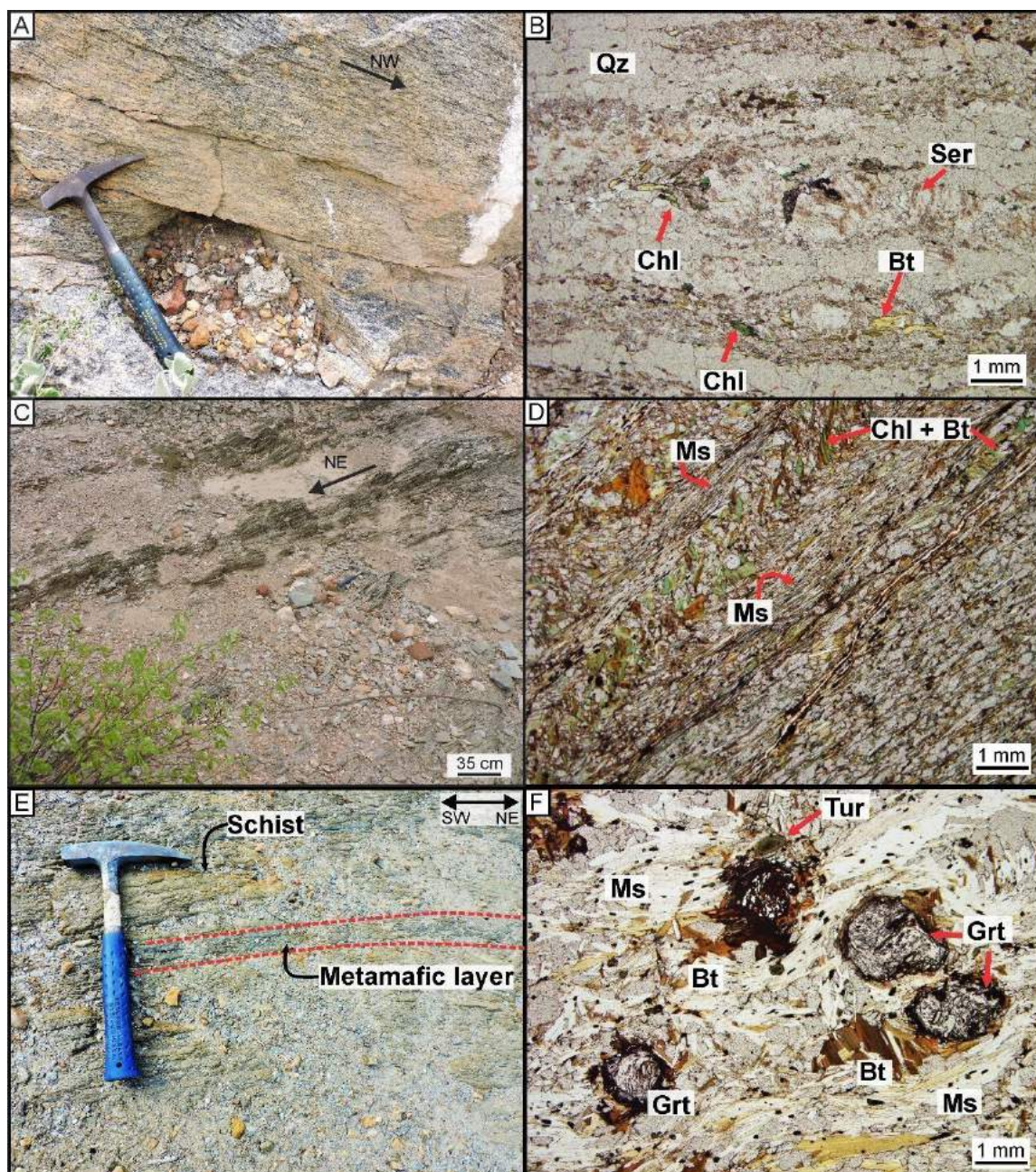


Figure 2. Field aspects and thin section features of the geological units of the studied area. *Augen* gneiss from the Cariris Velhos Suite (A) and the associated foliation marked by biotite and chlorite alignments (B). (C) Phyllite layers from the Riacho Gravatá Complex, composed by

folded muscovite, chlorite and biotite lamellae (D). Garnet-biotite- muscovite schist from the São Caetano Complex, interleaved with metamafic rock layer (E), and detail of coronitic garnet crystals and tourmaline prisms indicated by red arrows (F). Bt: biotite; Chl: chlorite; Ms: muscovite; Qz: quartz; Tur: tourmaline.

The Riacho Gravatá Complex is composed of grayish green to grayish brown phyllitic and slaty rocks (Figure 2C), and quartz (40-45%), biotite (15-20%), muscovite (15-20%), chlorite (15-20%) and feldspar (5%) represent its main mineralogy. Phyllosilicates mark the well-defined schistosity of these rocks. Chlorite is interpreted as the result of biotite replacement (Figure 2D).

The São Caetano Complex is characterized by schists consisting of quartz (45- 50%), muscovite (25%), biotite (20%), garnet (5%), tourmaline (1-2%), allanite (1%), opaque minerals (1%). They occur as fine-grained, ochre colored rocks, showing millimetric banding defined by quartz-feldspathic and micaceous layers, which are occasionally intercalated with metamafic layers (Figure 2E). Muscovite and biotite crystals mark the rock foliation, whilst tourmaline and granoblastic garnet appear in a lesser extent (Figure 2F). Sericite is commonly formed from plagioclase alteration, whilst chlorite is interpreted as a product from the biotite destabilization.

The Santana dos Garrotes Formation is represented by brown to gray phyllites (Figure 3A) composed essentially by quartz (40-50%), biotite (10-15%) and muscovite (40-45%) disposed along the foliation planes (Figure 3B).

The Brejinho Pluton is characterized by mesocratic, porphyritic (whose porphyry crystals are made of potassium feldspar) monzogranites with mafic enclaves (Figure 3C). The main mineralogy of the monzogranites are represented by quartz (~35%), potassium feldspar (~25%), plagioclase (~30%), biotite (~10%), hornblende (~5%) epidote (~1%), titanite (<1%) and, punctually, calcite (Figure 3D). The enclave matrix is composed essentially of quartz (30-35%) and plagioclase (30-35%), indicative of tonalitic composition, whereas biotite (15%) and hornblende (~10%) compose the main mafic phases. Epidote and titanite are the main accessory minerals.

The Teixeira Batholith varies from monzogranite and syenogranite in composition [plagioclase (30-35%), quartz (~30%), potassium feldspar (~25-35%)] (Figure 3E). The main mafic phases are hornblende (~5-10%) and biotite (~2-7%). The former marks a moderately developed magmatic foliation (which might be present as mafic deformed clots), being partially altered into chlorite (Figure 3F). Plagioclase and potassium feldspar show moderate saussuritization and sericitization, respectively.

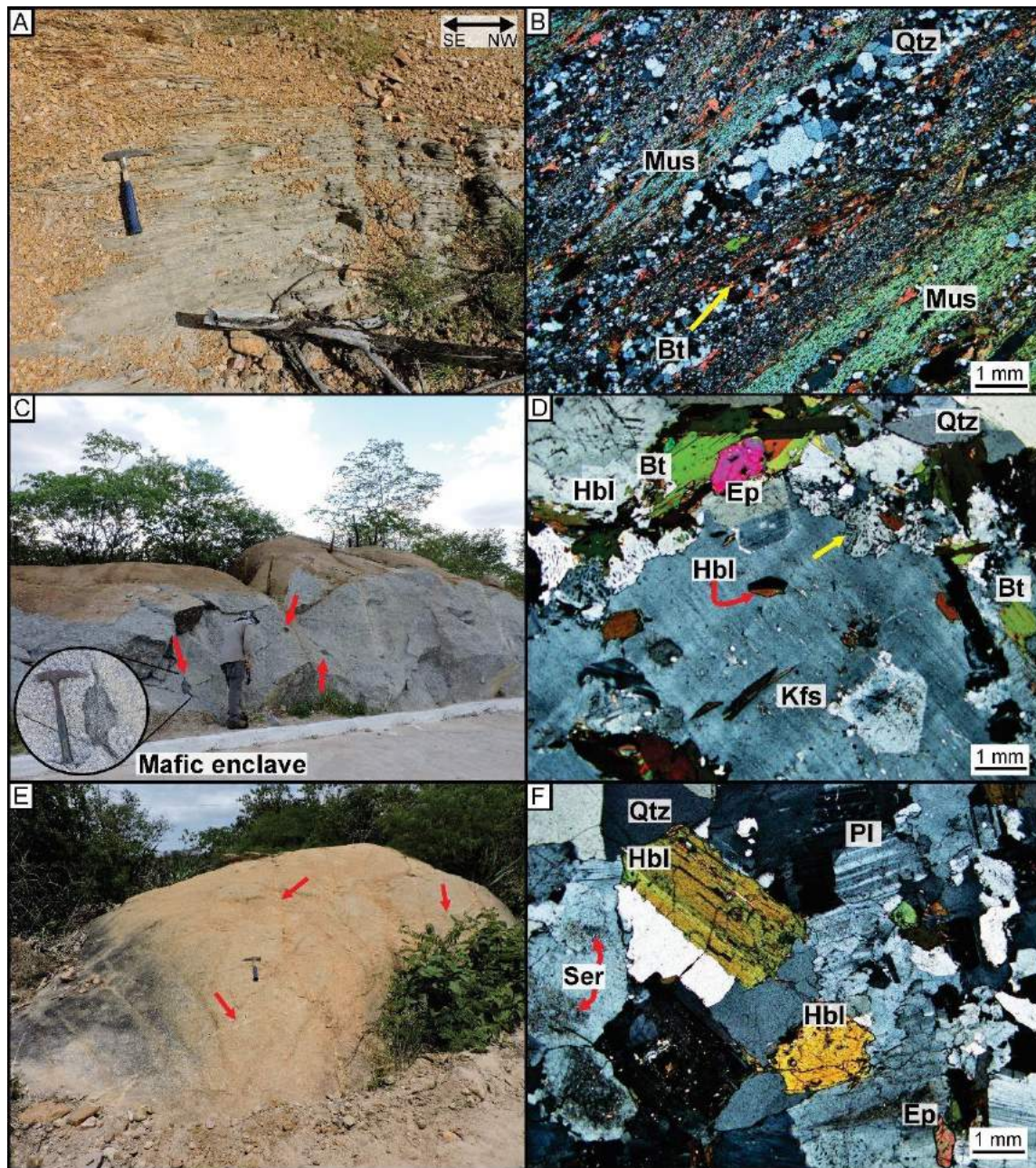


Figure 3. Field and petrographic aspects of the metasedimentary and granitic units. Overview of slate outcrop from Santana dos Garrotes Formation (A) and microscopic details such as alternating layers of muscovite and biotite in very fine quartz matrix (B). Overview of Brejinho Pluton's outcrop marked by common mafic enclaves (see red arrows) (C), and microscopic characterization of granite from this unit containing porphyroblast of potassium feldspar, hornblende, biotite and epidote (D). Teixeira Batholith outcrop (E), marked by monzogranite characterized by epidote, hornblende and sericitization of feldspar (F). Bt: biotite; Ep: epidote; Hbl: hornblende; Kfs: potassium feldspar; Ms: muscovite; Pl: plagioclase; Qtz: quartz; Ser: sericite.

Spectral analysis

The spectral characterization of the regional units reveals the predominance of minerals such as goethite, biotite, muscovite, kaolinite, sericite, chlorite and hornblende (Table 2; Figure 4A, B).

Table 2. Summary of the main spectral responses related to the main regional geological units of the studied area.

Geological Units	Rock	Absorption features of VNIR-active minerals	Absorption features of SWIR-active minerals
Cariris Velhos Suite	Biotite gneisses	Broad absorption feature at VNIR range (ferrous iron from biotite) (Pontual et al. 2008).	Muscovite (deep absorption at ~2200 nm and subtle feature at 2438 nm; Al-OH bonds). Biotite and chlorite show ambiguous absorption features at 2250 nm (Fe-OH) and ~2350 nm (Mg-OH). OH- related absorption feature at 1400 nm is associated with muscovite, chlorite and biotite (Clark et al. 1990; Pontual et al. 2008).
Riacho Gravatá Complex	Biotite-muscovite schists	Broad absorption feature at the VNIR range, derived from	Muscovite (~2200, 2438 nm; Al-OH bonds). Biotite and

		the ferrous iron (chlorite and biotite) (Pontual et al. 2008), subtle features at ~730, ~925 and ~1130 are arisen from Fe ⁺² in chlorite (Pontual et al. 2008).	chlorite show ambiguous absorption features at 2250 nm (Fe-OH) and 2350 nm (Mg-OH). OH-related absorption feature at 1400 nm is associated with muscovite and biotite (Clark et al. 1990; Pontual et al. 2008).
São Caetano Complex	Garnet-biotite-muscovite schists	Goethite (678 and 980 nm; ferrous iron) (Hunt 1977; Hunt and Ashley 1979; Pontual et al. 2008). Subtle features at ~925 and ~1130 indicate presence of chlorite (Pontual et al. 2008).	Muscovite (2200, 2346 and 2436 nm; Al-OH bonds). Subtle absorption at ~2250 (Fe-OH) indicates biotite in minor quantity. OH-related absorption feature at 1400 nm is associated with muscovite and biotite (Clark et al. 1990; Pontual et al. 2008).
Santana dos Garrotes Formation	Muscovite phyllite	Goethite (678 and 980 nm; ferrous iron) (Hunt 1977; Hunt and Ashley 1979; Pontual et al. 2008).	Predominance of muscovite (deeper absorption features at ~1400 and ~2200 nm and subtle at 2345

			and 2430 nm; Al-OH bonds) (Clark et al. 1990; Pontual et al. 2008).
Brejinho Pluton	Monzogranite with tonalitic enclaves	Broad absorption feature at VNIR range (ferrous iron from biotite and hornblende).	Monzogranite and tonalitic enclaves are characterized by ambiguous absorption features of biotite and hornblende (2250 nm – Fe- OH-, and ~2330 and ~2390 nm – Mg-OH), and subtle absorption of sericite at 2200 nm (Al-OH). Subtle OH- related absorption feature at 1400 nm is associated with the three referred minerals (Clark et al. 1990; Pontual et al. 2008).
Teixeira Batolith	Granite	Do not show absorption features.	Biotite (2250 nm – Fe-OH-, 2324 and 2392 nm – Mg-OH), and kaolinite, derived from the weathering of feldspar (double

			absorption features at 1395-1410 nm – OH, and 2165-2200 nm – Al-OH). Sericite (2200 nm) (Clark et al. 1990; Pontual et al. 2008).
--	--	--	---

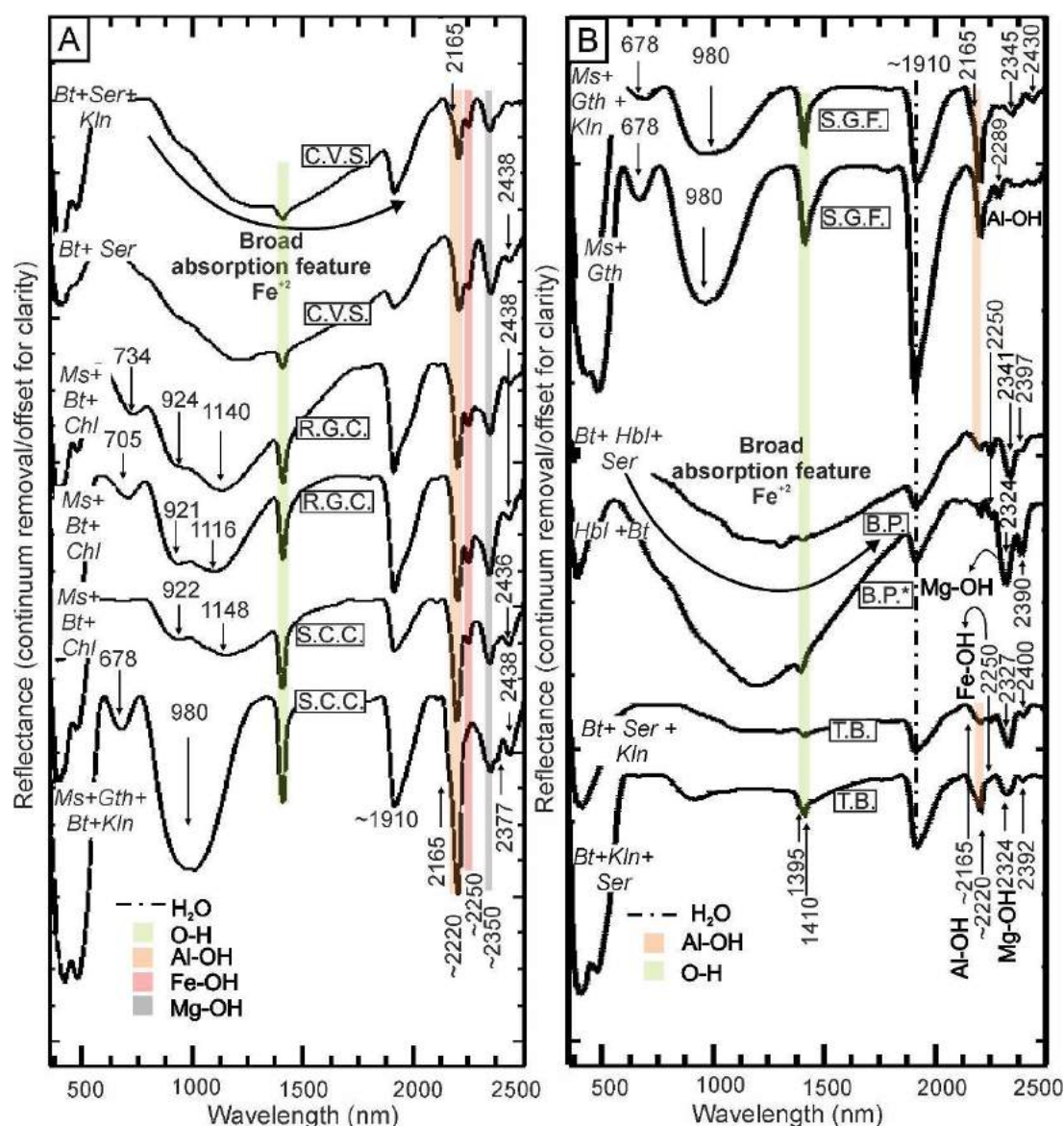


Figure 4. Stacked reflectance spectra of geological units: (A) Cariris Velhos Suite (C.V.S.), São Caetano Complex (S.C.C.) and Riacho Gravatá Complex (R.G.C.); (B) Santana dos Garrotes Formation (S.G.F.), Brejinho Pluton (B.P.), Brejinho Pluton enclaves (B.P.*) and Teixeira Batholith (T.B.). Bt: biotite; Chl: chlorite; Gth: goethite; Hbl: hornblende; Kln: kaolinite; Ms: muscovite; Ser: sericite.

In most units, the spectral mixture might cause ambiguous responses, as in the case of mafic minerals such as biotite, chlorite and hornblende, whose spectral features overlap at ~2250 nm (Fe-OH) and ~2330-2350 nm (Mg-OH). Kaolinite appears as weathering product of potassium feldspar in granitic plutons, such as the Teixeira Batholith (Figure 4B). Also, the absorption feature at ~1900 nm may be related to molecular water present in sericite or associated with sample humidity. In such cases, petrographic data was used as a base to discriminate the mineralogy.

SOIL SPECTRAL CHARACTERIZATION

Six types of soil were recognized in the studied area. In general, they are observed making up shallow profiles predominately showing ~10-50 cm in thickness, but in some occurrences can reach up to 1.5 m. The most common soil cover is characterized by sandy to sandy-clay, partially loose, whitish colored soils along the Teixeira Batholith (type 1; figure 5A). In varieties of granites enriched in mafic minerals (~15%), the soils are reddish and sandy-clay, presenting widespread pebbles of iron oxides in its surface (type 2; figure 5B). The São Caetano Complex residual soils may be present as reddish gravelly sand textured covers, containing angular to sub-angular pebbles (type 3; figure 5C) or as light brown colored sandy-clay soils (type 4; figure 5D). In addition, residual soils of amphibolites and gneisses are also present. The former is represented by dark-red sandy-clay soils (type 5; figure 5E), whereas the latter has a light yellow color, argillaceous texture and shows remnants of gneiss texture represented by weathered feldspar crystals partially transformed into kaolinite (type 6; figure 5F).

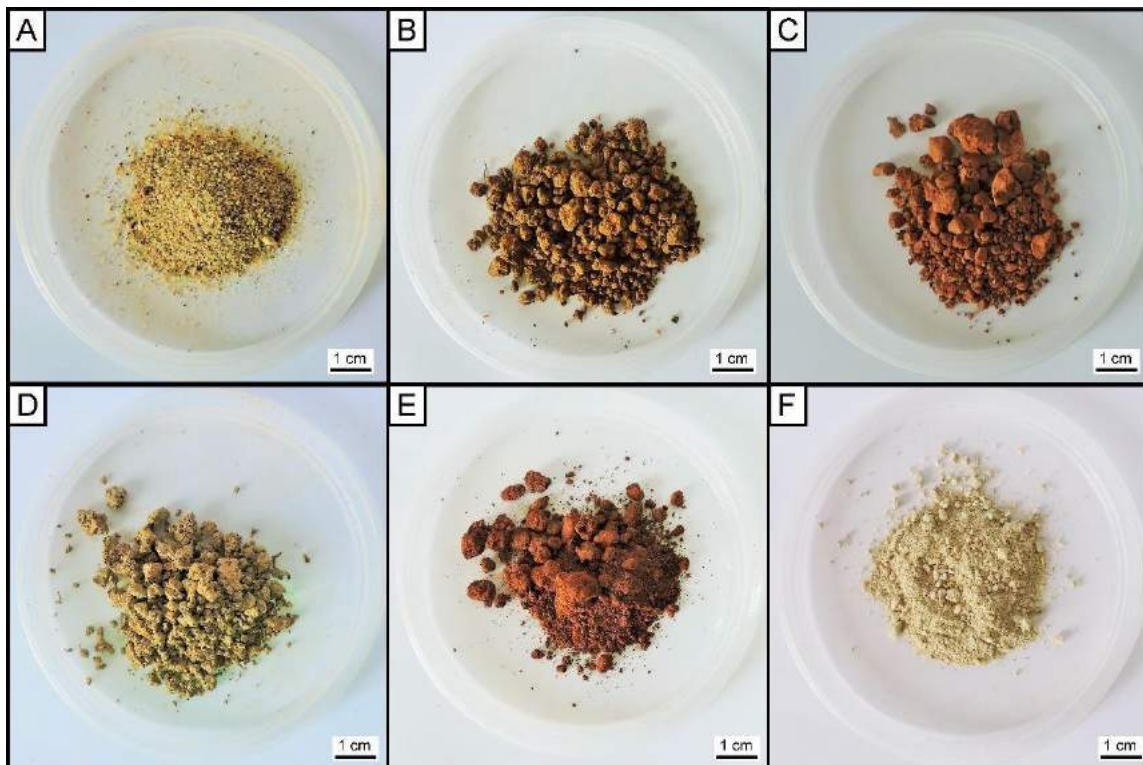


Figure 5. Types of soil present in the studied area. (A) Type 1: sandy to sandy-clay whitish soil. (B) Type 2: sandy-clay reddish soil. (C) Type 3: gravelly sand textured, reddish soil. (D) Type 4: light brown, sandy-clay soil. (E) Type 5: dark-red sandy-clay soil. (F) Type 6: light yellow, argillaceous soil.

Although the soils have different sources and present variable physical characteristics, such as texture and color, the main identified minerals through reflectance spectroscopy were similar (Figure 6). All spectra are marked by kaolinite absorption features, including the double absorption features at ~ 1400 and ~ 1415 nm (OH related) and at ~ 2167 and ~ 2205 nm (Al-OH related), along with three subtle absorptions at ~ 2314 , ~ 2350 , ~ 2380 nm (Pontual et al. 2008). Even though goethite absorption features at ~ 660 - 679 and ~ 950 nm (Fe^{+3} related) are present in all soil's spectra, deeper absorption features are observed in red and light brown colored soils associated with mafic mineral-bearing granites (Teixeira Batholith), São Caetano Complex rocks and amphibolites (Figure 6).

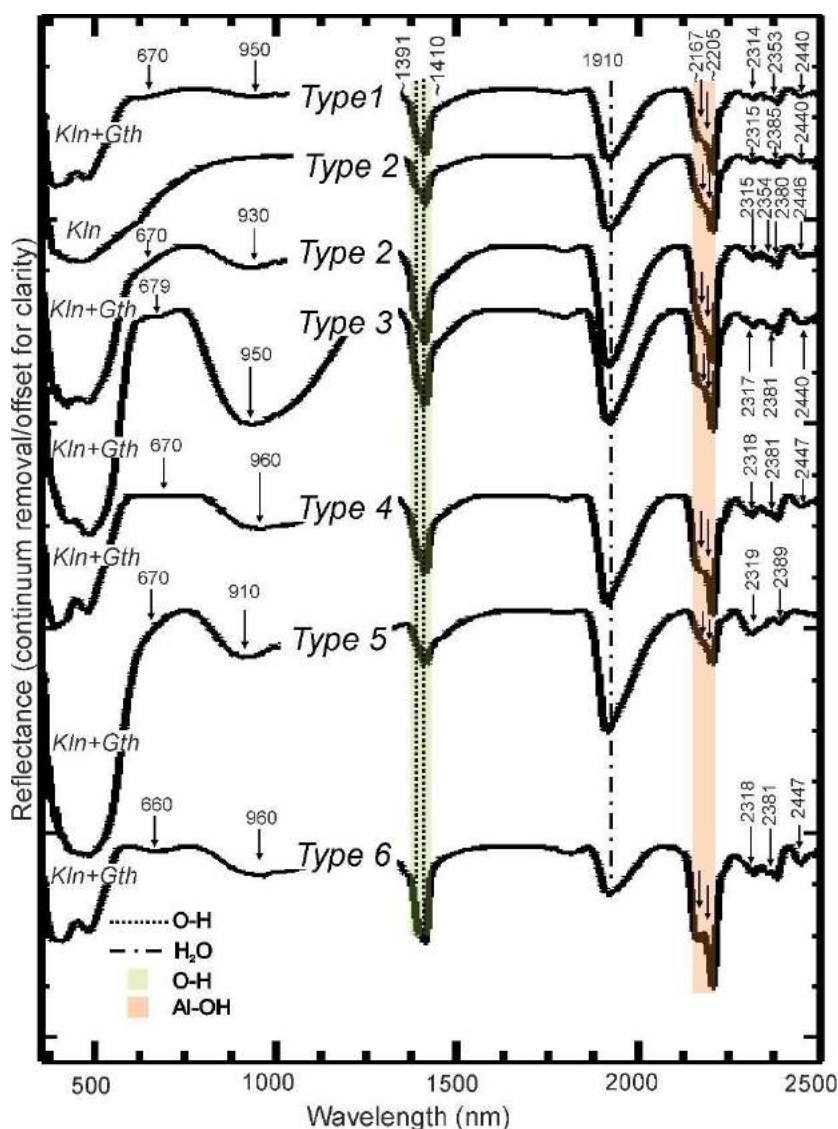


Figure 6. Stacked reflectance spectra of soils from the Itapetim region. Gth: goethite; Kln: kaolinite.

CHARACTERIZATION OF MINERALIZED SECTORS

Macroscopic and microscopic description

The Santo Aleixo and Degredo mineralized sectors (Figure 1B) were sampled for petrographic and spectral characterization of alteration minerals and host rocks.

In the Santo Aleixo sector, quartz veins are hosted by mylonites of the Cariris Velhos metaplutonic Suite (Figure 7A, B). These rocks are composed of quartz (~55%), potassium feldspar (~25%), plagioclase (~10%), with minor biotite (~10%), muscovite (~2-3%), sericite and epidote (<1%). Biotite, muscovite and quartz (ribbons) mark the sub-vertical ENE-WSW

trending foliation planes. In this sector, the 2–30 cm thick mineralized quartz veins occur intercalated with the hydrothermal assemblage marked by biotite (10%) and epidote (7-15%) (Figure 7C), with minor titanite (Figure 7D) and chlorite (the last one, resultant of replacement of biotite crystals).

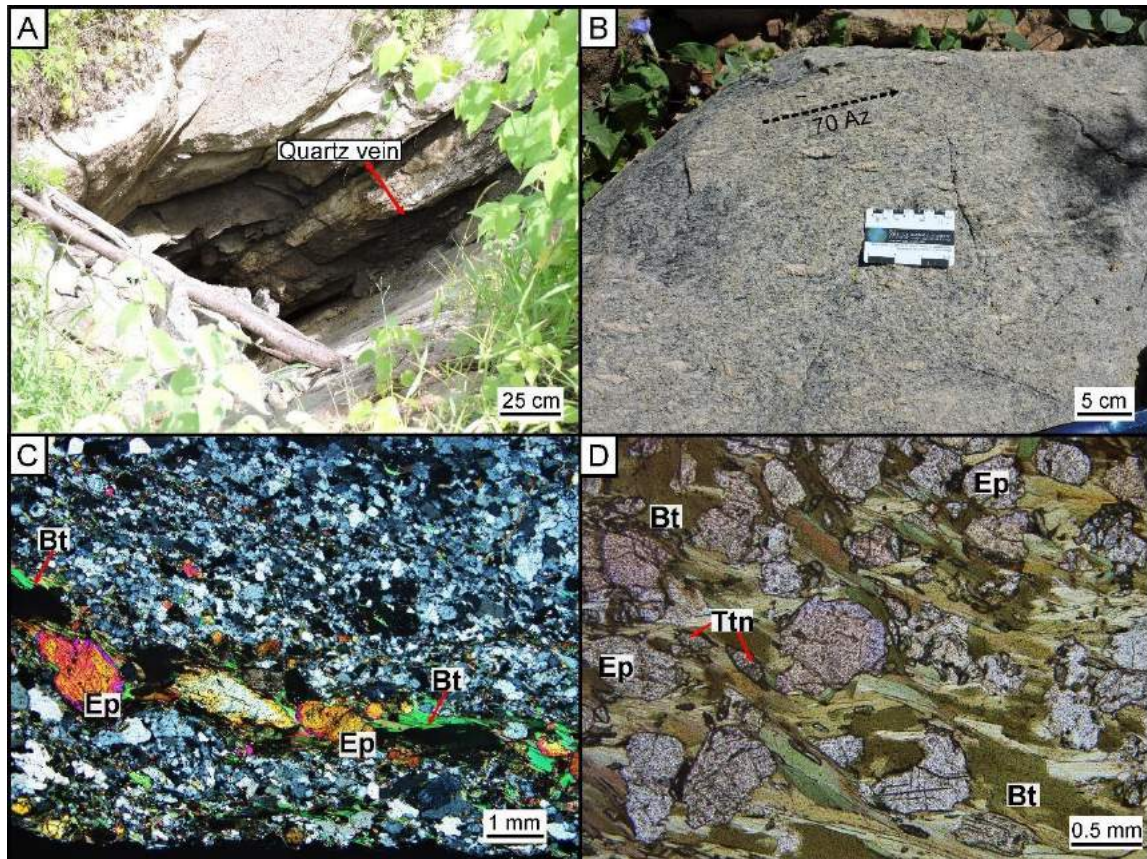


Figure 7. Rock samples from the Santo Aleixo mineralized sector. (A) Quartz vein hosted by mylonite, and detail of ENE-WSW oriented mylonite (B). (C, D) Thin sections showing hydrothermal alteration mineralogy marked by epidote and biotite, with minor titanite. Bt: biotite; Ep: epidote; Ttn: titanite.

The host rocks in the Degredo sector are characterized by mylonites composed mainly of quartz and feldspar, which make up a fine-grained matrix and occasionally form *augens*, also presenting percentage of muscovite and biotite varying between 3% and 10% (Figure 8A, B). Muscovite may be present as inclusions in feldspar or as small crystals making up the rock foliation along with biotite. Some samples show a high degree of sericitization of potassium feldspar and chlorite lamellae might be present within fracture planes. The hydrothermal alteration depicted by orange quartz-feldspathic rocks with mylonitic texture is common. Those rocks are enriched in muscovite and is cross-cut by veins (2 mm - 1 cm thick)

composed of quartz and/or tourmaline, arranged parallel- or transversely to the mylonitic foliation (Figure 8C, D). Tourmaline crystals show a blue- green pleochroism (Figure 8E), typical of hydrothermal specimens, whereas in the Degredo sector, hydrothermalized samples are represented by aggregates of biotite and titanite (Figure 8F).

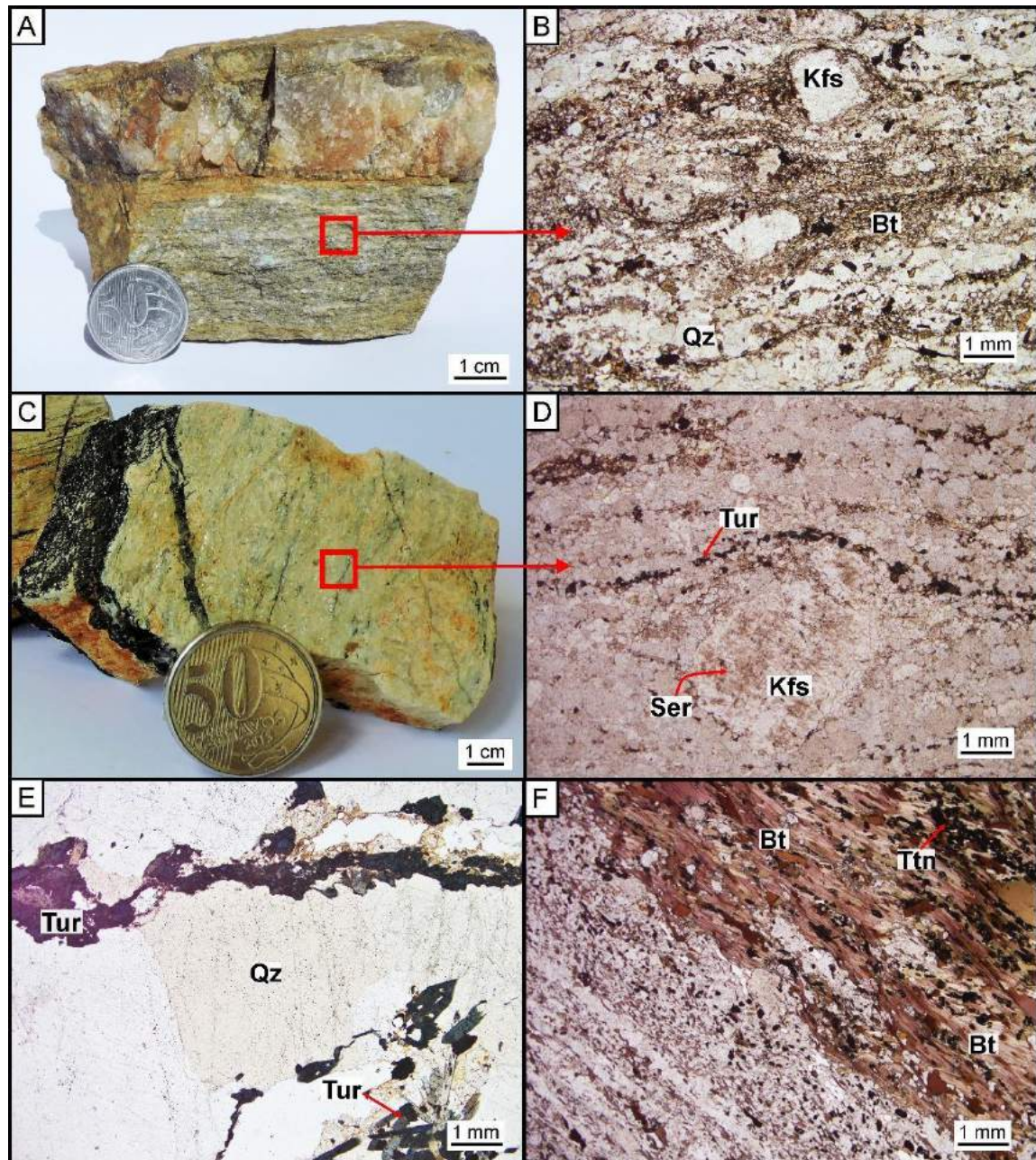


Figure 8. Rock samples from Degredo mineralized sector. (A) Mylonite in contact with quartz vein, and detail of the foliation marked by biotite and some quartz and feldspar crystals (B). (C) The most common type of hydrothermal alteration, depicted by feldspathic rock, and detail of potassium feldspar crystals partially altered to sericite and thin layer of tourmaline (D). (E) Hydrothermal tourmaline exhibiting a typical blue-green pleochroism. (F) Aggregate of biotite and titanite in contact with mylonite. Bt: biotite; Kfs: potassium feldspar; Qz: quartz; Tur:

tourmaline.

