



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

GLENDALIRA SANTOS

**ARCABOUÇO GEOLÓGICO-GEOFÍSICO E MINERALIZAÇÃO DE ASBESTO DO
COMPLEXO RIACHO DO TIGRE: implicações na evolução do Terreno Rio
Capibaribe, Província Borborema**

Recife

2024

GLENDALIRA SANTOS

**ARCABOUÇO GEOLÓGICO-GEOFÍSICO E MINERALIZAÇÃO DE ASBESTO DO
COMPLEXO RIACHO DO TIGRE: implicações na evolução do Terreno Rio
Capibaribe, Província Borborema**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação
em Geociências do Centro de Tecnologia e
Geociências da Universidade Federal de
Pernambuco, como requisito parcial para a
obtenção do grau de Doutor em Geociências.

Área de concentração: Geoquímica, geofísica e
evolução crustal

Linha de pesquisa: Processos ígneos,
metalogênese e evolução crustal

Orientador: Prof. Dr. Lauro César Montefalco de Lira Santos

Coorientadora: Prof.^a Dra. Gláucia N. Queiroga

Recife

2024

.Catalogação de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Santos, Glenda Lira.

Arcabouço geológico-geofísico e mineralização de asbesto do Complexo Riacho do Tigre: implicações na evolução do terreno Rio Capibaribe, Província Borborema / Glenda Lira Santos. - Recife, 2024.

116 f.: il.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geociências, 2024.

Orientação: Lauro Cézar Montefalco de Lira Santos.

Coorientação: Gláucia N. Queiroga.

Inclui referências.

1. Província Borborema; 2. Terreno Rio Capibaribe; 3. Tectônica acrescionária; 4. Evolução crustal. I. Santos, Lauro Cézar Montefalco de Lira. II. Queiroga, Gláucia N. III. Título.

UFPE-Biblioteca Central

GLENDALIRA SANTOS

**ARCABOUÇO GEOLÓGICO-GEOFÍSICO E MINERALIZAÇÃO DE ASBESTO DO
COMPLEXO RIACHO DO TIGRE: implicações na evolução do Terreno Rio
Capibaribe, Província Borborema**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação
em Geociências do Centro de Tecnologia e
Geociências da Universidade Federal de
Pernambuco, como requisito parcial para a
obtenção do grau de Doutor em Geociências.

Área de concentração: Geoquímica, geofísica e
evolução crustal

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Gorki Mariano (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Profa. Dra. Thais Andressa Carrino (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Haroldo Monteiro Lima (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. João Paulo Araújo Pitombeira (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

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

À minha família de sangue e da vida

Àqueles que estiveram comigo desde sempre e aos que
escolheram estar. Obrigada por não soltarem minha mão.

AGRADECIMENTOS

Meus agradecimentos iniciais vão aos meus pais, minha base que sempre estiveram e estão aqui pra me apoiar e ser meu porto seguro. Em seguida, à Ângela, minha segunda mãe e a meu irmão Iuri.

Agradeço ao meu orientador prof. Lauro Santos, pela orientação, por todas as conversas, e pela parceria durante essa caminhada árdua do doutorado. Incluo aqui, profa. Thais Carrino e profa. Sandra Brito, por continuarem a me acompanhar desde o mestrado e sempre sendo fonte de incentivo e exemplo. Agradeço à minha co-orientadora Gláucia Queiroga, pelo incentivo e apoio dado para a conclusão desta pesquisa. Also, I would like to thank Peter Cawood for all the support he has given in Australia, helping me through my short but very rich time in Monash University.

Agradeço ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pela concessão da bolsa de doutorado, além da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), fundação do Ministério da Educação (MEC), pela concessão da bolsa PDSE – Doutorado Sanduíche.

Agradeço ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Estudos Tectônicos, do CNPq, pelo apoio logístico, em especial ao Prof. Elton Dantas e pelo suporte nas análises envolvidas nesta pesquisa.

Agradeço também a todos aqueles envolvidos diretamente ou indiretamente pra que essa pesquisa fosse desenvolvida: José Ferreira (Neto), Igor Manoel Souza, Gisely Maria da Silva, Henrique Britto, Charles Henrique Neves, Paula Jussara, Guillermo Ortiz-Joya, Lucas Eduardo Barbosa, Yousef Zoleikhaei, Massimo Raveggi, Glaucimar Resende, Armando Lucas, Alexandra Souza, Caio Santana e Clara Uchoa.

Por fim, gostaria de agradecer a banca examinadora por ter aceitado o convite de embarcar nessa aventura comigo e acrescentar na qualidade desta pesquisa.

RESUMO

A evolução crustal da Província Borborema vem sendo alvo de estudos por décadas, uma vez que é parte de um sistema orogênico neoproterozoico complexo que se formou durante a aglutinação do mega continente Gondwana. Dentre os diversos terrenos ou domínios que compõem a parte central desta província, o Terreno Rio Capibaribe carece de dados estruturais e geofísicos que embasem uma hipótese sobre a evolução tectônica. Inserido neste contexto geológico, o Complexo Riacho do Tigre, uma faixa predominantemente metavulcanossedimentar, localiza-se no limite dos terrenos Rio Capibaribe e Alto Moxotó, separados pelo sistema de cisalhamento Congo-Cruzeiro do Nordeste. Este complexo traz a luz importantes discussões, principalmente pela localização estratégica entre terrenos contrastantes, por supostamente apresentar idade Eotoniana, que indicaria a presença do evento Cariris Velhos no contexto evolutivo. Além disso, esta unidade hospeda associações de rochas metamáficas e meta-ultramáficas incluindo o serpentinito Xilili, mineralizado em asbesto antofilítico, ocorrência rara ocorrência no Nordeste do Brasil. Assim, para contribuir com a evolução crustal do Terreno Rio Capibaribe, este trabalho apresenta uma integração de dados petrográficos, estruturais nas escalas meso- e microscópicas, de imagens geofísicas aeromagnetométricas e aerogamaespectrométricas, além de contar com uma contextualização da ocorrência de minerais de asbesto e caracterização do asbesto antofilítico do serpentinito Xilili. Dentro do contexto regional, na porção sul do limite entre os terrenos Rio Capibaribe e Alto Moxotó, foram identificadas evidências para acreção de terrenos. Dez domínios magnéticos e quatorze aerogamaespectrométricos, que coincidiram com os litotipos presente, demonstram o caráter contrastante onde o terreno Rio Capibaribe consiste de altos valores de K, e estruturação NE-SW; enquanto que o terreno Alto Moxotó tem concentrações médias a altas de eTh e eU e geometria de grandes dobramentos. Os estudos estruturais apontam que o sistema de cisalhamento Congo-Cruzeiro do Nordeste possa representar um limite de terreno desenvolvido durante a amalgama de Gondwana, principalmente conectadas com corredores miloníticos de foliação vertical com lineações de caimento moderadas. Ainda, associações com microestruturas como *bulging*, rotação de subgrão e recristalização, além de bandas de cisalhamento S-C e myrmekitas indicam que as deformações ocorreram em temperaturas moderadas (~400–500 °C). No contexto local, a mineralização de asbesto do serpentinito Xilili ocorre em lentes de rochas ultramáficas serpentinizadas que estão encaixadas nas rochas metavulcanosedimentares do Complexo Riacho do Tigre. Neste depósito do Sítio Xilili, aflora em garimpos relacionados aos solos areno-argilosos marrons avermelhados associados a

concreções ferruginosas. O asbesto é do tipo antifilítico e ocorre majoritariamente em depósitos do tipo *mass-fiber* que podem conter cristais relictos de antofilita associados a cristais de magnetita, também ocorrem como *slip-fiber* mostrando orientação das fibras no eixo C.

Palavras-chave: Província Borborema, Terreno Rio Capibaribe, tectônica acrescionária, evolução crustal.

ABSTRACT

The Borborema Province crustal evolution has been focused from several studies throughout many decades, once it consists of a complex Neoproterozoic orogenic system formed during the collage of the mega continent Gondwana. Among the diverse terranes or domains that composes the central part from this Province, the Rio Capibaribe Terrane lacks of structural and geophysical data that strengthen a tectonic evolution hypothesis. The Riacho do Tigre Complex, inserted in this context, it is mainly a metavolcanosedimentary belt, located in the boundary between the Rio Capibaribe and Alto Moxotó terranes, marked by the Congo-Cruzeiro do Nordeste Shear System. This complex brings important discussions, since its aged in the early-Tonian, indicating the presence of the Cariris Velhos event in the geotectonic evolution context. Besides that, this geological unit hosts metamafic and metaultramafic rocks' associations including the Xilili serpentinite, mineralized in antophyllitic asbestos, a rare occurrence in Northeastern Brazil. In this way, aiming to contribute to the crustal evolution of the Rio Capibaribe Terrane, this work presents an integrated data based on petrography, airborne gamma-ray spectroscopic and magnetometric imaging, micro- and megascopic structural data, besides the characterization of the antophyllitic asbestos from the Sítio Xilili. In the regional context, the terrane accretion was identified, mainly in the southern portion of the Rio Capibaribe and Alto Moxotó boundary. Ten magnetic domains and fourteen airborne gamma-ray spectroscopic domains, coinciding with the outcropping lithotypes, showed the contrasting characteristics, where the Rio Capibaribe Terrane consists of high values of K and with structural trend of NE-SW; while the Alto Moxotó Terrane has medium to high concentrations of eTh and eU and large folding geometries. Structural data pointed out that the Congo-Cruzeiro do Nordeste shear zone system could be the terrane boundary developed during the Gondwana assembling mainly associated with mylonitic corridors with vertical foliation and lineations with moderate plunging. Yet, microstructural associations like bulging, subgrain rotation and recrystallization, besides S-C shear bands and myrmekites indicate that the deformations occurred in moderate temperatures (~400-500°C). In the local context, the asbestos mineralization of the Xilili serpentinite outcrops in serpentinized ultramafic rocks lenses hosted by metavolcanosedimentary rocks from the Riacho do Tigre Complex. Within the Sítio Xilili deposit, reddish-brown sandy to clay soils appears associated to iron concretions. The asbestos is antophyllitic and occurs mainly in the mass type deposits which contains anthophyllite relics associated to magnetite crystals, it also occurs as slip-fiber deposits showing fibers elongated in the C-axis.

Key-words: Borborema Province, Rio Capibaribe Terrane, tectonic accretion, crustal evolution

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1 OBJETIVOS	12
1.2 ESTRUTURA DA TESE	12
2. CONTEXTO GEOLÓGICO	14
2.1 PROVÍNCIA BORBOREMA	14
2.2.1 Subprovíncia Transversal (SPT)	19
2.2.1.1 Terreno Rio Capibaribe (TRC)	20
2.2.1.1.1 <i>Complexo Riacho do Tigre (CRT)</i>	22
2.2.1.2 Terreno Alto Moxotó (TAM)	23
3. METODOLOGIA	25
4. ARTIGO I - CRUSTAL ARCHITECTURE OF NEOPROTEROZOIC TERRANES OF WESTERN GONDWANA REVEALED BY INTEGRATED GEOPHYSICAL AND STRUCTURAL DATA ON THE EASTERN BORBOREMA PROVINCE, NE BRAZIL	29
5. ARTIGO II – UM OLHAR SOBRE OS MINERAIS DE ASBESTO: ASPECTOS HISTÓRICOS E GEOLÓGICOS E ESTUDO DE CASO DO SÍTIO XILILI (PE), PORÇÃO CENTRAL DA PROVÍNCIA BORBOREMA	71
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	92
REFERÊNCIAS	94

1. INTRODUÇÃO

O Terreno Rio Capibaribe (TRC), situado na porção sul/sudeste da Zona Transversal da Província Borborema, limita-se a sul pelo lineamento Pernambuco, e a oeste pela zona de cisalhamento Congo-Cruzeiro do Nordeste, separando-o do Superterreno Pernambuco-Alagoas e do Terreno Alto Moxotó, respectivamente (Almeida et al. 1981, Santos e Medeiros, 1999; Brito Neves et al. 2000, Brito Neves e Silva Filho, 2019).

De acordo com o estudo realizado por Brito Neves e colaboradores (2013), embora os estudos geocronológicos e petrológicos para a Província Borborema, envolvendo, principalmente, as rochas graníticas do TRC, tenham sido intensificados nos últimos 20 anos, grande parte dos litotipos presentes neste terreno ainda carece de estudos mais aprofundados (Santos e Medeiros, 1999; Ferreira et al., 2004; Guimarães et al., 2004, 2011, entre outros). Consequentemente, hipóteses sobre a evolução geotectônica do TRC necessita de complementos em termos petrológicos, estruturais, geoquímicos e geofísicos (Brito Neves et al., 2013).

Dentre os litotipos presentes citados acima, pode-se citar o Complexo Riacho do Tigre, que se destaca pela ocorrência de rochas metavulcanosedimentares intercaladas com *sheets* metagranitoides peraluminosos de idade Eotoniana, além de ocorrências de metavulcânicas máficas anfibolitizadas associadas e asbestos antofilíticos relacionados ao Sítio Xilili (Santos et al., 1971; Accioly et al., 2010; Santos et al., 2017). O posicionamento estratigráfico deste complexo corresponde a um período cujo significado regional é sumariamente importante para a evolução da província, o Cariris Velhos (*ver* Santos et al., 2010; Neves, 2015; Guimarães et al., 2015, Caxito et al., 2020, Santos et al., 2023 para detalhes).

Buscando compreender o contexto geotectônico do Terreno Rio Capibaribe em relação aos outros componentes da Subprovíncia Transversal, o limite entre este terreno e o Terreno Alto Moxotó, foi escolhido como um dos alvos de estudo desta tese. Esta região compreende a zona de cisalhamento Congo-Cruzeiro do Nordeste, agora definida como sistema de cisalhamento Congo-Cruzeiro do Nordeste (Miranda et al., 2020), uma importante zona de cisalhamento complexa com ramificações sinistral (porção Congo) e dextral (porção Cruzeiro do Nordeste) com muitas características locais que também necessitam de mais investigações (Brito Neves et al., 2013).

Neste sentido, esta pesquisa traz um compilado de métodos investigativos e analíticos aplicados ao entendimento da evolução estrutural e econômica no contexto do Terreno Rio Capibaribe e a ocorrência do asbesto antofilítico do Sítio Xilili. Desta forma, foi realizado o

mapeamento geológico, geofísico e estrutural do Terreno Rio Capibaribe, com enfoque no sistema de cisalhamento Congo-Cruzeiro do Nordeste, além de trazer a luz a caracterização do asbesto antofilítico presente no Sítio Xilili, Arcoverde (PE).

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral desta pesquisa busca caracterizar meio da integração de estudos de campo, petrográficos e geofísicos o limite entre o Terreno Rio Capibaribe e o Terreno Alto Moxotó, contribuindo para o entendimento no contexto da evolução geotectônica da Província Borborema. Além disso, traz a luz o contexto estrutural do sistema de cisalhamento Congo-Cruzeiro do Nordeste (SCCCNE). Nesse sentido, busca-se entender o significado do limite entre estes terrenos para a evolução neoproterozoica da Província Borborema, no contexto da porção ocidental do continente Gondwana. Assim, foram traçados os seguintes objetivos:

- i. Através do mapeamento geológico e estrutural, além do estudo das imagens geofísicas, detalhar os litotipos presente no Terreno Rio Capibaribe e Alto Moxotó, com enfoque nas zonas de cisalhamento que estruturam estes corpos;
- ii. Estudo petrográfico do asbesto antofilítico do Sítio Xilili, detalhando sua ocorrência e métodos de caracterização;
- iii. Montar um panorama geral da evolução das rochas do Complexo Riacho do Tigre, objetivando a construção de um modelo que deverá ser confrontado e comparado com unidades similares.