Spectral analysis

In the Santo Aleixo sector, biotite and epidote are the main SWIR-active alteration minerals, that are characterized by ambiguous absorption features absorption at 2250 nm (Fe-OH) and 2330-2341 nm (Mg-OH) (Figure 9A-D). All spectra show absorption features at 2388-2394 nm (Mg-OH bonds) associated with biotite (Clark et al. 1990, Pontual et al. 2008). A subtle absorption feature at ~2206 nm may indicate a response driven by sericite, as verified over petrographic analysis (Figure 9E).

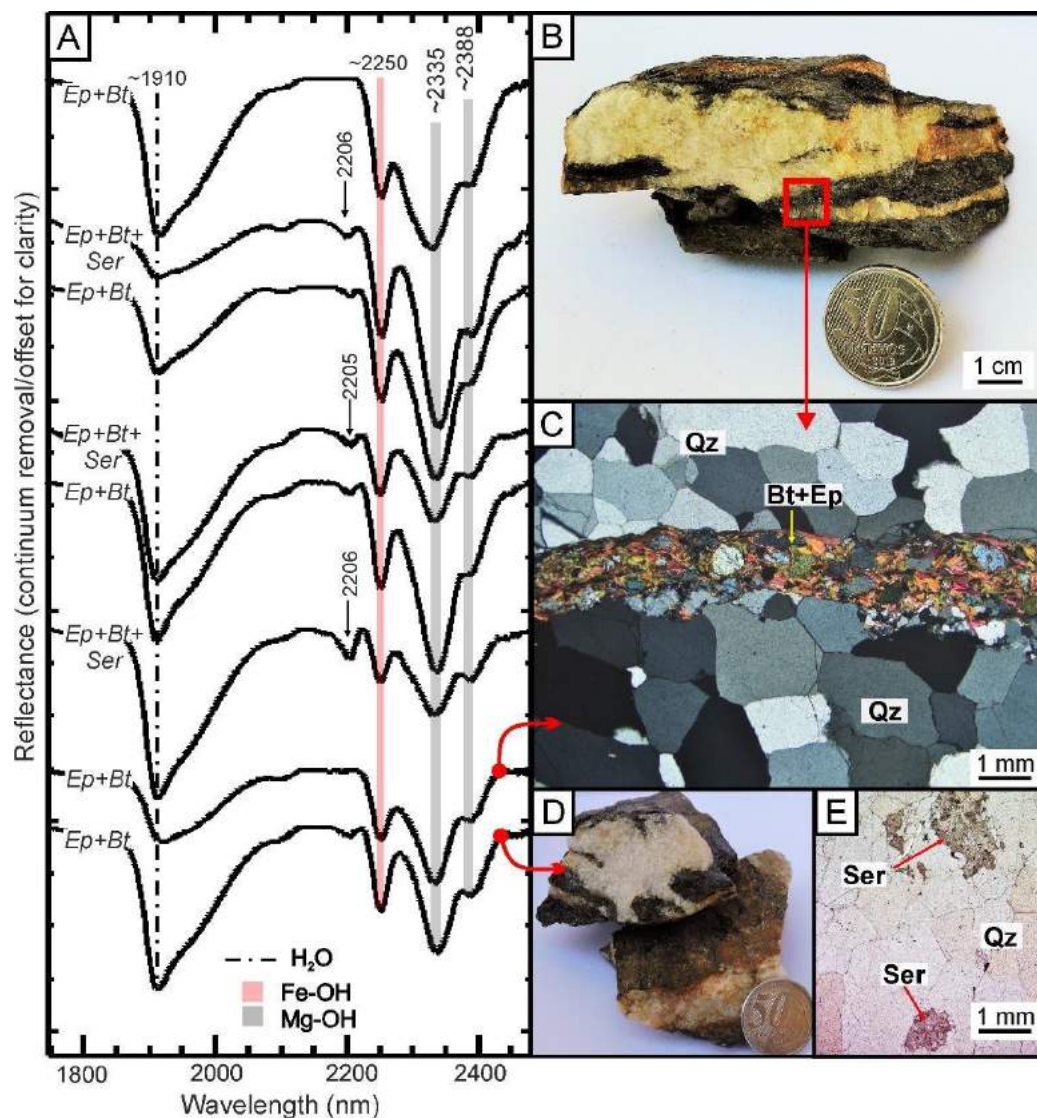


Figure 9. Stacked reflectance spectra of hydrothermally altered rocks from the Santo Aleixo sector, dominated by epidote and biotite absorption features (A). Examples of Santo Aleixo sector rocks, composed essentially by quartz, epidote and biotite (B, C, D), and photomicrograph of sericite in quartz vein (E). Bt: biotite; Ep: epidote; Qz: quartz; Ser: sericite.

The spectral signature related to the hydrothermal alteration, identified in the Degredo sector, is represented by absorption features of tourmaline (schorlite) in quartz veins (Figures 10A-D). Schorlite is defined by absorptions at ~ 2200 nm (Al-OH bonds), ~ 2245 , ~ 2300 and ~ 2366 nm, these last possibly derived from B-OH bonds (Bierwirth 2008). Sericite also occurs in the samples, but its main absorption feature at ~ 2200 nm (Al-OH bonds) is overlapped by the absorption of schorlite (Figure 10A).

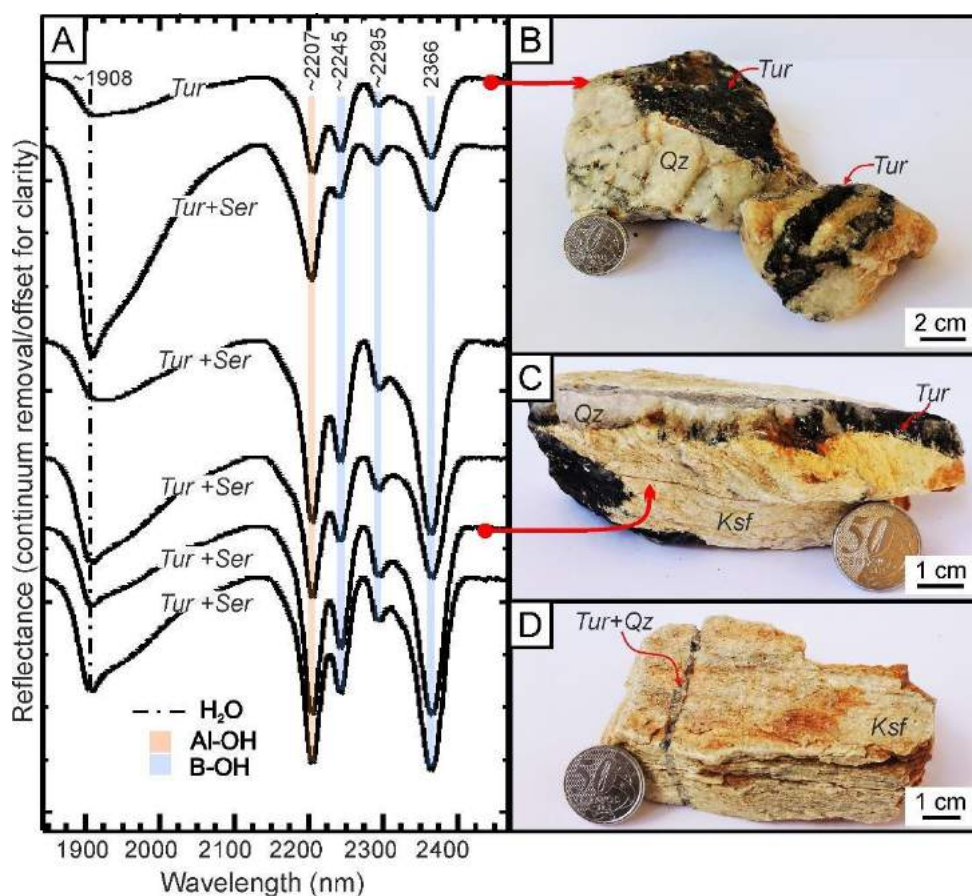


Figure 10. Stacked reflectance spectra of hydrothermally altered rocks from the Degredo sector, dominated by tourmaline (schorlite) and sericite absorption features (A). Examples of altered rocks in the Degredo sector, composed of quartz, potassium feldspar and tourmaline, are shown in (B), (C) and (D). Kfs: potassium feldspar; Qz: quartz; Ser: sericite; Tur: tourmaline.

The hydrothermally altered rocks from Degredo sector are associated with mylonites whose spectral response is marked mostly by muscovite and biotite (Figure 11A-E). In general, the spectra of these rocks have similar responses, with deep and sharp features at 2200 nm (muscovite) and at ~ 2250 , ~ 2348 and ~ 2390 nm (biotite). Kaolinite appears in some

samples marked by a subtle absorption feature at ~2165 nm (Al-OH), as a weathering product from feldspar.

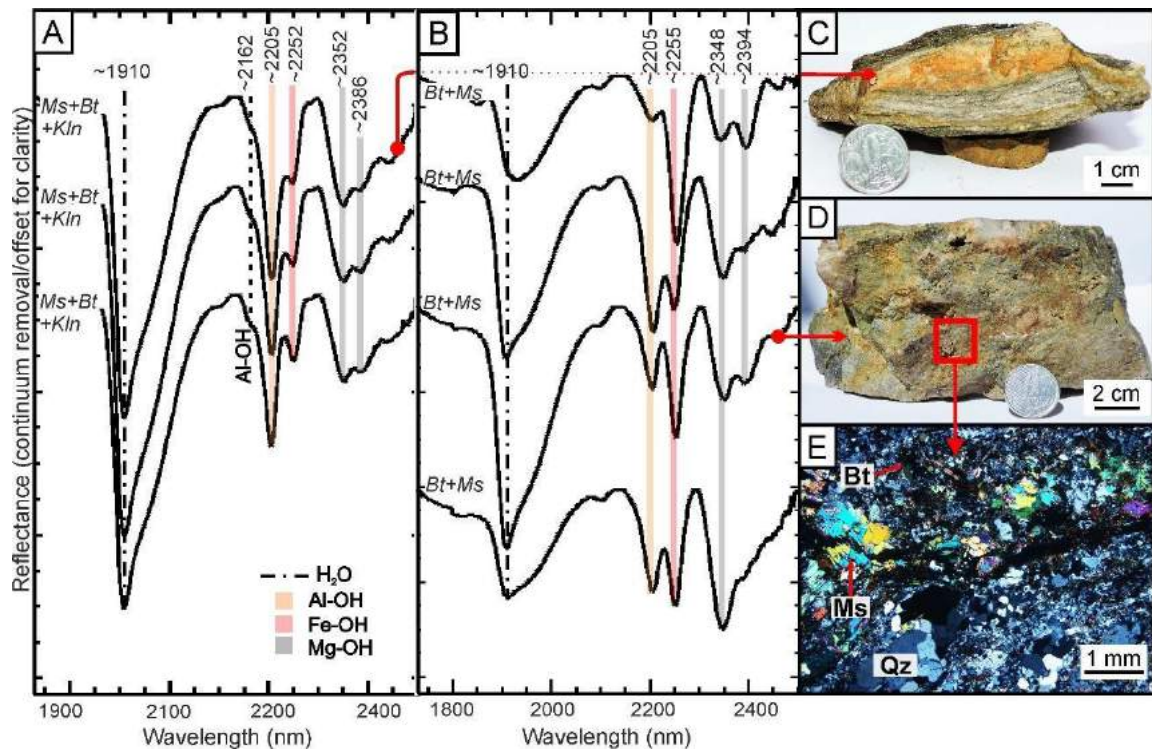


Figure 11: Stacked reflectance spectra of mylonites from the Degredo sector, dominated by biotite, muscovite and minor kaolinite (A, B). Examples of hydrothermally altered gneisses (C, D), characterized by muscovite, quartz and biotite (E). Bt: biotite; Kln: kaolinite; Ms: muscovite; Qz: quartz.

ASTER DATA PROCESSING

The ASTER data was mainly used to map Neoproterozoic granitic units, which are coeval to the genesis of gold occurrences in the studied area (*e.g.* Coutinho 1994),

based on the use of the band ratio technique (Figure 12). The granites are discriminated by the kaolinite-rich areas, as also observed in field (Figure 13).

The ASTER data was also used to assign the typical shrub vegetation cover, as it represent one of the main components in the image (Figure 14A), besides the surface areas enriched in iron-bearing minerals, which contrast with main neoproterozoic granite units (Figure 14B). In addition, based on the ASTER band 4, 3, 2 (RGB) color composite, it was possible to delineate the region of influence of Itapetim Shear Zone and its spatial relationship with gold occurrences.

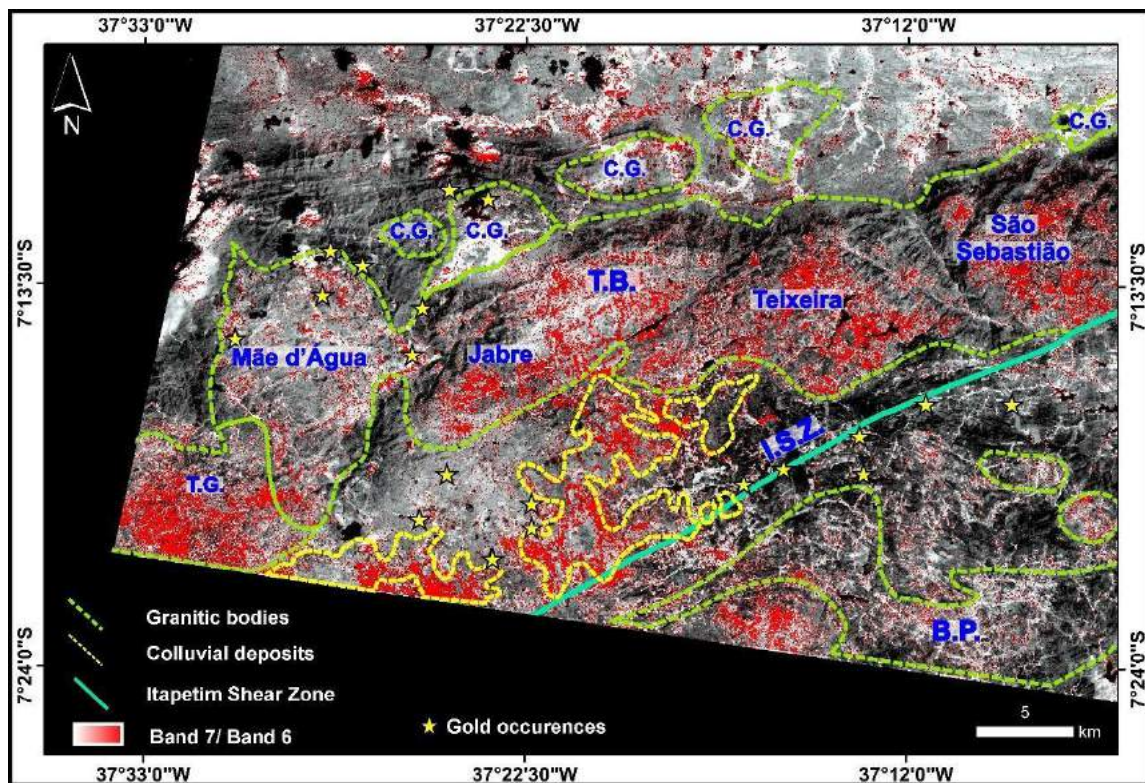


Figure 12. Band7/band6 ratio result integrated with ASTER band 3, overlain by main Neoproterozoic granitic bodies and alluvial deposits. The highest concentration of kaolinite-bearing pixels is indicated in red. B.P. = Brejinho Pluton; C.G.= Calc-alkaline granite; I.S.Z. = Itapetim Shear Zone; T.B. = Teixeira Batholith; T.G.= Trondhjemitic Granite.



Figure. 13 Field aspects related to kaolinite-bearing areas in the Teixeira Batolith region. Soil cover representing (A) the type 1 (sandy to sandy-clay whitish soil) and (B) type 2 (sandy-clay reddish soil). It is also possible to observe the typical shrub vegetation.

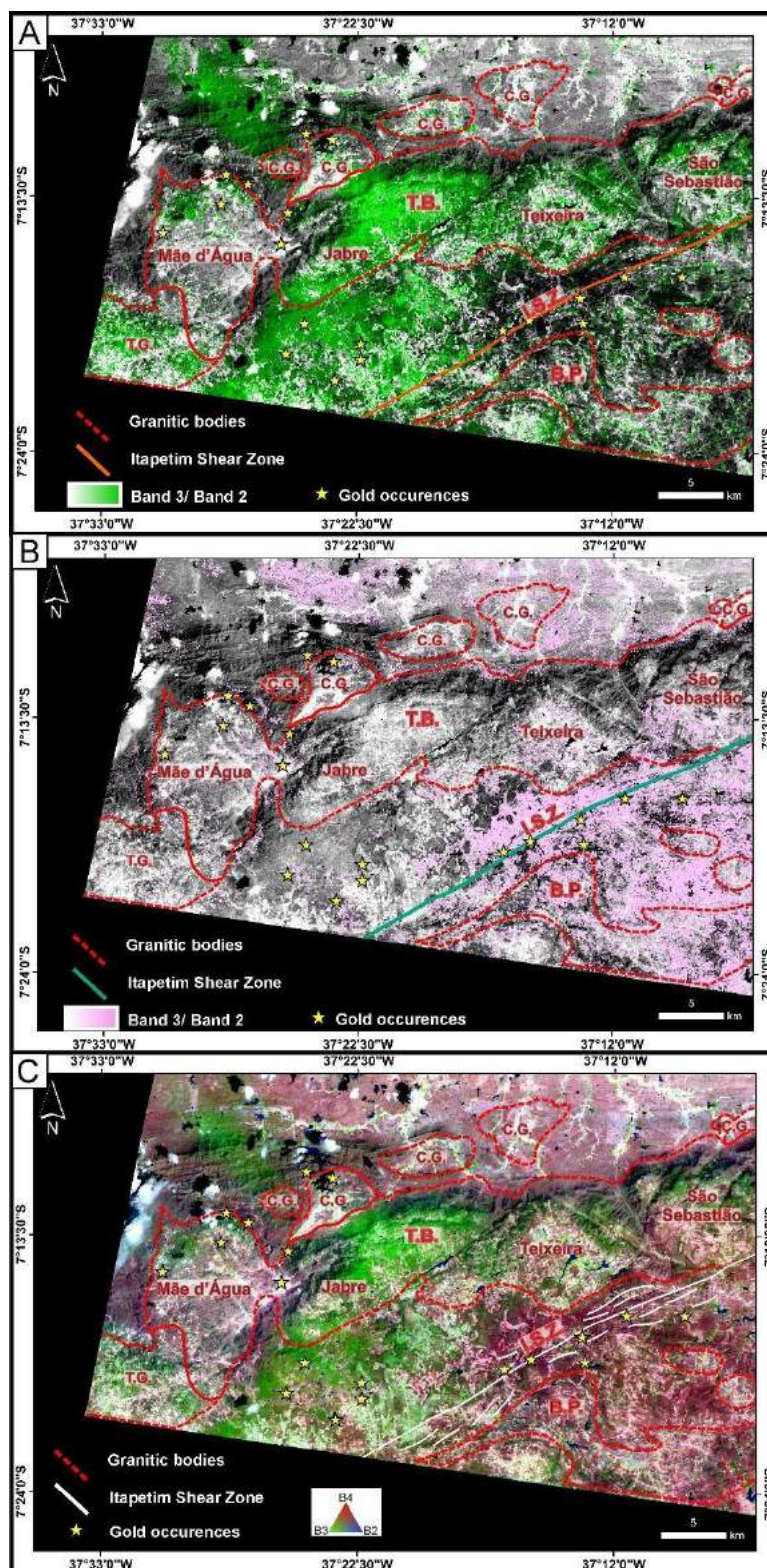


Figure 14. Results from the band 3/band 2 ratio, highlighting the vegetation cover (A), and from the band 4/band 3 ratio, indicating iron-bearing mineral related pixels (B). All results are integrated with the ASTER band 3. (C) ASTER band 4, 3, 2 (RGB) color composite of the studied area, with interpretation of the NE trending lineaments related to Itapetim Shear Zone. B.P. = Brejinho Pluton; C.G.= Calc-alkaline granite; I.S.Z. = Itapetim Shear Zone; T.B. = Teixeira Batholith; T.G.= Trondhjemitic Granite.

DISCUSSION

By the characterization accomplished in the Itapetim gold district region, we have created a spectral library for discriminating the reflectance responses of the main regional geological units, soils and hydrothermally altered rocks from the Degredo and Santo Aleixo mineralized sectors.

The regional geologic units are characterized by absorption features related to mafic minerals, such as biotite and/or chlorite and/or hornblende (Table 1, Figure 4). The spectral differentiation might be seen among the group of Neoproterozoic granites, such as Teixeira Batholith, which presents intense features of kaolinite (weathering product), and the enclave-bearing granites from Brejinho Pluton, represented by hornblende and biotite, which are characterized by broad absorption of ferrous iron in the VNIR range and vibrational absorptions in 2250 (Fe-OH) and ~2330 nm (Mg-OH) (Table 2, Figure 4B).

Supracrustal rocks of the Riacho Gravatá and São Caetano complexes show very similar spectral responses, mainly in the SWIR range, with deeper absorption features related to muscovite (~2200 nm) and mafic minerals such as biotite and/or chlorite (~2330 nm), as well. The lack of biotite-related features in SWIR range allows discriminating the Santana dos Garrotes Formation phyllites from the São Caetano Complex schists.

In regard to the spectral responses obtained over the Cariris Velhos metaplutonic suite, they are similar to those found in Teixeira Batholith. Nevertheless, the significant presence of biotite, in the former, causes a broad absorption feature in the VNIR region, not seen in the Teixeira Batholith sample spectra.

The soil covers were divided into six types according to their physical characteristics, including texture and color. All samples are marked by spectral signature related to kaolinite and goethite that are common minerals related to the weathering processes in the region. Goethite absorption features are intense and well-marked in soils related to mafic units (Figure 6).

Concerning the mineralized areas, the main alteration minerals interpreted in reflectance spectra from Degredo and Santo Aleixo gold sectors are compatible with the mineralogy described in previous studies (Scheid and Ferreira 1991, Coutinho 1994, 1995, Coutinho and Alderton 1998, Santos et al. 2014). Tourmaline has been reported as being one of the main gangue minerals of the Itapetim gold occurrences formed by the hydrothermal

event linked to the gold mineralization. The spectral responses of schorlite are ascribed to four absorption features in the SWIR range (2200-2400 nm), being this hydrothermal mineral frequently observed in Degredo sector spectra (Figure 10A). Epidote and biotite composes a recurrent assemblage in quartz veins from Santo Aleixo sector (Figures 7C, 9B-C). Sericite and muscovite, related to quartz veins and host rocks, indicate retrogressive metamorphism associated with shearing/hydrothermal processes (Coutinho 1994), and are commonly observed in petrographic and reflectance spectra (Figures 9A, B, 10A, 11 A-C), making up the most important SWIR-active aluminum- micaceous phases.

The band rationing of ASTER data allowed to identify the areas enriched in kaolinite and iron-bearing minerals, as well as the vegetation cover (Figures 12 and 14). The main advantage in characterizing granitic rocks using image processing in semi-arid regions is the formation of secondary phases such as kaolinite through the weathering of minerals from the feldspar group (*e.g.* Eswaran and Bin 1978, Berner and Holdren Jr 1979). The mineral mapping produced from the band7/band 6 ratio shows a positive spatial correlation with the granitic bodies, especially with Teixeira Batholith, whose extent was delineated by using kaolinite response as pathfinder (Figures 4B, 5, 6 and 12). On the other hand, the Brejinho Pluton and other granitic bodies display an unsatisfactory geographical relationship with this band rationing, presenting only scarce kaolinite- related pixels (Figure 12). A high concentration of kaolinite was also observed over the areas mapped as alluvial deposits, where weathering process is also intense. In the field, areas enriched in this clay mineral are characterized by the presence of type 1 and type 2 soil covers (Figures 5 and 6) which are intimately linked to the Teixeira Batholith and other similar granites (Figure 13).

The vegetation cover is concentrated in the central portion of the studied area, encompassing the mid-western region of the Teixeira Batholith (Jabre sector), and areas readily to the south (Figure 14A). The derived result from the band4/band3 ratio shows that the studied area is widely covered by iron-bearing minerals related to intense oxidation and weathering, including units such as Brejinho Pluton and metasedimentary units lying to the north of Teixeira Batholith (Figure 14B).

Although the spectral responses of the weathering, oxidation and vegetation cover (under a semi-arid climatic set up), the mineralogical cartography performed over band ratio in ASTER data was favorable in highlight granitic signatures, in special, the one associated with Teixeira Batholith, whose hydrothermal-related fluids has been interpreted, through a series of studies (*e.g.* isotopic, fluid inclusion data and field relation), as the main source of gold in the region (see Coutinho 1994, Maia 2002). Besides the concerned batholith, the Itapetim Shear Zone represents another important corridor of gold occurrences and its delineation can be observed in the ASTER band 4, 3, 2 (RGB) color composite of the studied area, as a group of NE lineaments lying between Teixeira Batholith and Brejinho Pluton (Figure 14C).

CONCLUSIONS

This study illustrates the effectiveness of the reflectance spectroscopy and multispectral imaging to characterize the spectral signatures of rocks present along the Itapetim gold district and discriminating sectors enriched in kaolinite, vegetation and iron-oxides.

We obtained the standard spectral signatures for each regional geological units (metaplutonic, granitic and metasedimentary rocks) and soil covers, to understand the background spectral responses in relation to the mineralized sectors from the Itapetim region. The main spectral signatures from the geological units are related to biotite, hornblende, chlorite, and sericite/muscovite, while goethite and kaolinite appear as the VNIR-SWIR-active minerals in all soil covers.

In relation to the spectral library produced from rocks of the mineralized areas, tourmaline, epidote and sericite are identified as the main alteration minerals, being directly linked to the input of hydrothermal fluids triggered by Brasiliano Orogeny, as corroborated by petrographic and literature data (Coutinho 1994, 1995, Coutinho and Alderton 1998, Lima et al. 2000, Maia 2002).

The ASTER data processing, performed over band rationing, was mainly effective in delineating Teixeira Batholith extents, a geological unit considered the key source of hydrothermal fluids that transported gold (*e.g.* Coutinho 1994, Maia 2002). However, the vegetation cover obliterates the visualization of part of land surface, precluding mineral identification mostly in the central zone of the studied area.

Overall, the results achieved by this study are effective and show the possibility of using reflectance spectroscopy, as well, multispectral imaging, as reliable methodologies in semi-arid regions. Special contribution comes from the use of the reflectance spectroscopy for future exploration studies in the Itapetim region, considering the systematic analysis from drill cores, being possible to discriminate the background spectral responses (geological units) from the altered rocks marked by diagnostic SWIR- active minerals (*e.g.* tourmaline, epidote, muscovite) using this rapid and non-destructive methodology.

ACKNOWLEDGEMENTS

We thank the Programa de Pós-graduação em Geociências (PPGEOC) of Departamento de Geologia from Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) for the financial support given in fieldwork. We specially thank Prof. Dr. Carlos Roberto de Souza Filho, Dr. Rosa Pabón and Dr. Rebecca Scafutto for the use of FieldSpec® at the UNICAMP. L.C.L.P. thanks the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) for the scholarship granted during the period of development of her master's thesis. Moreover, we are grateful for the Laboratório de Gemologia (LABGEM — UFPE) and its collaborators, for the use of microscopes.

REFERENCES

- ABRAMS M, HOOK S AND RAMACHANDRAN B. 2002. ASTER users handbook Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer, Pasadena, Jet Propulsion Laboratory, 135 p.
- ADEGOKE M AND BULUS G. 2015. Satellite remote sensing for mineral deposit assessment of clay in Mubi local government area of Adamawa State.” Niger Geosci 5: 26–30. doi: [10.5923/j.geo.20150501.03](https://doi.org/10.5923/j.geo.20150501.03).
- ALMEIDA FF, HASUI Y, BRITO NEVES BB AND FUCK RA. 1981. Brazilian structural provinces: an introduction. Earth Sci Rev 17: 1–29. doi: [10.1016/0012-8252\(81\)90003-9](https://doi.org/10.1016/0012-8252(81)90003-9)
- ARCHANJO CJ, HOLLANDA MHB, RODRIGUES SW, NEVES BBB AND ARMSTRONG R. 2008. Fabrics of pre- and syntectonic granite plutons and chronology of shear zones in the Eastern Borborema Province, NE Brazil. J Struct Geol 30: 310–336. doi: [10.1016/j.jsg.2007.11.011](https://doi.org/10.1016/j.jsg.2007.11.011)

BANNARI A, MORIN D, BONN F AND HUETE A.R. 1995. A review of vegetation indices. *Rem Sen Rev* 13: 95–120.

BERNER RA AND HOLDREN JR GR. 1979. Mechanism of feldspar weathering - II. Observations of feldspars from soils. *Geochim Cosmochim Acta* 43: 1173–1186.

BIERWIRTH P, HUSTON D AND BLEWETT R. 2002. Hyperspectral mapping of mineral assemblages associated with gold mineralization in the Central Pilbara, Western Australia. *Econ Geol* 97: 819–826. doi: [10.2113/gsecongeo.97.4.819](https://doi.org/10.2113/gsecongeo.97.4.819)

BIERWIRTH PN. 2008. Laboratory and imaging spectroscopy of tourmaline - a tool for mineral exploration. In: AUSTRALASIAN REMOTE SENSING AND PHOTOGRAMMETRY CONFERENCE, 14., Darwin. Proceedings..., Darwin: 12 p.

BITTAR SMB. 1999. Faixa Piancó-Alto Brígida: Terrenos tectono-estratigráficos sob regimes metamórficos e deformacionais contrastantes. PhD Thesis, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 126 p.

BRITO NEVES BB, SANTOS EJ, AND VAN SCHMUS WR. 2000. Tectonic history of the Borborema province. In: INTERNATIONAL GEOLOGICAL CONGRESS, 31., Rio de Janeiro. Proceedings..., Rio de Janeiro: p. 151–182.

CARRINO TA, CRÓSTA AP, TOLEDO CLB AND SILVA AM. 2018. Hyperspectral remote sensing applied to mineral exploration in southern Peru: a multiple data integration approach in the Chapi Chiara gold prospect. *Int J Appl Earth Obs Geoinformation*, 64: 287–300. doi: [10.1016/j.jag.2017.05.004](https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.05.004)

CARRINO TA, CRÓSTA AP, TOLEDO CLB, SILVA AM AND SILVA JL. 2015. Geology and hydrothermal alteration of the Chapi Chiara Prospect and nearby targets, southern Peru, using ASTER data and reflectance spectroscopy. *Econ Geol* 110: 73–90. doi: [10.2113/econgeo.110.1.39](https://doi.org/10.2113/econgeo.110.1.39).

CLARK RN, SWAYZE GA, WISE RA, LIVO KE, HOEFEN TM, KOKALY RF AND SUTLEY SJ. 2007. USGS digital spectral library splib06a: U.S. Geological Survey, Digital Data Series 231. Access: June 7, 2019. <https://pubs.er.usgs.gov/publication/ds231>. doi: [10.3133/ds231](https://doi.org/10.3133/ds231).

CLARK RN. 1999. Spectroscopy of rocks and minerals, and principles of spectroscopy. In: RENCZ AN (Ed.), *Manual of remote sensing: remote sensing for the Earth Science*, vol. 3, New York: John Wiley and Sons, p. 3-58.

CLARK RN, KING TVV, KLEJWA M, SWAYZE GA AND VERGO N. 1990. High spectral resolution reflectance spectroscopy of minerals. *J Geophys Res* 95: 12653– 12680. doi: [10.1029/JB095iB08p12653](https://doi.org/10.1029/JB095iB08p12653).

CLARK RN AND ROUSH T.L. 1984. Reflectance spectroscopy: quantitative analysis techniques for remote sensing applications. *J Geophys Res* 89: 6329–6340. doi: [10.1029/JB089iB07p06329](https://doi.org/10.1029/JB089iB07p06329).

CRÓSTA AP, SOUZA FILHO CR, AZEVEDO F AND BRODIE C. 2003. Targeting key alteration minerals in epithermal deposits in Patagonia, Argentina, using ASTER imagery and principal component analysis. *Int J Rem Sen* 24: 4233–4240. doi: [10.1080/0143116031000152291](https://doi.org/10.1080/0143116031000152291).

COUTINHO MGN AND ALDERTON DHM. 1998. Character and genesis of Proterozoic shear zone-hosted gold deposits in Borborema Province, northeast Brazil. *Trans Inst Min Metall Sect B Appl Earth Sci* 107:109–119.

COUTINHO MGN. 1995. Mineralizações de ouro primário na Província Borborema, Nordeste do Brasil. *Terra Rev* 1: 44–48.

COUTINHO MGN. 1994. The geology of shear-zone hosted gold deposits in Northeast Brazil. PhD Thesis, Department of Geology, University of London, p. 359.

CUDAHY TJ. 1997. PIMA-II spectral characteristics of natural kaolins; CSIRO exploration and mining report 420R. Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO), Canberra, Australia. Access: July 20, 2019. [ftp://ftp.csiro.au/arcc/AMIRA%20P435%20Project%20Reports/Emr420r%20Kaolins.pdf](http://ftp.csiro.au/arcc/AMIRA%20P435%20Project%20Reports/Emr420r%20Kaolins.pdf)

DANTAS EL, SOUZA ZS, WERNICK E, HACKSPACHER PC, MARTIN H, XIAODONG D AND LI J.W. 2013. Crustal growth in the 3.4-2.7 Ga São José do Campestre Massif, Borborema Province, NE Brazil. *Precambrian Res* 227: 120–156. doi: [10.1016/j.precamres.2012.08.006](https://doi.org/10.1016/j.precamres.2012.08.006).

DI TOMMASO I AND RUBINSTEIN N. 2007. Hydrothermal alteration mapping using ASTER data in the Infiernillo porphyry deposit, Argentina. *Ore Geol Rev* 32: 275–290. doi: [10.1016/j.oregeorev.2006.05.004](https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2006.05.004).

DUCART DF, CRÓSTA AP, SOUZA FILHO CR AND CONIGLIO J. 2006. Alteration mineralogy at the Cerro La Mina epithermal prospect, Patagonia, Argentina: field mapping, shortwave infrared spectroscopy and ASTER images. *Econ Geol* 101: 981–996. doi: [10.2113/gsecongeo.101.5.981](https://doi.org/10.2113/gsecongeo.101.5.981).