1.2 ESTRUTURA DA TESE

O volume final desta tese será composto por uma descrição da Geologia Regional e breve descrição da Geologia Local, além de dois artigos científicos, sendo o primeiro deles um artigo voltado ao estudo geofísico e estrutural dos litotipos relacionados ao sistema de cisalhamento Congo-Cruzeiro do Nordeste (Artigo Científico I), além de um artigo de revisão sobre os minerais de asbesto, com enfoque para a ocorrência do Sítio Xilili (Artigo Científico II).

- **Capítulo 2: Contexto Geológico.** Uma abordagem do contexto geológico regional da Província Borborema, incluindo um breve histórico de sua compartimentação geotectônica será descrita neste capítulo. Ainda, serão discriminados o contexto local inserido nesta tese.

- **Capítulo 3: Metodologia.** Este capítulo trará o compilado de metodologias que foram utilizadas para desenvolver os artigos publicados, apresentados nos capítulos seguintes.
- **Capítulo 4: Artigo I - Crustal architecture of Neoproterozoic Terranes of Western Gondwana revealed by integrated geophysical and structural data on the Eastern Borborema Province, NE Brazil.** Este artigo apresenta a integração de imagens geofísicas (gamaespectroscopia e magnetometria) e análises estruturais na meso- e microescala no limite dos terrenos Rio Capibaribe (TRC) e Alto Moxotó (TAM), delimitado pelo sistema de zonas de cisalhamento Congo-Cruzeiro do Nordeste. Propõe-se a participação de eventos acrescionários ocorrido durante o neoproterozoico para a aglutinação do TRC e TAM, onde o sistema cisalhante Congo-Cruzeiro do Nordeste é indicado como sendo o limite entre estes terrenos.
- **Capítulo 5: Artigo II - Um olhar sobre os minerais de asbesto: aspectos históricos e geológicos e estudo de caso do Sítio Xilili (PE), porção central da Província Borborema.** Neste artigo de revisão, os minerais de asbesto são tratados em termos históricos, contando com sua grande importância econômica e industrial, além dos aspectos geológicos, contando com a gênese e mineralogia deste grupo de minerais. Destaca-se a descrição inédita da ocorrência do asbesto do Sítio Xilili (PE), presente no Complexo Riacho do Tigre e sua importância no contexto do Domínio Rio Capibaribe, da Subprovíncia Central.
- **Capítulo 6: Considerações Finais.** Compatibilização dos principais resultados obtidos por esta pesquisa.

2. CONTEXTO GEOLÓGICO

A área de estudo localiza-se na Subprovíncia Transversal, na Província Borborema (PB; Almeida et al., 1981), no limite entre os Terrenos Rio Capibaribe e Alto Moxotó, compreendendo o Complexo Riacho do Tigre.

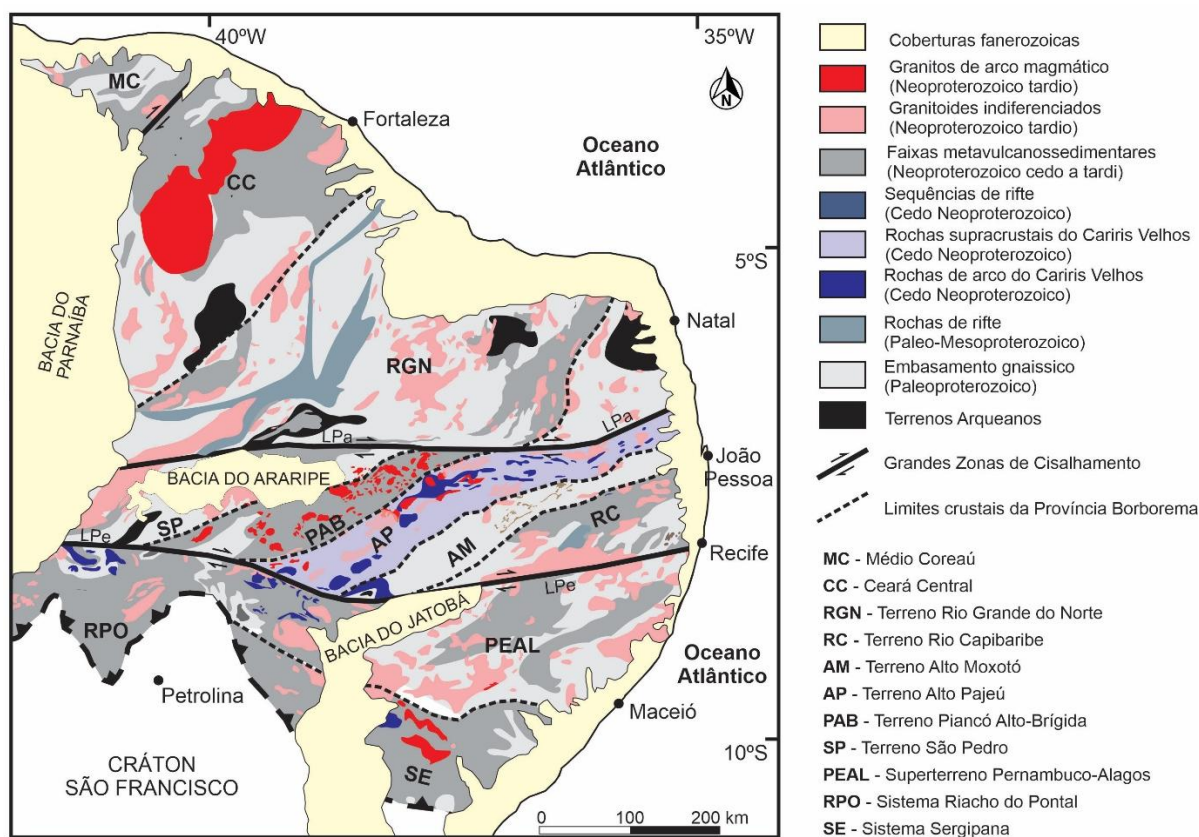
2.1 PROVÍNCIA BORBOREMA

A PB compreende um complexo sistema de faixas orogênicas neoproterozoicas localizadas na Plataforma Sul-Americana encaixadas entre os Crátons do Oeste Africano-São Luís (ao norte), de São Francisco-Congo (a sul), e do Parnaíba (a oeste) (Brito Neves, 2020; Figura 2.1). A primeira estruturação da província em um conjunto de dobramentos marginais e interiores intercalados com maciços medianos e múltiplas intrusões graníticas no final do Neoproterozoico foi descrita por Brito Neves (1975).

Os primeiros modelos geotectônicos para descrever este arcabouço foram introduzidos na década de 80, onde foram discriminadas as formações de faixas monocíclicas e policíclicas através de correlações regionais e dados estruturais (Jardim de Sá et al., 1981; Santos e Brito Neves, 1984). Nestes trabalhos, constatam-se evidências de retrabalhamento da crosta paleoproterozoica no final do neoproterozoico, indicando evidência de tectônica de placas como um evento formador da província.

Com a inserção dos estudos geocronológicos baseados em datação de U-Pb em zircão na década de 90, novas configurações puderam ser estabelecidas para a Província Borborema. A proposição em subdividir a província em três domínios: (i) Setentrional; (ii) Transversal; e (iii) Meridional, das quais são limitas por extensos lineamentos E-W Patos e Pernambuco, foi dada por Van Schmus et al. (1995). Neste período, ainda pode-se citar a formalização do Evento Cariris Velhos, onde evidências de eventos Wilsonianos foram datados em torno de 1,1 a 0,95 Ga (Campos Neto et al., 1994). Ainda, Santos (1996) propõe o modelo de terrenos tectono-acrescionários para toda a PB, baseado no conceito de terrenos suspeitos de Coney et al. (1980), onde a Subprovíncia Transversal pode ser destacada. Neste sentido, foi proposta a seguinte subdivisão em quatro terrenos: Rio Capibaribe, Alto Moxotó, Alto Pajeú e Piancó-Alto Brígida (Santos e Medeiros, 1999; Brito Neves et al., 2000).

Figura 2.1. Compartimentação geológica da Província Borborema



Fonte: Modificado de Santos e Caxito (2021).

Atualmente, a compartimentação descrita para a Província Borborema, seguindo os modelos propostos de acreção de terrenos exóticos (Santos 1996, Santos et al. 2000, Brito Neves et al. 2000, Brito Neves, 2020) ocorre a partir da extensa rede de zonas de cisalhamento que corta toda província, entre elas a Kandi-Transbrasiliiano (a noroeste, com *trend* NNE-SSW), Patos (*trend* E-W) e a Pernambuco (*trend* E-W). Assim, pode-se subdividi-la nas seguintes subprovíncias: Norte-ocidental ou Médio Coreau, Setentrional (Ceará Central e Terreno Rio Grande do Norte), Transversal (faixas móveis neoproterozoicas intercaladas com terrenos tecnoestratigráficos paleoproterozoicos e arqueanos) e Meridional (Superterreno Pernambuco-Alagoas e os sistemas Sergipano, Riacho do Pontal e Rio Preto). Ainda, em reconstruções do Gondwana ocidental, Caxito et al. (2020) demonstra que a província apresenta continuidade para o continente africano através da Nigéria, Camarões, Togo e Benin num cinturão orogênico do Brasileiro-Pan-Africano.

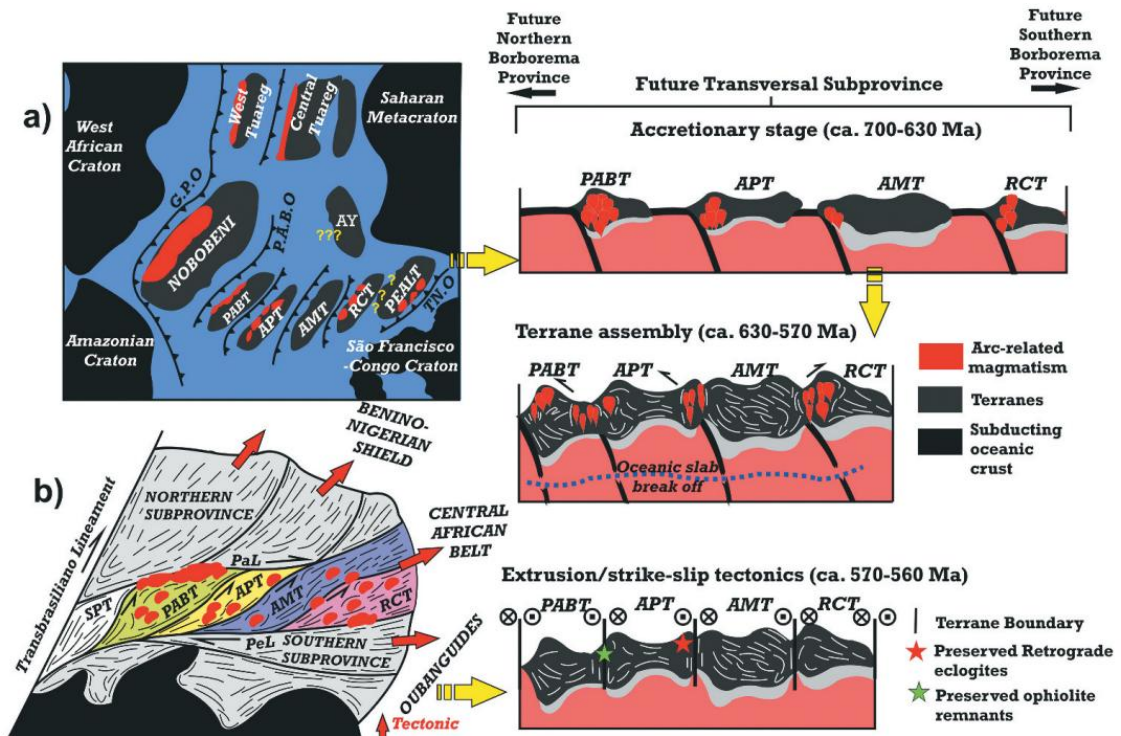
Apesar do consenso da presença do modelo acrescionário na PB durante o Arqueano e Paleoproterozoico, durante o Neoproterozoico ainda são discutidos modelos distintos para contextualizar a evolução geotectônica da província, onde vários autores utilizam de diversas

integrações metodológicas como dados de campo, geofísicos, estruturais, estratigráficos, petrológicos, petrográficos, isotópicos, geocronológicos e geoquímicos.

As recentes descobertas e caracterizações de ofiolitos, eclogitos, rochas de ultra- e ultra-alta pressão, além de contrastes geofísicos entre distintos blocos têm sido fundamentais para embasar a tectônica acrescionária neoproterozoica (Caxito et al., 2020; Santos et al., 2021; Santos e Caxito et al. 2021; Santos et al., 2022; Santos et al., 2023). Em modelos recentes, como no compilado publicado por Caxito e colaboradores (2020) que leva em consideração a evolução da PB juntamente com a contraparte africana, destaca-se que diferentes domínios do embasamento da província (NOBO-BENI, APAMCAPAY) possam ser gerados pela decratonização de blocos do paleocontinente na margem norte do cráton São Francisco-Congo através da hiperextensão e consequente deriva na margem. Assim, domínios oceânicos (Goiás-Farusiano e Transnordestino-Africa Central) separariam estes blocos durante o neoproterozoico, e zonas de subducção e a colagem de terrenos juvenis neoproterozoicos seriam os responsáveis pela união de todos os domínios, os quais foram posteriormente comprimidos e retrabalhados durante o evento orogênico Brasileiro-Pan Africano. Santos et al. (2021), acrescenta ainda que, dentre um dos blocos do embasamento, que representa a Subprovíncia Transversal (APAMCAPAY), existiam braços litosféricos oceânicos erodidos que subdividiriam os terrenos componentes, que foram convertidos em suturas secas (“dry sutures”), onde a acreção seria responsável por unir estes terrenos (Figura 2.2).

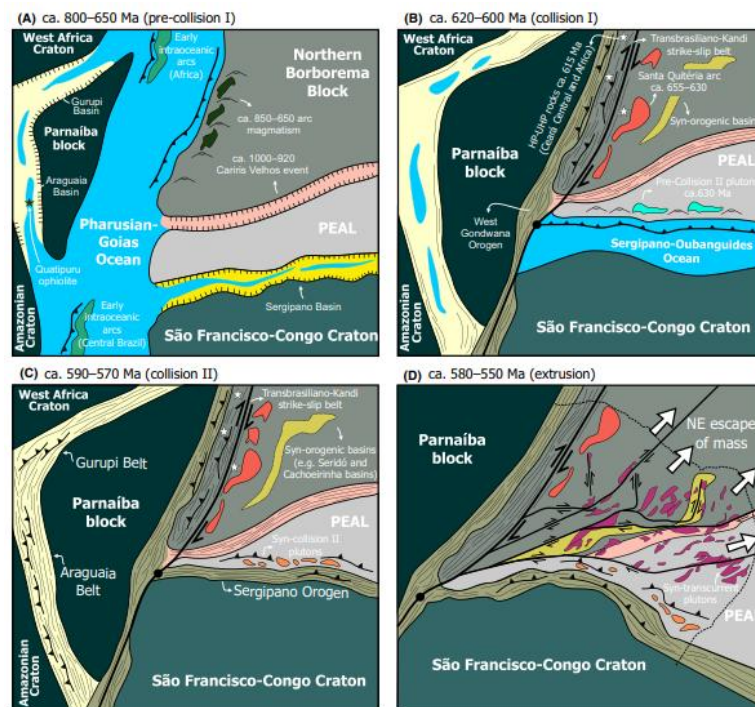
Outros modelos geotectônicos também foram propostos para explicar a estruturação da Província Borborema. Seguindo na linha dos modelos que envolvem processos de movimentação de placas, têm-se a combinação de um ciclo tectônico completo envolvendo dois eventos colisionais discretos, dos quais correspondem as suturas a oeste do Lineamento Transbrasiliano-Kandi (*ca.* 620-610 Ma) dada pela colisão do Bloco Parnaíba, com o Cráton Amazônia-África ocidental e o embasamento da PB; e a sul, marcando a colagem do Cráton São Francisco com o Orógeno Sergipano (*ca.* 590-580 Ma). Consequentemente, os esforços combinados nessa colisão seriam responsáveis por empurrar toda essa massa continental para nordeste, gerando extensas ramificações de zonas de cisalhamento neoproterozoicas num contexto intracontinental (Ganade de Araújo, 2014; Figura 2.3).

Figura 2.2. Modelo acrescionário para a Província Borborema no Neoproterozoico, com enfoque para a Subprovíncia Transversal.



Fonte: Santos et al. (2021)

Figura 2.3. Modelo colisional com extrusão intracontinental para a Província Borborema.

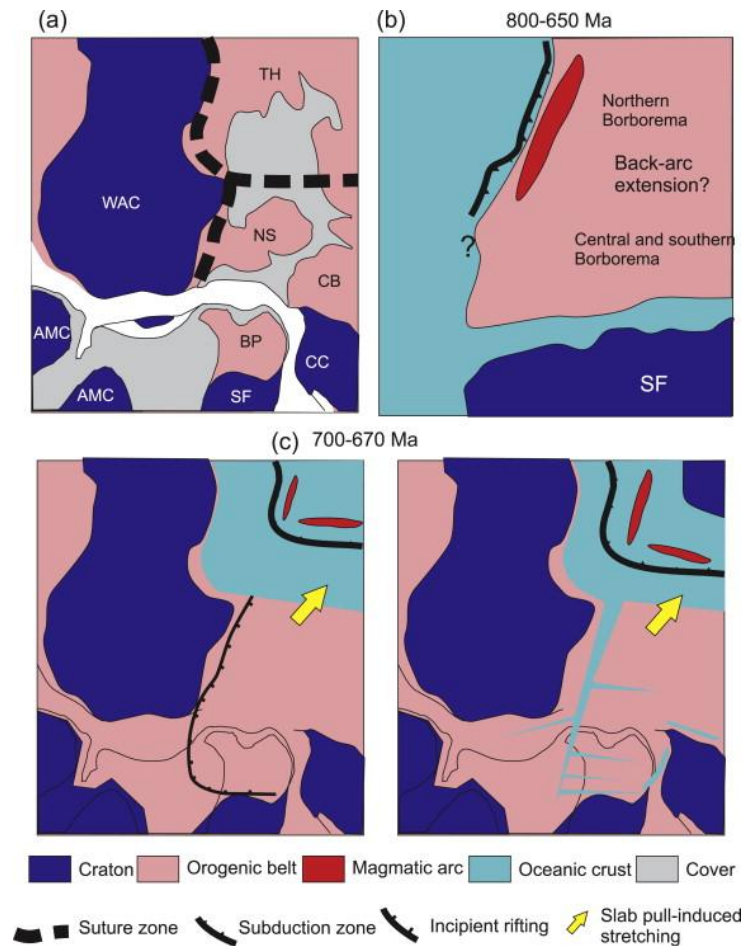


Fonte: Ganade de Araújo et al. (2014)

Outra hipótese, levanta o modelo onde há o retrabalhamento de um único bloco continental, que permaneceu relativamente estável desde a convergência de pequenos blocos e

formação de arcos intra-oceânicos durante o Paleoproterozoico (*ca.* 2.0 Ga; Neves et al., 2006, 2015; Neves 2018). Assim, eventos metamórficos, deformacionais e magmáticos associados desde 2.0 Ga até a Orogênese Brasileira seriam causados por processos intracontinentais, dado por idades similares entre zircões de metassedimentos, a ausência de evidências claras de zonas de sutura e processos de convergência de placas (Figura 2.4).

Figura 2.4. Modelo intracontinental para a Província Borborema durante o Neoproterozoico.

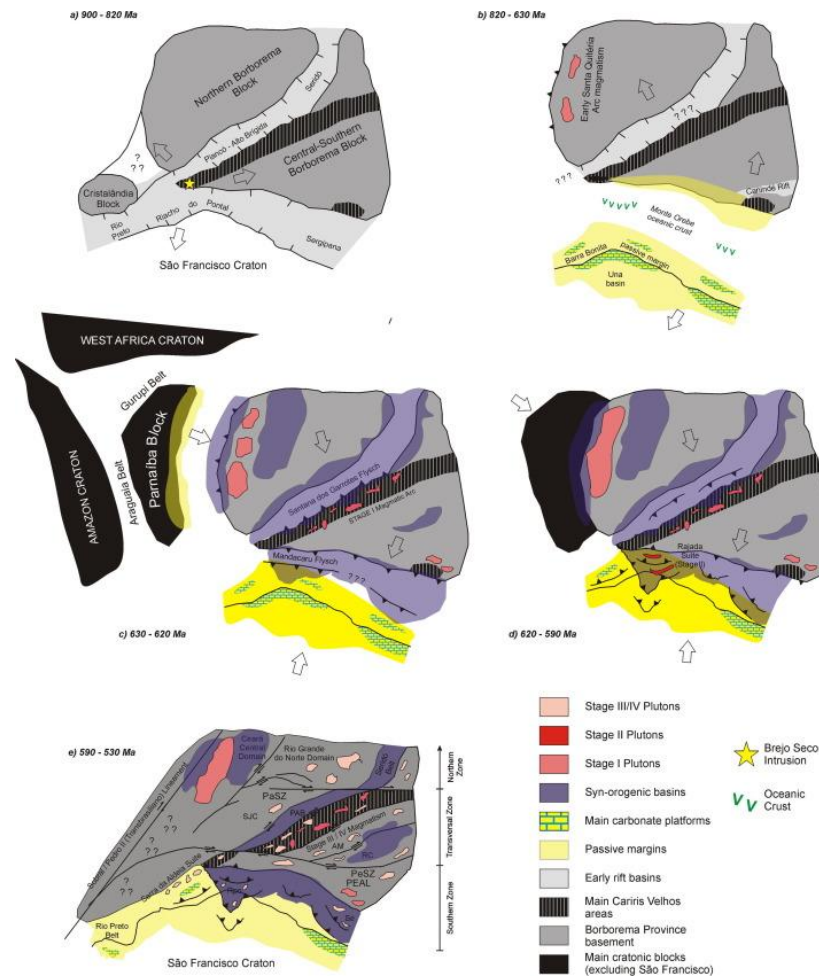


Fonte: Neves (2015).

Também pode-se citar a proposição do Ciclo de Wilson completo desenvolvido principalmente no Orógeno Riacho do Pontal, que está em um posicionamento estratégico para entendimento da evolução neoproterozoica da BP, entre os Crátons São Francisco-Congo, Amazônia e África Ocidental. Neste orógeno ocorre rifteamento (*ca.* 900-820 Ma) e deriva crustal com afinamento litosférico com abertura oceânica, formando o ofiolitos Monte Orebe (*ca.* 820-630 Ma). Também é citado a convergência dos blocos com subducção dada por inversão de bacias e obducção do ofiolitos (*ca.* 630-620 Ma); colisão entre o Cráton São Francisco e o bloco Pernambuco-Alagoas (*ca.* 620-590 Ma) seguido de um escape tectônico

lateral que gerou a zona de cisalhamento Pernambuco ocidental (ca. 590-530 Ma; Caxito et al. 2016; Figura 2.5).

Figura 2.5. Modelo neoproterozoico considerando o Ciclo de Wilson para a Província Borborema.



Fonte: Caxito et al. (2016).

2.2.1 Subprovíncia Transversal (SPT)

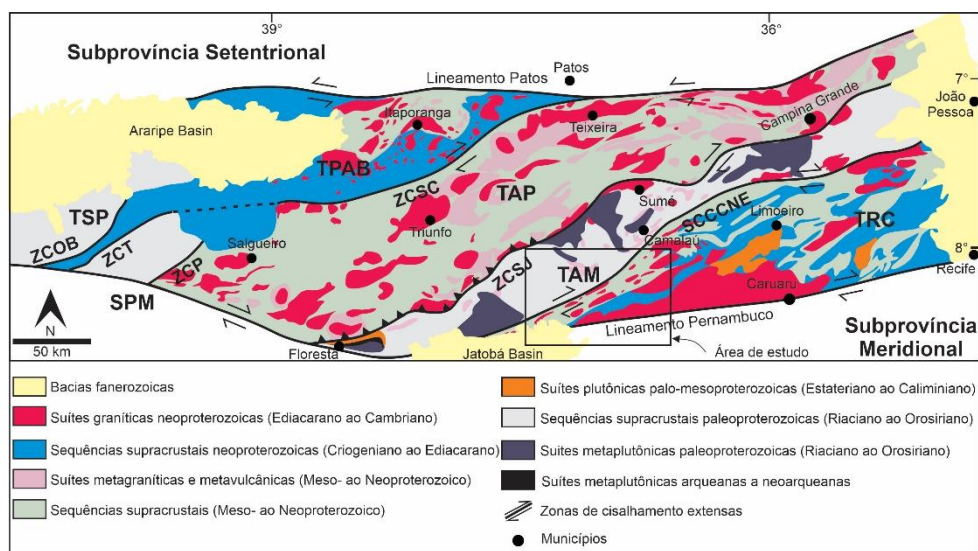
A Subprovíncia Transversal se localiza entre os lineamentos Patos (a norte) e Pernambuco (a sul), e se diferencia das subprovíncias adjacentes por diferentes características geológicas, tectono-estratigráficas e geofísicas (Figura 2.6). A subprovíncia se subdivide em terrenos, que se dispõem de forma sigmoidal ENE-WSW, recortados por zonas de cisalhamentos que por vezes se conectam aos Lineamentos Patos e Pernambuco.

A atual subdivisão proposta para esta subprovíncia se dá em terrenos, de leste pra oeste, da seguinte forma: Rio Capibaribe (TRC), Alto Moxotó (TAM), Alto Pajeú (TAP), Piancó-Alto

Brígida (TPAB) e São Pedro (SP; Brito Neves et al. 2000; Brito Neves, 2020). Estes terrenos são separados por importantes falhas ou zonas de cisalhamento consideradas limites, sendo elas: (i) Sistema de Cisalhamento Congo-Cruzeiro do Nordeste, limitando o TRC do TAM; (ii) Nappe ou sistema de empurrões Serra de Jabitacá, em partes, limitando o TAM do TAP; (iii) Zona de Cisalhamento Serra do Caboclo, limitando o TAP do TPAB; e (iv) Zona de Cisalhamento Ouricuri-Bodocó, limitando o TPAB do SP (Santos et al., 2010; Van Schmus et al., 2011, Brito Neves et al., 2013; Santos et al., 2017; Brito Neves et al., 2018; Brito Neves, 2020; Brito Neves et al. 2022; Lira Santos et al., 2023).

Tendo como foco do trabalho o limite entre os Terrenos Rio Capibaribe e o Alto Moxotó, além da ocorrência de asbestos no Complexo Riacho do Tigre, serão tratados estes temas a seguir.

Figura 2.6. Representação esquemática simplificada da Subprovíncia Transversal com enfoque para a área de estudo.



Fonte: Modificado de Lira Santos et al. (2023). TRC – Terreno Rio Capibaribe; TAM – Terreno Alto Moxotó; TAP – Terreno Alto Pajeú; TPAB – Terreno Piancó-Alto Brígida; TSP – Terreno São Pedro; SCCCNE – Sistema de Cisalhamento Congo-Cruzeiro do Nordeste; ZCSJ – Zona de Cisalhamento Serra do Jabitacá; ZCSC – Zona de Cisalhamento Serra do Caboclo; ZCP – Zona de Cisalhamento Parnamirim; ZCT – Zona de Cisalhamento Trempe; ZCOB – Zona de Cisalhamento Ouricuri-Bodocó; SPM – Subprovíncia Meridional.

2.2.1.1 Terreno Rio Capibaribe (TRC)

O Terreno Rio Capibaribe está delimitado a oeste pelo Sistema de Cisalhamento Congo-Cruzeiro do Nordeste de direção NE-SW a ENE-WSW, que o separa do TAM; e a sul pelo

Lineamento Pernambuco de caráter E-W, que o separa do Superterreno Pernambuco-Alagoas (Brito Neves et al., 2013). Considerando o caráter acrescionário para este terreno, embasado nos trabalhos geofísicos de Oliveira (2008) e Medeiros et al. (2011), enseja-se que os lineamentos supracitados sejam limites dos TRC.

A sequência litoestratigráfica para este terreno se encontra sem ocorrências de rochas do embasamento arqueanas, concentradas na faixa de idades desde o Paleoproterozoico “médio” ao Neoproterozoico (Ediacarano) e coberturas recentes de idades cenozoicas (Brito Neves et al., 2013, Santos et al., 2017). No contexto da evolução geotectônica, Brito Neves et al. (2013) conclui para este terreno o caráter de terreno tectono-estratigráfico (no sentido de Howell, 1995), do qual encontra-se trapeado entre grandes falhas de caráter regional.