ESWARAN H AND BIN WC. 1978. A study of a deep weathering profile on granite in peninsular Malaysia: III. Alteration of feldspars. *Soil Sci Soc Am J* 42: 154–158. doi: [10.2136/sssaj1978.03615995004200010034x](https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200010034x)

FERREIRA CA AND SANTOS EJ. 2000. Programa levantamentos geológicos básicos do Brasil: Jaguaribe SE - Folha SC. 24-Z. Estados do Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba e Pernambuco. Escala 1:500.000. Geologia e metalogênese. Texto explicativo. Recife: CPRM, 39 p.

FRESIA B, ROSS PS, GOAGUEN E AND BOURKE A. 2017. Lithological discrimination based on statistical analysis of multi-sensor drill core logging data in the Matagami VMS district, Québec, Canada. *Ore Geol Rev* 80: 552–563. doi: [10.1016/j.oregeorev.2016.07.019](https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.07.019)

GOZZARD JR. 2006. Image processing of ASTER multispectral data. Perth: Geological Survey of Western Australia, 51 p.

GROVES DI, GOLDFARB RJ, ROBERT F AND HART CJR. 2003. Gold deposits in metamorphic belts: overview of current understanding, outstanding problems, future research, and exploration significance. *Econ Geol* 98: 1–29. doi: [10.2113/gsecongeo.98.1.1](https://doi.org/10.2113/gsecongeo.98.1.1)

GUIMARÃES IP, VAN SCHMUS WR, BRITO NEVES BB, BITTAR SM, SILVA FILHO AF AND ARMSTRONG R. 2012. U Pb zircon ages of orthogneisses and supracrustal rocks of the Cariris Velhos belt: onset of Neoproterozoic rifting in the Borborema Province, NE Brazil. *Precambrian Res* 192-195: 52–77. doi: [10.1016/j.precamres.2011.10.008](https://doi.org/10.1016/j.precamres.2011.10.008)

GUIMARÃES IP, SILVA FILHO AF, ALMEIDA CN, VAN SCHMUS WR, ARAUJO JMM, MELO SC AND MELO EB. 2004. Brasiliano (Pan-African) granitic magmatism in the Pajeú Paraíba belt, Northeast Brazil: an isotopic and geochronological approach. *Precambrian Res* 135: 23–53. doi: [10.1016/j.precamres.2004.07.004](https://doi.org/10.1016/j.precamres.2004.07.004).

HARRIS JR, VILJOEN D.W. AND RENCZ AN. 1999. Integration and visualization of geoscience data. In: RENCZ AN (Eds), *Manual of remote sensing: remote sensing for the Earth Science*, vol. 3, New York: John Wiley and Sons, p. 307- 354.

HUNT GR AND ASHLEY RP. 1979. Spectral of altered rocks in the visible and near infrared. *Econ Geol*. 74: 1613–1629. doi: [10.2113/gsecongeo.74.7.1613](https://doi.org/10.2113/gsecongeo.74.7.1613).

HUNT GR. 1977. Spectral signatures of particulate minerals, in the visible and near- infrared. *Geophys* 42: 501–513. doi: [10.1190/1.1440721](https://doi.org/10.1190/1.1440721).

KAYET N, PATHAK K, CHAKRABARTY A AND SAHOO S. 2018. Mapping the distribution of iron ore minerals and spatial correlation with environmental variables in hilltop mining areas. *Env Earth Sci* 77: 1–14. doi: [10.1007/s12665-018-7482-7](https://doi.org/10.1007/s12665-018-7482-7).

LAMPINEN HM, LAUKAMP C, OCCHIPINTI SA AND HARDY L. 2019. Mineral footprints of the paleoproterozoic sediment-hosted Abra Pb-Zn-Cu-Au deposit Capricorn Orogen, Western Australia. *Ore Geol Rev* 104: 436-461. doi: [10.1016/j.oregeorev.2018.11.004](https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.11.004).

LIMA HM, PIMENTEL MM, DE LIRA SANTOS LCM AND DANTAS EL. 2019. Isotopic and geochemical characterization of the metavolcano-sedimentary rocks of the Jirau do Ponciano dome: A structural window to a Paleoproterozoic continental arc root within the Southern Borborema province, Northeast Brazil. *J S Am Earth Sci* 90: 54–69. doi: [10.1016/j.jsames.2018.12.002](https://doi.org/10.1016/j.jsames.2018.12.002).

LIMA RG, ARCHANJO CJ, MACEDO JWP AND MELO JR G. 2000. Anomalias de suscetibilidade magnética no batólito granítico de Teixeira (Província da Borborema, Nordeste do Brasil) e sua relação com a zona de cisalhamento de Itapetim. *Rev Bras Geocienc* 30: 685-692.

MAIA HN. 2002. Deformação e fluxo de fluidos em zonas de cisalhamento: a integração de estudos estrutural, inclusões fluidos e isótopos estáveis dos veios mineralizados em ouro posicionados na zona de cisalhamento de Itapetim (NE do Brasil). PhD Thesis, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, 204 p.

MARS JC AND ROWAN LC. 2006. Regional mapping of phyllic- and Aargillic-altered rocks in the Zagros magmatic arc, Iran, using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data and logical operator algorithms. *Geosphere* 2: 161–186. doi: [10.1130/GES00044.1](https://doi.org/10.1130/GES00044.1).

MCCUAIG TC AND KERRICH R. 1998. P-T-t-deformation-fluid characteristics of lode gold deposits: Evidence from alteration systematics. *Ore Geol Rev* 12: 381–453. doi: [10.1016/S0169-1368\(98\)80002-4](https://doi.org/10.1016/S0169-1368(98)80002-4)

MEDEIROS VC. 2004. Evolução geodinâmica dos Terrenos Piancó-Alto Brígida e Alto Pajeú, Domínio da Zona Transversal, NE do Brasil. PhD Thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 190 p.

NALETO JLC, PERROTTA MM, COSTA FG AND SOUZA FILHO CR. 2019. Point and imaging spectroscopy investigations on the Pedra Branca orogenic gold Deposit, Troia Massif, Northeast Brazil: Implications for mineral exploration in amphibolite metamorphic-grade terrains. *Ore Geol Rev* 107: 283–309. doi: [10.1016/j.oregeorev.2019.02.019](https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.02.019).

PEREIRA LCL, SANTOS LCM AND CARRINO TA. 2019. The role of airborne geophysics in the investigation of gold occurrences in the Itapetim region, Borborema Province, Northeast Brazil. *Braz J Geol* 49: e20190028. doi: 10.1590/2317- 4889201920190028

PONTUAL S, MERRY N AND GAMSON P. 2008. Spectral interpretation – Field manual. GMEX. Spectral Analysis guides for mineral exploration, Victoria: AusSpec International Pty, 189 p.

POUR AB AND HASHIM M. 2012. Identifying areas of high economic-potential copper mineralization using ASTER data in Urumieh-Dokhtar Volcanic Belt, Iran. *Adv Space Res* 49: 753–769. doi: [10.1016/j.asr.2011.11.028](https://doi.org/10.1016/j.asr.2011.11.028).

RAIZER V. 2019. Optical remote sensing of ocean hydrodynamics. Boca Raton: CRC Press, 296 p.

ROSS PS, BOURKE A, SCHNITZLER N AND CONLY A. 2019. Exploration vectors from near infrared spectrometry near the McLeaod Volcanogenic Massive Sulfide Deposit, Matagami District, Québec. *Econ Geol* 114: 613-638. doi: [10.5382/econgeo.4656](https://doi.org/10.5382/econgeo.4656)

ROWAN LC, HOOK SJ, ABRAMS MJ AND MARS JC. 2003. Mapping hidrothermally altered rocks at Cuprite, Nevada, using the Advanced Spaceborne Thermal Emission and

Reflection Radiometer (ASTER), a new satellite imaging system. *Econ Geol* 98: 1019–1027. doi: [10.2113/gsecongeo.98.5.1019](https://doi.org/10.2113/gsecongeo.98.5.1019).

SABINS F.F. 1999. Remote sensing for mineral exploration. *Ore Geol Rev* 14: 157–183. doi: [10.1016/S0169-1368\(99\)00007-4](https://doi.org/10.1016/S0169-1368(99)00007-4).

SANTOS LCML, DANTAS EL, CAWOOD PA, SANTOS EJ AND FUCK RA. 2017. Neoproterozoic crustal growth and Paleoproterozoic reworking in the Borborema Province, NE Brazil: insights from geochemical and isotopic data of TTG and metagranitic rocks of the Alto Moxotó Terrane. *J S Am Earth Sci* 79: 342–363. doi: [10.1016/j.jsames.2017.08.013](https://doi.org/10.1016/j.jsames.2017.08.013).

SANTOS EJ, SOUZA NETO JA, SILVA MRR, BEURLEN H, CAVALCANTI JAD, SILVA MG, DIAS VM, COSTA AF, SANTOS LCML AND SANTOS RB. 2014. Metalogênese das porções norte e central da Província Borborema. In: SILVA MG ET AL. (Eds.), *Metalogênese das províncias tectônicas brasileiras*, Belo Horizonte: CPRM, p. 343-388.

SANTOS EJ, VAN SCHMUS WR, KOZUCH M AND BRITO NEVES BB. 2010. The Cariris Velhos tectonic event in Northeast Brazil. *J S Am Earth Sci* 29: 61–76. doi: [10.1016/j.jsames.2009.07.003](https://doi.org/10.1016/j.jsames.2009.07.003).

SANTOS EJ, BRITO NEVES BB, VAN SCHMUS WR, OLIVEIRA RG AND MEDEIROS VC. 2000. An overall view on the displaced terrane arrangement of the Borborema Province, NE Brazil. In: *INTERNATIONAL GEOLOGICAL CONGRESS, 31., Rio de Janeiro. Proceedings...*, Rio de Janeiro: p. 5-9.

SANTOS EJ AND MEDEIROS VC. 1999. Constraints from granitic plutonism on proterozoic crustal growth of the Transverse Zone, Borborema Province, NE Brazil. *Rev Bras Geocienc* 29: 73–84.

SANTOS E.J. 1995. O complexo granítico Lagoa das Pedras: acreção e colisão na região de Floresta (Pernambuco), Província Borborema. PhD Thesis, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 220 p.

SCHEID C AND FERREIRA CA 1991. Programa levantamentos geológicos básicos do Brasil: estados de Pernambuco e Paraíba - Folha SB.24-Z-D-I-Patos. Escala 1:100.000. Carta geológica e carta metalogenético-previsional. Texto explicativo. Brasília: DNPM/CPRM, 140 p.

SIAL AN AND FERREIRA VP 2016. Magma associations in Ediacaran granitoids of the Cachoeirinha– Salgueiro and Alto Pajeú terranes, northeastern Brazil: forty years of studies. *Journal J S Am Earth Sci* 68: 113–133. doi: [10.1016/j.jsames.2015.10.005](https://doi.org/10.1016/j.jsames.2015.10.005).

SIAL A.N., VASCONCELOS PM, FERREIRA VP, PESSOA RJR, BRASILINO RG AND MORAES NETO J. 2008. Geochronological and mineralogical constraints of depth of emplacement and ascension rates of epidote-bearing magmas from Northeastern Brazil. *Lithos* 105:225–238. doi: [10.1016/j.lithos.2008.04.002](https://doi.org/10.1016/j.lithos.2008.04.002).

SILVA FILHO M.A. 1989. Projeto Itapetim: relatório final de pesquisa de ouro. DNPM 840280 e 286/85. Internal report. Recife: CPRM, 31 p.

SWAYZE GA ET AL. 2014. Mapping advanced argillic alteration at Cuprite, Nevada, using imaging spectroscopy. *Econ Geol* 109: 1179–1221. doi: [10.2113/econgeo.109.5.1179](https://doi.org/10.2113/econgeo.109.5.1179).

THOMPSON AJB, HAUFF PL AND ROBITAILLE AJ. 1999. Alteration mapping in exploration: application of short-wave infrared (SWIR) spectroscopy. *Soc Econ Geol Newsl* 39: 15–17. doi: [10.5382/Rev.16.03](https://doi.org/10.5382/Rev.16.03).

VAN DER MEER F, VAN DER WERFF HMA, VAN RUITENBEEK FJA, HECKER CA, BAKKER WH, NOOMEN MF, VAN DER MEIJDE M, CARRANZA EJM, SMETH JB AND WOLDAI T. 2012. Multi- and hyperspectral geologic remote sensing: a review. *Int J Appl Earth Obs Geoinformation* 14: 112-128. doi: [10.1016/j.jag.2011.08.002](https://doi.org/10.1016/j.jag.2011.08.002)

VAN SCHMUS WR, BRITO NEVES BB, HACKSPACHER P AND BABINSKI M. 1995. U/Pb and Sm/Nd geochronologic studies of the eastern Borborema Province, Northeastern Brazil: initial conclusions. *J S Am Earth Sci* 8: 267-288. doi: [10.1016/0895-9811\(95\)00013-6](https://doi.org/10.1016/0895-9811(95)00013-6).

WHITNEY DL AND EVANS BW. 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *Am Mineral* 95: 185–187. doi: [10.2138/am.2010.3371](https://doi.org/10.2138/am.2010.3371).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As principais conclusões da presente dissertação estão listadas nos tópicos seguintes:

- a) as zonas de cisalhamento mais expressivas da área de estudo podem ser correlacionadas a áreas fortemente magnetizadas que mostram formas lineares a curvilíneas, as quais, em campo, são representadas por rochas protomiloníticas a miloníticas marcadas por foliação verticalizada, lineação de estiramento mineral e dobras locais;
- b) a área de estudo apresenta enriquecimento anômalo de K, observado a partir de dados de gamaespectrometria, no mapa de K/eTh, cujos locais correspondentes em campo são marcados pela presença de minerais ricos em potássio como feldspato, turmalina e sericita, que se encontram em constante associação com veios de quartzo;
- c) os setores mineralizados em ouro são observados em (1) porções fortemente magnetizadas e (2) enriquecidas em K, ao longo da Zona de Cisalhamento Itapetim e da borda do Batólito Teixeira. Tais fatores representam os principais controles para ocorrência de Au;
- d) a caracterização espectral realizada na região do distrito aurífero de Itapetim mostrou bons resultados e possibilitou a criação de uma biblioteca espectral para discriminar as respostas de reflectância das principais unidades geológicas regionais, solos e rochas hidrotermalmente alteradas dos setores mineralizados Degredo e Santo Aleixo;
- e) as principais assinaturas espectrais das unidades geológicas estão relacionadas à biotita, hornblenda, clorita e sericita/muscovita. Já em relação à cobertura de solo, goethita e caulinita representam os minerais espectralmente ativos nas regiões VNIR-SWIR;
- f) nas áreas mineralizadas turmalina, epidoto, sericita e muscovita representam as principais fases identificadas, as quais estão diretamente ligados ao aporte de fluidos e hidrotermalismo ocorrido durante a Orogênese Brasileira;
- g) os dados de imageamento do sensor ASTER, apesar de obliterados pela cobertura vegetal, permitiram a identificação de corpos graníticos, como o Batólito Teixeira, através da razão entre as bandas 7 e 6 (indicativa da presença de argilas como a caulinita). Os corpos graníticos da região mostram sua importância, pois são considerados como a principal fonte magmática dos fluidos hidrotermais mineralizados;

Em suma, os resultados adquiridos neste estudo foram eficazes em indicar o padrão de ocorrências de ouro através de dados de magnetometria e gamaespectrometria, os quais permitiram identificar novos possíveis alvos mineralizados. Confirmou-se, também, a possibilidade de usar espectroscopia de refletância e imagens multiespectrais como metodologias confiáveis em regiões semi-áridas do Brasil, como a região de Itapetim. A análise realizada por espectroscopia de refletância poderá servir como base para futuros estudos de exploração na região de Itapetim (envolvendo análise de testemunhos ou imagens hiperespectrais), pois será possível discriminar as respostas espectrais de unidades geológicas das rochas alteradas ligadas à mineralização.

6.1 RECOMENDAÇÕES

Tendo em vista a utilização de geofísica como metodologia de estudo, sabendo-se que se trata de um método indireto, recomenda-se, primeiramente, uma análise de dados históricos de geoquímica de solo, depois, se necessário, o adensamento da malha de amostragem visando a identificação/confirmação de áreas anômalas;

Estender o estudo espectral realizado nos setores Santo Aleixo e Degredo para outras áreas mineralizadas visando entender se a caracterização descrita na presente dissertação se repete ao longo de todas as ocorrências de Itapetim.

REFERÊNCIAS

- AIRO, M. L. Aeromagnetic and aeroradiometric response to hydrothermal alteration. **Surveys in Geophysics**, v. 23, p. 273-302, 2002.
- AIRO, M. L. & MERTANEN, S. Magnetic signatures related to orogenic gold mineralization, Central Lapland Greenstone Belt, Finland. **Journal of Applied Geophysics**, v. 64, p. 14-24, 2008.
- ALMEIDA, F. F.; HASUI, Y.; BRITO NEVES, B.B.; FUCK, R.A. Brazilian structural provinces: an introduction. **Earth Sciences Reviews**, v. 17, p. 1-29, 1981.
- ALMEIDA, H. L. **Estudo microestrutural em mineralização aurífera do tipo-veio hospedada em zona de cisalhamento: caso do depósito Sertãozinho, Província Borborema, NE do Brasil**. 2003. 86 p. (Tese de doutorado) - Unesp.
- ARAÚJO, M.N.C.; VASCONCELOS, P.M.; ALVES DA SILVA, F.C.; JARDIM DE SÁ, E.; SÁ J.M. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of gold mineralization in Brasiliano strike-slip shear zone in the Borborema Province, NE Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 19, p. 445-460, 2005.
- ARCHANJO, C.J.; RODRIGUES, S.W.; NEVES B.B.B. Fabrics of pre- and syntectonic granite plutons and chronology of shear zones in the Eastern Borborema Province, NE Brazil. **Journal of Structural Geology**, v. 30, p. 310-336, 2008.
- BASTO, C. F.; CAXITO, F. A.; VALE, J. A. R.; SILVEIRA, D.A.; RODRIGUES, J.B.; ALKMIM, A.R.; VALERIANO, C.M.; SANTOS, E.J. An Ediacaran back-arc basin preserved in the Transversal Zone of the Borborema Province: Evidence from geochemistry, geochronology and isotope systematics of the Ipueirinha Group, NE Brazil. **Precambrian Research**, v. 320, p. 213-231, 2019.
- BEDINI, E.; RASMUSSEN, T. M. Use of airborne hyperspectral and gamma-ray spectroscopy data for mineral exploration at the Sarfartoq carbonatite complex, southern West Greenland. **Geosciences Journal**, v. 22(4), p. 641-651, 2018.
- BIERWIRTH, P.; HUSTON, D.; BLEWETT, R. Hyperspectral mapping of mineral assemblages associated with gold mineralization in the Central Pilbara, Western Australia. **Economic Geology**, v. 97, p. 819-826, 2002.
- BITTAR, Sheila Maria Bretas. **Faixa Piancó-Alto Brígida: terrenos tectono-estratigráficos sob regimes metamórficos e deformacionais contrastantes**. 1999. 126 f. Tese (Doutorado em Geoquímica e Geotectônica – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.
- BRITO NEVES, B. B. A evolução dos crátons Amazônico e São Francisco comparada com a dos seus homólogos do Hemisfério Norte - 25 anos depois. In: HORBE A. M. C., SOUZA V.S. (Eds.) **Contribuição à geologia da Amazonia, Manaus**. Belém – PA: Sociedade Brasileira de Geologia, 2005. (Núcleo Norte). v. 4, p. 1-8.
- BRITO NEVES, B. B.; FUCK, R. A.; PIMENTEL, M. M. The Brasiliano collage in South America: a review. **Brazilian Journal of Geology**, v. 44, p. 493-518, 2014.

BRITO NEVES, B. B.; SANTOS, E. J.; FUCK, R. A.; SANTOS, L. C. M. L. A preserved early Ediacaran magmatic arc at the northernmost portion of the Transversal Zone central subprovince of the Borborema Province, Northeastern South American. **Brazilian Journal of Geology**, v. 46, p. 491-508, 2016.

BRITO NEVES, B. B.; SANTOS, E. J.; SCHMUS, W. R. Q. Tectonic history of the Borborema province. *In*: Cordani U.G., Milani E.J., Thomaz-Filho A.; Campos D.A. (Org.). Tectonic Evolution of South America. 31ST INTERNATIONAL GEOLOGICAL CONGRESS. Rio de Janeiro, p. 151-182, 2000. (Special Publication).

CAMPOS NETO, M. C., BITTAR, S. M. B., BRITO NEVES, B. B. Domínio tectônico Rio Pajeú – Província Borborema: orogêneses superpostas no ciclo Brasileiro/Pan- Africano. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 38., 1994, Balneário Camboriú. **Abstracts** [...]. Balneário Camboriú, SC: Sociedade Brasileira de Geologia, 1994. p. 221-222.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. **Projeto Itapetim, PE/PB setor Sertãozinho plano de lavra experimental**: Alvarás 4282, 5296, 5353, 5413/83. Rio de Janeiro: CPRM, 1984.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. **Projeto Itapetim**: relatório sintético. Recife: CPRM, 1985.

COSTA, F.G.; PALHETA, E.S.M.; RODRIGUES, J.B.; GOMES, I.P.; VASCONCELOS, A.M. Geochemistry and U– Pb zircon ages of plutonic rocks from the Algodões granite-greenstone terrane, Tróia Massif, northern Borborema Province, Brazil: Implications for Paleoproterozoic subduction-accretion processes. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 59, p. 45-68, 2015.

COUTINHO, Maria Glícia da Nóbrega. **The geology of shear-zone hosted gold deposits in Northeast Brazil**. 1994. 391 f. Tese (Doutorado em Geologia Econômica). London University, London, 1994.

COUTINHO, M. G. N.; ALDERTON, D. H. M. Proterozoic lode gold deposits in the Borborema Province, Northeast Brazil and their exploration significance. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**., v. 70, n. 3, p. 429-439. 1998a.

COUTINHO, M. G. N.; ALDERTON, D. H. M. Character and genesis of Proterozoic shear zone-hosted gold deposits in Borborema Province, northeast Brazil. **Trans. Instit. Mining Metallurgy** (Section B: Applied Earth Sciences), v. 107, p. 109- 119, 1998b.

CURY, A. **O vendedor de sonhos**: o chamado. São Paulo: Academia de Inteligência, 2008. p. 134.

DANTAS, E. L.; SOUZA, Z. S.; WERNICK, E.; HACKSPACHER, P. C.; MARTIN, H.; XIADONG, D.; LI, J. W. Crustal growth in the 3.4-2.7 Ga São José do Campestre Massif, Borborema Province, NE Brazil. **Precambrian Research**, v. 227, p. 12-156, 2013.
ELKHATEEB, S. O. & ABDELLATIF, M. A. G. Delineation potential gold mineralization zones in a part of Central Eastern Desert, Egypt using Airborne Magnetic and Radiometric data. **NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics**, v. 7, n. 2, p. 361-376, 2018.

FERREIRA, C. A.; SANTOS, E. J. **Mapa dos Estados do Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba e Pernambuco**. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Jaguaribe SE. Folha SC. 24-Z. Geologia e metalogênese. Escala 1:500.000. Recife: CPRM, 2000.

FORD, K.; KEATING, P.; THOMAS, M. D. Overview of geophysical signatures associated with Canadian ore deposits. In: GOODFELLOW, W. D. (ed.). **Mineral deposits of Canada: a synthesis of major deposit-types, district metallogeny, the evolution of geological provinces, and exploration methods**. St. John's, NL, Canadá: Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, 2007. (Special Publication, n. 5, p. 939-907).

GOLDFARB, R. & GROVES, D. Orogenic gold: Common or evolving fluid and metal sources through time. **Lithos**, v. 233, p. 2-26, 2015.

GROVES, D. I.; GOLDFARB, R. J.; GEBRE-MARIAM, M.; HAGEMANN, S. G.; ROBERT F. Orogenic gold deposits: a proposed classification in the context of their crustal distribution and relationships to other gold deposit types. **Ore Geology Reviews**., v. 13, p. 7-27, 1998.

GROVES, D. I.; SANTOSH, M. Province-scale commonalities of some world-class gold deposits: implications for mineral exploration. **Geoscience Frontiers**, v. 6, p. 389- 399, 2015.

HODGSON, C.J. The structure of shear-related, vein-type gold deposits: a review. **Ore Geology Reviews**, v. 41, p. 231-273, 1989.

HRONSKY, J. M. A. & GROVES, D. I. Science of targeting: definition, strategies, targeting and performance measurement. **Australian Journal of Earth Sciences**., v. 55, p. 3-12, 2008.

HOLDEN, E.J.; WONG, J. C.; KOVESI, P.; WEDGE, D.; DENTITH, M.; BAGAS, L. Identifying structural complexity in aeromagnetic data: An image analysis approach to greenfields gold exploration. **Ore Geology Reviews**, v.46, p. 47-59, 2012.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATISTICA. **Itapetim**. Rio de Janeiro: IBGE, 2018. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pe/itapetim/historico>. Acesso em: 25 out. 2018 às 09:07.

LASA ENGENHARIA E PROSPECÇÕES; PROSPECTORS AEROLEVANTAMENTOS E SISTEMAS. **Projeto aerogeofísico Paraíba - Rio Grande do Norte; Pernambuco - Paraíba**: relatório final do levantamento e processamento dos dados magnetométricos e gamaespectométricos. Rio de Janeiro, 2009. Programa Geologia do Brasil (PGB). Internal report. Open access. 2009.

LIMA, R. G.; ARCHANJO, C. J.; MACEDO, J. W. P.; MELO, JR. G. Anomalias de suscetibilidade magnética no batólito granítico de Teixeira (Província da Borborema, Nordeste do Brasil) e sua relação com a zona de cisalhamento de Itapetim. **Revista Brasileira de Geociências** v. 30(4), p. 685-692, 2000.

LIMA, H.; PIMENTEL, M.; SANTOS, L.; DANTAS, E. Isotopic and geochemical characterization of the metavolcano-sedimentary rocks of the Jirau do Ponciano dome: a structural window to a Paleoproterozoic continental ARC root within the Southern Borborema province, Northeast Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, 2019. (in press).

MAIA, Heitor Neves. **Deformação e fluxo de fluidos em zonas de cisalhamento: a integração de estudos estrutural, inclusões fluidas e isótopos estáveis dos veios mineralizados em ouro posicionados na zona de cisalhamento de Itapetim (NE do Brasil).** 2002. 204 f. Tese (Doutorado em Geologia Econômica) – Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

MALVERN PANALYTICAL. 2018. Disponível em: <https://www.malvernpanalytical.com/en/products/product-range/asd-range/fieldspec-range/fieldspec-4-standard-res-spectroradiometer>. Acesso em 31 de julho de 2018.

MCCUAIG, T.; KERRICH, R. P-T-t-deformation-fluid characteristics of lode gold deposits: evidence from alteration systematics. **Ore Geology Reviews**, v. 12, p. 381-453, 1998.

MEDEIROS, V. C. Comparações geoquímicas entre granitóides do Domínio da Zona Transversal, Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 25, n.4, p. 333-342, 1995.

MEDEIROS, Vladimir Cruz de. **Evolução geodinâmica dos terrenos Piancó-Alto Brígida e Alto Pajeú, Domínio da zona Transversal, NE do Brasil.** 2004. 198 f. Tese (Doutorado em Geodinâmica e Geofísica) – Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2004.

MEDEIROS, V. C.; MEDEIROS, W. E.; JARDIM DE SÁ, E. F. Utilização de imagens aerogamaespectrométricas, LANDSAT 7 ETM+ e aeromagnetométricas no estudo do arcabouço crustal da porção central do domínio da Zona Transversal, Província Borborema, NE do Brasil. **Revista Brasileira de Geofísica (IMPRESSO)**, v. 29, p. 83- 97, 2011.

NALETO, L. C. J.; MAZZINI PERROTTA, M.; GRANDJEAN DA COSTA, F.; SOUZA FILHO, C. R. Point and imaging spectroscopy investigations on the Pedra Branca orogenic gold Deposit, Troia Massif, Northeast Brazil: Implications for mineral exploration in amphibolite metamorphic-grade terrains. **Ore Geology Reviews**, in press, 2019.

NEVES, S. P.; BRUGUIER, O.; VAUCHERZ, A.; BOSCH, D.; SILVA, J. M. R.; MARIANO, G. Timing of crustal formation, deposition of supracrustal sequences and Transamazonian and Brasiliano metamorphism in eastern Borborema Province (BE Brazil): Implications for western Gondwana assembly. **Precambrian Research**, v. 149, p. 197-216, 2006.

PEREIRA FILHO, J. M.; VIEIRA, E. L.; ADERBAL, S.; MARCÍLIO, C.; AMORIM, F. U. Efeito do tratamento com hidróxido de sódio sobre a fração fibrosa, digestibilidade e tanino do feno de jurema-preta (*Mimosa tenuiflora*. Wild). **Revista Brasileira de Zootecnia**. v. 32, n.1 p. 70-76 2003.

PONTUAL, S.; MERRY, N.; GAMSON, P., 2008. Spectral Interpretation Field Manual. 3.ed. [Austrália]: Ausspec International. 189 p. (GMEX Guides for Mineral Exploration, 1).

RAMOS, L.N.R.A.; PIRES A.; TOLEDO C. L. B. Airborne gamma-ray spectrometric and magnetic signatures of Fazenda Nova Region, East portion of Arenópolis magmatic arc, Goiás. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 32, p. 123-140, 2014.

ROEDDER, E., 1984. Fluid inclusions. **Reviews in Mineralogy** v. 12, p. 644, 2014.

SANTOS, Edilton José dos. **O complexo granítico Lagoa das Pedras: acreção e colisão na região de Floresta (Pernambuco), Província Borborema.** 1995. 228 f. Tese (Doutorado em Mineralogia e Petrologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

SANTOS, E. J.; BRITO NEVES, B. B.; VAN SCHMUS, W. R.; OLIVEIRA R. G.; MEDEIROS, V.C. An overall view on the displaced terrane arrangement of the Borborema Province, NE Brazil. *In: INTERNATIONAL GEOLOGICAL CONGRESS, 31., GENERAL SYMPOSIA, TECTONIC EVOLUTION OF SOUTH AMERICAN PLATFORM.* Rio de Janeiro, Brazil, 2000. pp. 5-9.

SANTOS, E.J.; OLIVEIRA, R.G.; PAIVA, I.P. Terrenos no Domínio Transversal da Província da Borborema: Controles sobre acreção e retrabalhamento crustais ao sul do Lineamento Patos. *IN: SBG-NE SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE, 17, Proceedings*, v. 15, p. 140-144, 1997.

SANTOS, E. J.; SOUZA NETO, J. A.; SILVA, M. R. R.; BEURLIN, H.; CAVALCANTI, J. A. D.; SILVA, M. G.; DIAS, V. M.; COSTA, A. F.; SANTOS, L. C. M. L.; SANTOS, R. B. Metalogênese das porções norte e central da Província Borborema. *In: M. G. SILVA, M. B. ROCHA NETO, H. JOST, R. M. KUYUMIJAN (Eds.). Metalogênese das províncias tectônicas brasileiras.* Belo Horizonte: CPRM. 2014. p. 343-388.

SANTOS, L. C. M. L.; DANTAS, E. L.; CAWOOD, P. A.; LAGES, G. A.; LIMA, H. M.; SANTOS, E. J. Accretion tectonics in western Gondwana deduced from Sm-Nd isotope mapping of terranes in the Borborema Province, NE Brazil. **Tectonics**, v. 37, n. 8, p. 2727-2743, 2018.

SANTOS, L. C. M. L.; DANTAS, E. L.; CAWOOD, P. A.; SANTOS, E. J.; FUCK, R. A. Neoproterozoic crustal growth and Paleoproterozoic reworking in the Borborema Province, NE Brazil: insights from geochemical and isotopic data of TTG and metagranitic rocks of the Alto Moxotó Terrane. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 79, p. 342- 363, 2017.

SCHEID, C.; FERREIRA, C. A. **Mapa dos Estados de Pernambuco e Paraíba.** Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil: Carta Geológica, Carta Metalogenético-previsional. (Folha SB.24-Z-D-I-Patos). Escala 1:100.000. Brasília, DNPM/CPRM. 140p. 1991.

SHIVES, R. B. K.; CHARBONNEAU, B. W.; FORD, K. L. The detection of potassic alteration by gamma-ray spectrometry-Recognition of alteration related to mineralization. **Geophysics**, v. 65, n. 6, p. 2001-2011, 2000.

SIAL, A. & FERREIRA, V. Magma associations in Ediacaran granitoids of the Cachoeirinha– Salgueiro and Alto Pajeú terranes, northeastern Brazil: Forty years of studies. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 68, p. 113-133, 2016.

SOUZA NETO, J.; LEGRAND, J.; VOLFINGER, M.; PASCAL, M-L.; SONNET, P. W-Au skarns in the Neo-Proterozoic Seridó Mobile Belt, Borborema Province in northeastern

Brazil: An overview with emphasis on the Bonfim deposit. **Mineralium Deposita**, v. 43, p. 185-205, 2008.

SILVA FILHO, M. A. **Projeto Itapetim**: relatório final de pesquisa de ouro (DNPM 840280 e 286/85). Recife: CPRM, 1989.

VAN SCHMUS, W.R.; BRITO NEVES, B.B.; HACKSPACHER, P.C.; BABINSKI, M. U/Pb and Sm/Nd geochronologic studies of the eastern Borborema Province, Northeast Brazil: initial conclusions. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 8, p. 267- 288, 1995.

VAN SCHMUS, W.R.; KOZUCH, M.; BRITO NEVES, B.B. Precambrian history of the Zona Transversal of the Borborema Province, NE Brazil; Insights from Sm-Nd and U-Pb geochronology. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 31, p. 227-252, 2011.

VAN SCHMUS, W.R.; OLIVEIRA, E.P.; SILVA FILHO, A.F., TOTEU, F., PENAYE, J.; GUIMARÃES, I.P. Proterozoic links between the Borborema province, NE Brazil, and the central African fold belt. **Geological Society of London**, v. 294, p.66-69, 2008. (Special Publication).

WANDERLEY, A. A. Projeto Itapetim. Relatório Final de Pesquisa (alvarás: 721, 280, 281, 283/96). Recife: Serviço Geológico do Brasil (CPRM), 1999. Relatório interno. 24 p.

WEMEGAH, D.; PREKO, K.; NOYE, R.; BOADI, B.; MENYEH, A.; DANUOR, S.; AMENYOH, T. Geophysical Interpretation of Possible Gold Mineralization Zones in Kyerano, South-Western Ghana Using Aeromagnetic and Radiometric Datasets. **Journal of Geoscience and Environment Protection**, v. 3, p. 67-82, 2015.

APÊNDICE A – RELATÓRIO DE CAMPO

Afloramentos da região do município de Teixeira (PB)

Campanhas de campo de 05 a 07 de fevereiro de 2018
e de 09 a 10 de maio de 2018

Laís Cristina Leite Pereira

Junho de 2018

Ponto 1 (LL-01)

Município: Itapetim-PE

Data: 05/02/2018

Coordenadas UTM, zona 24 sul: 692610 W; 9191807 S

Localização: estrada de terra, a aproximadamente 1,0 km da BR-110

Demarcação de área de garimpo.

Ponto 2 (LL-02)

Município: Itapetim-PE

Data: 05/02/2018

Coordenadas UTM, zona 24 sul: 693027 W; 9191972 S

Localização: estrada de terra, a aproximadamente 1,5 km da BR-110

Amostra coletada: LL-02

Características aeromagnéticas: alto magnético localizado ao longo da Zona de Cisalhamento Itapetim

Unidade geológica: Complexo São Caetano

Descrição do afloramento:

Biotita-muscovita xisto com granada (Fig. 1A). A litologia tem coloração marrom, granulação fina e apresenta alternância de bandas milimétricas quartzo-feldspáticas e micáceas (Fig. 1B). Encontra-se intercalada com rocha metamáfica de coloração cinza-escura, a qual se dispõe em camadas (~ 10 cm de espessura) que acompanham a direção da foliação do biotita-muscovita xisto com granada. Estruturalmente, observa-se foliação de alto ângulo de direção NE-SW e mergulho para SE (55Az/75°/145Az), além de dobramento suave afetando as rochas metassedimentar e metamáfica (Fig. 1C). Ambas litologias são cortadas por veios de quartzo

tardios (Fig. 1D).