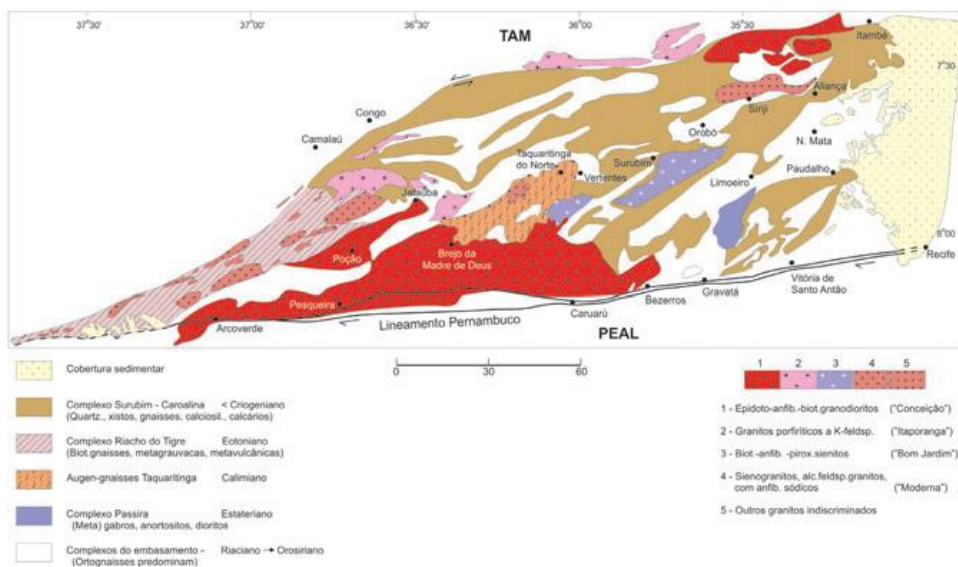
O embasamento compreende rochas do paleoproterozoico exposto em ortognaisses por vezes bandados, com complexos polimigmatíticos e graníticos a gnaisses peraluminosos com idades variando de 1,9 a 2,2 Ga (Riaciano a Orosiriano). Estas unidades ocorrem associadas a dobramentos e zonas de cisalhamento, e possuem exposições proporcionalmente similares àquelas de unidades supracrustais, sendo uma característica única para este terreno (Sá et al., 2002, Neves et al., 2006, 2009; Brito Neves et al., 2013). Ainda de idade estateriana, pode-se citar o complexo intrusivo máfico-ultramáfico de Passira, composto de rochas (meta) anortosíticas, gabroicas, gabro-noríticas e lentes de ultramafitos ricas em óxidos de Fe-Ti (Accioly, 2001; Accioly et al., 2003). Litotipos de idades mesoproterozoicas compõe-se de ortognaisses graníticos calimianos associados ao completo máfico-ultramáfico citado anteriormente, além de rochas graníticas porfiríticas transposto por foliação gnáissica neoproterozoica.

As exposições de rochas neoproterozoicas podem ser subdivididas em quatro grupos de acordo com as idades compiladas no trabalho de Brito Neves et al. (2013):

- Eotoniano – Faixa Móvel do evento “Cariris Velhos”: O Complexo Riacho do Tigre representa esta unidade com ocorrências de uma sequência metavulcanosedimentar de idade 0,96 Ga correlata ao evento “Cariris Velhos”, que além de ser limitada por zonas de cisalhamento extensas, inclui várias rochas graníticas (Accioly et al., 2010; Santor, 2012; Santos et al., 2017).
- Neotoniano: compreende um granitoide tabular bandado de idade 0,87 Ga de provável origem tafrogênica (Neves et al., 2011).

- Criogeniano/Ediacarano: rochas destas idades (630 – 620 Ma) são registradas no TRC constituindo-se de micaxistos e paragneisses aluminosos, granadíferos (nem sempre) com sillimanita, gnaisses ricamente quartzosos, alguns anfibólio-gnaisses, quartzitos, mármore e rochas calciosilicatadas.
- Ediacaranas: aqui se pode englobar as ocorrências de suítes graníticas que intercalam as rochas citadas anteriormente numa faixa de idades de aproximadamente 600 ± 15 Ma (Santos e Medeiros, 1999; Ferreira et al., 2004; Guimarães e Silva Filho, 1998; Guimarães et al., 2004, 2011).

Figura 2.7. Mapa esquemático do Terreno Rio Capibaribe.



Fonte: Brito Neves et al. (2013)

2.2.1.1.1 **Complexo Riacho do Tigre (CRT)**

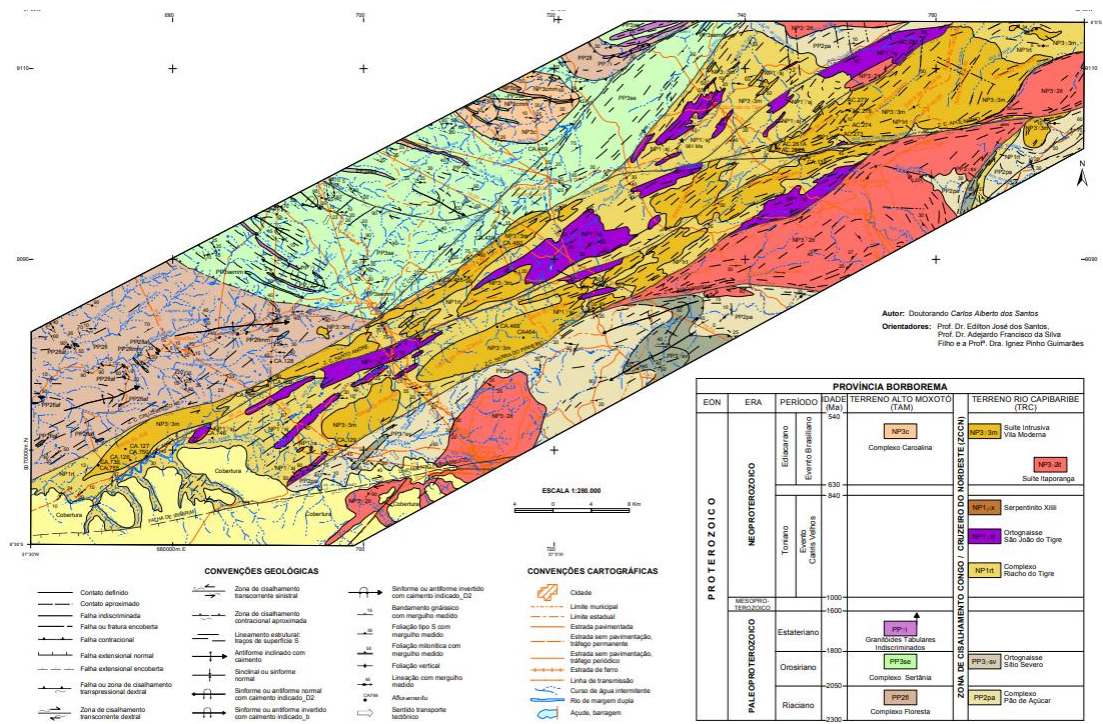
O Complexo Riacho do Tigre, originalmente incluído no Complexo Vertentes (Medeiros, 2000) devido as similaridades composicionais, foi discriminado por Accioly et al. (2010) como uma sequência supracrustal constituída por rochas metavulcanosedimentares associadas com *sheets* de metagranitoides peraluminosos. Este corpo tem formato sigmoidal bordejado pelo Sistema de Cisalhamento Congo-Cruzeiro do Nordeste (a oeste) e pela Zona de Cisalhamento Serra do Pinheiro (a leste).

A sequência de metassedimentos do CRT compreende bitotita-xistos, biotita-granada xisto com turmalina, anfibólio-biotita gnaisses e granada-biotita gnaisses. As rochas metavulcânicas e metavulcanoclásticas são finas e de composição máfica a intermediária, ocorrem também associadas às rochas metamáficas de composição anfibolítica (Accioly et al., 2010). Esta

unidade inclui uma variedade de rochas graníticas (tipo “Itaporanga” e “Moderna” etc.), além de ortognaisses e serpentinitos associados à asbestos antofilíticos (Santos et al., 2017).

Vale ressaltar que a distribuição da fácies dos gnaisses bandados com alternância de material vulcânico máfico-intermediário, em uma regularidade de leitos perfeita, pode sugerir uma sedimentação turbidítica com uma componente vulcânica (Santos et al., 2017). Ainda, zircões datados pelo método U-Pb das metavulcanoclásticas revelaram idades de 0,96 Ga, sugestivo do evento “Cariris Velhos” (Brito Neves et al., 2013).

Figura 2.8. Mapa geológico do Complexo Riacho do Tigre.



Fonte: Santos (2012).

2.2.1.2 Terreno Alto Moxotó (TAM)

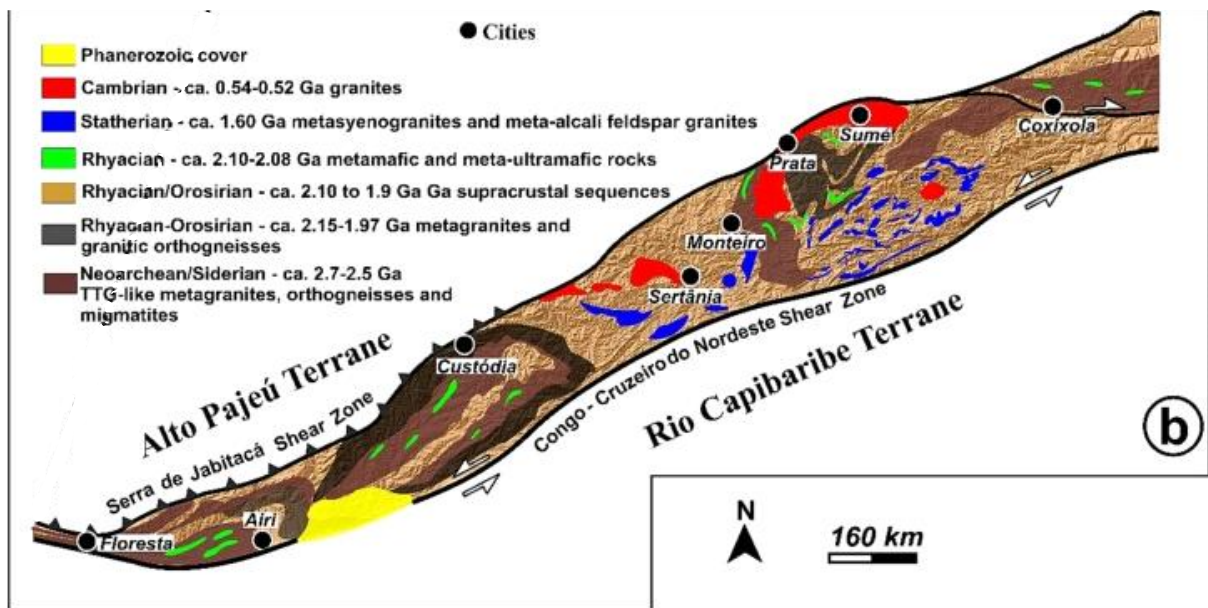
O Terreno Alto Moxotó possui características únicas que o distingue dos demais terrenos da SPT, o limite com o TRC já foi descrito, entretanto a oeste, o limite se inicia na complexa estrutura de falha de empurrão resultante no Sistema de Cisalhamento Serra do Jabitacá (Santos et al. 2018).

O TAM consiste em uma associação de suítes de afinidades TTG arqueanas (ca. 2,7 a 2,4 Ga) intercaladas com blocos crustais paleoproterozoicos (2,1 a 2,0 Ga) de alto grau metamórfico constituídos de ortognaisses, migmatitos e metagranitos (Complexo Floresta),

além de suítes máficas-ultramáficas (Malhada Vermelha) e sequências supracrustais (Complexo Sertânia; Santos et al., 2015, 2017). Ressalta-se que a idade de deposição máxima obtidas de zircões de 0,97 Ga sugere fontes mais jovens para partes desta sequência (Neves et al., 2017). Rochas neoproterozoicas são raras e ocorrem em granitos tipo A de idade entre 540-520 Ma (Guimarães et al., 2005).

O sistema acrescionário é citado para o desenvolvimento do terreno do Neoarqueano ao Paleoproterozoico tardio, que envolveu colisão entre arcos magmáticos continentais e intra-oceânicos datados entre 2,2 a 1,9 Ga, consequentemente correlatos à amalgama do supercontinente Columbia/Nuna (Santos et al. 2015, 2017; Brito Neves et al., 2020).

Figura 2.9. Mapa esquemático do Terreno Alto Moxotó.



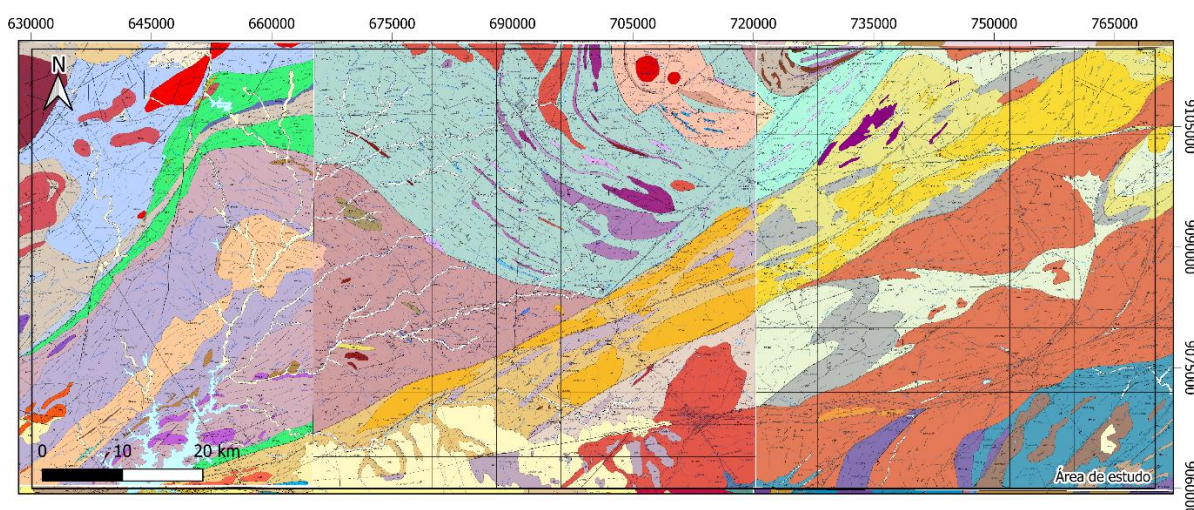
Fonte: Santos et al. (2023).

3 METODOLOGIA

Objetivando a caracterização dos terrenos Rio Capibaribe e Alto Moxotó, assim como o a mineralização do asbesto no Complexo Riacho do Tigre, a metodologia seguida se subdividiu em: elaboração dos mapas pré-campo e geofísicos, atividades de campo e interpretação dos dados.

Um compilado das folhas desenvolvidas pela CPRM: Custódia (SC.24-X-A-III), Sertânia (SC.24-X-B-I) e Pesqueira (SC.24-X-B-II) observado na Figura 3.1, gerou o mapa pré-campo principal, utilizado para definir a área de estudo da tese observada na Figura 4.2.

Figura 3.1. Mapa compilado das folhas Custódia (SC.24-X-A-III), Sertânia (SC.24-X-B-I) e Pesqueira (SC.24-X-B-II), respectivamente da esquerda para a direita.



Fonte: Lima et al. (2018), Santos et al (2017) e Accioly et al (2015), respectivamente da esquerda para a direita.