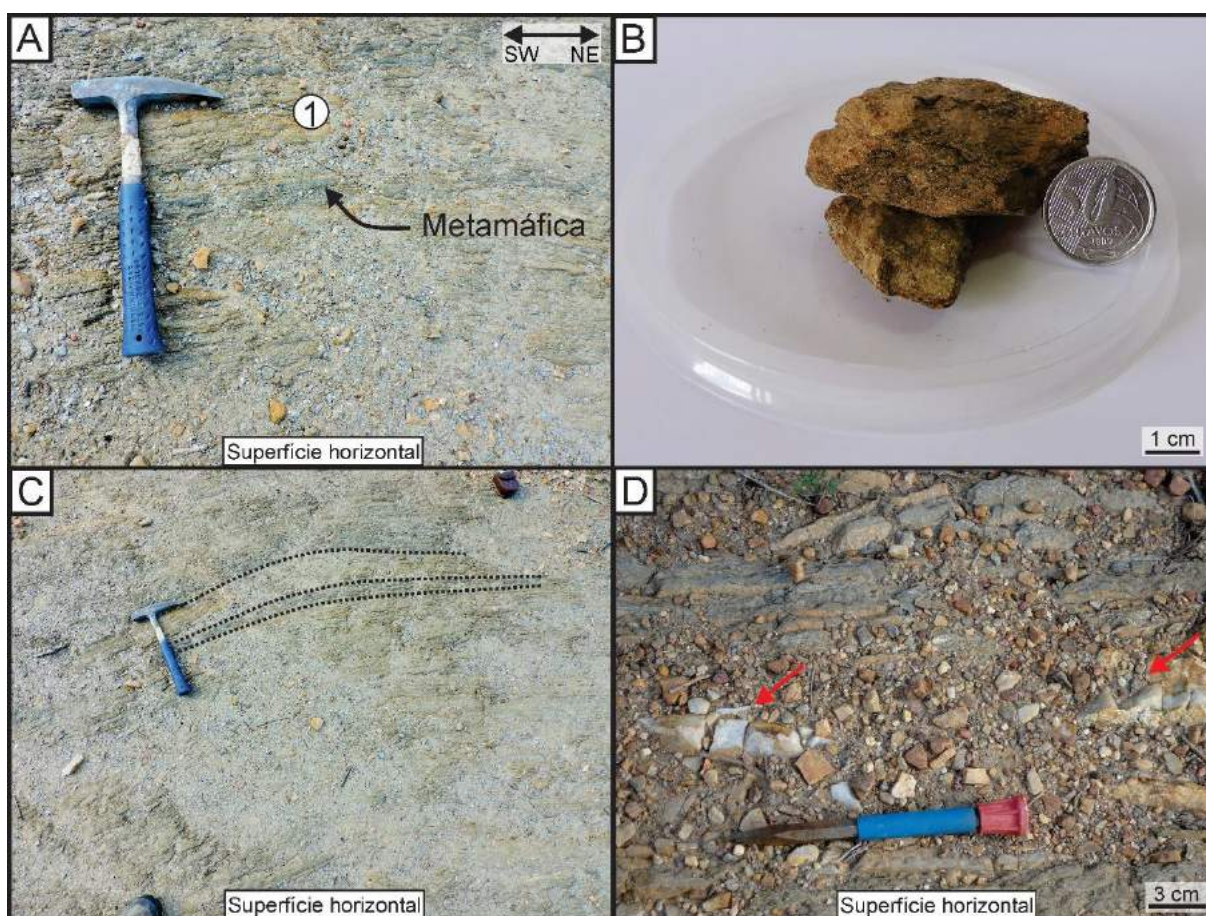


Figura 1: (A) Intercalação entre biotita-muscovita xisto com granada e rocha metamáfica. 1 – Indicação do local de coleta da amostra LL-02. (B) Detalhe da amostra LL-02 mostrando bandamento milimétrico. (C) Dobramento suave afetando biotita-muscovita xisto com granada e rocha metamáfica. (D) Veios de quartzo tardios cortando o biotita-muscovita xisto com granada (vide setas vermelhas).

Ponto 3 (LL-03)

Município: Brejinho-PE

Data: 05/02/2018

Coordenadas UTM, zona 24 sul: 691008 W; 9190470 S

Localização: à beira da BR-110, a aproximadamente 4 km do centro de Brejinho-PE

Amostras coletadas: LL-03A, LL-03B (ambas amostras de gnaiss)

Características aeromagnéticas: alto magnético localizado ao longo da Zona de Cisalhamento Itapetim

Unidade geológica: Complexo São Caetano

Descrição do afloramento:

Blocos de biotita-muscovita gnaiss com granada (Fig. 2A), com textura protomilonítica. A rocha apresenta porfiroclatos de feldspato potássico, chegando a

aproximadamente 2 cm de comprimento. Estruturalmente, é observada foliação de alto ângulo de direção NW-SE e mergulho para NE (135Az/88°/45Az; 147Az/89°/57Az; 152Az/86°/62Az) (Fig. 2B). Grande parte dos porfiroclastos é do tipo delta; no entanto, algumas ocorrências do tipo sigma indicam cinemática sinistral (Fig. 2C). Em volta do afloramento, é comum a presença de fragmentos de quartzito. Este ponto apresenta, comparativamente ao LL-02, uma maior quantidade de feldspato potássico e menor de muscovita.



Figura 2: (A) Visão geral do afloramento de biotita-muscovita gnaiss com granada. 1 – Indicação do local de coleta da amostra LL-03. (B) Bloco de biotita-muscovita gnaiss com granada caracterizado por foliação verticalizada na direção NW-SE (vide linha pontilhada, em amarelo, indicando a direção da foliação). (C) Detalhe mostrando a textura protomilonítica e a geometria de cristais. A cinemática sinistral foi inferida por porfiroclastos do tipo delta (vide setas vermelhas).

Ponto 4 (LL-04)

Município: Brejinho-PE

Data: 05/02/2018

Coordenadas UTM, zona 24 sul: 690615 W, 9189342 S

Localização: à beira da BR-110, a aproximadamente 2,5 km do centro de Brejinho-PE

Amostras coletadas: LL-04

Características aeromagnéticas: alto magnético localizado ao longo da Zona de Cisalhamento Itapetim

Unidade geológica: Suíte Granítica Cariris Velhos (tipo Riacho do Forno)

Descrição do afloramento:

Bloco de biotita-muscovita gnaiss (Fig. 3A). Trata-se de uma rocha leucocrática, equigranular, de granulação fina (Fig. 3B), contendo *clots* centimétricos de biotita. Apresenta bandamento incipiente, milimétrico, com intercalação de porções micáceas e quartzo-feldspáticas (sendo esta última predominante) (Fig. 3B). A foliação tem direção NE-SW e mergulho alto para NW ($60\text{Az}/75^\circ/330\text{Az}$; $60\text{Az}/77^\circ/330\text{Az}$) (Fig. 3C). Foram identificados veios quartzo sin-cinemáticos (os quais não apresentam evidência de deformação) de aproximadamente 5 cm de espessura. Estes veios também apresentam acumulações de biotita que, em geral, mostram bordas oxidadas (Fig. 3D). Além de veios, foram observadas, no biotita-muscovita gnaiss, feições concêntricas que podem representar estruturas reliquias de fluxo magmático (Fig. 3D).

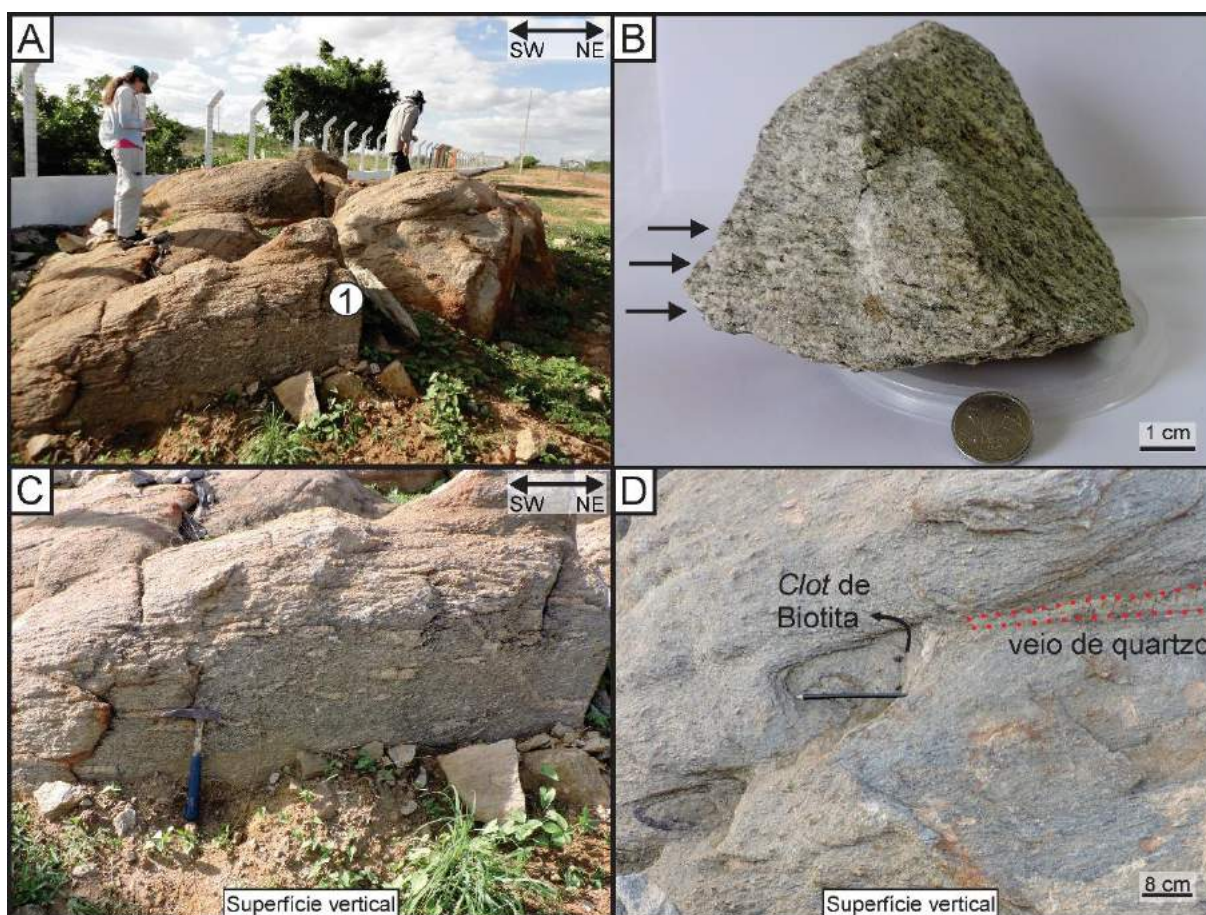


Figura 03: (A) Visão geral do afloramento de biotita-muscovita gnaiss. 1 – Indicação do local de coleta da amostra LL-04. (B) Detalhe da amostra LL-04 apresentando bandamento milimétrico paralelo à direção indicada por setas. (C) Bloco de gnaiss mostrando foliação de alto ângulo. (D) Veio de quartzo sin-cinemático descontínuo (indicado por linha pontilhada, em vermelho). À esquerda, feições concêntricas indicativas de fluxo magmático. Na borda da última feição, há clots de biotita.

Ponto 5 (LL-05)

Município: Brejinho-PE

Data: 05/02/2018

Coordenadas UTM, zona 24 sul: 689714 W; 9186615 S

Localização: à beira da BR-110, a aproximadamente 700 m do centro de Brejinho-PE

Amostras coletadas: LL-05A (granito), LL-05B (enclave máfico)

Relevo: morro com aproximadamente 3 m de altura

Características aeromagnéticas: alto magnético localizado próximo à Zona de Cisalhamento Juru-Belém

Unidade geológica: Plúton Brejinho

Descrição do afloramento:

Blocos de granito, com superfície arredondada, que alcançam aproximadamente 3 m de altura (Fig. 4A). Os blocos são compostos por granito mesocrático, porfirítico, com matriz de granulação média (Fig. 4B). Os fenocristais são de feldspato potássico e chegam a ter cerca de 7 cm de comprimento, estando, por vezes, zonados (Fig. 4C). Os principais minerais máficos da matriz são biotita e anfibólio.

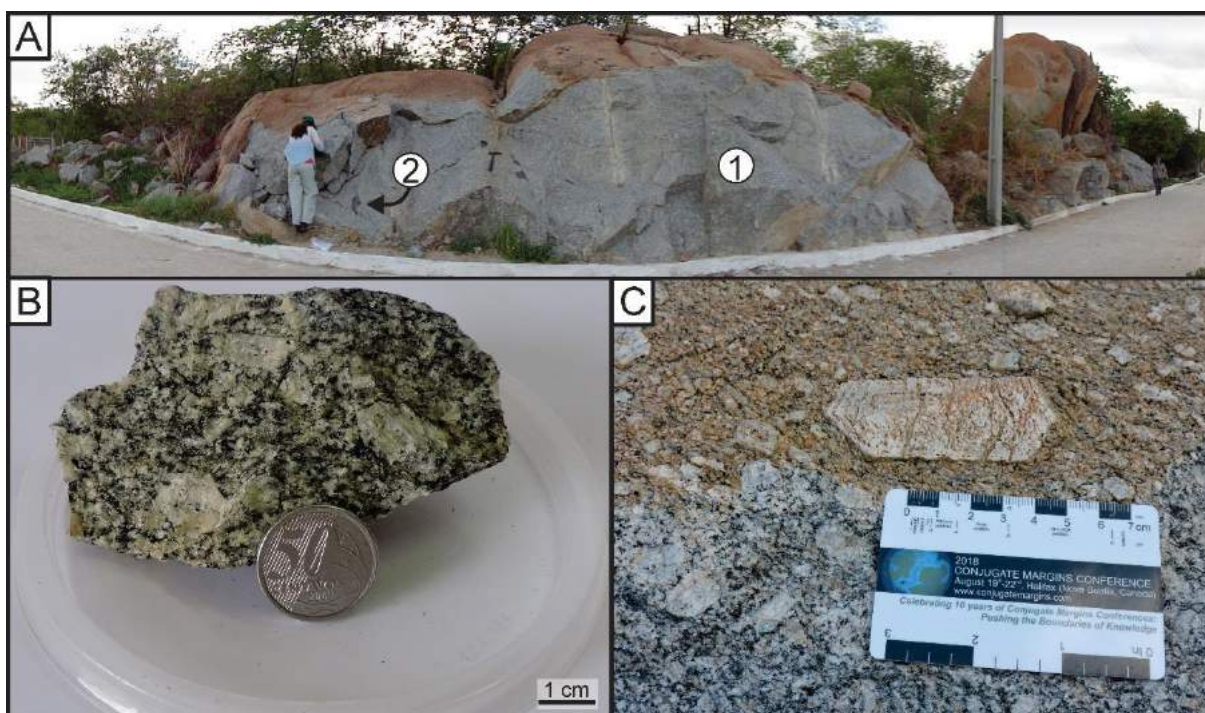


Figura 4: (A) Visão geral do afloramento, em que é possível observar a superfície arredondada que os blocos de granito apresentam. 1 – Indicação do local de coleta da amostra LL-05A (granito). 2 – Indicação do local de coleta da amostra LL-05B (enclave máfico). (B) Detalhe da amostra de granito. Nota-se que a quantidade de minerais máficos e félsicos, na matriz, é aproximadamente similar – evidenciada pela coloração mesocrática da amostra. (C) Detalhe de cristal de feldspato potássico euédrico, de ~7 cm de comprimento, apresentando zoneamento.

O granito apresenta enclaves máficos (dioríticos?) alongados e de dimensões decimétricas (Fig. 5A). Estes enclaves, em geral, encontram-se alinhados à foliação magmática de direção NE (marcada pelo alinhamento de cristais de feldspato potássico). Observam-se, também, cristais de feldspato potássico disseminados na matriz dos enclaves, indicando uma provável assimilação destas fases minerais a partir do magma granítico (Fig. 5B). Estas duas últimas feições sugerem que houve coexistência de magmas de composições distintas. O granito é cortado por diques de quartzo e fraturas tardias.

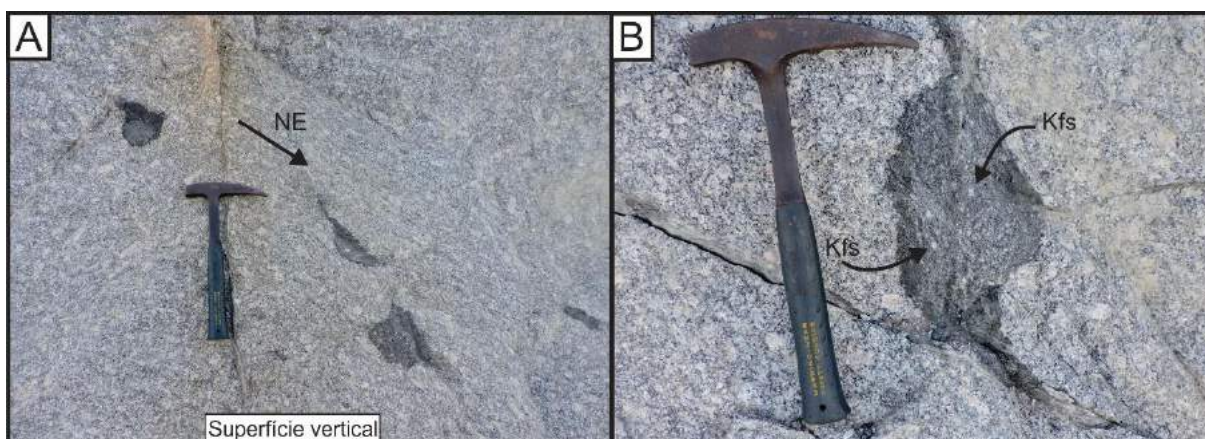


Figura 5: (A) Enclaves máficos alongados, dispostos na direção NE (paralelos à direção preferencial da foliação magmática). (B) Detalhe de enclave máfico apresentando cristais de feldspato potássico disseminados na matriz (Kfs = Feldspato potássico).

Ponto 6 (LL-06)

Município: São José do Egito-PE

Data: 05/02/2018

Coordenadas UTM, zona 24 sul: 690650 W; 9180665 S

Localização: à beira da BR-110, a aproximadamente 7 km do centro de Brejinho-PE

Amostras coletadas: LL-06

Características aeromagnéticas: baixo magnético

Unidade geológica: Complexo São Caetano

Descrição do afloramento:

Afloramento de biotita-muscovita xisto com granada (Fig. 6A, B), apresentando alto grau de deformação. Comparativamente, apresenta mais granada e biotita que o xisto do ponto LL-02. Estruturalmente, podem-se observar dois eventos de deformação distintos. O primeiro é caracterizado por foliação de baixo ângulo, representada por cavalgamento de camadas (Fig. 6C) e dobras recumbentes. O segundo é representado por um evento transcorrente que gerou

foliação de alto ângulo ($45\text{Az}/75^\circ/315\text{Az}$) e dobras com plano axial subparalelo à foliação de alto ângulo (e.g. dobra em *chevron* (Fig. 7A)) e crenulação (Fig. 7B).

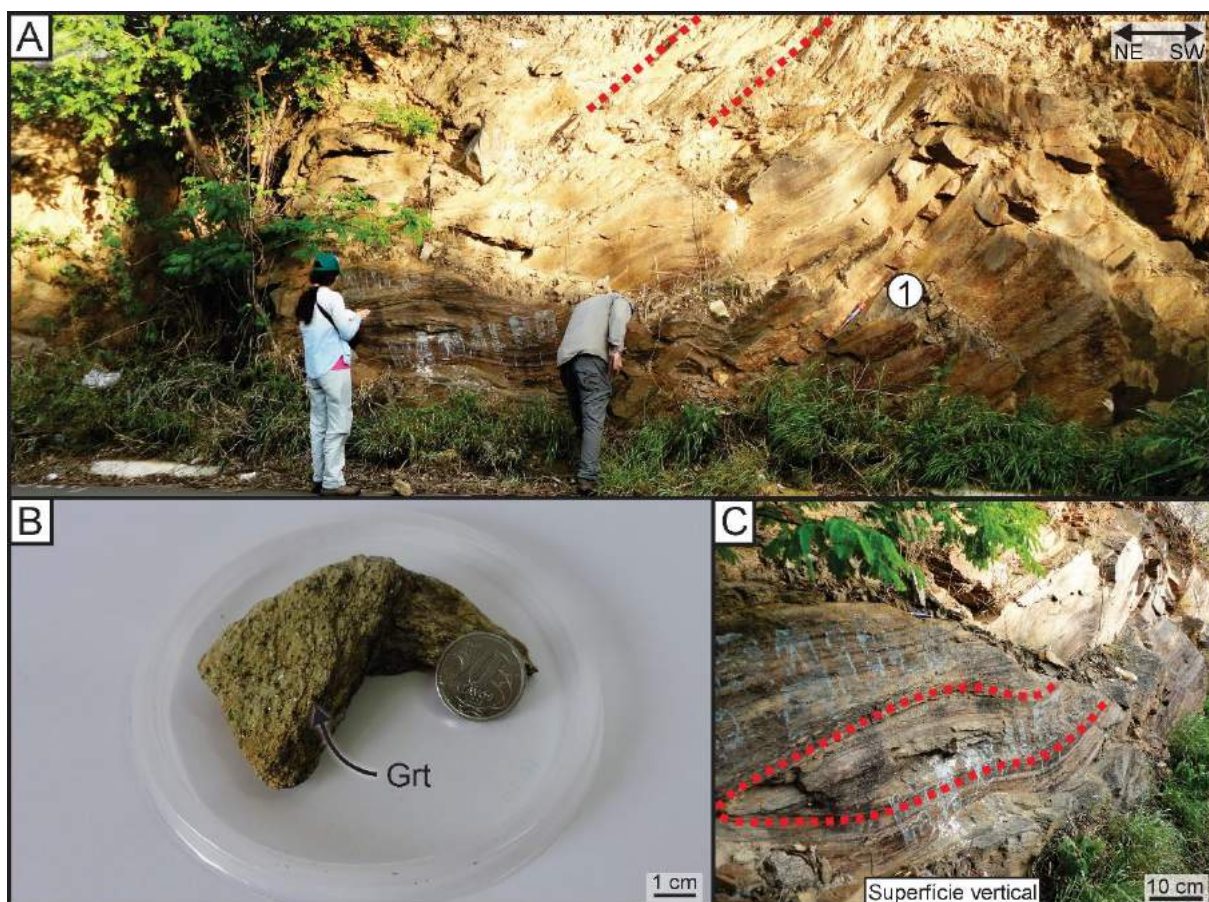


Figura 6: (A) Visão geral do afloramento de biotita-muscovita xisto com granada, onde é possível observar, na parte superior (indicado por linha pontilhada), foliação de alto ângulo e, na parte inferior, foliação de baixo ângulo. 1 – Indicação do local de coleta da amostra LL-06. (B) Detalhe de amostra de biotita-muscovita xisto com granada (os pontos escuros representam cristais de granada) (Grt = granada). (C) Cavalgamento de camadas.

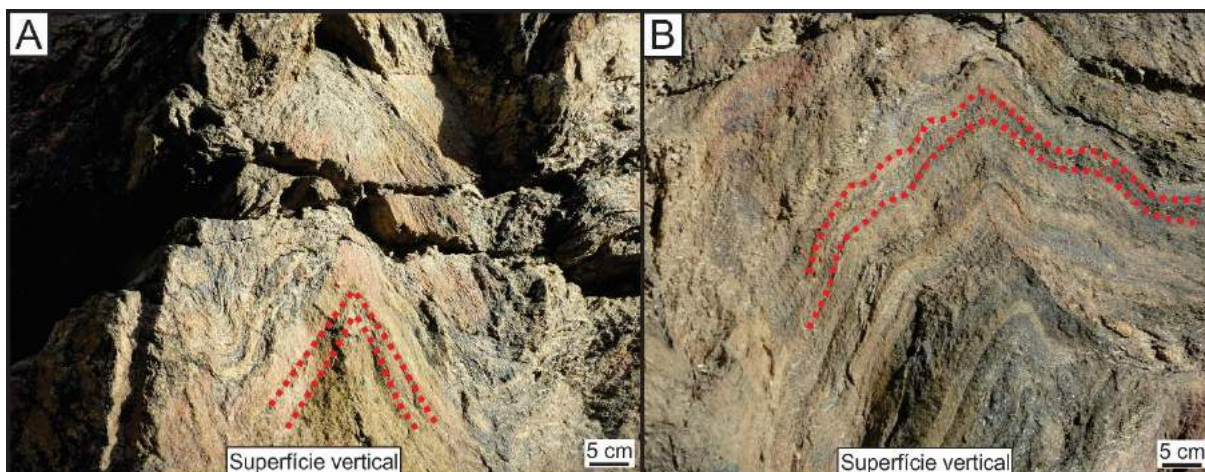


Figura 7: (A) Dobra em *chevron*. (B) Dobra aberta apresentando crenulação nos flancos.

Ponto 7 (LL-07)

Município: Maturéia-PB

Data: 06/02/2018

Coordenadas UTM, zona 24 sul: 680381 W; 9194816 S

Localização: estrada de terra, a aproximadamente 1,3 km da PB-306

Amostras coletadas: LL-07

Características aeromagnéticas: alto magnético localizado próximo à Zona de Cisalhamento do Tendó

Unidade geológica: Suíte Granítica Cariris Velhos (tipo Riacho do Forno)

Descrição do afloramento:

Bloco de *augen* gnaiss de granulação média (Fig. 8A), com porfiroclastos de feldspato potássico estirados, em geral apresentando entre 0,5 e 3 cm de comprimento (Fig. 8B). Os minerais máficos mais abundantes são biotita e anfibólio. Cristais do tipo delta indicam cinemática sinistral. Como feição comum, aparecem fitas de quartzo descontínuas. Estruturalmente, observa-se foliação verticalizada na direção NW-SE.

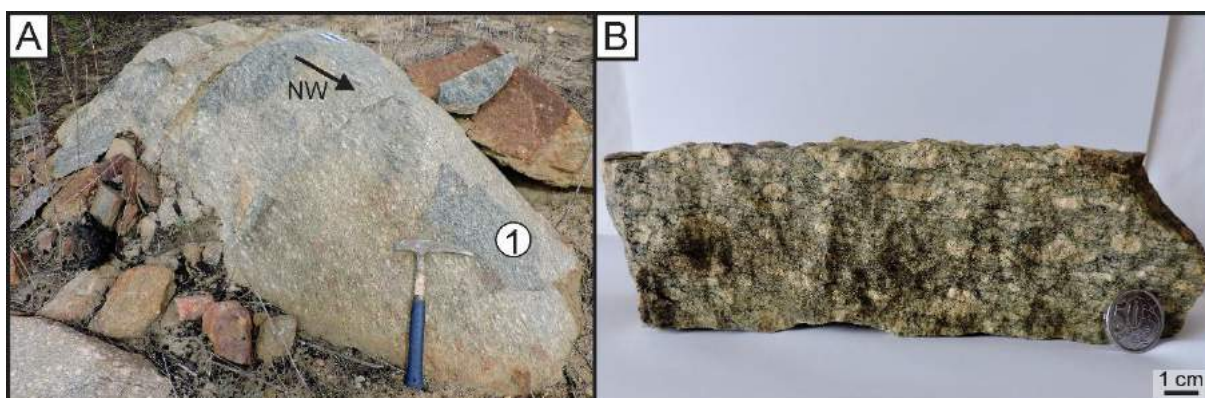


Figura 8: (A) Visão geral de bloco de *augen* gnaiss, onde é possível observar a foliação de alto ângulo disposta

na direção NW-SE. 1 – Indicação do local de coleta da amostra LL-07. (B) Detalhe da amostra de *augen* gnaiss mostrando cristais de feldspato potássico estirados.

Ponto 8 (LL-08) – Ponto de Controle

Município: Maturéia-PB

Data: 06/02/2018

Coordenadas UTM, zona 24 sul: 679578 W; 9194761 S

Localização: estrada de terra, a aproximadamente 2,2 km da PB-306

Amostras coletadas: não houve

Características aeromagnéticas: alto magnético na borda sul do Domínio Jabre–Batólito Teixeira

Unidade geológica: Suíte Granítica Cariris Velhos (tipo Riacho do Forno)

Descrição do afloramento:

Augen gnaiss similar ao descrito anteriormente no ponto LL-07.

Ponto 9 (LL-09)

Município: Maturéia-PB

Data: 06/02/2018

Coordenadas UTM, zona 24 sul: 678675 W; 9194922 S

Localização: estrada de terra, a aproximadamente 3,2 km da PB-306

Amostras coletadas: LL-09A (granito), LL-09B (solo)

Relevo: morro

Características aeromagnéticas: alto magnético na borda sul do Domínio Jabre–Batólito Teixeira

Unidade geológica: Batólito Teixeira

Descrição do afloramento:

Blocos de superfície arredondada compostos por granito equigranular, fino, leucocrático (Fig. 9A). Apresentam, como minerais máficos comuns, anfibólio e, subordinadamente, epidoto; sendo este último, frequentemente observado nas adjacências de cristais de anfibólio. Comparativamente, a quantidade de máficos é significativamente inferior ao granito do ponto LL-05 (Fig. 9B). A rocha contém raras ocorrências de enclaves máficos de formato elíptico (~3 cm de comprimento) (Fig. 9C). Esta unidade é afetada por zona de cisalhamento de largura centimétrica (~7 cm) de direção 155Az, a qual gera foliação milonítica em seus limites. Apresenta veios de quartzo subparalelos à direção da zona de cisalhamento (175Az) (Fig. 10A). Estes veios são deslocados por falhas tardias de direção SW (Fig. 10B). No entorno do afloramento, é observada a formação de solo cinza esbranquiçado, e areno-argiloso (Fig. 10C).

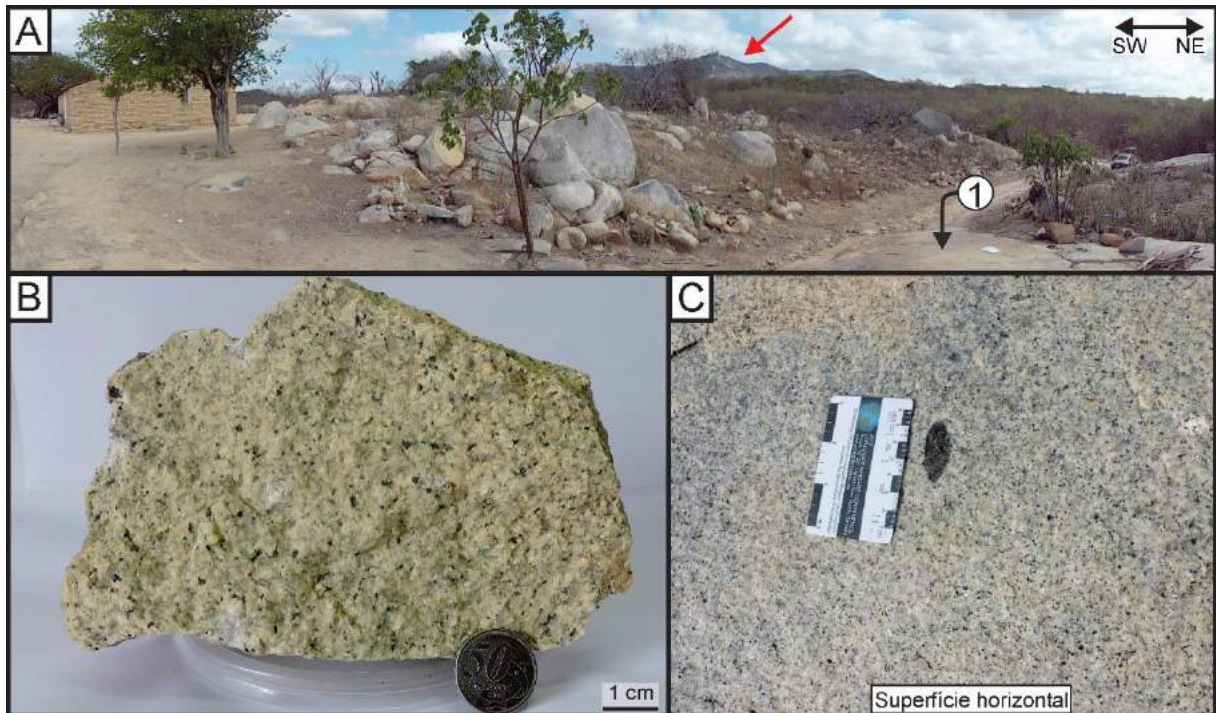


Figura 9: (A) Visão geral do afloramento, onde é possível observar blocos de morfologia arredondada. Ao fundo, uma serra de direção NE-SW também representando rochas do Batólito Teixeira (vide seta vermelha). 1 – Local de coleta da amostra LL-09A. (B) Em detalhe, amostra do granito marcado por baixo teor de minerais máficos. (C) Enclave máfico de formato elíptico com, aproximadamente, 3cm de comprimento.

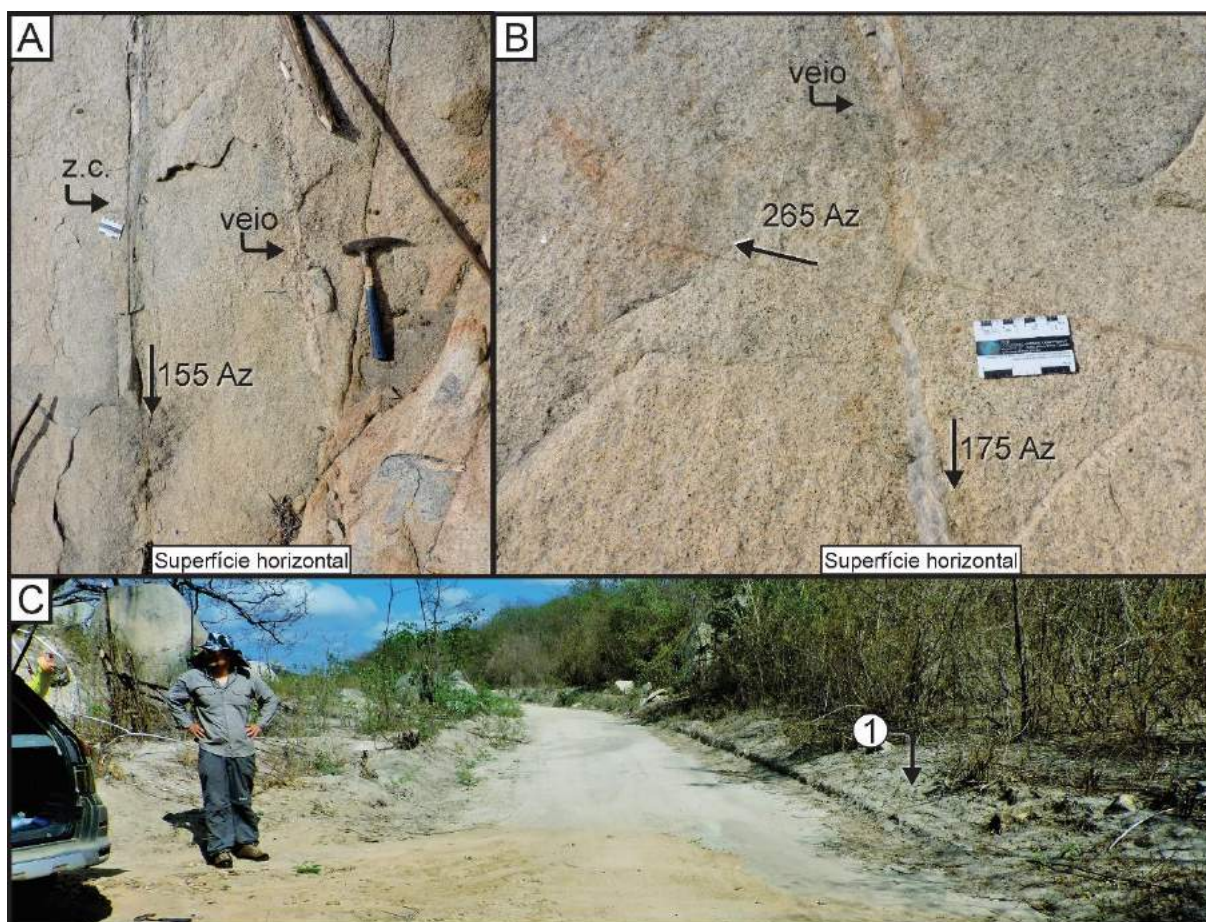


Figura 10: (A) Zona de cisalhamento (z.c.) de largura centimétrica e veio de quartzo subparalelos, ambos de direção SE. (B) Falha de direção SW deslocando veio de quartzo com direção SE. (C) Solo cinza esbranquiçado formado no entorno do afloramento do Granito Teixeira. 1 – Indicação do local de coleta de solo (amostra LL-09B).