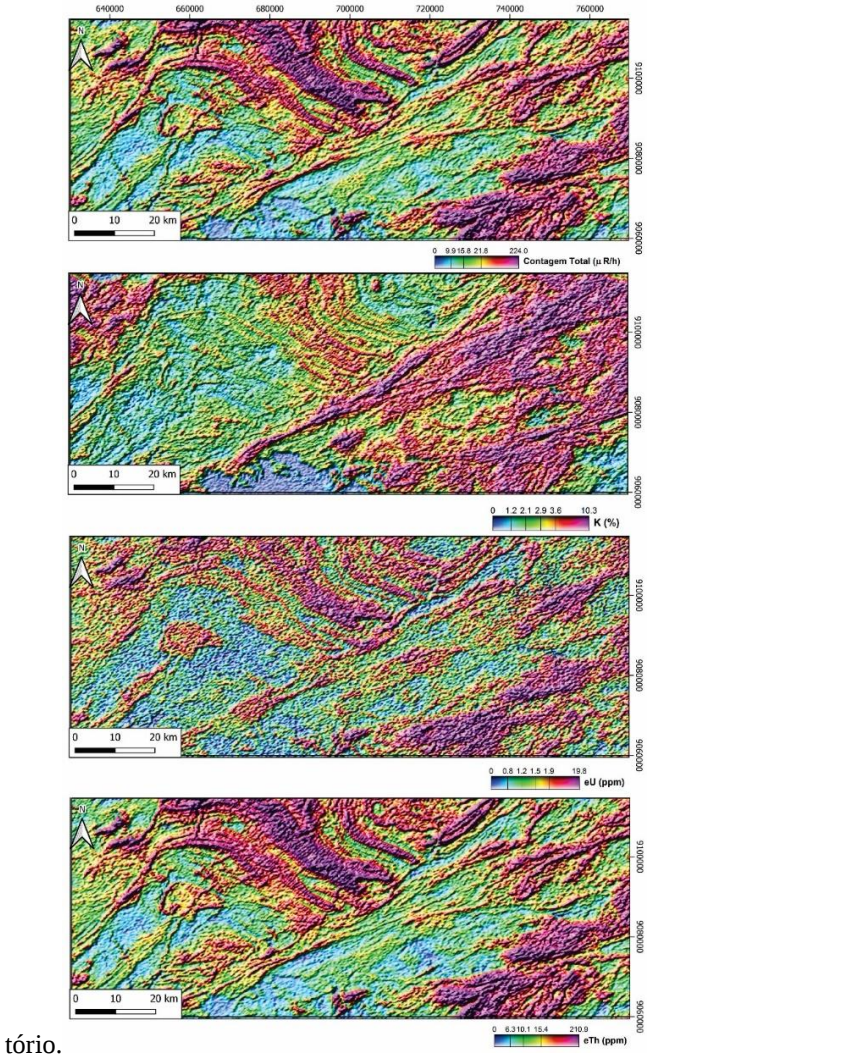
Para elaboração dos mapas geofísicos foram coletados dados desenvolvidos pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM) em conjunto com as empresas LASA e PROSPECTORS, publicados em 2010, em que reúne dados aeromagnéticos e aerogamaespectrométricos dos projetos Pernambuco-Paraíba e Pernambuco-Rio Grande do Norte. Os dados foram adquiridos com uma altura nominal de 100 metros acima do nível do mar, com linhas de voo N-S com espaçamento de 500 metros, e linhas de controle E-W de 10 quilômetros. O intervalo de aquisição foi de 1 s para dados de gamaespectrometria e 0,1 s para dados de magnetometria (CPRM, 2010). O processamento dos dados se deu no software *Oasis Montaj* 9.9, onde foi utilizado o método bi-direcional (BIGRID) para os dados magnéticos e de curvatura mínima para os dados de gamaespectrometria, e para ambos, a interpolação foi de célula quadrada com 125 metros.

Assim, foram gerados os seguintes mapas gamaespectrométricos: potássio (K), equivalente tório (eTh), equivalente urânio (eU), contagem total (Figura 3.2) e de composição ternária de falsa-cor (CMY – Ciano, Magenta e Amarelo; Figura 4.3). Estes mapas foram interpretados em conjunto com mapa topográfico de satélite gerado por SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*; Figura 3.3), que permitiu a integração das variações composicionais entre as unidades geológicas. Os mapas magnetométricos foram gerados a partir do mapa de anomalia magnética (Figura 4.4), onde foram aplicados diversos filtros: derivada horizontal total (Figura 4.4), primeira derivada vertical (Figura 4.5), e derivada *tilt* (Figura 4.5). Os filtros são utilizados objetivando a melhoria entre os limites e contatos geológicos, dos quais ficam coerentes com os limites magnéticos exibido pelos corpos (Isles e Rankin, 2013).

O mapa geofísico da deconvolução de Euler (Figura 4.8) foi gerado a partir dos dados magnéticos, onde foram considerados os seguintes parâmetros: índice estrutural de 1 e janela de 1250 m. Este mapa é utilizado, geralmente, por localizar topos de estruturas regionais resultando em um norteamento para estipular as profundidades de fontes magnéticas residuais (Reid et al., 1990).

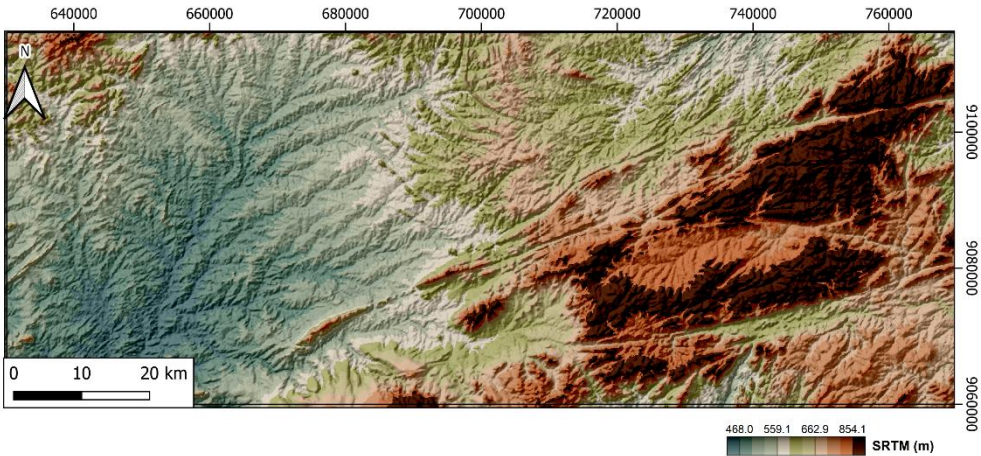
Nas interpretações dos dados geofísicos gamaespectrométricos e geração do mapa de domínios radiométricos (Figura 4.3), utilizou-se de valores pré-estabelecidos para as intensidades dos três radioelementos, de acordo com as falsas-cores, onde intensidades altas recebem o valor igual a 3, intensidades intermediárias recebem o valor igual a 2, e intensidades baixas recebem o valor igual a 1. Na interpretação dos dados magnéticos foi utilizado o critério visual e de sombreamento de grandes feições lineares, separadas em dois grupos: primeira ordem (>15 km) e segunda ordem (≤ 15 km). Para a geração do mapa de domínios magnéticos (Figura 4.6) e o diagrama de rosetas (Figura 4.7), foi utilizado como base o mapa de primeira derivada vertical, onde os domínios magnéticos foram plotados, estes foram definidos a partir de comportamentos semelhantes das linhas de segunda ordem que foram traçadas como retas. Assim, foram retirados os dados de rotação (em ângulo) e comprimento (em metros) no *software* ArcMap 10.8, a partir daí, foram gerados os diagramas de roseta no *software* Grapher.

Figura 3.1. Mapas de contagem total (CT) e dos canais de potássio (K), equivalente urânio (eU) e equivalente



Fonte: Da autora (2024).

Figura 3.2. Mapa de SRTM.



Fonte: Da autora (2024).

Foram realizadas 3 etapas de campo das quais foram essenciais para a coleta dos dados estruturais, composição mineralógica e mapeamento das ocorrências de asbesto compilados neste trabalho. Os dados estruturais foram coletados em 22 pontos (Tabela 3.1), onde foram medidas 116 lineações e 386 foliações, estas foram agrupadas de acordo com a sua localização, das quais subdividiram-se em: Domínio do Sistema de Cisalhamento Congo-Cruzeiro do Nordeste, Domínio do Terreno Alto Moxotó e Domínio do Terreno Rio Capibaribe.

Na interpretação estrutural, foram utilizados os *softwares* ArcMap 10.8 e o *OpenStereo* para definir os estereogramas de lineações e foliações (Figura 4.9).

Tabela 3.1. Tabela de dados estruturais utilizados no Artigo I para gerar a Figura 4.9.

X	Y	Ponto	Foliação	Lineação	Domínio Estrutural
690272	9077456	DG17	16	10	Domínio do Sistema de Cisalhamento Congo-Cruzeiro do Nordeste
690373	9080338	DG18	10		Domínio do Sistema de Cisalhamento Congo-Cruzeiro do Nordeste
690446	9082814	DG19	6		Domínio do Sistema de Cisalhamento Congo-Cruzeiro do Nordeste
690699	9089870	DG20	6	4	Domínio do Terreno Alto Moxotó
691097	9097353	DG21	7	3	Domínio do Terreno Alto Moxotó
691079	9097054	DG22	7	2	Domínio do Terreno Alto Moxotó
694939	9069733	DG23	5		Domínio do Terreno Rio Capibaribe
671937	9094004	DG29	41	15	Domínio do Terreno Alto Moxotó
668970	9099093	DG30	22		Domínio do Terreno Alto Moxotó
718496	9099001	DG31	20	3	Domínio do Sistema de Cisalhamento Congo-Cruzeiro do Nordeste
719449	9095362	DG32	11	4	Domínio do Sistema de Cisalhamento Congo-Cruzeiro do Nordeste
721653	9089808	DG33	7		Domínio do Terreno Rio Capibaribe
724641	9083180	DG34	20		Domínio do Terreno Rio Capibaribe
738675	9077187	DG35	11	4	Domínio do Terreno Rio Capibaribe
706891	9075168	DG36	39	3	Domínio do Terreno Rio Capibaribe
703234	9079196	DG37	38	7	Domínio do Sistema de Cisalhamento Congo-Cruzeiro do Nordeste
702116	9082975	DG38	19		Domínio do Sistema de Cisalhamento Congo-Cruzeiro do Nordeste
722390	9098421	DG39	20	8	Domínio do Sistema de Cisalhamento Congo-Cruzeiro do Nordeste
733373	9102474	DG40	12	9	Domínio do Terreno Rio Capibaribe
739272	9101797	DG41	34	13	Domínio do Terreno Rio Capibaribe
740651	9103783	DG42	19	28	Domínio do Terreno Rio Capibaribe
751247	9102102	DG43	16	3	Domínio do Terreno Rio Capibaribe

Fonte: Da Autora (2024).

4 ARTIGO I - CRUSTAL ARCHITECTURE OF NEOPROTEROZOIC TERRANES OF WESTERN GONDWANA REVEALED BY INTEGRATED GEOPHYSICAL AND STRUCTURAL DATA ON THE EASTERN BORBOREMA PROVINCE, NE BRAZIL

Published on Journal of South American Earth Sciences

Volume 127, July 2023, 104375

Received 16 December 2022, Revised 25 April 2023, Accepted 25 April 2023, Available online 29 April 2023, Version of Record 3 May 2023

Glenda Lira Santos ^{a,*}, Lauro Cézar M. de Lira Santos ^a, Roberta M. Vidotti ^b, Peter A. Cawood ^c, Gustavo Viegas ^b, Gláucia Queiroga ^d

^aDepartment of Geology, Federal University of Pernambuco, Brazil

^bGeoscience Institute, University of Brasília, Brazil

^cSchool of Earth, Atmosphere & Environment, Monash University, Melbourne, Australia

^dDepartment of Geology, Federal University of de Ouro Preto, Brazil

*Corresponding author: Glenda Lira Santos

<https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104375>

Abstract

The deformation processes (e.g. accretionary or intraplate) occurring within the Borborema Province have been widely discussed, however the eastern part of the central subprovince lacks further investigation in such aspect. In this contribution, we present integrated airborne gamma ray and magnetometric geophysical data, as well as meso- and microstructural markers of the Archean-Paleoproterozoic Alto Moxotó and Neoproterozoic Rio Capibaribe terrains (central Borborema Province), providing evidence for hidden accretionary episodes in the region. Fourteen radiometric and ten magnetic domains were described and fitted with most of the geological units and mapped structures, suggesting geological contrasts between the studied terrains. For instance, the Alto Moxotó terrain presents high-to-medium eTh and eU radiometric

signatures, spatially distributed along folded geometry, whereas the lithospheric record of the Rio Capibaribe terrain is characterized by K (%) enrichment and a dominant NE-SW sheared crust. In addition, the obtained Euler solutions show good correlations with the main structures and delineated shallow to intermediate sources of the Congo-Cruzeiro do Nordeste strike-slip shear zone system, the proposed structural boundary. This large set of shear zones are characterized by large mylonitic corridors with characteristic vertical foliation planes with moderately-plunging mineral lineations. Associated microstructures include bulging, subgrain rotation and recrystallization that, in association with the well-developed S–C fabrics and myrmekites indicate deformation at moderate temperature values ($\sim 400\text{--}500\text{ }^{\circ}\text{C}$). Also, conspicuous fracture networks seen in plagioclase grains demonstrate that deformation also took place at the later developed brittle-ductile transition. Hence, the described contrasting rock ages and nature, geophysical signatures and deformational patterns is herein interpreted as the result of crustal agglutination during the Neoproterozoic, in which the Congo-Cruzeiro do Nordeste shear zone system would represent relics of a terrane boundary developed during the assembly of western Gondwana.

Keywords: Borborema Province, Rio Capibaribe terrane, Alto Moxotó terrane, aeromagnetometry, structural geology, accretionary orogenesis.

INTRODUCTION

Orogenic belts are fundamental subdivisions of the Earth's crust (e.g., Cawood et al., 2022) in which deformation results in a complex framework of folds, thrust faults, and shear zones. Accretionary or Cordilleran orogens include an array of assembled lithospheric fragments emplaced during convergent plate motions either in oceanic or continental settings (Cawood et al., 2009 and references therein). Modern accretionary orogens are mostly enclosed along the circum-Pacific region, and constitute major sites of crustal growth on Earth (e.g., Beltrando et al., 2007; Cawood and Buchan 2007; Kelemen and Behn, 2016; Wu et al., 2021).

In western Gondwana, well-known examples of accretionary margins include the Neoproterozoic-Paleozoic Terra Australis Orogen that developed on the periphery of Gondwana (e.g., Cawood et al., 2011; Oríolo et al., 2021). However, the interior orogenic belts of Gondwana are still poorly understood, being characterized by variable, and contrasting orogenic styles, including evidence for the development of accretionary (e.g., Heilbron et al.,

2010) and collisional orogens (e.g., Ganade de Araújo et al., 2021). Nevertheless, evidence in favor of intracontinental deformation is also discussed in strongly reworked domains (e.g., Meira et al., 2015). Most of these orogens are interpreted as the result of convergent episodes between Archean and Paleoproterozoic cratons, microcontinents, and terranes during the Brasiliano-Pan African Orogeny (650-550 Ma; Almeida et al., 1981; Black et al., 1994; Brito Neves et al., 2000; Caxito et al., 2020a; Santos et al., 2022).

Within the Brazilian orogenic belts, evidence of accretionary and collisional episodes has been widely documented over the last twenty years (Brito Neves et al., 2014 and references therein) in several regions, usually marked by suture zones that crosscut both South American and African continents (Fig. 1a; e.g., Cordani et al., 2013; Houketchang Bouyo et al., 2015; Heilbron et al., 2020; Caxito et al., 2021; Santos et al., 2022a). Although relics of eclogites, ophiolite slivers and preserved magmatic arcs constrain the main evidence of ancient accretionary and/or collisional margins, as in the case of the Goiás-Pharusian (e.g., Kröner and Cordani 2003) and Adamastor (e.g., Amaral et al., 2020) ocean closures, alternative models have challenged the existence of Neoproterozoic oceanic realms (Fossen et al., 2021; Neves et al., 2021), implying that the models for the crustal evolution of the internal orogens of western Gondwana remain contentious.

Integrated high spatial-resolution airborne geophysical data and meso- to microscale structural analysis have provided important insights on the evolution of various orogenic belts from the interior of western Gondwana (e.g., Alkmin et al., 2006; Viola et al., 2008; Corrigan et al., 2009; Chala et al., 2015; Stein et al., 2017; Mbang et al., 2018). In many cases, this approach was successfully applied to untangle the role of accretionary episodes both in South American terranes (e.g., Castro and Ferreira, 2015; Santos et al., 2017b; Almeida et al., 2021, 2022), and their African counterparts (e.g., Miensoopust et al., 2011; Jessel et al., 2016; Zouaghi et al., 2020; Araïbia et al., 2022).

Occupying most of NE Brazil, the Borborema Province represents one of the most deformed crustal segments within the interior of Gondwana, due to its dense network of ductile shear zones that were mostly active during at ca. 560 Ma (e.g., Vauchez et al., 1995; Viegas et al., 2014, 2021, 2022; Castellan et al., 2020; Fonseca et al., 2020; Neves et al., 2021). In this region, new-released airborne geophysical data has been used to study previously described geological domains and possible terrane boundaries (Pedrosa Jr et al., 2014; Correa et al., 2016; Santos et al., 2021), providing insights on the tracking of deep-seated structures (e.g., Araújo Neto et al.,

2018; Huhn et al., 2018; Pereira et al., 2019) or improving regional tectonic interpretations (e.g., Oliveira and Medeiros, 2018). However, in the central portion of the province, few studies have been conducted to explore the geophysical and structural features of the possible tectonostratigraphic terranes that might have agglutinated during the early Neoproterozoic to Cambrian (see Santos and Caxito, 2021 for details). This region is unique, since it shows direct crustal linkage between South America and African orogenic belts through Nigeria and Cameroon, including the geometric connection between major structures (Caxito et al., 2020a and references therein).

In this contribution, we present the first integrated investigation of airborne magnetometric, gamma-spectrometric, and field structural data of the eastern portion of the province, a strongly deformed area in which the tectonic evolution is complex due to the long-lived record of magmatic, metamorphic, and deformation events (e.g., Brito Neves et al., 2013). Although the region is considered to include terrane boundaries (e.g., Santos and Medeiros 1999), the nature of regional structures, geophysical contrasts, and stratigraphic relationships is critical in deciphering the role of accretionary episodes in this sector of western Gondwana. Therefore, our results contribute to a better understanding of the tectonothermal evolution of terrane boundaries during different orogenic episodes through the Neoproterozoic.

GEOLOGICAL SETTING

Borborema Province

The Borborema Province (*sensu* Almeida et al., 1981) is part of a succession of Neoproterozoic orogenic belts formed by convergence between the São Francisco-Congo and Amazonia-São Luis-West Africa paleoplates during the assembly of Gondwana (Figure 4.1a). The final configuration of this province is marked by the Brasiliano-Pan African Orogeny (ca. 650-5450 Ma; Brito Neves et al., 2020) and comprises a complex set of highly deformed Paleoproterozoic basement units, including local Archean nuclei (e.g., Dantas et al., 2013; Costa et al., 2015; Neves et al., 2015; Santos et al., 2022a) that are bounded or interleaved with early to late Neoproterozoic domains (Van Schmus et al., 2003; Neves et al., 2009; Caxito et al., 2014, 2020; Lima et al., 2019; Santos et al., 2019). Several intrusive granitic batholiths and volcanic sequences are widely exposed as remnants, at least in part, of Ediacaran continental magmatic arcs (e.g., Brito Neves et al., 2016; Sial and Ferreira, 2016; Santos et al., 2020).

The regional scale E-W Pernambuco and Patos dextral shear zones divide the Borborema Province into Northern, Transversal (or Central), and Southern subprovinces (Figure 4.1b; Van Schmus et al., 1995, 2011). The Northern subprovince is mainly composed of Archean and Paleoproterozoic high-grade metamorphic rocks interleaved with low- to high grade Meso-Neoproterozoic volcanosedimentary belts (de Souza et al., 2007; Ganade de Araújo et al., 2012; Dantas et al., 2013; Hollanda et al., 2015) whereas the Transversal subprovince comprises a complex mosaic of sigmoidal Paleoproterozoic and Neoproterozoic terranes/domains, named from west to east: São Pedro, Piancó-Alto Brígida, Alto Pajeú, Alto Moxotó and Rio Capibaribe (Brito Neves et al., 2000). The Southern subprovince comprises the Meso-Neoproterozoic Pernambuco-Alagoas superterrane and the Rio Preto, Riacho do Pontal, and Sergipano Neoproterozoic volcanosedimentary belts that surround the São Francisco craton (Oliveira et al., 2010; Caxito et al., 2016; Brito Neves and Silva Filho, 2019).

The terranes of the Transversal subprovince (Figure 4.1c) are characterized by several NE-SW regional-scale shear zones developed at variable crustal levels, resulting in a regional “ribbon like” structural framework (Rodrigues and Brito Neves, 2008; Santos et al., 2017b; Santos et al., 2021). The studied area occupies the eastern part of this subprovince, comprising a complex network of sinuous thrust- and strike-slip shear zones, including the Congo-Cruzeiro do Nordeste shear zone system, a possible tectonic boundary between the Neoproterozoic Rio Capibaribe and the Archean-Paleoproterozoic Alto Moxotó terranes.

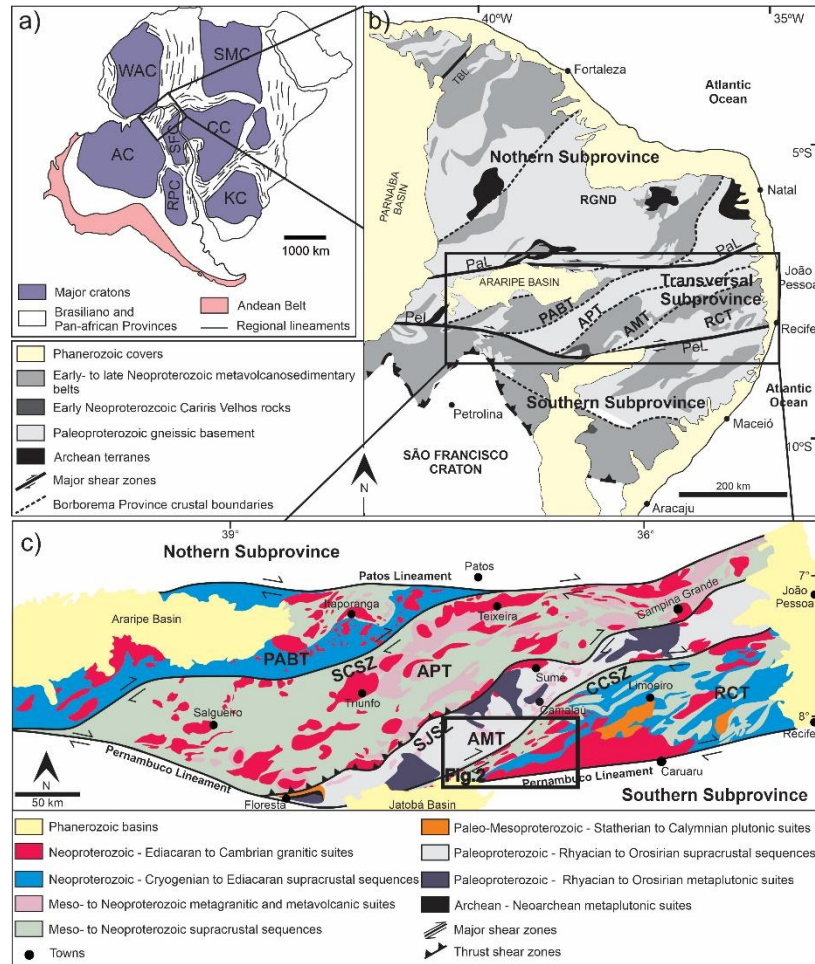


Figure 4.1. a) Main crustal blocks and Neoproterozoic orogenic belts in a pre-drift reconstruction of Northeast South America and West Africa in Western Gondwana context. b) Tectonic setting of the Borborema Province subdivided by the Patos Lineament (PaL) and Pernambuco Lineament (PeL) into Northern, Transversal and Southern subprovinces. c) Simplified geological map from the Transversal subprovince with indication of the studied area (black open square). Major cratons: AC – Amazonian, RPC – Rio de la Plata, SFC – São Francisco, WAC – West Africa, CC – Congo Craton, KC – Kalahari and SMC – Sahara. Terranes: PABT – Piancó Alto Brígida, APT – Alto Pajeú, AMT – Alto Moxotó, RCT – Rio Capibaribe. Major shear zones: SCSZ – Serra do Cabloco, SJSZ – Serra de Jabitacá, CCSZ – Congo-Cruzeiro do Nordeste.

The Rio Capibaribe terrane (RCT) comprises an early Paleoproterozoic (ca. 2.1 Ga) basement formed by metagranite and banded orthogneiss (Brito Neves et al., 2013 and references therein) crosscut by mafic-ultramafic and fine-grained late Paleoproterozoic orthogneisses of within-pate affinities (ca. 1.7-1.6 Ga; Accioly, 2001; Sá et al., 2002; Neves et al., 2012). Early Neoproterozoic units (ca. 0.92 Ga) are represented by volcanosedimentary sequences of schist

and garnet-amphibolite that might be intruded by meta-ultramafic rocks (Accioly et al., 2010, Santos et al., 2017a). Late Neoproterozoic units within this terrane include low- to medium grade supracrustal sequences (Neves et al., 2008; Brito Neves et al., 2013) and calc-alkaline to alkaline plutonic rocks of ca. 590 Ma, emplaced along the strike-slip shear zones that crosscut the terrane in a NE-SW trend (e.g., Santos and Medeiros, 1999; Mariano et al., 2001; Neves et al., 2006). Pseudotachylites and tectonic breccias are present but not common (Miranda et al. 2020).

The Alto Moxotó terrane (AMT) contrasts with other terranes of the Transversal subprovince by its extensive well-preserved Paleoproterozoic record (Brito Neves et al., 2020 and references therein). The AMT is interpreted as a high-grade metamorphic crustal block presenting some Neoarchean TTG domains (e.g., Santos et al., 2017a) as well as widespread Rhyacian-Orosirian plutonic units including metagranites, orthogneisses, migmatites and metamafic-ultramafic sequences, interpreted as relics of ancient continental magmatic arcs (Santos et al., 2015, 2022a) and strongly migmatized Paleoproterozoic metasedimentary rocks (Santos et al., 2004). Younger rocks are scarce, except by minor occurrences of Cambrian A-type granites along its margins (e.g., Guimarães et al., 2005) as well as some occurrences of early Neoproterozoic supracrustal rocks (Neves et al., 2017).

In the study area (Figure 4.2), the Rio Capibaribe terrane is composed of Paleoproterozoic metagranite, metatonalite and orthogneiss of the Pão de Açúcar Complex (ca. 2.14 Ga; Brito Neves et al., 2013). It also includes early Neoproterozoic metavolcanosedimentary rocks of the Riacho do Tigre Complex (ca. 960 Ma; Neves et al., 2009) that are intruded by granitic to monzonitic Brasiliano-related granitoids (ca. 0.6-0.5 Ga). In this region, the Alto Moxotó terrane is characterized by ca. 2.15 Ga strongly folded metamafic and meta-ultramafic rocks, metagranite, orthogneiss, and migmatite that makes up the Floresta Complex, cropping out in the NW portion of the area. This complex is in tectonic contact via thrust shear zones with garnet-sillimanite-biotite paragneisses and schists from the Sertânia Complex, whose detrital age (i.e., Paleoproterozoic vs. Neoproterozoic) is still under discussion (see Santos et al., 2004 and Neves et al., 2017).

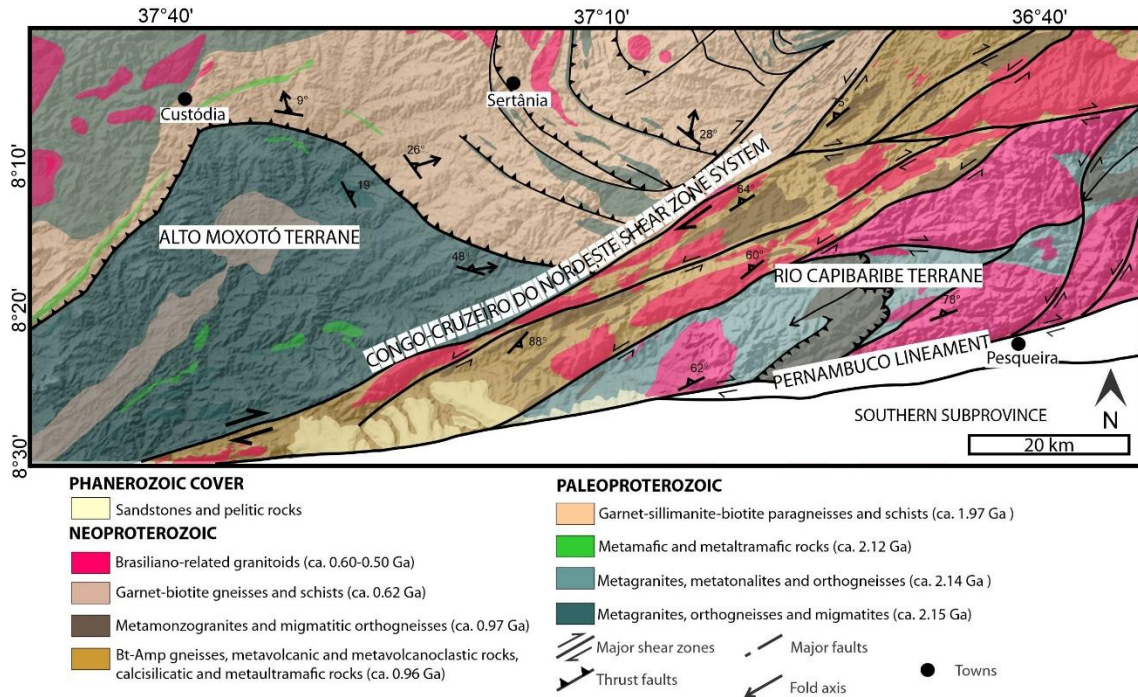


Figure 4.2. Geological map of the studied area. The Rio Capibaribe terrane is bordered by the Congo-Cruzeiro do Nordeste shear zone system and Pernambuco Lineament, which separate it from the Alto Moxotó terrane and the Southern subprovince in the south, respectively.