Ponto 10 (LL-10) – Ponto de controle

Município: Maturéia-PB

Data: 06/02/2018

Coordenadas UTM, zona 24 sul: 677944 W; 9195673 S

Localização: estrada de terra, a aproximadamente 4,4 km da PB-306

Amostras coletadas: não houve

Características aeromagnéticas: alto magnético na borda sul do Domínio Jabre–Batólito Teixeira

Unidade geológica: Batólito Teixeira

Descrição do afloramento:

Granito leucocrático, similar ao descrito anteriormente no ponto LL-09. Representa um afloramento do Batólito Teixeira.

Ponto 11 (LL-11)

Município: Maturéia-PB

Data: 06/02/2018

Coordenadas UTM, zona 24 sul: 677971 W; 9196401 S

Localização: estrada de terra, a aproximadamente 5,2 km da PB-306

Amostras coletadas: LL-11A (granito), LL-11B (solo)

Relevo: morro

Características aeromagnéticas: baixo magnético na borda sul do Domínio Jabre–Batólito Teixeira

Unidade geológica: Batólito Teixeira

Descrição do afloramento:

Blocos de granito leucocrático, equigranular, de granulação fina, com superfície arredondada (Fig. 11A, B). Os minerais máficos predominantes são anfibólio e biotita; esta última, localmente, forma *clots* centimétricos (Fig. 11C). Os blocos de granito têm formato arredondado e chegam a apresentar mais de 7 m de altura (Fig. 12B). O solo derivado é, predominantemente, argiloso, marrom-avermelhado e contém fragmentos de óxidos de ferro dispersos (Fig. 12A, C). Quando comparado ao afloramento LL-09, nota-se uma maior quantidade de minerais máficos, o que justifica a diferença na coloração entre os solos formados nestes dois pontos.

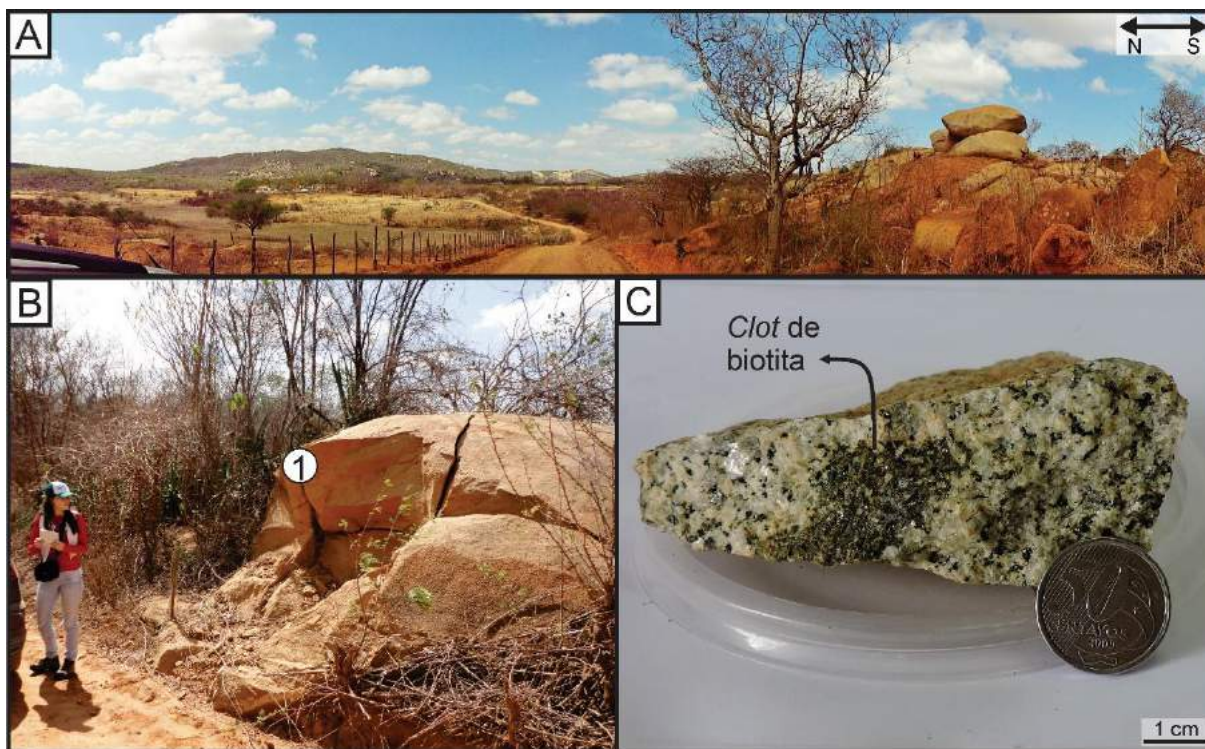


Figura 11: (A) Visão geral do afloramento de granito, onde é possível ver, ao fundo, uma serra também representando rochas do Batólito Teixeira. (B) Bloco de granito com superfície arredondada. 1 – Indicação do local de coleta da amostra LL-11A. (C) Detalhe de amostra de granito apresentando *clot* centimétrico de biotita.

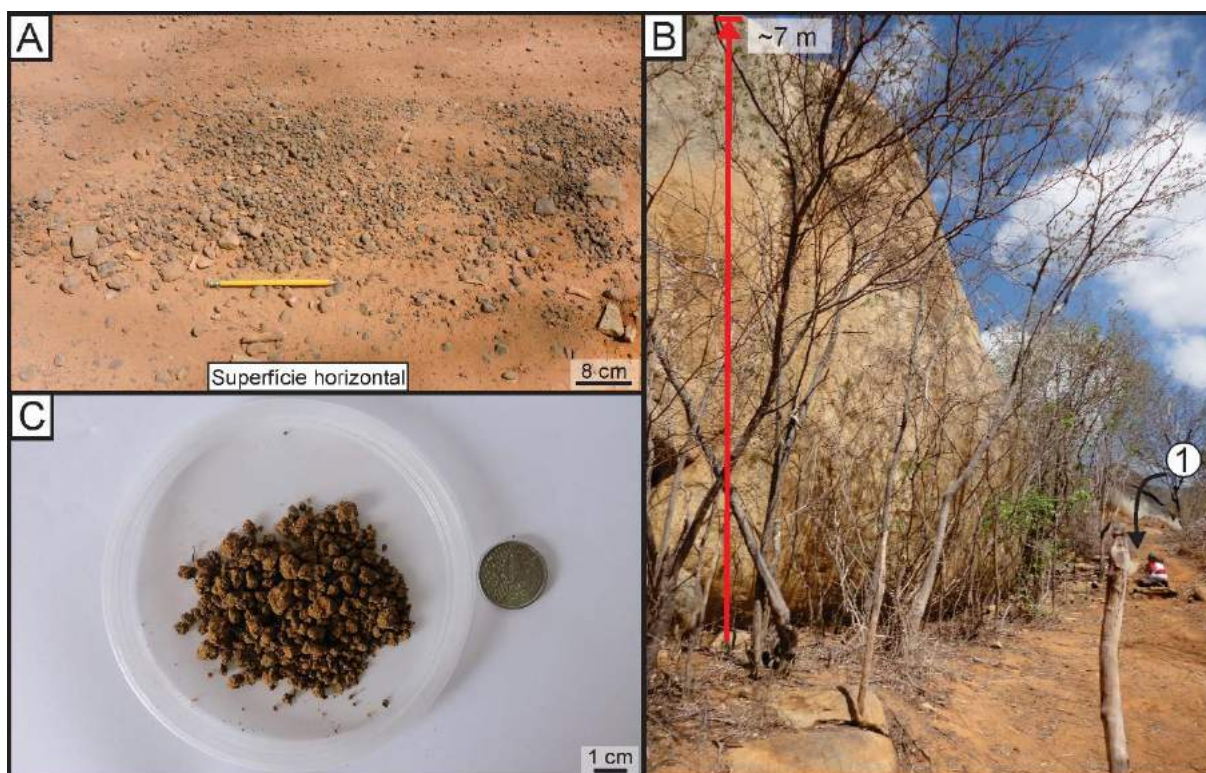


Figura 12: (A) Solo avermelhado contendo fragmentos de óxidos de ferro dispersos na superfície. (B) Bloco de granito com aproximadamente 7 m de altura. 1 – Indicação do local de coleta da amostra LL-11B. (C) Solo marrom avermelhado formado a partir do granito.

Ponto 12 (LL-12)

Município: Maturéia-PB

Data: 06/02/2018

Coordenadas UTM, zona 24 sul: 678596 W; 9194025 S

Localização: estrada de terra, a aproximadamente 3,6 km da PB-306. Próximo à Fazenda Catolé

Amostras coletadas: LL-12

Características aeromagnéticas: alto magnético na borda sul do Domínio Jabre–Batólito Teixeira, nas proximidades da Zona de Cisalhamento do Tendó

Unidade geológica: Suíte Granítica Cariris Velhos (tipo Riacho do Forno)

Descrição do afloramento:

Bloco de *augen* gnaiss protomilonítico. Os porfiroclastos são compostos por feldspato potássico, os quais mostram um alto grau de estiramento. Apresenta foliação de alto ângulo, com mergulho variando para NE e SE (155Az/88°/65Az; 55Az/85°/145Az) e cinemática sinistral, inferida a partir de fenocristais do tipo sigma e bandas tipo s-c. Também são observados diques pegmatíticos paralelos ao plano de foliação e compostos, essencialmente, por feldspato potássico. A rocha contém magnetita.



Figura 13: (A) Visão geral do afloramento de *augen* gnaiss. (B) Dique pegmatítico cortando gnaiss. (C) Detalhe de bandas tipo s-c e porfiroclasto de feldspato potássico indicando cinemática sinistral.

Ponto 13 (LL-13)

Município: Maturéia-PB

Data: 06/02/2018

Coordenadas UTM, zona 24 sul: 678455 W; 9193983 S

Localização: estrada de terra, a aproximadamente 3,8 km da PB-306.

Amostras coletadas: LL-13

Características aeromagnéticas: alto magnético a sul da Zona de Cisalhamento do Tendó

Descrição do afloramento:

Blocos de rocha pegmatítica, alcançando até 60 cm de altura, composta essencialmente por quartzo leitoso e turmalina de coloração preta (Fig. 14A, B). Texturalmente, são observados veios irregulares de quartzo entrelaçados cortando a turmalina (caracterizando a textura *stockwork*) (Fig. 14C). O afloramento apresenta ~6 m de diâmetro.



Figura 14: (A) Visão geral do afloramento de pegmatito. 1 – Indicação do local de coleta da amostra LL-13. (B) Bloco de pegmatito em que é possível observar alta concentração de turmalina. (C) Detalhe da amostra de pegmatito. Observa-se a presença de veios de quartzo irregulares, caracterizando textura *stockwork*.

Ponto 14 (LL-14)

Município: Mãe d'Água-PB

Data: 06/02/2018

Coordenadas UTM, zona 24 sul: 677282 W; 9193243 S

Localização: estrada de terra, a aproximadamente 5,2 km da PB-306.

Amostras coletadas: LL-14

Características aeromagnéticas: alto magnético a sul da Zona de Cisalhamento do Tendó

Unidade geológica: Suíte Granítica Cariris Velhos (tipo Riacho do Forno) e Batólito Teixeira

Descrição do afloramento:

Blocos de metagranito, melanocrático, equigranular, de granulação média (Fig. 15A, B). Os minerais mais frequentes são feldspato potássico e biotita. A rocha apresenta foliação

verticalizada na direção E-W (270Az) e deformação incipiente, marcada por alinhamento descontínuo de feldspato potássico. Estes blocos fazem contato sinuoso com granitos leucocráticos pertencentes ao Batólito Teixeira (Fig. 15C).

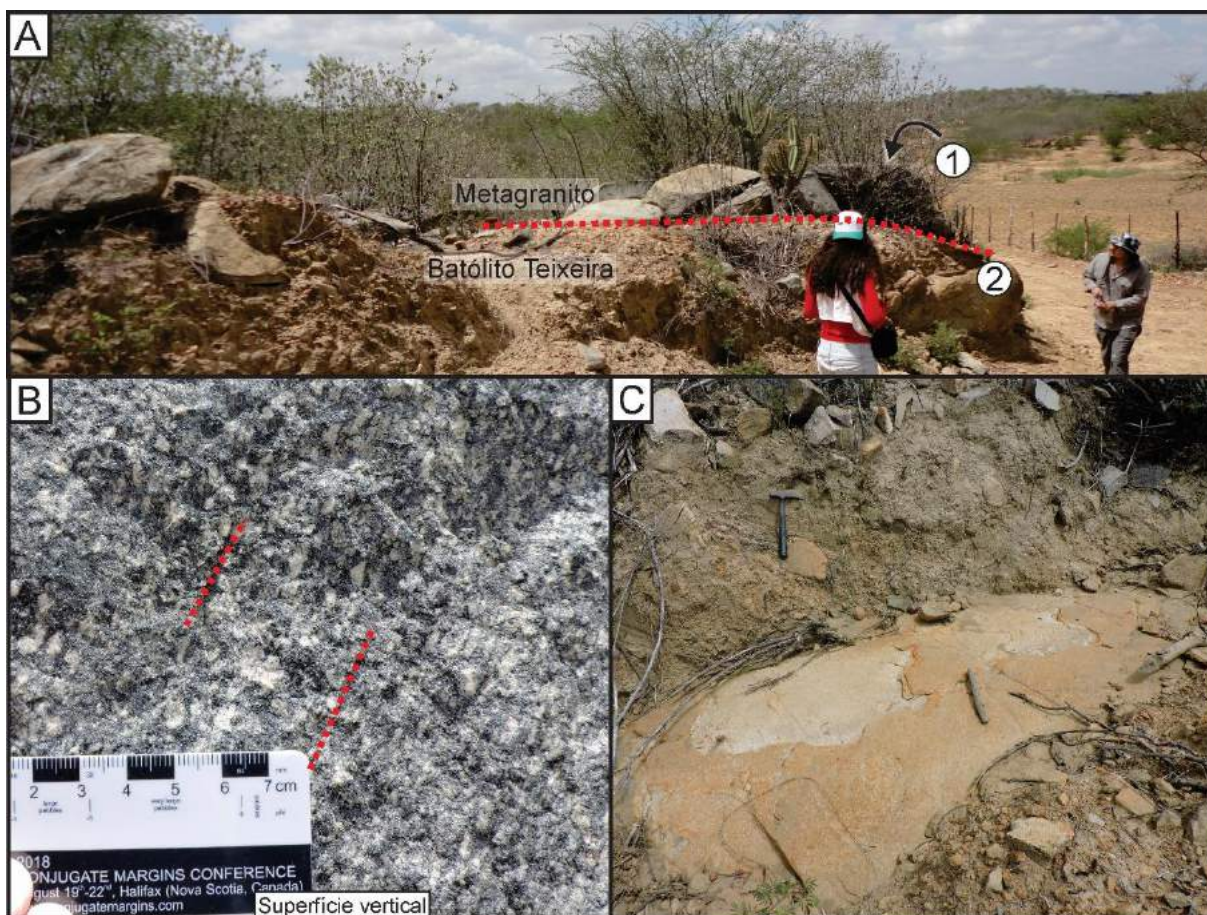


Figura 15: (A) Visão geral do afloramento de metagranito (a linha pontilhada mostra o contato entre o metagranito (acima) e o Batólito Teixeira (abaixo)). 1 – Indicação do local de coleta da amostra LL-14 (metagranito). (B) Detalhe da textura observada no metagranito, onde é possível observar um alinhamento incipiente de cristais de feldspato potássico, paralelamente à linha pontilhada vermelha. (C) Granito leucocrático representando um afloramento do Batólito Teixeira.

Ponto 15 (LL-15)

Município: Mãe d'Água-PB

Data: 06/02/2018

Coordenadas UTM, zona 24 sul: 676954 W; 9192803 S

Localização: estrada de terra, a aproximadamente 5,8 km da PB-306.

Amostras coletadas: LL-15A (rocha), LL-15B (solo)

Características aeromagnéticas: baixo magnético a sul da Zona de Cisalhamento do Tendó

Descrição do afloramento:

Ponto marcado por mudança brusca na coloração do solo – que passa de esbranquiçado para vermelho intenso, numa extensão de aproximadamente 10m, e volta a ser esbranquiçado (Fig. 16A). Na área que contém solo avermelhado, são observados blocos de anfibolito apresentando bandamento milimétrico entre anfibólio e plagioclásio (Fig. 16B). Esta feição pode representar uma lente de anfibolito encaixado nos granitos ou metagranitos da região. Texturalmente, o solo é classificado como silte-argiloso (Fig. 16C).

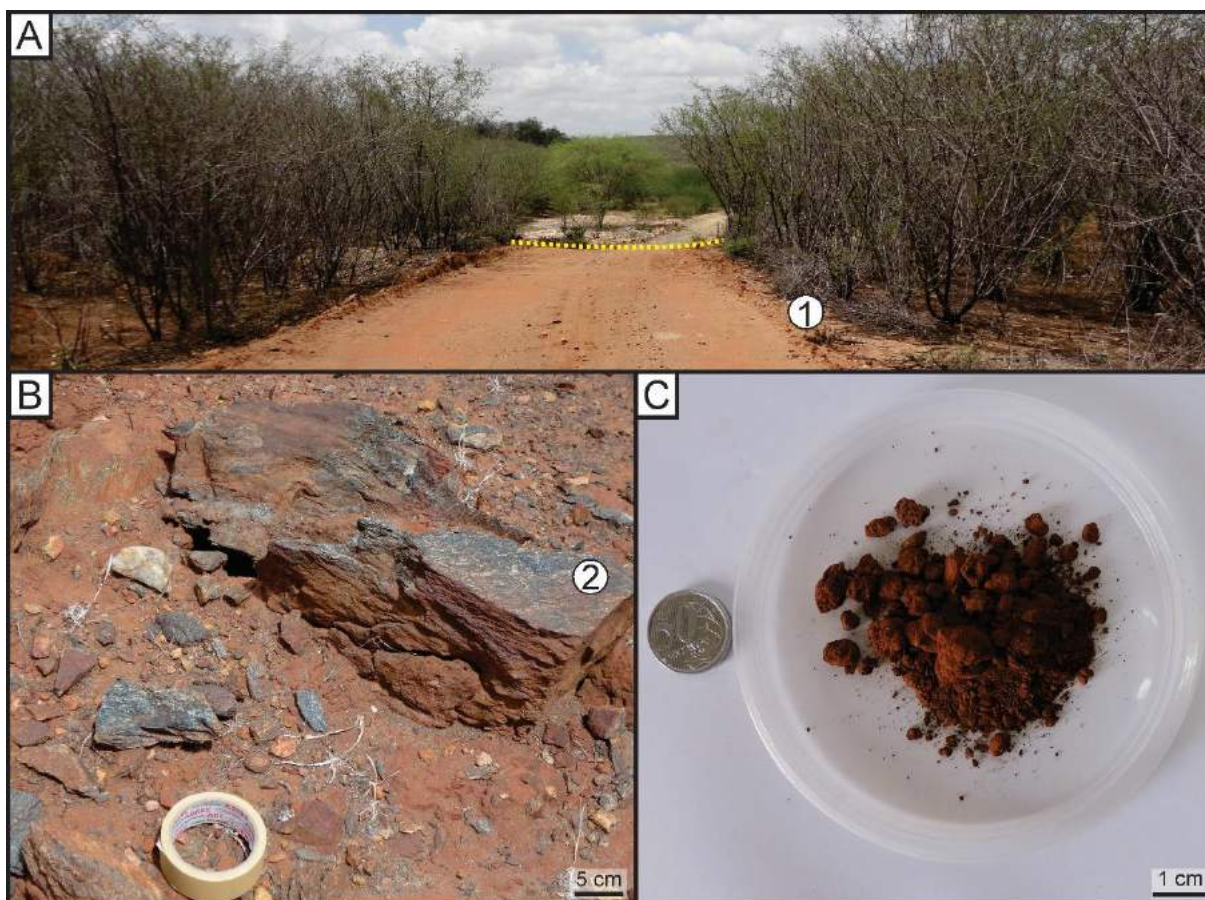


Figura 16: (A) Visão geral do ponto LL-15. A linha pontilhada, marca o contato entre solo esbranquiçado e o avermelhado. 1 – Indicação do local de coleta da amostra LL-15 B. (B) Bloco de anfibolito. 2 – Indicação do local de coleta da amostra LL-15 A. (C) Detalhe de amostra de solo silte-argiloso avermelhado.

Ponto 16 (LL-16) – Ponto de controle

Município: Maturéia-PB

Data: 06/02/2018

Coordenadas UTM, zona 24 sul: 680799 W; 9192621 S

Localização: à beira da PB-306

Amostras coletadas: LL-16

Características aeromagnéticas: baixo magnético a sul do Batólito Teixeira

Unidade geológica: Suíte Granítica Cariris Velhos (tipo Riacho do Forno)

Descrição do afloramento:

Blocos soltos de *augen* gnaiss (Fig. 17A) com porfiroclastos de feldspato potássico tipo sigma e delta (Fig. 17B, C). Observa-se alternância entre bandas quartzo-feldspáticas centimétricas, bastante estiradas, e bandas máficas compostas, essencialmente, por biotita.

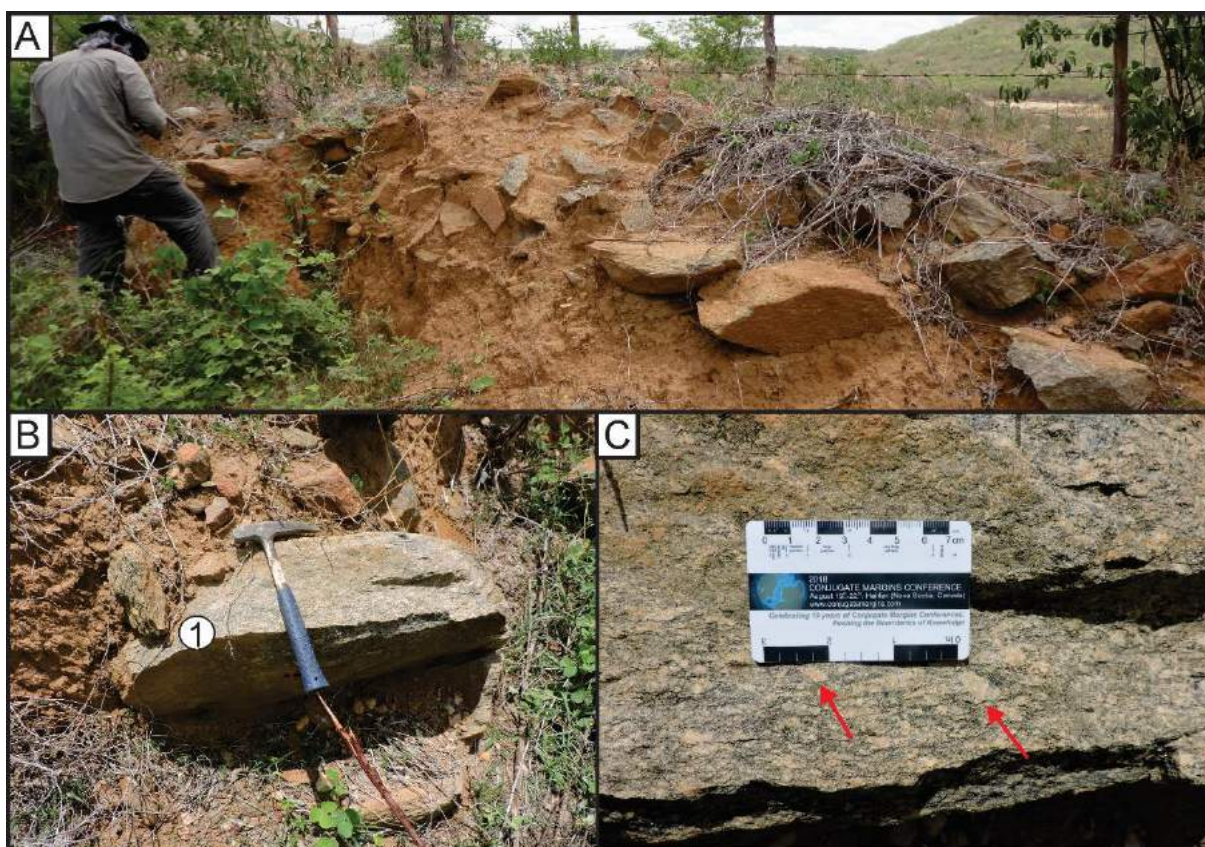


Figura 17: (A) Visão geral do ponto LL-16, onde se observam blocos soltos. (B) Detalhe de bloco de *augen* gnaiss. 1 – Indicação do local de coleta da amostra LL-16. (C) Detalhe do grau de estiramento de cristais de feldspato potássico, além de porfiroclastos do tipo sigma (vide setas vermelhas).

Ponto 17 (LL-17) – Ponto de controle

Município: Maturéia-PB

Data: 06/02/2018

Coordenadas UTM, zona 24 sul: 678860 W; 9189025 S

Localização: à beira da PB-306

Amostras coletadas: LL-17

Características aeromagnéticas: baixo magnético a noroeste da Zona de Cisalhamento Itapetim
Unidade geológica: Suíte Granítica Cariris Velhos (tipo Recanto)

Descrição do afloramento:

Blocos soltos de metagranito equigranular, cinza esbranquiçado (Fig. 18A). A rocha apresenta bandamento milimétrico incipiente formado por alinhamento de cristais de biotita (Fig. 18B, C).

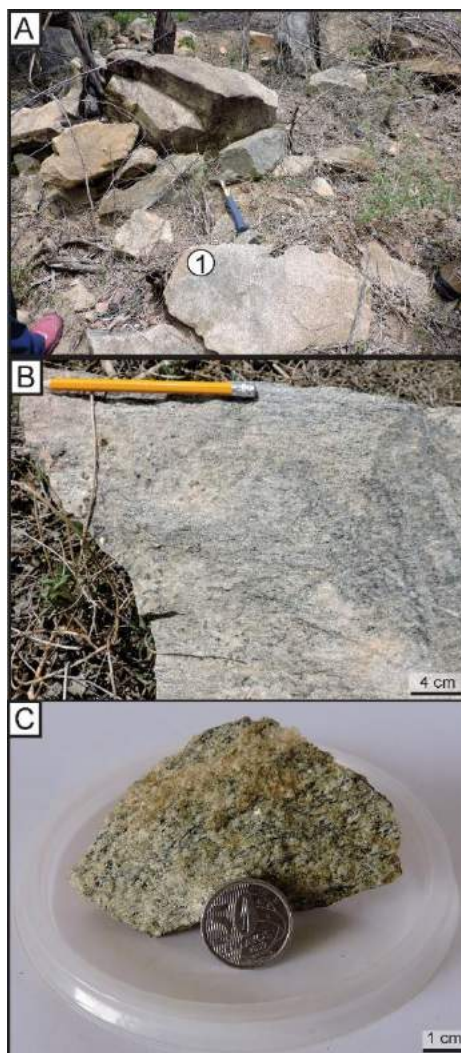


Figura 18: (A) Visão geral do ponto LL-17, onde se observam blocos de metagranito soltos. 1 – Indicação do local de coleta da amostra LL-17. (B) Bloco de metagranito cinza esbranquiçado. (C) Detalhe de amostra LL-17, em que é possível notar alinhamento de cristais de biotita.

Ponto 18 (LL-18)

Município: Imaculada-PB

Data: 06/02/2018

Coordenadas UTM, zona 24 sul: 676219 W; 9189120 S

Localização: à beira da PB-306

Amostras coletadas: LL-18

Características aeromagnéticas: baixo magnético a noroeste da Zona de Cisalhamento Itapetim
 Unidade geológica: Suíte Granítica Cariris Velhos (tipo Recanto)

Descrição do afloramento:

Augen gnaiss apresentando bandamento mili a centimétrico bem definido (Fig. 19A, B). As bandas félsicas contêm feldspato potássico e quartzo, que apresentam elevado grau de estiramento. As bandas máficas são compostas por biotita. Estruturalmente, o *augen* gnaiss exibe foliação de baixo ângulo de direção NE-SW e mergulho para NW (10Az/24°/280Az). São observados veios pegmatíticos (~10 cm de largura) compostos por quartzo e feldspato potássico, que desenvolvem crenulação nas bordas (Fig. 19C).

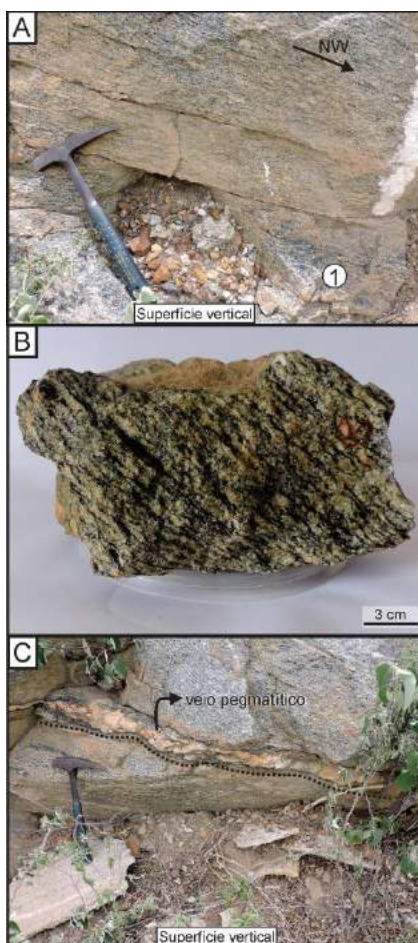


Figura 19: (A) *Augen* gnaiss apresentando bandamento bem definido e mergulho de baixo ângulo para direção NW. 1 – Indicação do local de coleta da amostra LL-18. (B) Detalhe de amostra de gnaiss em que é possível observar, além do bandamento bem definido, o grau de estiramento dos minerais nas bandas félsicas. (C) Detalhe de veio pegmatítico composto por quartzo e feldspato potássico. No contato entre o veio e o gnaiss, é possível observar a formação de crenulação (indicado por linha tracejada).

Ponto 19 (LL-19) – Ponto de controle

Município: Imaculada-PB

Data: 06/02/2018

Coordenadas UTM, zona 24 sul: 673204 W; 9188776 S

Localização: à beira da PB-306

Amostras coletadas: não houve

Características aeromagnéticas: baixo magnético a SE do Domínio Mãe D'Água–Batólito Teixeira

Unidade geológica: Suíte Granítica Cariris Velhos (tipo Riacho do Forno)

Descrição do afloramento:

Augen gnaiss similar ao descrito anteriormente no ponto LL-18.

Ponto 20 (LL-20) – Ponto de controle

Município: Imaculada-PB

Data: 06/02/2018

Coordenadas UTM, zona 24 sul: 667566 W; 9186981 S

Localização: à beira da PB-306

Amostras coletadas: não houve

Características aeromagnéticas: alto magnético a SW do Domínio Mãe D'Água–Batólito Teixeira

Unidade geológica: Batólito Teixeira

Descrição do afloramento:

Granito do tipo Teixeira.

Ponto 21 (LL-21)

Município: Santa Terezinha-PE

Data: 06/02/2018

Coordenadas UTM, zona 24 sul: 670299 W; 9182777 S

Localização: à beira da PE-285

Amostras coletadas: LL-21

Relevo: morro de aproximadamente 5 m de altura e 50 m de comprimento

Características aeromagnéticas: alto magnético próximo ao limite sudoeste da Zona de Cisalhamento Itapetim

Unidade geológica: Suíte Granítica Cariris Velhos (tipo Riacho do Forno)

Descrição do afloramento:

Metagranito equigranular, fino, de coloração cinza-esbranquiçada (Fig. 20A). Apresenta bandamento milimétrico incipiente, formado por alinhamento de biotita (melhor desenvolvido do que aquele observado no ponto LL-17). Esta rocha contém magnetita e apresenta foliação verticalizada na direção NW-SE (95Az). Encontra-se intercalada com rocha de composição máfica (com aproximadamente 1 m de largura), disposta paralelamente à direção da foliação da

primeira (Fig. 20B). As porções máficas são vistas nas partes mais arrasadas do afloramento, evidenciando o processo de erosão diferencial. São observados veios pegmatíticos contendo feldspato potássico e turmalina. Pares conjugados de direção NE deslocam plano de foliação (Fig. 20C). No entorno do afloramento, há a formação de solo arenoso esbranquiçado.

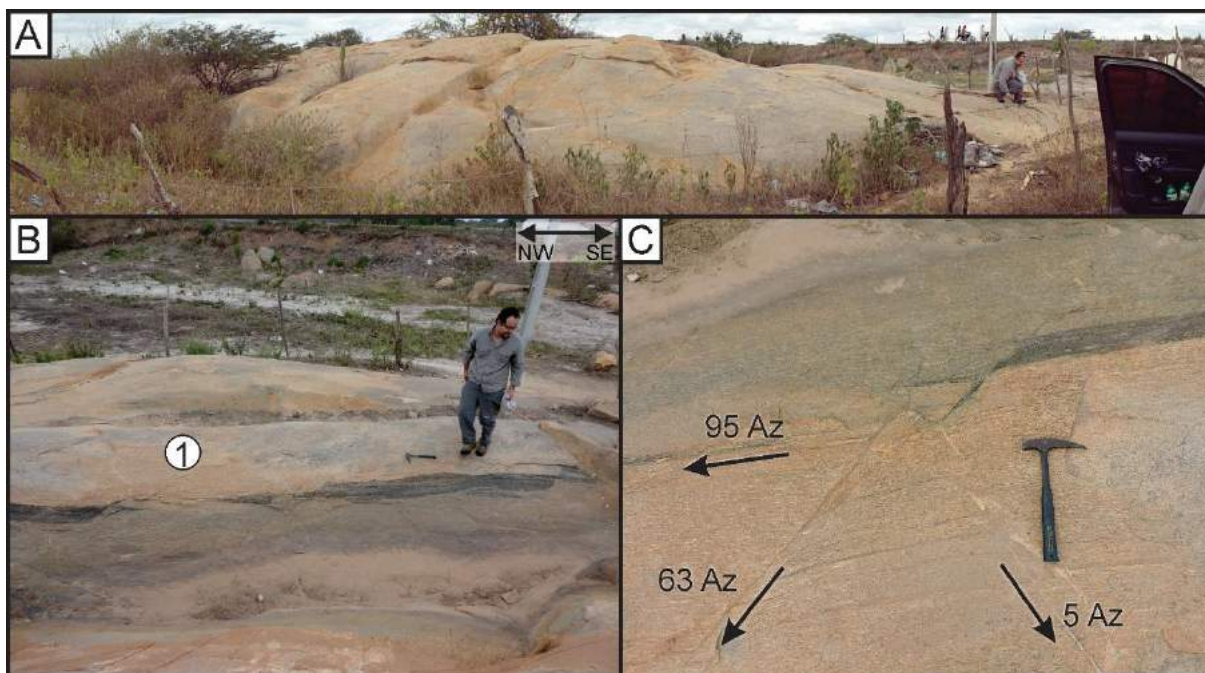


Figura 20: (A) Visão geral do afloramento de metagranito. (B) Contato entre metagranito e rocha máfica (paralelo à foliação de direção NW-SE). 1 – Indicação do local de coleta da amostra LL-21. (C) Par conjugado deslocando plano de foliação de metagranito.