GEOPHYSICAL DATA

Airborne gamma-ray spectrometric and magnetic data used in this study are part of the Pernambuco-Paraíba and Paraíba-Rio Grande do Norte projects (total covered area of 286,377.07 km²) carried out in 2010 by the Geological Survey of Brazil (CPRM) in partnership with LASA and PROSPECTORS company. The acquisition characteristics are: nominal height of 100 m above ground level, N-S flight lines spaced 0.5 km, E-W control lines spaced 10 km, and sampling intervals of 1 s (gamma spectrometer) and 0.1 s (magnetometer) (CPRM, 2010). The geophysical data were processed with the Geosoft Oasis Montaj 9.9 software using the bi-directional method (BIGRID) for magnetic data and minimum curvature for gamma-spectrometric. Data interpolation for both data sets in a 125 m square cell.

The maps of potassium (K), equivalent Thorium (eTh), equivalent Uranium (eU), and Total Count (TC) as well as the ternary compositions in false color (CMY – Ciano, Magenta, and Yellow) were designed from the gamma-ray spectrometric data, which allied to the SRTM satellite imagery (Shuttle Radar Topographic Mission) allowed discriminating compositional

variations between the regional units. We used the Magnetic anomaly map (MA), First Vertical Derivative (1DV), Total Horizontal Derivative (THD), and Tilt Derivative (TDR) for the magnetic structural data interpretations. In the derivative maps, the geologic edges and contacts are enhanced making them suitable for the identification of the borders of magnetic bodies (Isles and Rankin, 2013).

RESULTS

Gamma ray spectrometric data analysis

Gamma ray airborne spectrometric maps were designed to investigate contrasts in the radioelements' distribution between the Rio Capibaribe and Alto Moxotó terranes. The three channels were used (K, eTh and eU) for prime interpretations, but greater emphasis was given to the ternary image in false color (CMY – Ciano, Magenta, and Yellow). Based on the ternary image, we have classified the radiometric domains according to the following variations: high (value 3), intermediate (value 2) and low (value 1). Fourteen radiometric domains (A to O) were identified, fitting with the major geological units due to the semiarid region with low vegetation and soil cover of the study area (Figure 4.3).

The Alto Moxotó terrane presents high-medium eTh and eU radiometric signatures, clearly differing from the higher K radiometric signatures of the Rio Capibaribe terrane. In the Rio Capibaribe terrane, the granitic intrusions occupy most of the area and therefore, the K (%) concentrations on the domains are moderate to high. The H and M domains have intermediate to elevated contents of K and eTh, but differentiate in the eU, which is higher in H and lower in L domains that can correlate to the metavolcanosedimentary units. Higher values of radioelements on the H domain probably reflect the presence of alluvial deposits, which are common in this region. High K and eU, and low eTh values from the M and F domains correspond to the basement quartz-dioritic to granodioritic orthogneisses from Pão de Açúcar Complex. Overall, high values of K and some variations in the eTh and eU that are defined by the I to O domains are displayed by the intrusive granitic suites. Low radiometric values (A domain) are correlated with the sedimentary rocks from the Phanerozoic Jatobá basin.

Within the Alto Moxotó terrane, C to E and G domains are represented by medium-to high eTh, and medium to low eU and K values that can be correlated to dioritic to granodioritic gneisses from the Paleoproterozoic basement of the Floresta Complex. D domain presents low values of K, medium eTh and high eU consistent with supracrustal sequences and, together with H

domain that have medium-to high values of the radioelements, can be correlated to schists and paragneisses of the Sertânia Complex. At the NW portion of the Alto Moxotó terrane, J, L and O domains are characterized by high K, medium-to high eU and low to high eTh, which is also attributed to granitic gneisses and metagranitic intrusions. Higher values of K, eTh and eU clearly marks the presence of alluvial deposits.

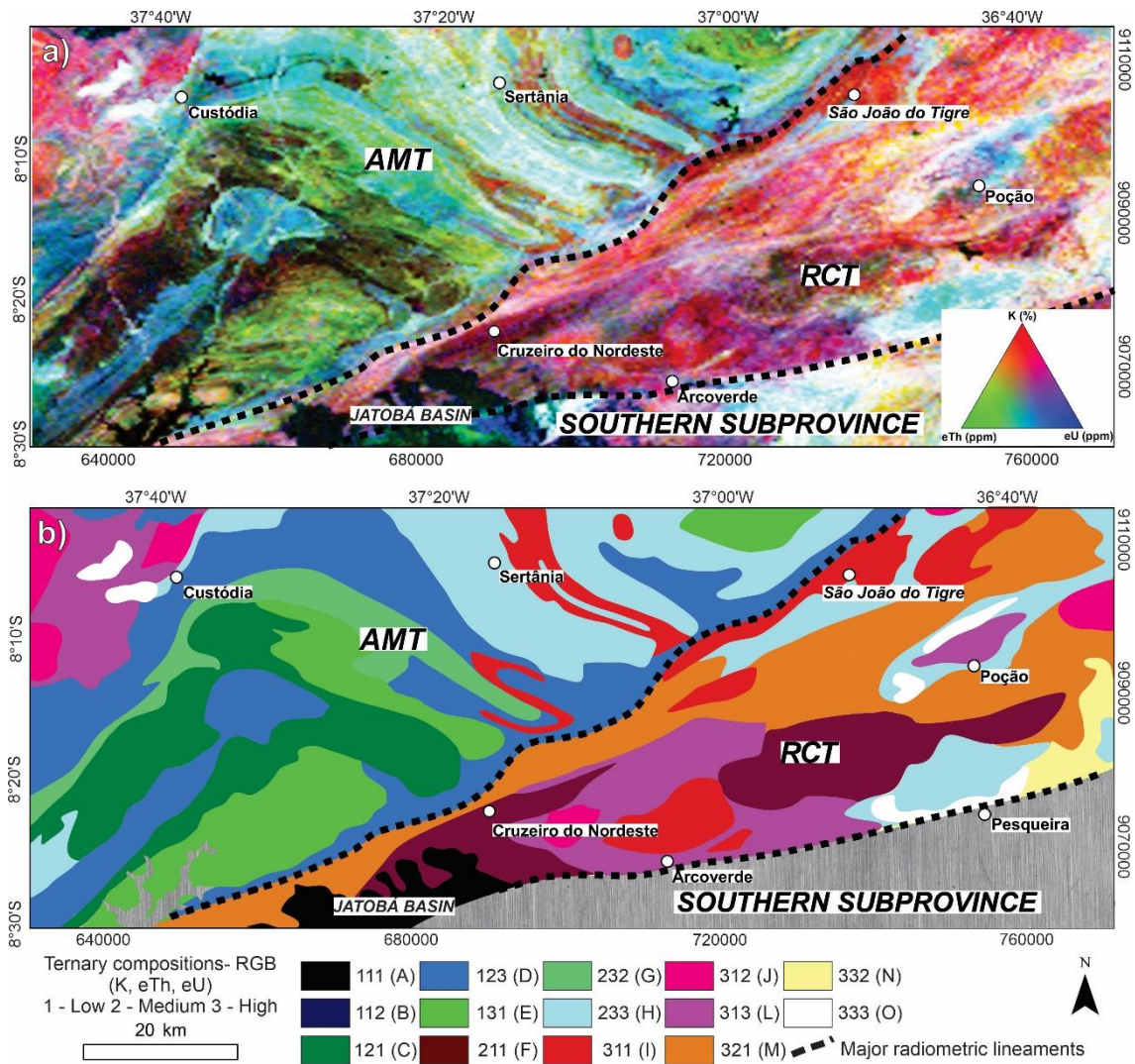


Figure 4.3. Gamma ray data analysis. a) Ternary image in false color (CMY). b) Map of the interpreted radiometric domains according to the ternary image analysis. The dashed lines represent the limits between the studied terranes defined from the geophysical interpretation. The graphic texture in the SW portion of the area represents the Poço da Cruz dam. AMT – Alto Moxotó terrane; TRC – Rio Capibaribe terrane.

Magnetic data analysis

The magnetic lineaments delineated within the study area were extracted from the Magnetic Anomaly map (Figure 4.4a) and subsequent derivative filters, including the Total Horizontal (THD), first-derivative (1VD), and tilt (Figure 4.4b and Figure 4.5). Two sets of lineaments were traced and correlated with first and second order structures. The first order lineaments include extensive (more than 15 km) magnetic lineaments that mark boundaries of both magnetic and radiometric domains, including the early proposed terrane boundaries, whereas the second order lineaments correspond to shorter lineaments mostly concentrated in the inner portions of the geophysical domains. Ten magnetic domains were identified (Figure 4.6), with fabrics parallel to the major NE-SW regional structures. In contrast, magnetic lineaments within the Alto Moxotó Terrane are characterized by close to gentle regional folds, forming a strongly sinuous pattern of magnetic lineaments (Figure 4.7).

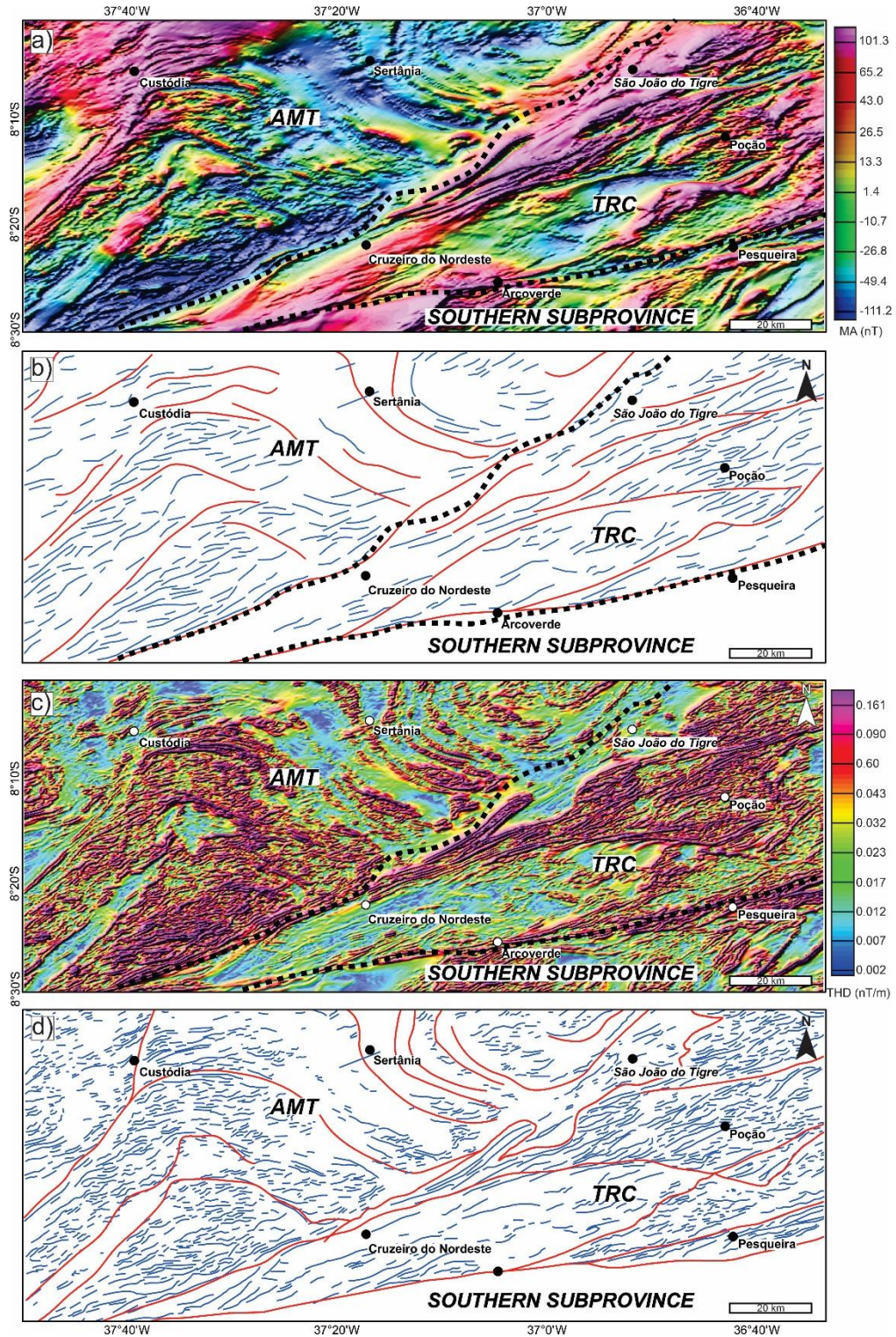


Figure 4.4. Magnetic maps: a) Magnetic anomaly and c) Total horizontal gradient. b) and d) corresponds to magnetic lineaments interpretations of a) and c), respectively. The dashed line represents the limits between the studied terranes defined from the geophysical interpretation. The graphic texture represents the Moxotó River. AMT – Alto Moxotó terrane; TRC – Rio Capibaribe terrane. Red lines – first order lineaments, blue lines – second order lineaments.