Ponto 22 (LL-22)

Município: Santa Terezinha-PE

Data: 06/02/2018

Coordenadas UTM, zona 24 sul: 671259 W; 9181660 S

Localização: à beira da PE-285

Amostras coletadas: LL-22 (solo)

Características aeromagnéticas: baixo magnético próximo ao limite sudoeste da Zona de Cisalhamento Itapetim

Descrição:

Regolito argilo-arenoso, de coloração amarelada (Fig. 21A, B). Localmente, é possível observar resquícios de textura gnáissica representada por cristais de feldspato caulinizados. O regolito é cortado por dique pegmatítico intemperizado, de coloração avermelhada, e caracterizado por aproximadamente 30 cm de largura (Fig. 21A).

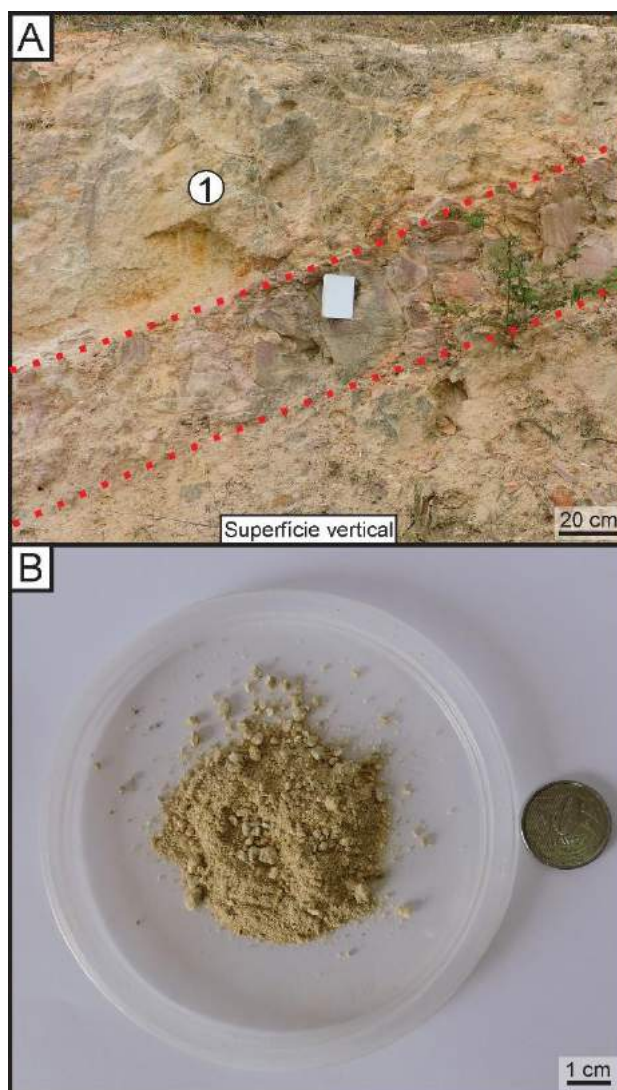


Figura 21: (A) Visão geral do ponto LL-22. Observa-se regolito argilo-arenoso de coloração amarelada, cortado por dique pegmatítico de coloração avermelhada (este último, indicado entre linhas vermelhas pontilhadas). 1 – Indicação do local de coleta da amostra LL-22. (B) Em detalhe, a amostra de regolito em que é possível observar a textura argilo-arenosa.

Ponto 23 (LL-23) – Ponto de controle

Município: Santa Terezinha-PE

Data: 06/02/2018

Coordenadas UTM, zona 24 sul: 672928 W; 9180181 S

Localização: à beira da PE-285

Amostras coletadas: LL-23 (solo)

Características aeromagnéticas: baixo magnético próximo ao limite sudoeste da Zona de Cisalhamento Itapetim

Descrição do afloramento:

Camada com mais de 2 m de espessura de solo avermelhado areno-cascalhoso (Fig.

22A, B), com seixos de quartzo subangulosos a subarredondados que alcançam até 20 cm de comprimento (Fig. 22C).

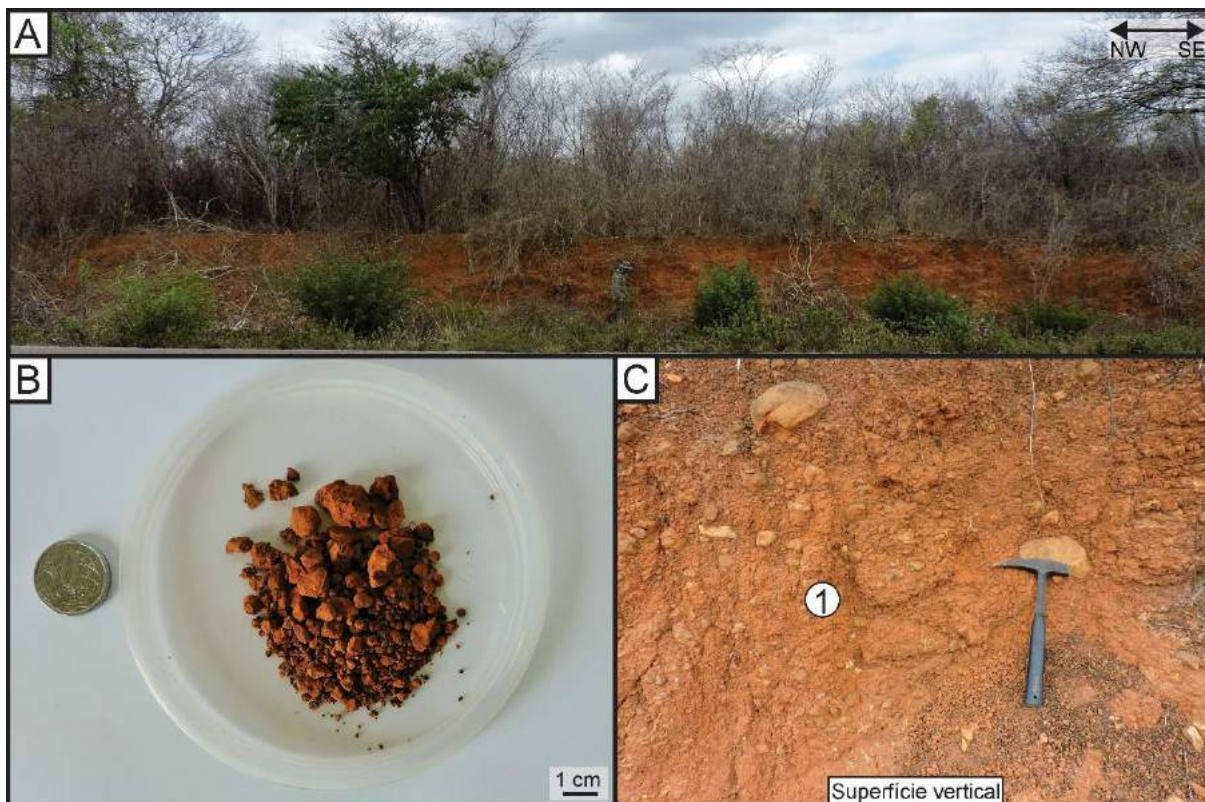


Figura 22: (A) Camada de solo avermelhado com mais de 2 metros de espessura. (B) Em detalhe, a textura areno-cascalhosa apresentada pelo solo. (C) Seixos com até 20 cm de comprimento em meio a matriz areno-cascalhosa. 1 – Indicação do local de coleta da amostra LL-23.

Ponto 24 (LL-24)

Município: Santa Terezinha-PE

Data: 06/02/2018

Coordenadas UTM, zona 24 sul: 673571 W; 9177399 S

Localização: à beira da PE-285

Amostras coletadas: LL-24A, LL-24B (ambas amostras da mesma rocha)

Características aeromagnéticas: baixo magnético próximo ao limite sudoeste da Zona de Cisalhamento Itapetim

Unidade geológica: Complexo São Caetano

Descrição do afloramento:

Muscovita-biotita xisto cortado por diques pegmatíticos e veios de quartzo (Fig. 23A, B). Localmente, há acumulações centimétricas de muscovita no xisto. O mesmo apresenta foliação de baixo ângulo e é afetado por dobras mesoscópicas abertas, características de zonas

de empurrão (Fig. 23C).

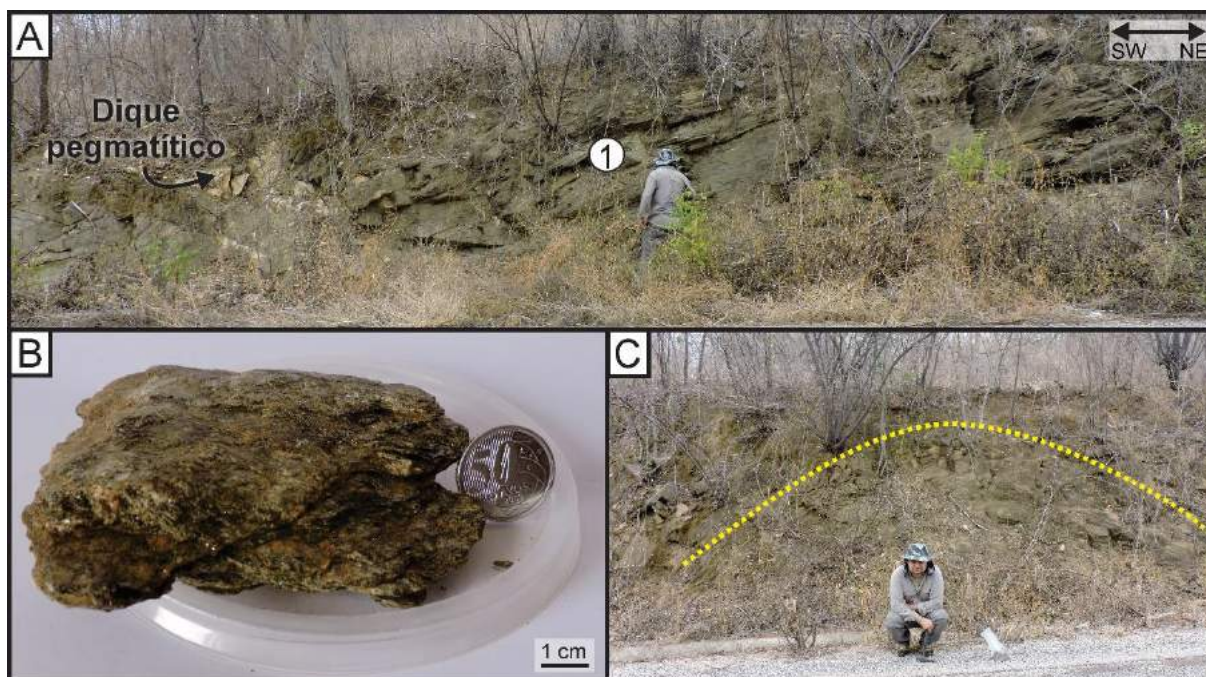


Figura 23: (A) Visão geral do afloramento de muscovita-biotita xisto, onde é possível ver a foliação de baixo ângulo, além de dique pegmatítico cortando a litologia. 1 – Indicação do local de coleta da amostra LL-24. (B) Detalhe de amostra de muscovita-biotita xisto. (C) Dobra (anticlinal) aberta mesoscópica afetando o muscovita-biotita xisto.

Ponto 25 (LL-25) – Ponto de controle

Município: Teixeira-PB

Data: 06/02/2018

Coordenadas UTM, zona 24 sul: 692174 W; 9203455 S

Localização: à beira da BR-110, próximo ao Restaurante do Tendó

Amostras coletadas: LL-25

Relevo: morro (granito); a norte do granito pode ser observada a Planície de Patos

Características aeromagnéticas: alto magnético na borda norte da porção central do Batólito Teixeira

Unidade geológica: Batólito Teixeira

Descrição do afloramento:

Pedra do Tendó - morro formado por granito fino, equigranular, leucocrático, composto, majoritariamente, por quartzo, plagioclásio e anfibólio. Comparativamente, a proporção de minerais máficos se assemelha àquela observada no ponto LL-09. Este afloramento está localizado próximo aos limites da Zona de Cisalhamento do Tendó; no entanto, não foram identificadas evidências de deformação. Observa-se, à norte da Pedra do Tendó, a Planície de

Patos.

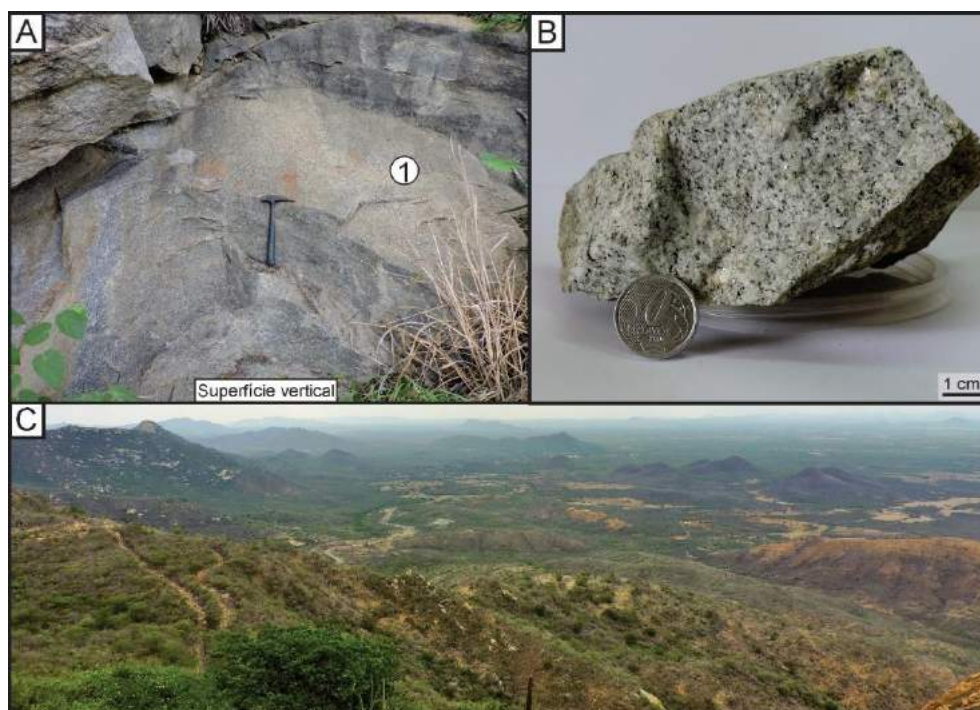


Figura 24: (A) Afloramento de granito leucocrático de granulação fina, pertencente ao Batólito Teixeira (Pedra do Tendó). 1 – Indicação do local de coleta da amostra LL-25. (B) Detalhe da amostra do granito, em que é possível observar suas características texturais. (C) Visão da Planície de Patos observada da Pedra do Tendó.

Ponto 26 (LL-26)

Município: São José do Bonfim-PB

Data: 06/02/2018

Coordenadas UTM, zona 24 sul: 687369 W; 9211264 S

Localização: à beira da PB-276, próximo ao Sítio Coração de Jesus

Amostras coletadas: LL-26

Características aeromagnéticas: alto magnético a sul do Lineamento Patos

Unidade geológica: Complexo Riacho Gravatá

Descrição do afloramento:

Filito marrom-acinzentado (Fig. 25A, B). Os minerais observados foram talco (e sericita? ou muscovita?). A litologia é cortada por veios de quartzo que, localmente, apresentam formato sigmoidal (Fig. 25C). Internamente, o filito não mostra evidências de deformação dúctil. As camadas encontram-se fortemente basculadas para a direção SW (Fig. 25A).



Figura 25: (A) Visão geral do afloramento de filito, em que se observa o forte basculamento para direção sul. (B) Detalhe da amostra de filito, caracterizado por foliação milimétrica. (C) Veios de quartzo com formato sigmoidal cortando o filito. 1 – Indicação do local de coleta da amostra LL-26.

Ponto 27 (LL-27)

Município: São José do Bonfim-PB

Data: 06/02/2018

Coordenadas UTM, zona 24 sul: 687652 W; 9210746 S

Localização: estrada de terra, a 300 m da PB-276

Amostras coletadas: LL-27

Características aeromagnéticas: alto magnético a sul do Lineamento Patos

Unidade geológica: Complexo Riacho Gravatá

Descrição do afloramento:

Ardósia de coloração cinza-esverdeada (Fig. 26A, B), apresentando camadas milimétricas (~1 mm). A rocha é cortada por diques pegmatíticos compostos por quartzo e biotita. As camadas têm direção NE-SW e mergulham com ângulo fraco para SE (55Az/25°/145Az) (Fig. 26C) e não mostram evidências de deformação dúctil.

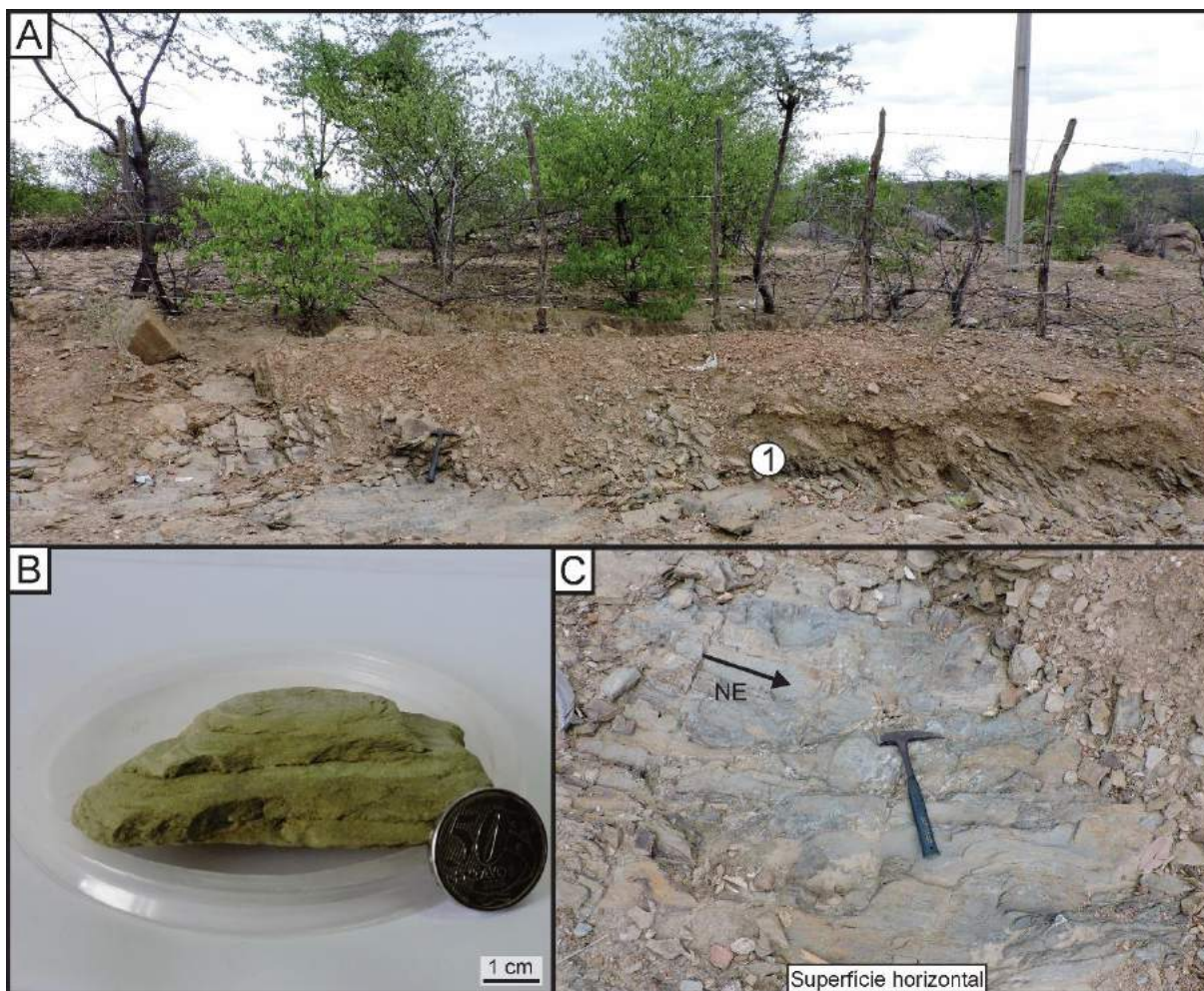


Figura 26: (A) Visão geral do afloramento de ardósia. 1 – Indicação do local de coleta da amostra LL-27. (B) Detalhe da amostra de ardósia mostrando foliação milimétrica. (C) Foliação de direção NE-SW e mergulho fraco (25°) para NW.

Ponto 28 (LL-28)

Município: São José do Bonfim-PB

Data: 06/02/2018

Coordenadas UTM, zona 24 sul: 688223 W; 9210953 S

Localização: estrada de terra, a 1 km da PB-276

Amostras coletadas: não houve

Características aeromagnéticas: alto magnético a sul do Lineamento Patos

Unidade geológica: Complexo Riacho Gravatá

Descrição do afloramento:

Ardósia (metaritmuito) de coloração cinza-esverdeada (Fig. 27A, B), semelhante à rocha encontrada no ponto LL-27. Apresenta camadas milimétricas (~1 mm), contendo talco. Estas camadas estão dispostas na direção NE-SW e mergulham, com ângulo moderado, para NW

(70Az/41°/340Az). São observadas estruturas sedimentares preservadas (e.g. camadas onduladas) (Fig. 27C).

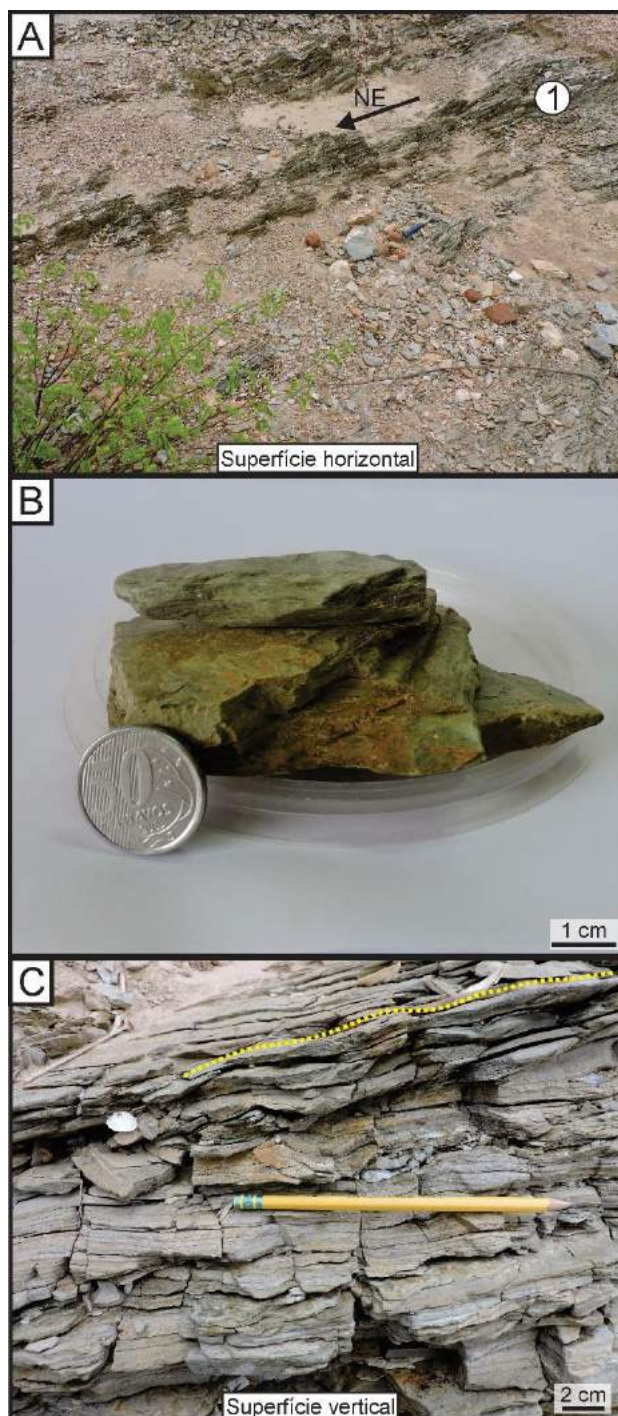


Figura 27: (A) Visão geral do afloramento de ardósia, mostrando foliação de direção NE-SW e mergulho moderado (41°) para NW. 1 – Indicação do local de coleta da amostra LL-28. (B) Detalhe da amostra de ardósia mostrando foliação milimétrica. (C) Camada ondulada, estrutura sedimentar preservada em ardósia.

Ponto 29 (LL-29)

Município: São José do Bonfim-PB

Data: 06/02/2018

Coordenadas UTM, zona 24 sul: 689036 W; 9210687 S

Localização: estrada de terra, a aproximadamente 2 km da PB-276

Amostras coletadas: LL-29A (filito), LL-29B (metariolito/metassedimentar?)

Características aeromagnéticas: alto magnético a sul do Lineamento Patos

Unidade geológica: Complexo Riacho Gravatá

Descrição do afloramento:

Filito (metarritmito) de coloração cinza-esverdeado (Fig. 28A, B). Apresenta-se intercalado com rocha de coloração esbranquiçada, com bandamento milimétrico, na qual é possível observar cristais de feldspato arredondados caulinizados (Fig. 28A, C). O contato entre as duas litologias é concordante com a direção da foliação do filito (80Az/54°/350Az). Esta camada pode representar um metapsamito impuro ou um *sill* metariolítico. As litologias são cortadas por veios de quartzo (Fig. 28D).

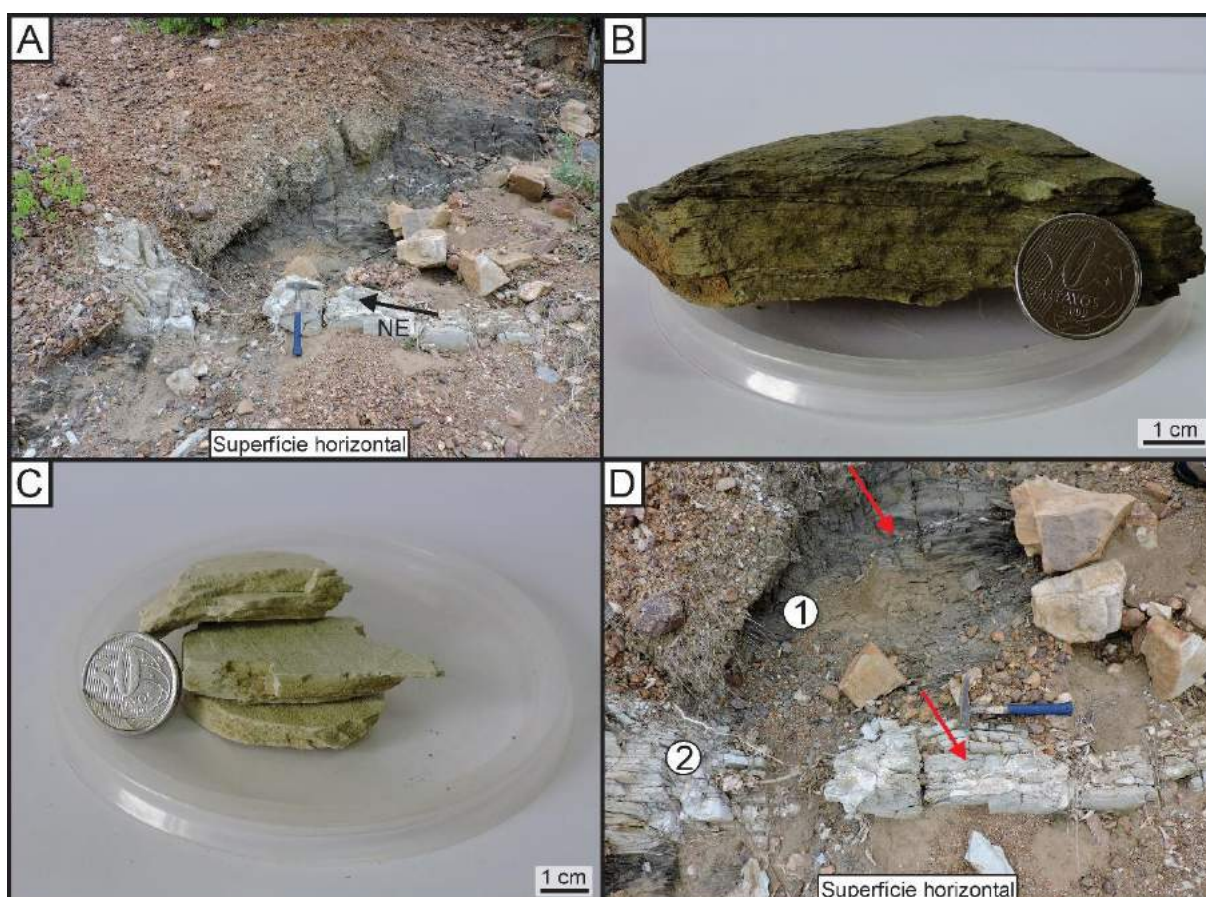


Figura 28: (A) Visão geral do afloramento, mostrando o contato entre filito e a camada esbranquiçada (composta por metariolito ou metapsamito). Observa-se, também, a foliação da rocha de direção NE-SW e mergulho moderado (54°) para NW. (B) Detalhe da amostra de filito mostrando foliação milimétrica. (C) Detalhe da amostra de metapsamito impuro ou *sill* metariolítico, também apresentando foliação milimétrica. (D) Veios de quartzo cortando ambas litologias (vide setas vermelhas). 1 – Indicação do local de coleta da amostra LL-29A. 2 –

Indicação do local de coleta da amostra LL-29B.

Ponto 30 (LL-30)

Município: Itapetim-PE

Data: 07/02/2018

Coordenadas UTM, zona 24 sul: 695153 W; 9193318 S

Localização: estrada de terra, a aproximadamente 3,5 km da BR-110. Nas proximidades da localidade Piedade

Amostras coletadas: LL-30

Características aeromagnéticas: alto magnético ao longo da Zona de Cisalhamento Itapetim

Unidade geológica: Suíte Granítica Cariris Velhos (tipo Recanto)

Descrição do afloramento:

Bloco prolato composto por milonito de granulação fina e coloração cinza-róseo (Fig. 29A, B). Apresenta bandamento milimétrico evidenciado por porções quartzo-feldspáticas descontínuas (Fig. 29C). Nestas porções félsicas, nota-se alto grau de estiramento mineral; no entanto, em raras ocorrências, observa-se grão de feldspato potássico em formato de *augen* (~2 mm). Magnetita representa o mineral opaco mais abundante. Estruturalmente, o milonito apresenta foliação verticalizada, na direção NE.

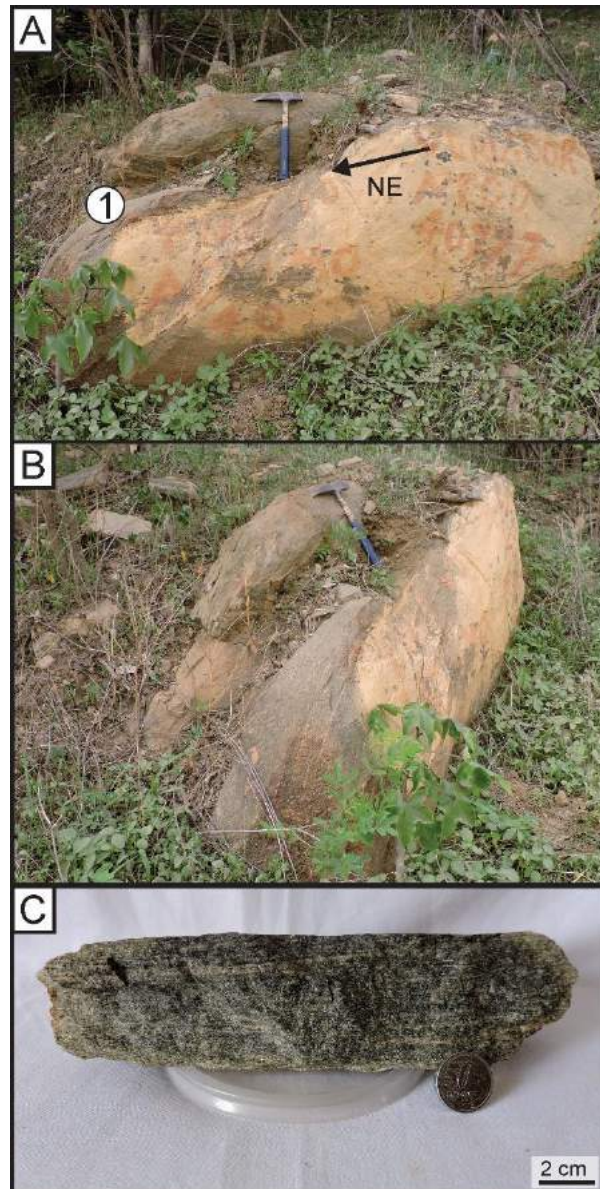


Figura 28: Visão geral do afloramento de milonito, em que é possível notar a geometria prolata do bloco. Em (A) vista lateral e, em (B) vista frontal. Observa-se, também, a foliação da rocha de direção NE-SW e mergulho verticalizado. 1 – Indicação do local de coleta da amostra LL-30. (C) Detalhe da amostra de milonito, em que é possível notar o elevado grau de estiramento das camadas compostas por quartzo e feldspato.

Ponto 31 (LL-31) – Ponto de controle

Município: Itapetim-PE

Data: 07/02/2018

Coordenadas UTM, zona 24 sul: 695986 W; 9192939 S

Localização: estrada de terra, a aproximadamente 4,6 km da BR-110, nas proximidades do Povoado de Piedade

Amostras coletadas: não houve

Características aeromagnéticas: alto magnético ao longo da Zona de Cisalhamento Itapetim

Unidade geológica: Batólito Teixeira

Descrição do afloramento:

Granito do tipo Teixeira.

Ponto 32 (LL-32) – Ponto de controle

Município: Itapetim-PE

Data: 07/02/2018

Coordenadas UTM, zona 24 sul: 696492 W; 9191846 S

Localização: estrada de terra, a aproximadamente 6,3 km da BR-110

Amostras coletadas: LL-32

Características aeromagnéticas: valores de magnetismo intermediário ao longo da Zona de Cisalhamento Itapetim

Unidade geológica: Suíte Granítica Cariris Velhos (tipo Riacho do Forno)

Descrição do afloramento:

Blocos de superfície arredondada, compostos por biotita metagranito, equigranular, de granulação média (Fig. 29A). A rocha apresenta bandamento incipiente, formado por alinhamento de cristais de biotita. Magnetita apresenta-se como o óxido mais abundante e é observada próxima às porções ricas em biotita (Fig. 29B). Localmente, são observadas evidências de intemperismo, como porções friáveis e formação de argila na superfície da rocha (Fig. 29C).

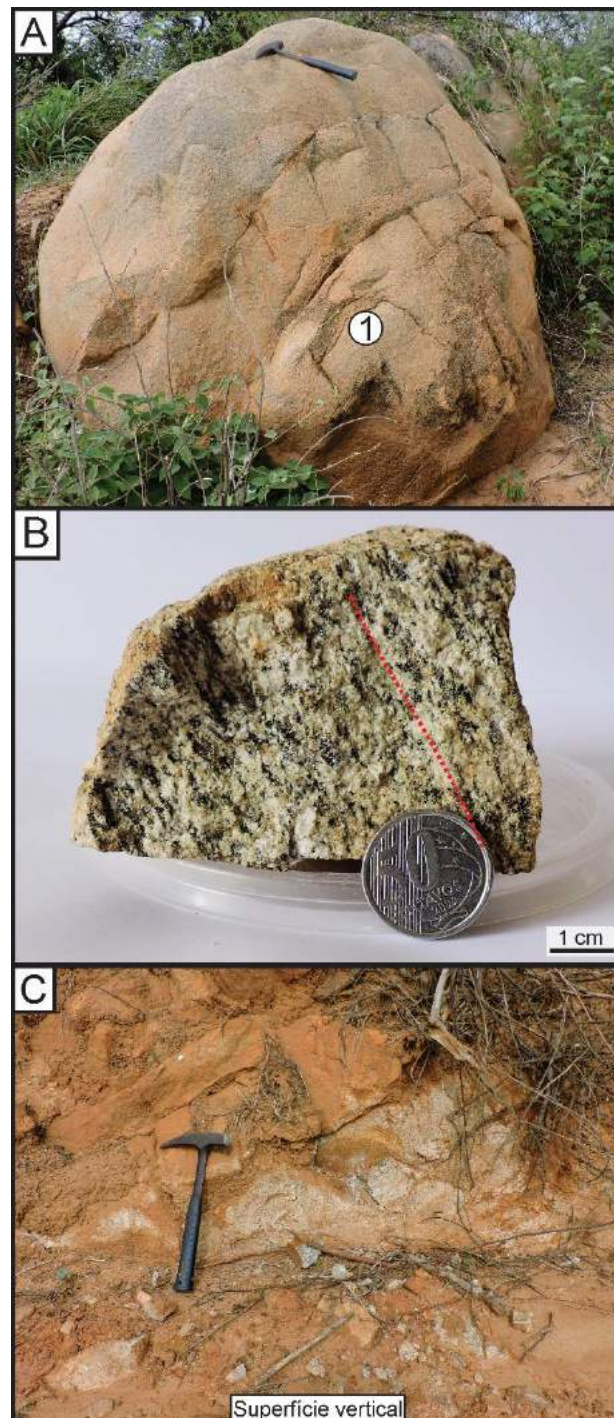


Figura 29: (A) Visão geral do afloramento de metagranito, em que é possível observar a geometria arredonda do bloco. 1 – Indicação do local de coleta da amostra LL-32. (B) Detalhe da amostra de metagranito, onde é observado um bandamento incipiente representado por alinhamento de cristais de biotita (vide a direção da linha pontilhada). (C) Metagranito muito intemperizado, evidenciado pela formação de argila branca na superfície.

Ponto 33 (LL-33)

Município: Itapetim-PE

Data: 07/02/2018

Coordenadas UTM, zona 24 sul: 696282 W; 9191315 S

Localização: estrada de terra, a aproximadamente 7 km da BR-110.

Amostras coletadas: LL-33

Características aeromagnéticas: alto magnético localizado a sul da Zona de Cisalhamento Itapetim

Unidade geológica: Suíte Granítica Cariris Velhos (tipo Riacho do Forno)

Descrição do afloramento:

Bloco de superfície arredondada composto por migmatito mostrando textura estromática (Fig. 30A), formada por paleossoma de composição granítica, leucocrática (similar à litologia descrita no ponto LL-32) (Fig. 30B), e neossoma quartzo-feldspático contendo cristais de magnetita por vezes euédricos, que atingem até ~2 cm (Fig. 30C). O paleossoma também apresenta magnetita, no entanto, em proporções menores quando comparado ao neossoma. Estruturalmente, observa-se que as porções félsicas encontra-se alinhadas segundo à direção NW-SE. Observa-se, à frente do afloramento, uma planície vegetada e rio meandrante.

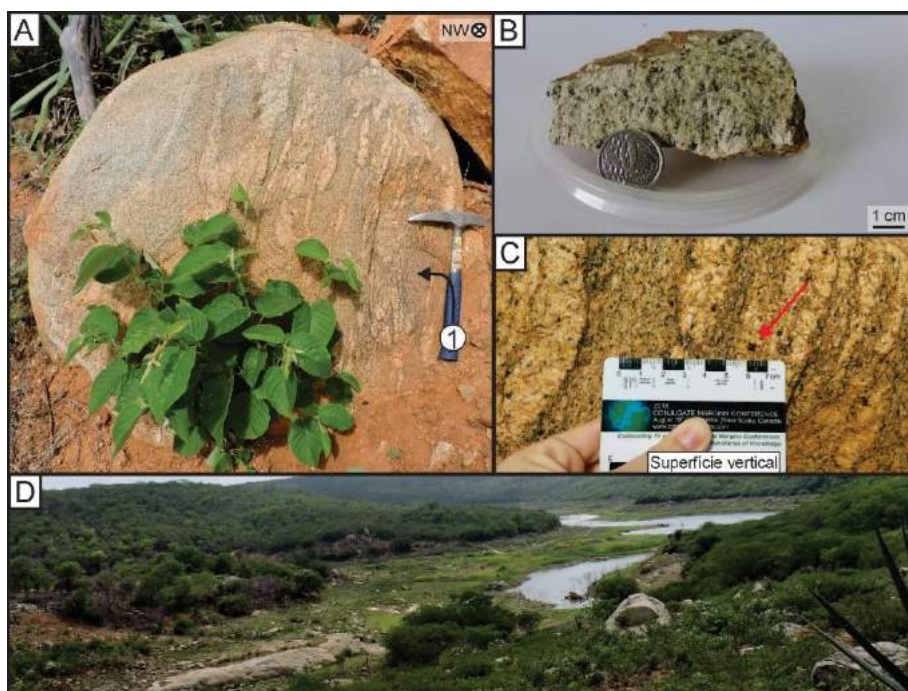


Figura 30: (A) Visão geral do afloramento de migmatito, em que é possível observar neossoma de textura estromática alinhado segundo à direção NW-SE. 1 – Indicação do local de coleta da amostra LL-33. (B) Detalhe do paleossoma leucocrático, de composição granítica. (C) Cristal de magnetita euédrico em paleossoma quartzo-feldspático. (D) Paisagem observada do ponto LL-33, caracterizada por planície e rio meandrante.

Ponto 34 (LL-34)

Município: Itapetim-PE

Data: 07/02/2018

Coordenadas UTM, zona 24 sul: 693684 W; 9193381 S

Localização: estrada de terra, a aproximadamente 1,8 km da BR-110, nas proximidades da localidade Piedade

Amostras coletadas: LL-34

Características aeromagnéticas: alto magnético ao longo da Zona de Cisalhamento Itapetim.

Unidade geológica: Suíte Granítica Cariris Velhos (tipo Recanto)

Descrição do afloramento:

Blocos de milonito (Fig. 30A) com bandamento milimétrico bem desenvolvido, apresentando intercalação de porções máficas e félsicas (quartzo-feldspáticas). Na parte félsica, os minerais se encontram quase totalmente estirados, porém ainda são observados cristais de feldspato potássico e quartzo em forma de *augen* (tipo delta) (Fig. 30B). A foliação é verticalizada e tem direção 70 Az (Fig. 30C). Magnetita representa o mineral opaco mais abundante.

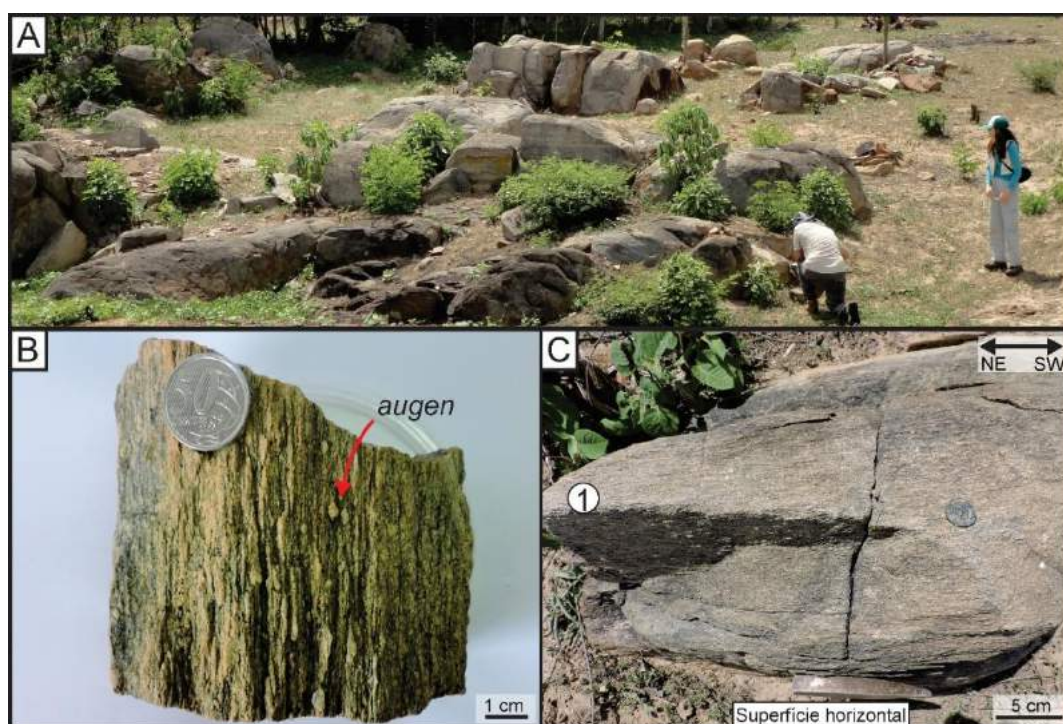


Figura 30: (A) Visão geral do afloramento de milonito. (B) Detalhe da amostra de milonito em que é possível notar o alto grau de estiramento de quartzo e feldspato potássico, além de *augens* milimétricos formados por quartzo. (C) Bloco de milonito mostrando foliação de direção NE e mergulho verticalizado. 1 – Indicação do local de coleta da amostra LL-34.

Ponto 35 (LL-35)

Município: Brejinho-PE

Data: 07/02/2018

Coordenadas UTM, zona 24 sul: 690172 W; 9190539 S

Localização: estrada de terra, a aproximadamente 800 m da BR-110

Amostras coletadas: não houve

Características aerogeofísicas: baixo magnético próximo à área de influência da Zona de Cisalhamento Itapetim.

Unidade geológica: Suíte Granítica Cariris Velhos (tipo Recanto)

Descrição do afloramento:

Ortognaisse apresentando bandamento centimétrico de minerais máficos (~7 cm). Estruturalmente, observa-se foliação de alto ângulo na direção NE-SW, mergulhando para NW (55Az/60°/325Az; 50Az/65°/320Az).

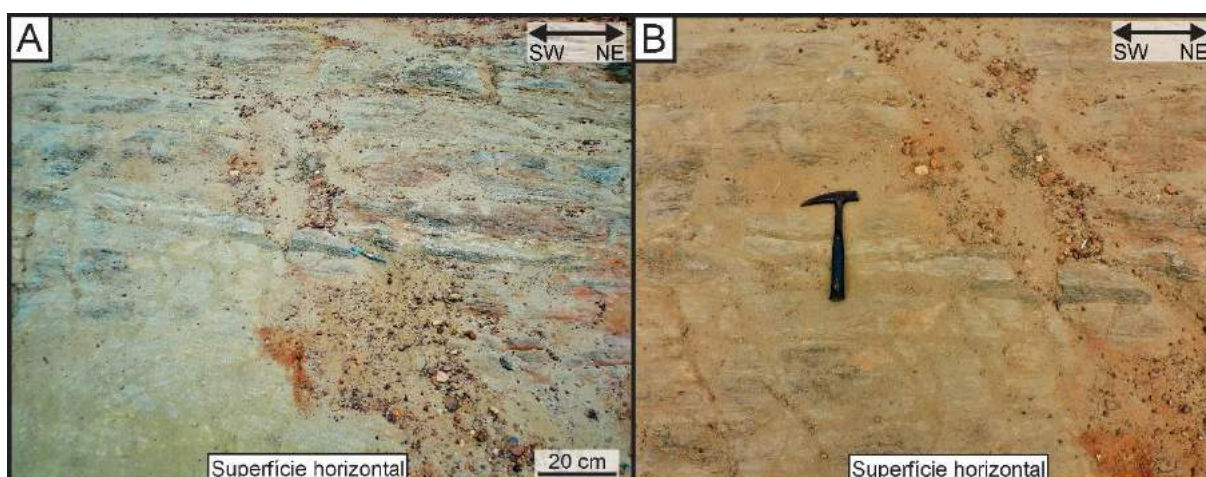


Figura 31: Tem-se em (A) e (B), visão geral do afloramento de ortognaisse bandado.

Ponto 36 (LL-36) – Ponto de controle

Município: Brejinho-PE

Data: 07/02/2018

Coordenadas UTM, zona 24 sul: 687827 W; 9190546 S

Localização: estrada de terra, a aproximadamente 3,2 km da BR-110

Amostras coletadas: não houve

Características aerogeofísicas: alto magnético ao longo da Zona de Cisalhamento Itapetim.

Unidade geológica: Suíte Granítica Cariris Velhos (tipo Recanto)

Descrição do afloramento:

Ortognaïsse similar ao descrito anteriormente no ponto LL-35.

Ponto 37 (LL-37) – Ponto de controle

Município: Brejinho-PE

Data: 07/02/2018

Coordenadas UTM, zona 24 sul: 687228 W; 9190685 S

Localização: estrada de terra, a aproximadamente 4 km da BR-110

Amostras coletadas: não houve

Características aerogeofísicas: valores de magnetismo intermediário ao longo da Zona de Cisalhamento Itapetim

Unidade geológica: Suíte Granítica Cariris Velhos (tipo Recanto)

Descrição do afloramento:

Ortognaïsse similar ao descrito anteriormente no ponto LL-35.

Ponto 38 (LL-38) – Ponto de controle

Município: Brejinho-PE

Data: 07/02/2018

Coordenadas UTM, zona 24 sul: 687046 W; 9192545 S

Localização: estrada de terra, a aproximadamente 6 km da BR-110

Amostras coletadas: LL-38

Características aerogeofísicas: baixo magnético a norte da Zona de Cisalhamento Itapetim

Descrição do afloramento:

Solo argilo-arenoso de coloração marrom (Fig. 32A, B).

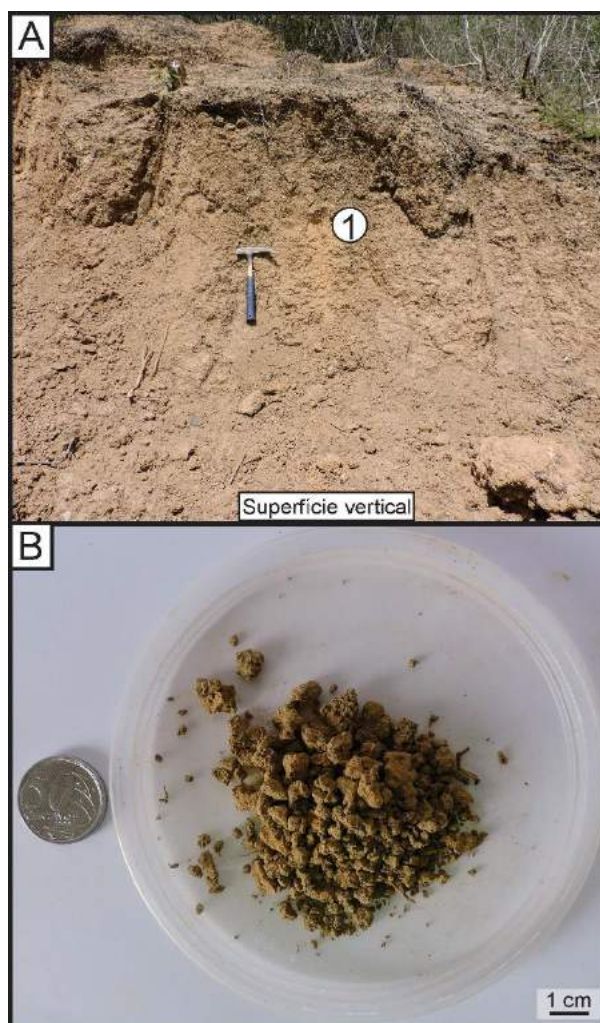


Figura 32: (A) Visão geral do ponto LL-38. 1 – Indicação do local de coleta da amostra de solo LL-38. (B) Detalhe de amostra de solo argilo-arenoso.

Ponto 39 (LL-39) – Ponto de controle

Município: Brejinho-PE

Data: 07/02/2018

Coordenadas UTM, zona 24 sul: 686954 W; 9193292 S

Localização: estrada de terra, a aproximadamente 6,7 km da BR-110

Amostras coletadas: LL-39 (solo)

Características aerogeofísicas: valores magnéticos intermediários, associados à porção norte da Zona de Cisalhamento Itapetim

Unidade geológica: Granitos neoproterozoicos

Descrição do afloramento:

Bloco de granito, de superfície arredondada, cortado por veios de quartzo (Fig. 33A). No entorno do afloramento, observa-se solo esbranquiçado e arenoso, composto, essencialmente, por quartzo, além de feldspato e magnetita (Fig. 33B, C).

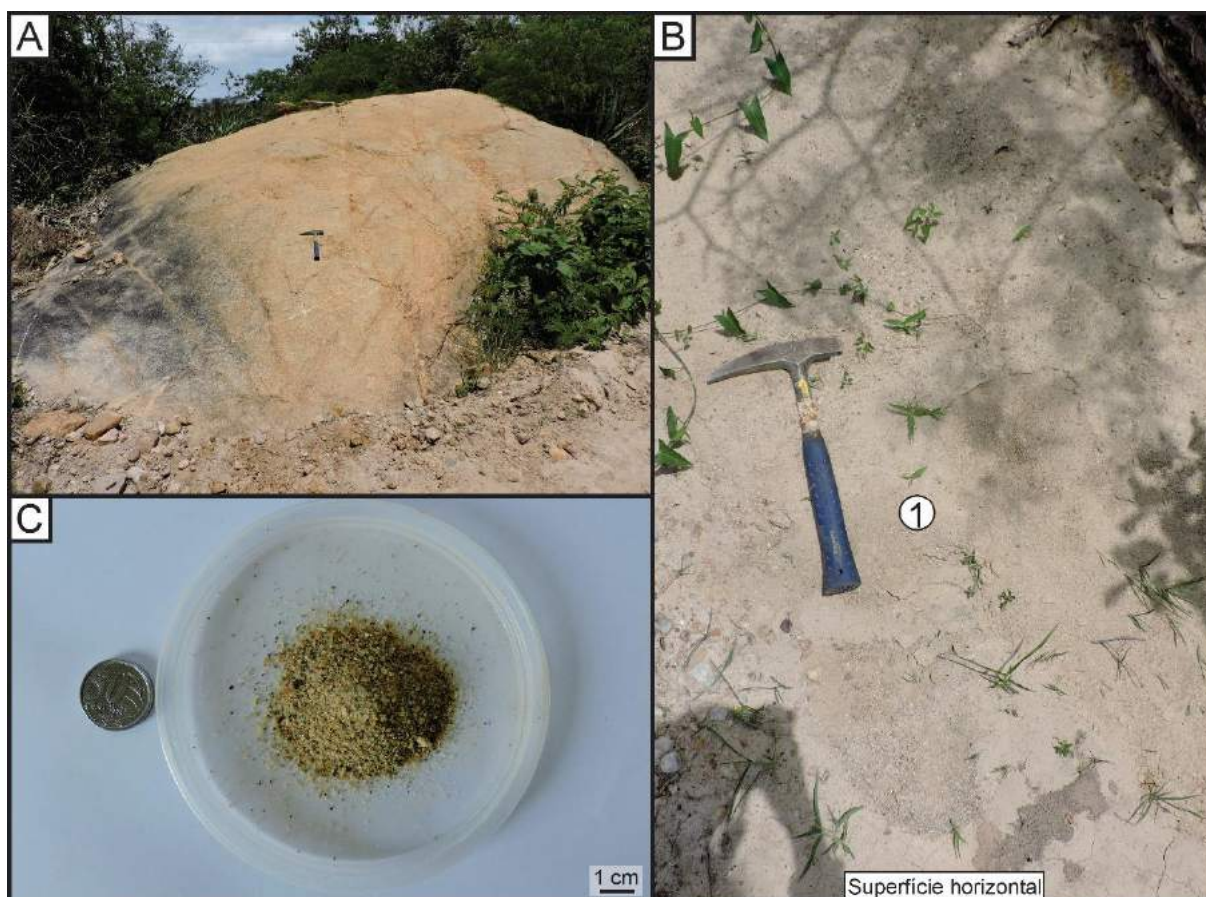


Figura 33: (A) Visão geral do afloramento de granito em que é possível notar a superfície arredondada, além dos veios de quartzo que o cortam. (B) Solo esbranquiçado arenoso. 1 – Indicação do local de coleta da amostra de solo LL-39. (C) Detalhe da amostra de solo arenoso, composto por quartzo, feldspato e magnetita.

Ponto 40 (LL-40)

Município: Maturéia-PB

Data: 07/02/2018

Coordenadas UTM, zona 24 sul: 685955 W; 9194276 S

Localização: estrada de terra, a aproximadamente 1,8 km da PB-306.

Amostras coletadas: LL-40

Relevo: morro

Características aerogeofísicas: baixo magnético a sul do Batólito Teixeira

Unidade geológica: Granitos neoproterozoicos

Descrição do afloramento:

Morro composto por biotita granito de granulação média, equigranular, leucocrático (Fig. 34A, B, C). Contém magnetita (em menor proporção que as observadas em pontos anteriores). Observa-se a formação de estruturas erosivas tipo panela (derivadas de erosão diferencial). A rocha apresenta raros enclaves máficos (~10 cm de comprimento) (Fig. 34D) e

é cortada por zona de cisalhamento de largura centimétrica (~ 30 cm) e direção 130Az, que desenvolve textura milonítica em seus limites (Fig. 34C).

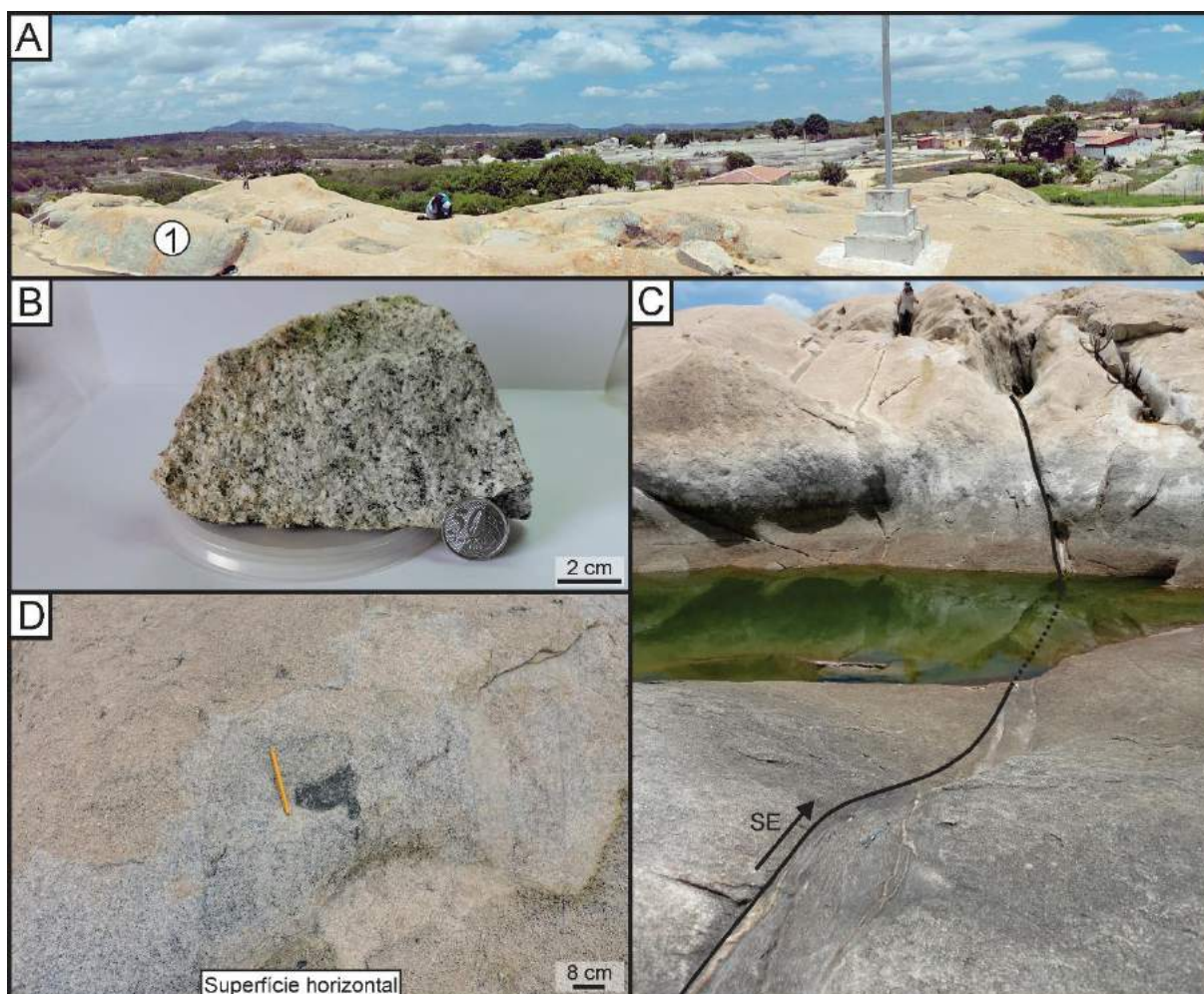


Figura 34: (A) Visão geral do afloramento de biotita granito. Ao fundo, observa-se o Batólito Teixeira. 1 – Indicação do local de coleta da amostra LL-40. (B) Detalhe da amostra do biotita granito. (C) Zona de cisalhamento de largura centimétrica de direção SE. (D) Enclave máfico centimétrico em meio a matriz granítica.

Quanto à cinemática da zona de cisalhamento, cristais de feldspato potássico tipo sigma e fragmentos de veio de quartzo, com formato sigmoidal, indicam cinemática sinistral (Fig. 35A). Também foram observadas, em menor frequência, estruturas tipo *tension gashes* indicando movimento dextral (Fig. 35B).

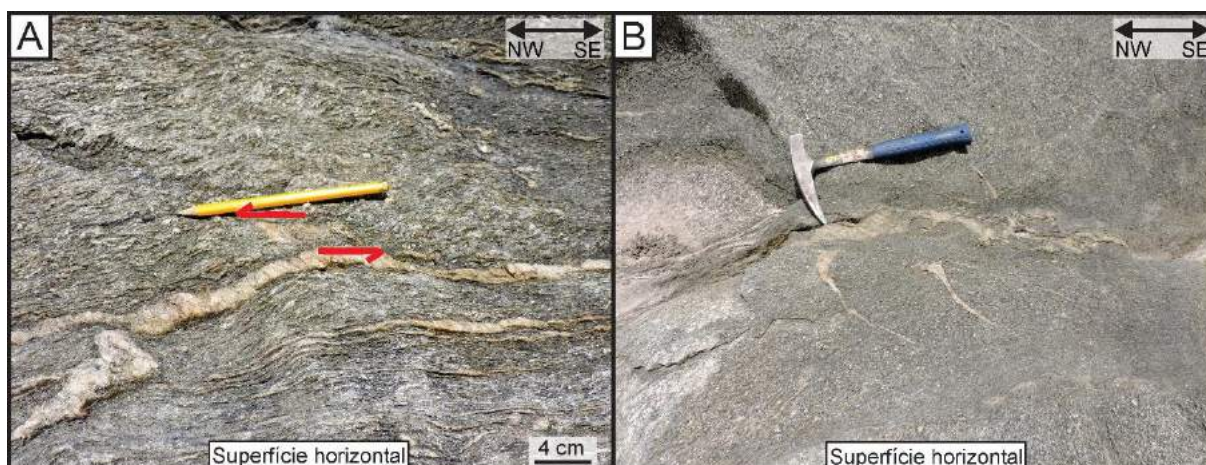


Figura 35: (A) Fragmento de veio de quartzo com formato sigmoidal indicando cinemática sinistral. (B) *Tension gashes* indicando cinemática dextral.

Ponto 41 (LL-41)

Município: Imaculada-PB

Data: 07/02/2018

Coordenadas UTM, zona 24 sul: 671086 W; 9189745 S

Localização: estrada de terra, a aproximadamente 1,8 km da PB-306.

Amostras coletadas: LL-41

Características aerogeofísicas: alto magnético a sul do Domínio Jabre–Batólito Teixeira

Descrição do afloramento:

Dique riolítico com cerca de 30 m de extensão, disposto na direção 115Az. Apresenta matriz afanítica de coloração cinza esbranquiçada, com fenocristais milimétricos de quartzo, feldspato potássico e biotita.

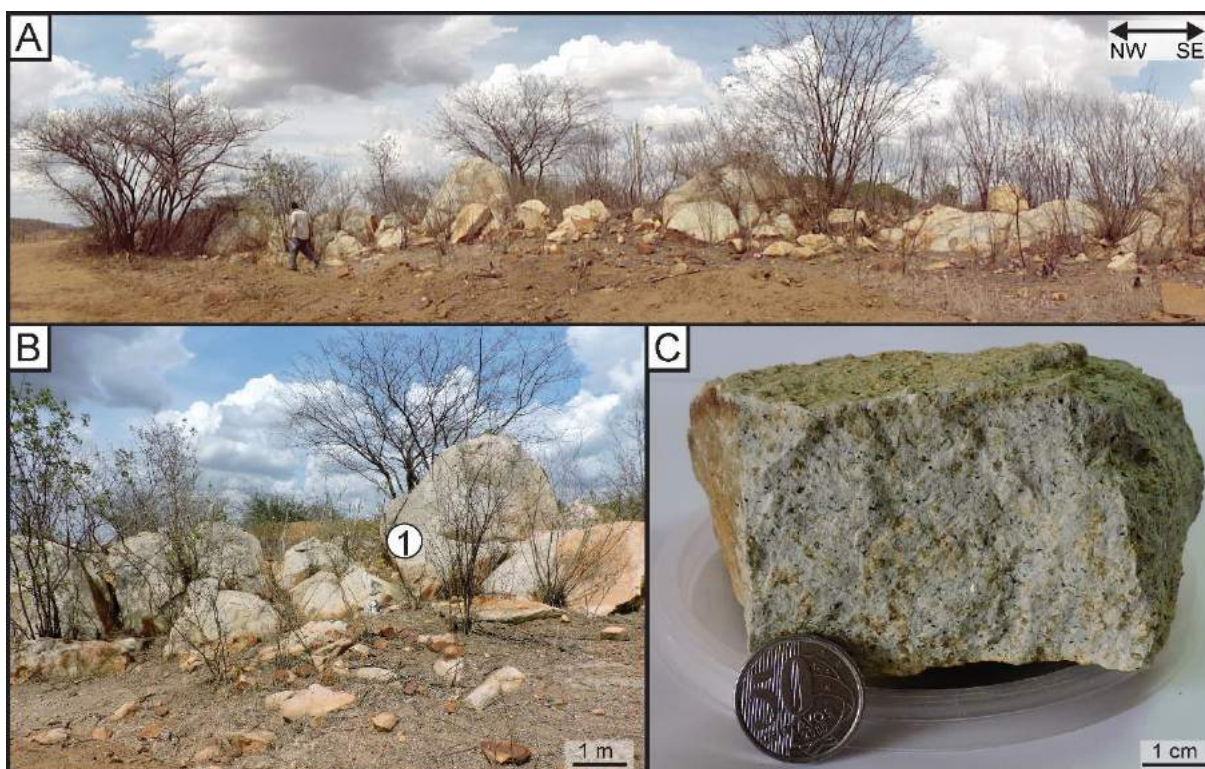


Figura 36: (A) Visão geral de dique riolítico disposto na direção NW-SE. (2) Blocos de riolito com formato arredondado. 1 – Indicação do local de coleta da amostra LL-41. (C) Detalhe da amostra de riolito, em que é possível observar fenocristais em matriz afanítica cinza esbranquiçada.

Ponto 42 (LL-42)

Município: Imaculada-PB

Data: 07/02/2018

Coordenadas UTM, zona 24 sul: 671081 W; 9189745 S

Localização: estrada de terra, a aproximadamente 1,8 km da PB-306.

Amostras coletadas: LL-42A, LL-42B, LL-42C (amostras de rocha)

Características aerogeofísicas: alto magnético a SW do Domínio Mãe D'Água–Batólito Teixeira

Descrição do afloramento:

Rocha migmatizada, em que é possível fazer distinção entre paleossoma, neossoma e uma porção intermediária entre estes extremos (Fig. 37A). O paleossoma se trata de uma rocha melanocrática, rica em mineral máfico acicular (piroxênio?) e granada de coloração marrom (compondo mais 90% em volume de rocha) (Fig. 37B). Os cristais de granada chegam a atingir 1 cm de diâmetro e apresentam coronas milimétricas de coloração um pouco mais clara (Fig. 37C). A porção intermediária (ou mesossoma) compõe a fração mais abundante dentre as três observadas no afloramento, onde foram identificados granada-biotita xisto e granada-biotita-

muscovita xisto.



Figura 37: (A) Visão geral do afloramento de migmatito, em que é possível identificar as três porções distintas: paleossoma (indicado por linha pontilhada amarela), neossoma (indicado por setas) e mesossoma, constituindo a maior parte do afloramento. 1 – Indicação do local de coleta da amostra LL-42A. 2 – Indicação do local de coleta da amostra LL-42B. (B) Detalhe do paleossoma, onde se observa a alta porcentagem de granada. (C) Detalhe de cristais de granada no paleossoma, exibindo coronas.

O neossoma é composto, basicamente, por quartzo, e apresenta dobras ptigmáticas (Fig. 38A,B). A foliação geral do afloramento tem direção NNW-SSE e mergulho verticalizado (Fig. 38C). São observadas estruturas características de áreas que sofreram alto grau de deformação, como dobras em bainha (Fig. 38D).

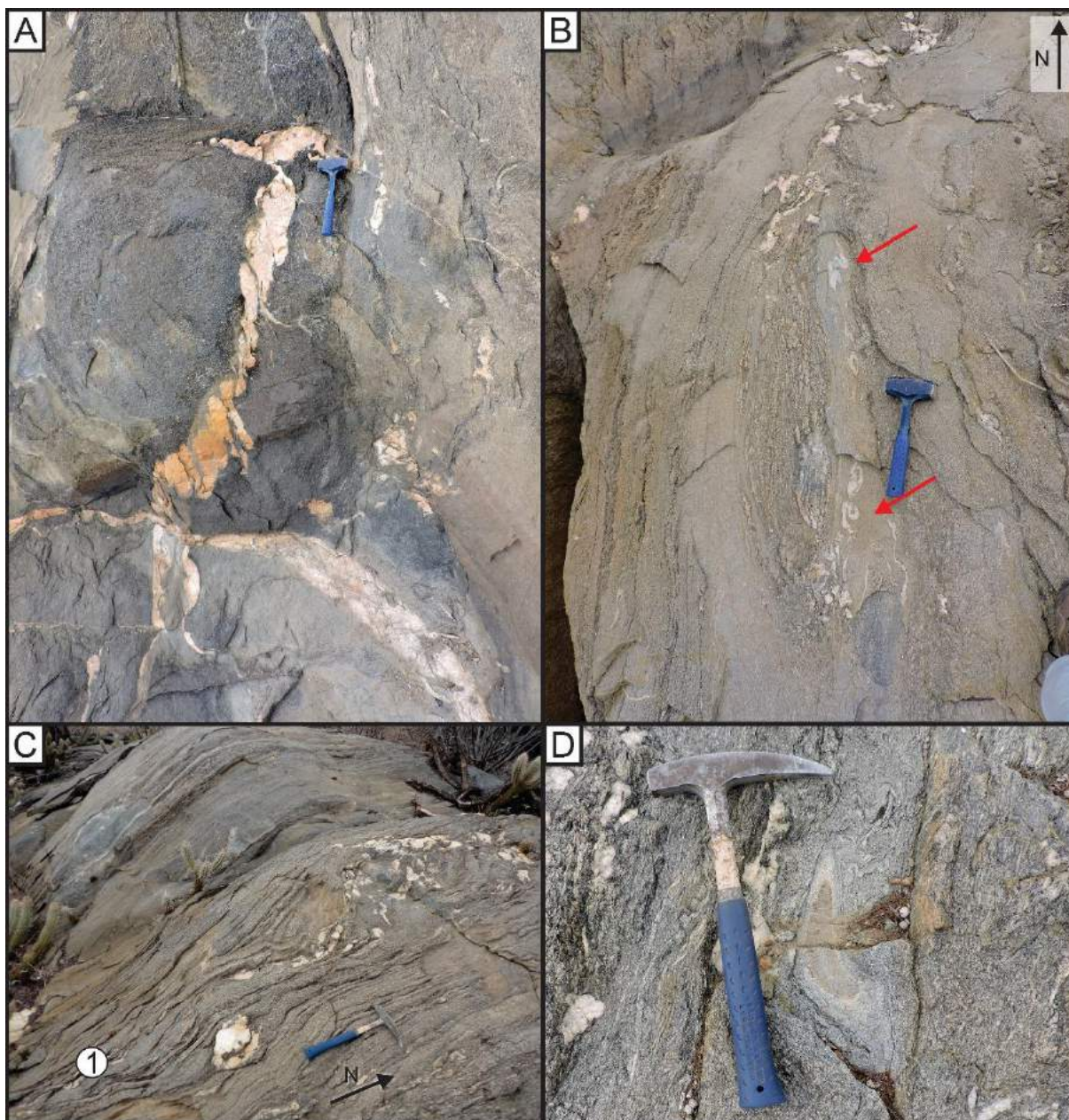


Figura 38: (A) e (B) Detalhe de dobras ptigmáticas observadas no neossoma do migmatito. (C) Foliação verticalizada, disposta na direção norte. 1 – Indicação do local de coleta da amostra LL-42C. (D) Dobra em bainha.

Ponto 43 (LL-43)

Município: Imaculada-PB

Data: 09/05/2018

Coordenadas UTM, zona 24 sul: 674313 W; 9189160 S

Localização: ao longo da PB-306

Amostras coletadas: LL-43A1, LL-43A2, LL-43A3, LL-43A4, LL-43A5, LL-43A6, LL-43A7, LL-43A8, LL-43A9, LL-43B (amostras de rocha)

Características aeromagnéticas: valores de magnetismo intermediário a leste da Zona de

Cisalhamento Itapetim

Unidade geológica: Suíte Granítica Cariris Velhos (tipo Riacho do Forno)

Descrição do afloramento:

Neste ponto, foi observado o *shaft* (desativado) do garimpo Santo Aleixo (Fig. 39A). Dentre as amostras de rejeito coletadas (Tabela 1 - em anexo) (Fig. 39B), se encontram: fragmentos de veios de quartzo apresentando textura sacaroidal ou maciça, de coloração branca a alaranjada (variando com o grau de alteração de óxidos de ferro nas amostras) e espessura entre 3 mm e 8 cm (Fig. 40A, B, C). Em contato com os veios, são observados biotita xisto, por vezes, apresentando magnetismo fraco e porções que se assemelham a misturas entre xisto e veio de quartzo, aqui denominadas de intermediárias (Fig. 40 B).

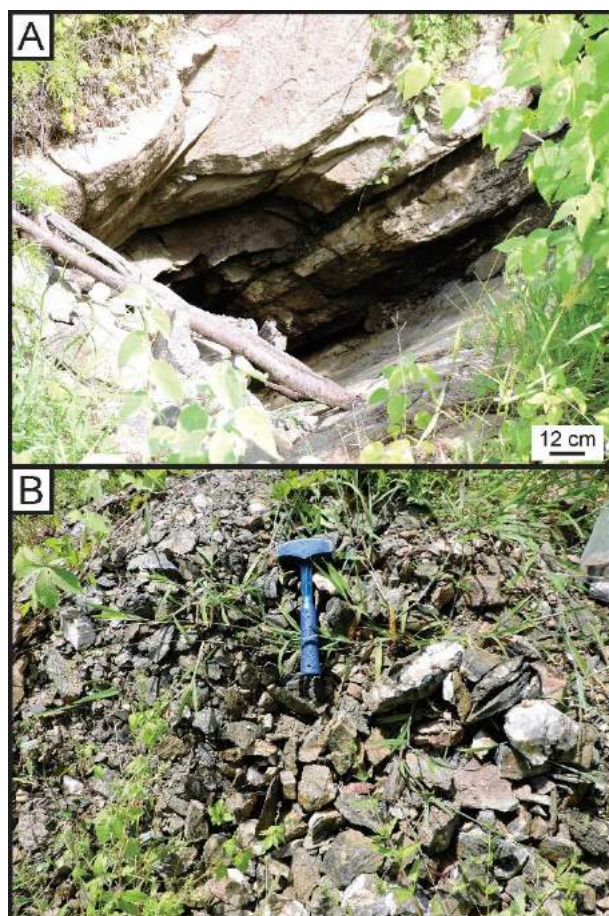


Figura 39: (A) Visão geral do *shaft* do garimpo (desativado) Santo Aleixo. (B) Pilha de rejeito de minério em que foram coletadas amostras para estudo posterior.

A rocha encaixante do veio mineralizado – observada *in situ* – é representada por milonito

composto por cristais de feldspato potássico e quartzo, bastante estirados, atingindo até 4 cm de comprimento. Apresenta foliação com mergulho verticalizado, disposta na direção 71Az (Fig. 40 D, E).

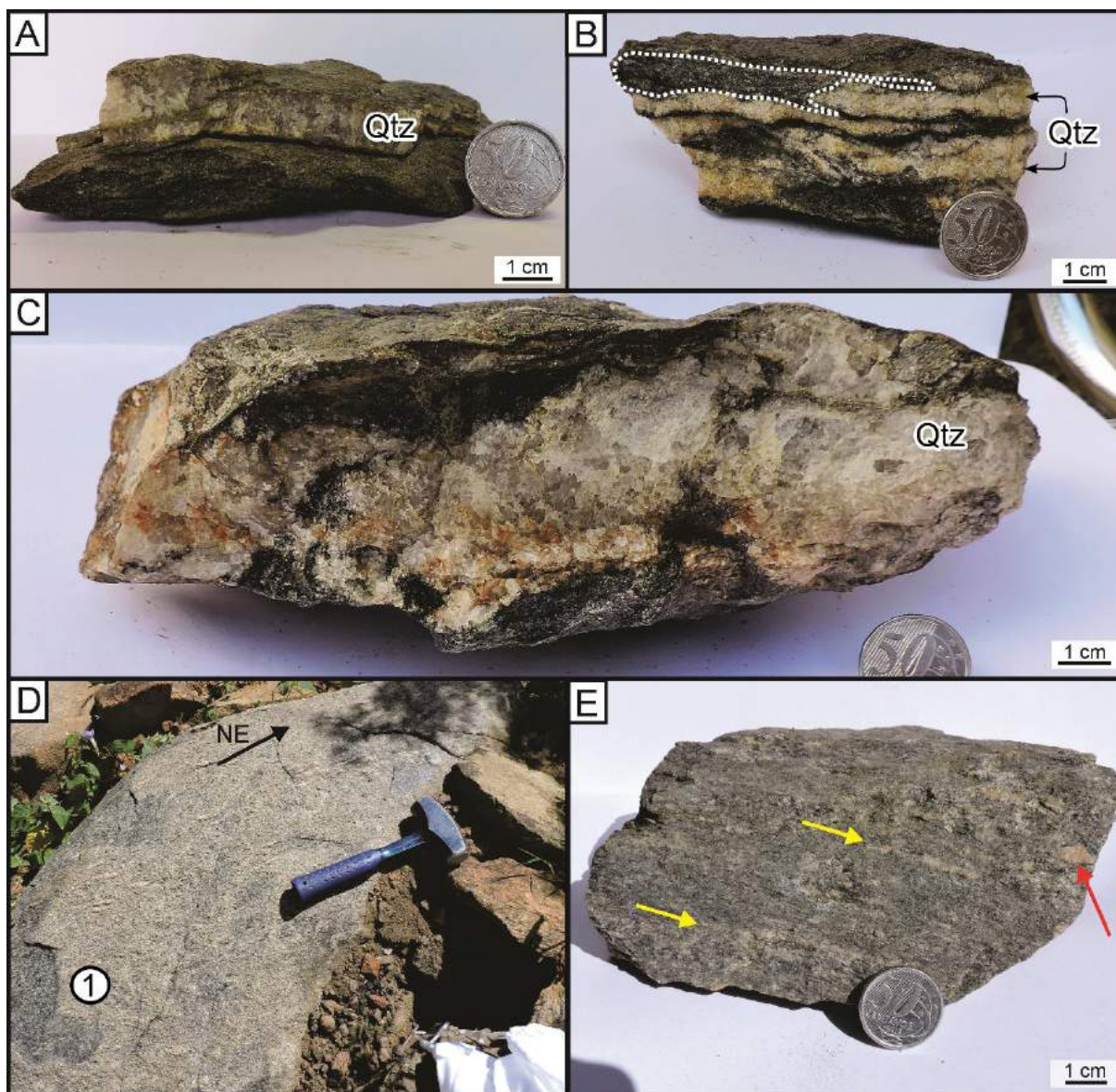


Figura 40: (A) Veio de quartzo com textura sacaroidal (com 1,5 cm de espessura) em contato com biotita xisto (amostra LL-43A5). (B) Amostra apresentando veios de quartzo com textura sacaroidal em contato com biotita xisto e porção intermediária entre quartzo e biotita xisto (indicado por linha tracejada) (amostra LL-43A4). (C) Amostra de veio de quartzo com textura sacaroidal em contato com biotita xisto (amostra LL-43A9). (D) Visão geral do afloramento de milonito, que representa a rocha encaixante do veio mineralizado, em que é possível observar a foliação verticalizada, disposta na direção 71 Az. 1 – Indicação do local de coleta da amostra LL-43B. (E) Amostra do milonito encaixante, onde nota-se a presença de camadas quartzo-feldspáticas milimétricas (vide setas amarelas), além de *augen* composto por feldspato potássico (vide seta vermelha).

Ponto 44 (LL-44)

Município: Catingueira-PB

Data: 09/05/2018

Coordenadas UTM, zona 24 sul: 655701 W; 9211017 S

Localização: estrada de terra, a aproximadamente 2,2 km da BR-361

Amostras coletadas: LL-44

Características aeromagnéticas: alto magnético ao longo do Lineamento Patos

Unidade geológica: Formação Santana dos Garrotes

Descrição do afloramento:

Filito (metaritmuito) de coloração marrom-claro a cinza-claro, apresentando camadas milimétricas (~1mm) dispostas na direção NW-SE. As camadas encontram-se basculadas com ângulo de mergulho de variando entre 70° e 80° para a direção NE.

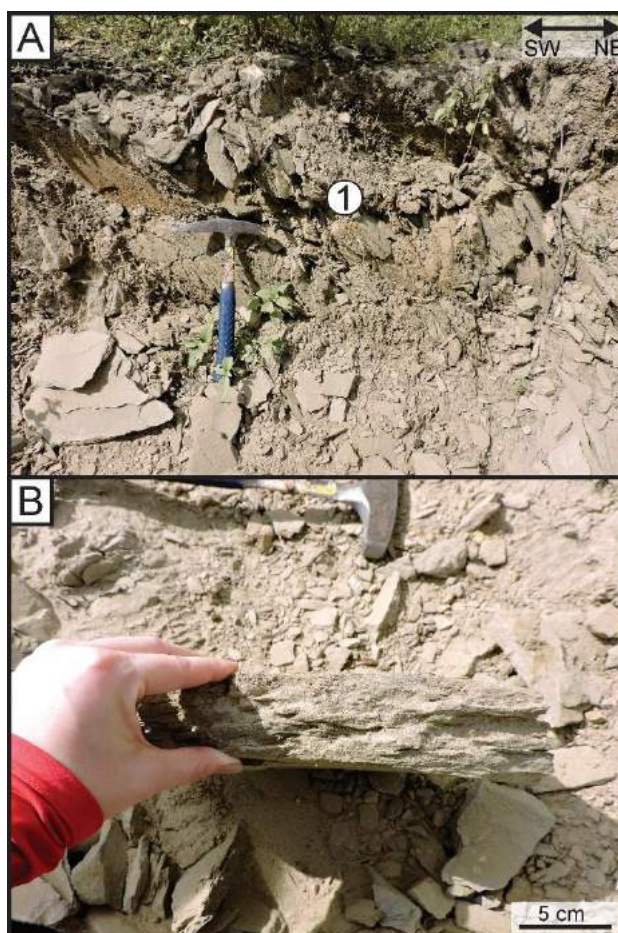


Figura 41: (A) Visão geral do afloramento, mostrando o intenso basculamento das camadas de filito (mergulho para NE). 1 – Indicação do local de coleta da amostra LL-44. (B) Detalhe da amostra de filito mostrando foliação milimétrica.

Ponto 45 (LL-45)

Município: Catingueira-PB

Data: 09/05/2018

Coordenadas UTM, zona 24 sul: 656298 W; 9209443 S

Localização: estrada de terra, a aproximadamente 3,7 km da BR-361

Amostras coletadas: LL-45

Características aeromagnéticas: alto magnético ao longo do Lineamento Patos

Unidade geológica: Formação Santana dos Garrotes

Descrição do afloramento:

Filito (metaritmito) de coloração marrom-claro a cinza-claro, apresentando camadas milimétricas ($\sim 1\text{mm}$) dispostas na direção 95 Az. As camadas encontram-se basculadas com ângulo de mergulho de aproximadamente 55° para a direção SW.

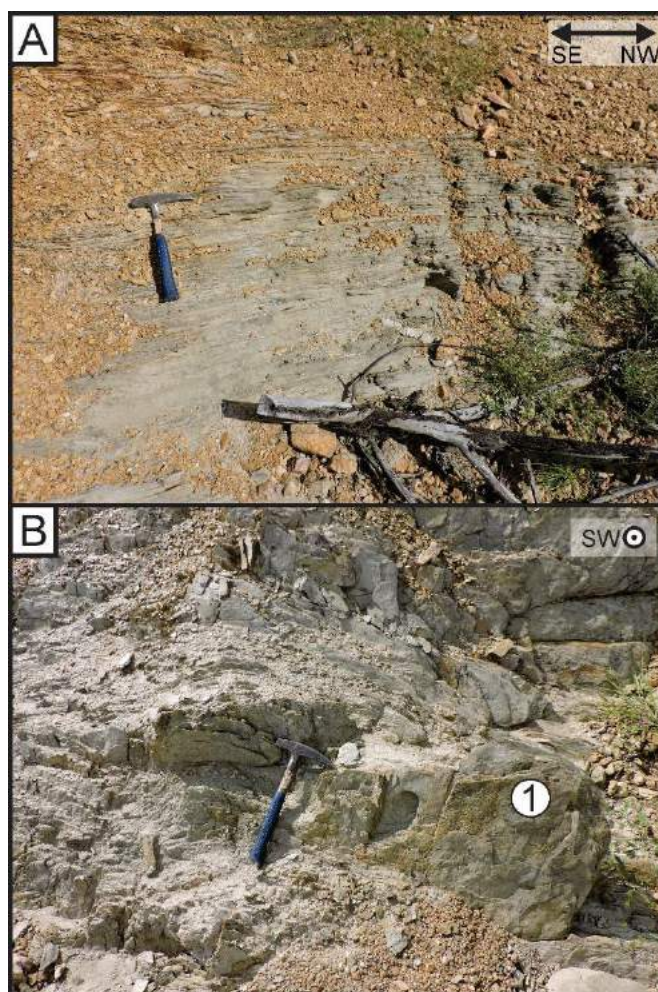


Figura 42: (A) Visão geral do afloramento em que é possível observar a disposição das camadas de filito na direção NW-SE. (B) Detalhe em que é possível observar o grau de basculamento da rocha ($55^\circ/\text{SW}$). 1 – Indicação do local de coleta da amostra LL-45.

Ponto 46 (LL-46)

Município: Itapetim-PE

Data: 09/05/2018

Coordenadas UTM, zona 24 sul: 694833 W; 9183577 S

Localização: ao longo da PE-263

Amostras coletadas: LL-46A (enclave máfico), LL-46B (granito)

Características aeromagnéticas: baixo magnético a SE da Zona de Cisalhamento Itapetim

Unidade geológica: Plúton Brejinho

Descrição do afloramento:

Blocos de granito, com superfície arredondada, que alcançam 4 m de altura (Fig. 43A). Os blocos são compostos por granito mesocrático, porfirítico, com matriz de granulação média (Fig. 43B). Os fenocristais são constituídos por feldspato potássico (Fig. 43B), os quais encontram-se, por vezes, euédricos e zonados. Os principais minerais máficos da matriz são biotita e anfibólio.

Também são observados, imersos na matriz granítica, enclaves máficos (dioríticos?) alongados, cujas dimensões alcançam 30 cm de comprimento. Falhas tardias, com rejeito de aproximadamente 25 cm, afetam o afloramento (Fig. 43A).

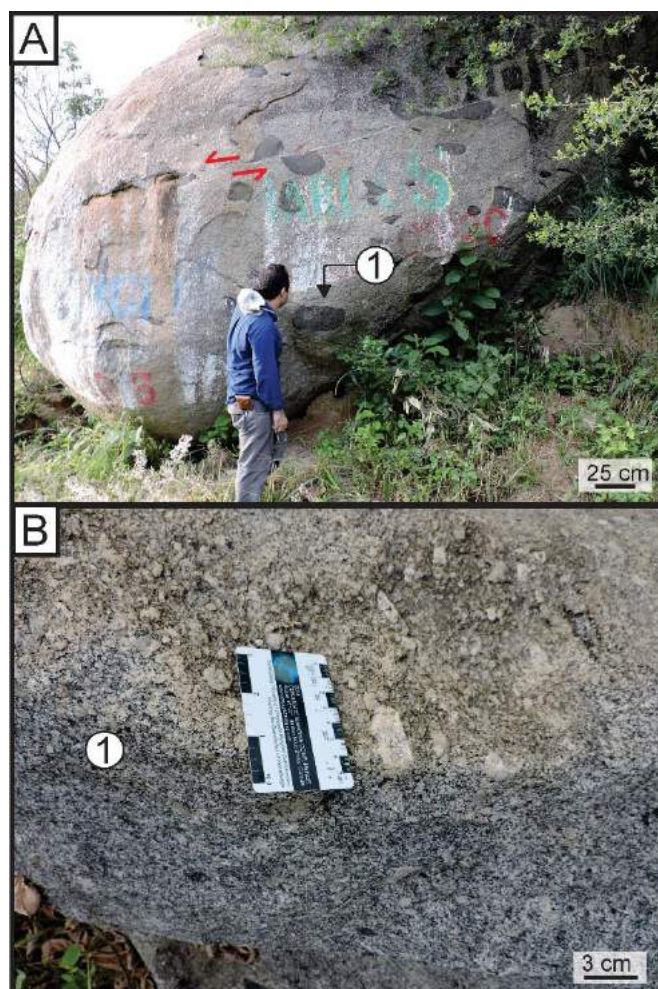


Figura 43: (A) Visão geral do afloramento, em que é possível observar a superfície arredondada do bloco de granito, além da presença de enclaves máficos que alcançam aproximadamente 30 cm de comprimento. Nota-se, também, uma falha com rejeito de 25 cm. 1 – Indicação do local de coleta da amostra LL-46A. (B) Detalhe de fenocristal euédrico de feldspato potássico (apresentando ~ 4 cm de comprimento). 1 – Indicação do local de coleta da amostra LL-46B.

Ponto 47 (LL-47)

Município: Brejinho-PE

Data: 10/05/2018

Coordenadas UTM, zona 24 sul: 690451 W; 9190492 S

Localização: estrada de terra, a aproximadamente 1 km da BR-110

Amostras coletadas: LL-47A1, LL-47A2, LL-47A3, LL-47A4, LL-47A5, LL-47A6, LL-47A7, LL-47A8, LL-47A9, LL-47B1, LL-47B2, LL-47B3, LL-47B4, LL-47B5, LL-47B6, LL-47B7, LL-47B8, LL-47B9, LL-47C1, LL-47C2, LL-47C3, LL-47C4, LL-47C5, LL-47D1, LL-47D2, LL-47D3 (amostras de rocha)

Características aeromagnéticas: alto magnético ao longo da Zona de Cisalhamento Itapetim

Unidade geológica: Suíte Granítica Cariris Velhos (tipo Recanto)

Descrição do afloramento:

Neste ponto, foi observado o *shaft* (desativado) do garimpo Degredo (Fig. 44A). Dentre as amostras de rejeito coletadas (Fig. 44B, C) (Tabela 1 - em anexo) estão fragmentos de milonito de coloração cinza, compostos por minerais máficos (biotita e anfibólio) e camadas milimétricas quartzo-feldspáticas. Por vezes, estas rochas encontram-se intercaladas com porções quartzo-feldspáticas, também milonitizadas, e veios de quartzo (2 mm – 4 cm de espessura) com textura maciça ou sacaroidal (Fig. 45A, B). Algumas amostras mostram um grau de alteração elevado, apresentando superfícies amarelo-esverdeadas (alteração de biotita?) e alaranjadas (alteração de minerais de Fe) (Fig. 45 C, D). Alguns dos fragmentos coletados apresentam magnetismo fraco.

Também foram observadas rochas essencialmente quartzo-feldspáticas com textura milonítica, em que é possível notar a presença de *augens* milimétricos compostos por feldspato potássico. Ocasionalmente, as amostras deste último tipo de rocha, apresentam muscovita. São cortadas por veios (2 mm – 1 cm de espessura) compostos por quartzo e/ou turmalina, dispostos paralela ou transversalmente à foliação milonítica (Fig. 46A, B). Algumas amostras apresentam magnetismo fraco.

Fragmentos compostos, essencialmente, por quartzo, turmalina e feldspato potássico também foram observados (Fig. 46C, D).



Figura 44: (A) Visão geral do *shaft* do garimpo (desativado) Degredo. (B) e (C) Pilha de rejeito de minério em que foram coletadas amostras para estudo posterior.

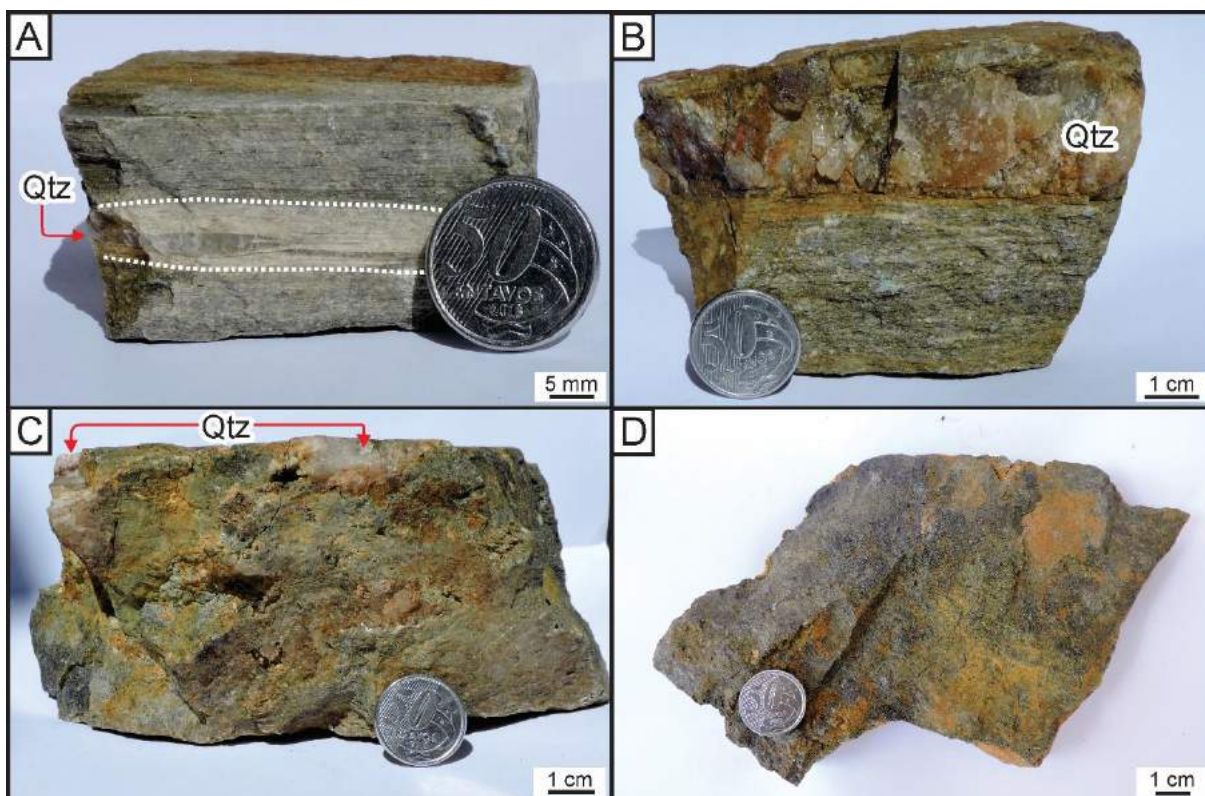


Figura 45: (A) Amostra de milonito com porção quartzo-feldspática, também milonitizada (indicada entre linhas pontilhadas), apresentando veio de quartzo milimétrico no centro (vide seta vermelha) (amostra LL-47B1). (B) Amostra de milonito em contato com veio de quartzo de 3 cm de espessura, coloração alaranjada e textura

sacaroidal (amostra LL-47B2). (C) Amostra de milonito em contato com fragmentos de veio de quartzo (indicado por setas vermelhas) (amostra LL-47C1). A porção milonítica, em algumas partes, apresenta grau de alteração avançado de cor amarelo-esverdeado. (D) Amostra de milonito apresentando superfície intensamente alterada de coloração verde a alaranjada (amostra LL-47C5).

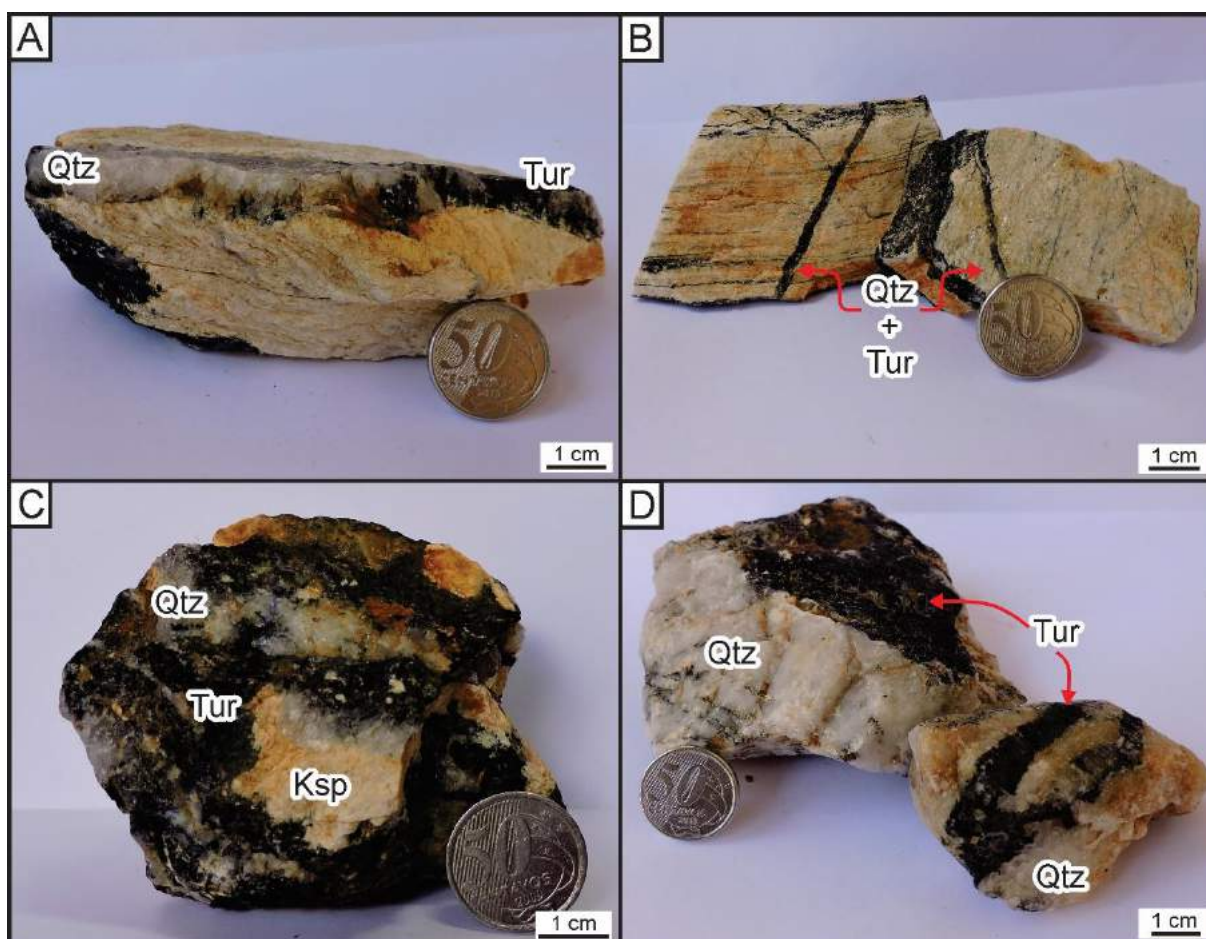


Figura 46: (A) e (B) amostras de rocha quartzo-feldspáticas com textura milonítica, cortadas por veios (2 mm – 1 cm de espessura) compostos por quartzo e/ou turmalina, dispostos transversalmente à foliação milonítica [amostras (A) LL-47A8 e (B) LL-47A3 (direita) e LL-47A9 (esquerda)]. (C) Amostra composta essencialmente por turmalina, além de quartzo e feldspato potássico (amostra LL-47A4). (D) Fragmentos de quartzo cortado por veios de turmalina [amostras LL-47A1 (direita) e LL-47A6 (esquerda)].

Ponto 48 (LL-48)

Município: Itapetim-PE

Data: 10/05/2018

Coordenadas UTM, zona 24 sul: 695988 W; 9193354 S

Localização: estrada de terra, a aproximadamente 4 km da BR-110, nas proximidades da localidade Piedade

Amostras coletadas: LL-48A, LL-48B1, LL48-B2 (amostras de rocha)

Características aeromagnéticas: alto magnético ao longo da Zona de Cisalhamento Itapetim

Unidade geológica: Suíte Granítica Cariris Velhos (tipo Riacho do Forno)

Descrição do afloramento:

Neste ponto, foi observado o *shaft* garimpo (desativado) Pimenteiras (Fig. 47A). A rocha encaixante é caracterizada por milonito que mostra intercalação de camadas milimétricas contendo biotita, anfibólio e muscovita, e camadas quartzo-feldspáticas (Fig. 47B, C). Apresenta, também, *augens* centimétrico compostos por feldspato potássico. A foliação é verticalizada e está disposta na direção 65 Az.

Além de milonito, há biotita-muscovita xisto, mostrando leve alteração de coloração verde (Fig. 48A), por vezes em contato com veios de quartzo (de espessura centimétrica) (Fig. 48B) e com porções ricas em feldspato potássico apresentando textura gráfica.

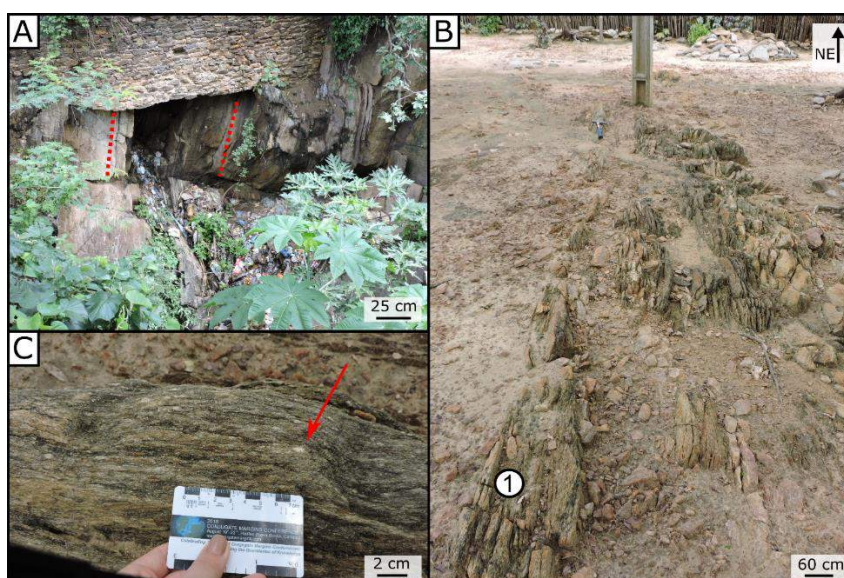


Figura 47: (A) Visão geral do *shaft* do garimpo Pimenteiras, em que é possível notar a foliação verticalizada da rocha encaixante (indicado por linhas tracejadas em vermelho). (B) Visão geral do afloramento do milonito encaixante do veio mineralizado, em que é possível observar a foliação verticalizada na direção 65 Az. 1 – Indicação do local de coleta da amostra LL-48A. (C) Detalhe do milonito onde observam-se *augens* milimétricos compostos por feldspato potássico (vide seta vermelha).

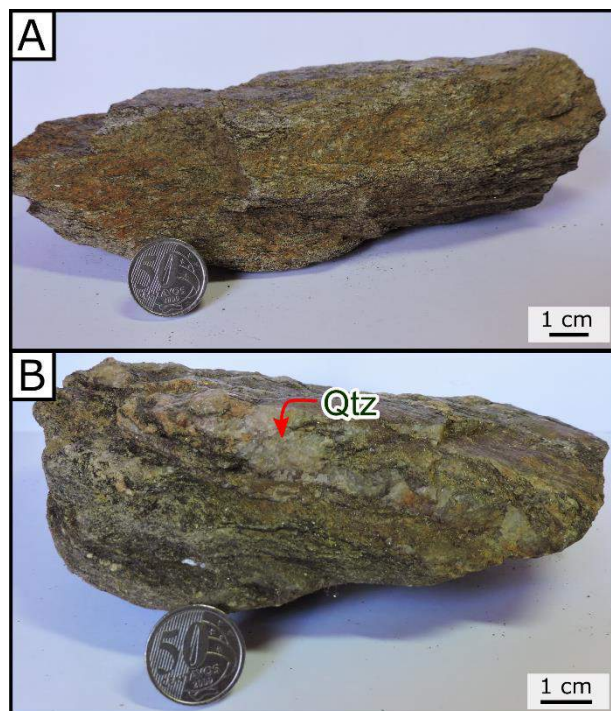


Figura 48: Amostras coletadas no garimpo Pimenteiras. (A) Detalhe de biotita-muscovita xisto, com leve alteração de coloração verde (amostra LL-48B1). (B) Biotita-muscovita xisto em contato com veio de quartzo centimétrico (amostra LL-48B2).