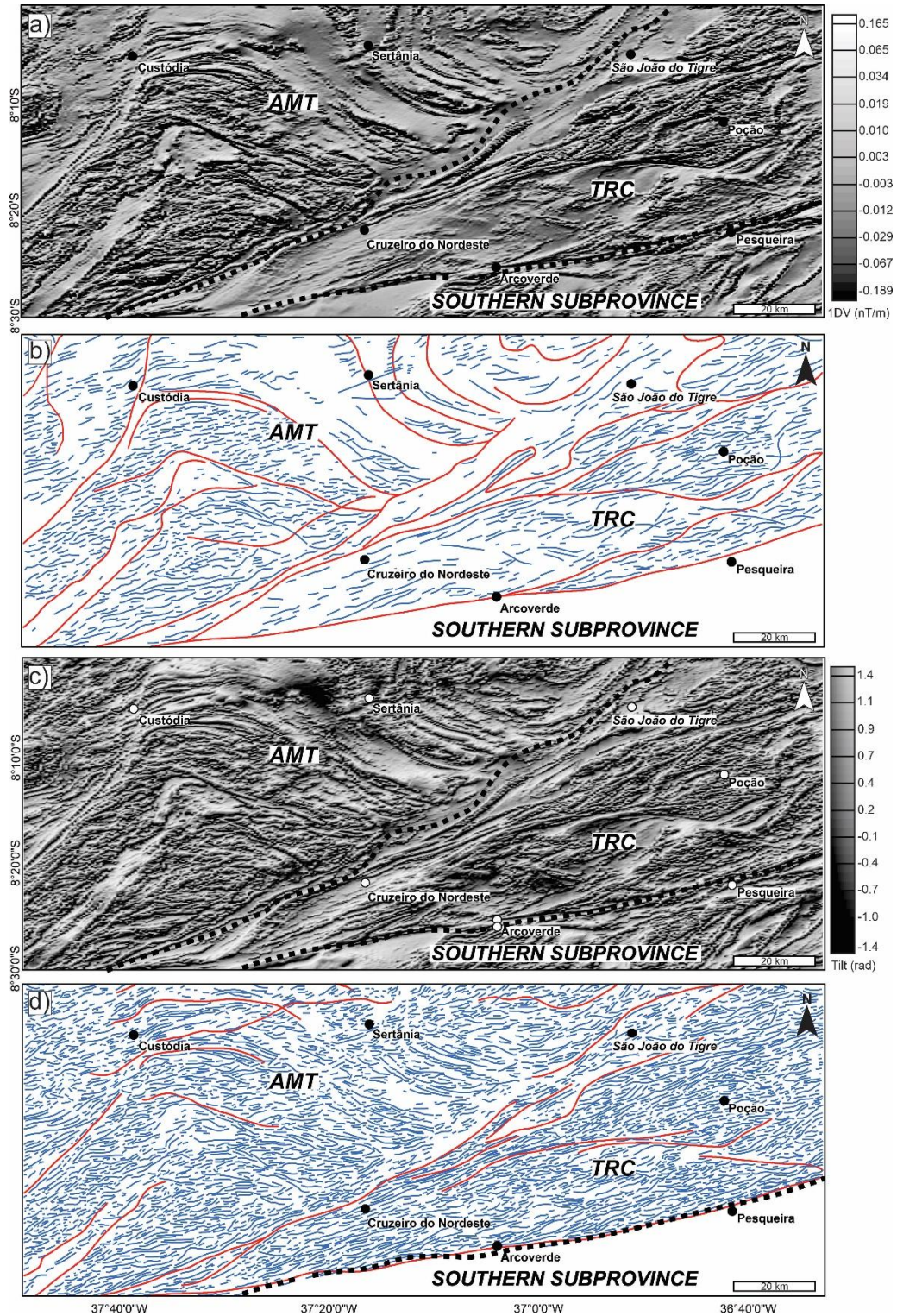


Figure 4.5. Magnetic maps: a) First derivative and c) Tilt derivative. b) and d) corresponds to magnetic lineaments interpretations of a) and b), respectively. The dashed line represents the limits between the studied terranes defined from the geophysical imagery. The graphic texture represents the Moxotó River. AMT – Alto Moxotó terrane; TRC – Rio Capibaribe terrane; Red lines – first order lineaments, blue lines – second order lineaments.

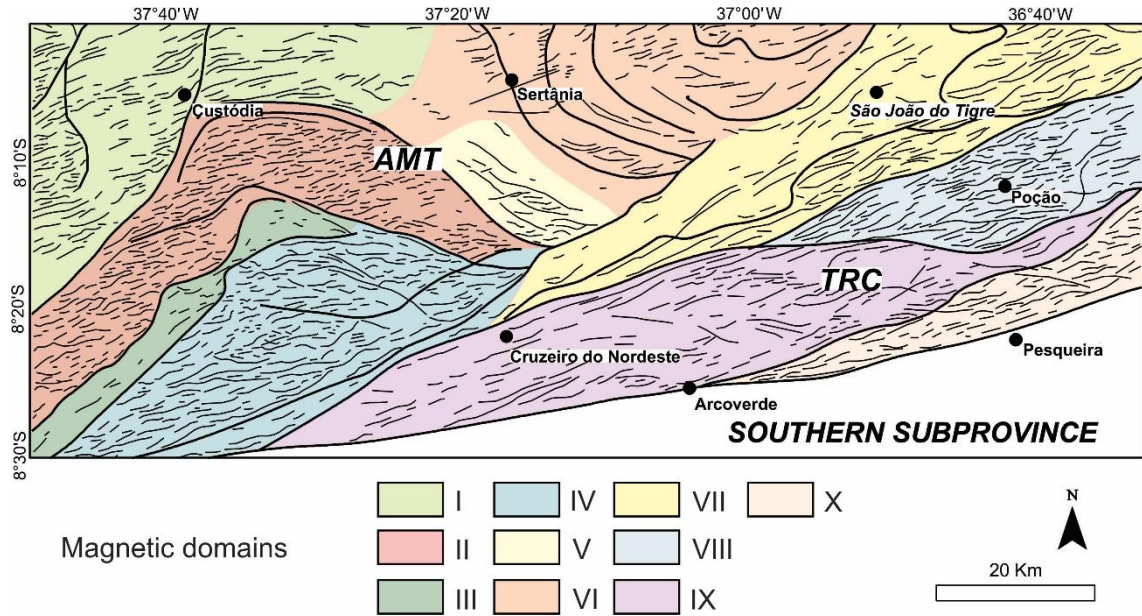


Figure 4.6. Magnetic domains with first (thick black line) and second (thin black line) order magnetic lineaments.

Magnetic domains	Terrane	Description	Magnetic domains	Terrane	Description
Domain I 	AMT	Display short to medium ENE-WSW lineaments with high magnetic anomaly (66.2-101.3 nT).	Domain VI 	AMT	Present a preferred ENE-WSW trending lineament with low magnetic values (-49.4 to -25.8 nT) and intermediate gradients (0.023-0.043 nT/m).
Domain II 	AMT	Irregular magnetic relief with high gradient (0.147-0.253 nT/m). Major ENE-WSW and minor ENE-WSW occur as short lineaments, and NE-SW and WNW-ESE as longer lineaments.	Domain VII 	AMT/ RCT	Slightly irregular magnetic relief and high magnetic anomalies values, ranging from 66.2 to 101.3 nT and shows longer to medium NE-SW lineaments.
Domain III 	AMT	Located at SW from the AMT with irregular and sparse NE-SW lineaments and low gradients in the AS3D (0.02-0.039 nT/m) and GHT (0.007-0.023 nT/m).	Domain VIII 	RCT	Display a rugged magnetic pattern with high gradients in GHT (0.090 - 0.161 nT/m) and in AS3D (0.147-0.253 nT/m) with shorter to medium ENE-WSW with some NNE-SSW lineaments.
Domain IV 	AMT	Rugged magnetic pattern with preferred NE-SW lineaments and longer curvilinear components associated to high gradients in GHT (0.090-0.161 nT/m) and AS3D (0.147-0.253 nT/m).	Domain IX 	RCT	Comprises an ellipsoidal shape with medium to long NE-SW associated to intermediate gradients (0.012-0.002 nT/m) and low to intermediate anomalies (-49.4 - 1.4 nT).
Domain V 	AMT	Present shorter to medium NW lineaments with some WNW-ESE minor lineaments with low magnetic values (-49.4 to -25.8 nT).	Domain X 	RCT	Displays a major NE-SW and minor NW-SE lineament with intermediate to high anomalies (1.4-66.2 nT) and intermediate gradients (0.017-0.043 nT/m).

Figure 4.7 – Schematic board of magnetic lineaments interpretations. n – number of the magnetic lineaments identified, AMT – Alto Moxotó terrane, RCT – Rio Capibaribe terrane.

Euler deconvolution

We applied Euler deconvolution to further enhance the morphology of regional structures as well as to constrain depth estimations of magnetometric residual sources (e.g., Thompson, 1982; Barbosa and Silva, 2005). For the studied area, we have chosen a structural index of 1

and an associated window of 1250 m (Reid et al., 1990). Figure 4.8 shows five identified categories for intervals of the Euler solutions' depth: i) under 250 m, ii) between 100 and 500 m, iii) between 500 and 1000 m, iv) between 1000 and 2000 and iv) above 2000 m.

The Euler solutions correlate with the interpreted magnetic lineaments in all filters. The shallow depths solutions (< 250 m) are scattered in both terranes and aligned with the main shear zones. The solutions between 250 – 500 m depths concentrate in the shear zones from the RCT, and also with thrust faults and geological contacts from the AMT. Solutions' depth ranging from 500 to 1000 occur in a less extent along major NE-SW and ENE-WSW shear zones from the RCT. The deepest categories of Euler solutions (> 1000 m) occur together as dispersed clouds associated with the Jatobá Basin, in the north area of the AMT and in the central area of the RCT, and due to the window size chosen, these depths are unreliable (Reid et al, 2014).

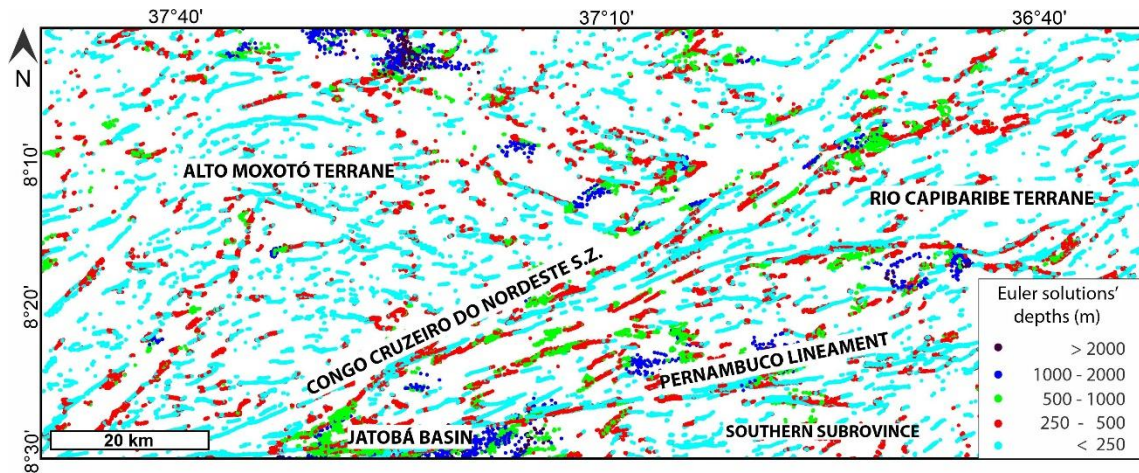


Figure 4.8. Euler deconvolution map for the structural index of 1.

STRUCTURAL ANALYSIS

Regional scale foliation traces and lineation directions suggest orientation contrasts between both Alto Moxotó and Rio Capibaribe terranes (Figure 4.9). The anastomosing system given by NE-SW shear zones in the Transversal subprovince is reproduced in the Rio Capibaribe terrane, mostly controlled by the NE-SW and ENE-WSW transcurrent shear zones. On the other hand, the Alto Moxotó terrane is characterized by a folded geometric pattern that is marked along the Rio da Barra thrust shear zone, with the proposed boundary between both terranes being marked by the Congo-Cruzeiro do Nordeste strike-slip shear zone system.

NW-SE oriented profiles along the major structures of the terrane have revealed three main structural domains: (I) inner Alto Moxotó terrane, (II) inner Rio Capibaribe terrane, and (III) Congo-Cruzeiro do Nordeste shear zone system.

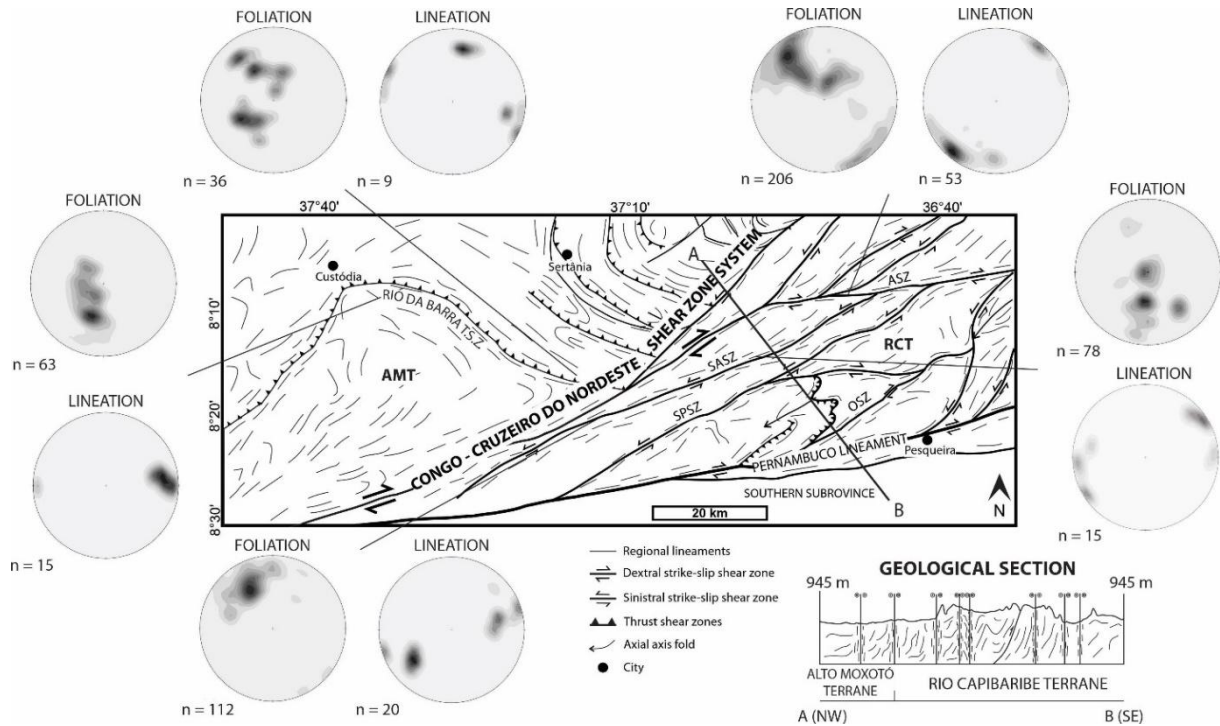


Figure 4.9. Structural map of the study area with schematic geological section and synthetic contour plots stereograms (lower hemisphere Schmidt projections). SAZS – Santo André shear zone; SPSZ – Serra do Pinheiro shear zone; ASZ – Apolinário shear zone; OSZ – Ororobá shear zone. The structural domain I is within the AMT, separated from the Domain III that is within the RCT, by the Congo-Cruzeiro do Nordeste shear system, which is the Domain II.

Domain I: Alto Moxotó terrane

Within the Alto Moxotó terrane the occurrence of gentle to open folds in the migmatized banded gneisses is widespread (Figure 4.10a). The migmatitic bands are at millimeter to centimeter scale, exhibiting local melt pockets, also including patchy, dilatant and schollen structures. Thick layers of microlithic quartz-feldspar domains occur interleaved with hornblende-biotite-bearing bands forming stromatic features that evolve to schlieren structures (Figure 4.10b). In addition, the folded migmatites are cross-cut by oblique vein-like structures that are common in the central area of this terrane, both in metaplutonic and metasedimentary rocks.

The migmatitic fabric is progressively deformed within NW-SE-oriented and NE-SW shortening strain fields, resulting in sheet to flake-like geometries of the intrusive metagranites and orthogneisses, especially in the southern portion of the terrane. Corresponding structures are mostly related to the Rio da Barra thrust shear zone that forms an approximately 18 km wide folded coarse-grained mylonitic belt, which marks the boundary between supracrustal sequences and the strongly migmatized metagranites within the Alto Moxotó Terrane (Figure 4.10c).

Near this belt, the outcropping rocks display gentle to moderate NNW-dipping foliation planes preserved in garnet-biotite mylonites, with associated steep mineral stretching lineation (65-70°) composed of elongated and strongly deformed biotite-amphibole clots (Figure 4.10d). Kinematic criteria are widespread including S-C surfaces and shear-band foliations which, in association with the combined foliation-lineation geometry, suggests top-to-the-south mass transport.

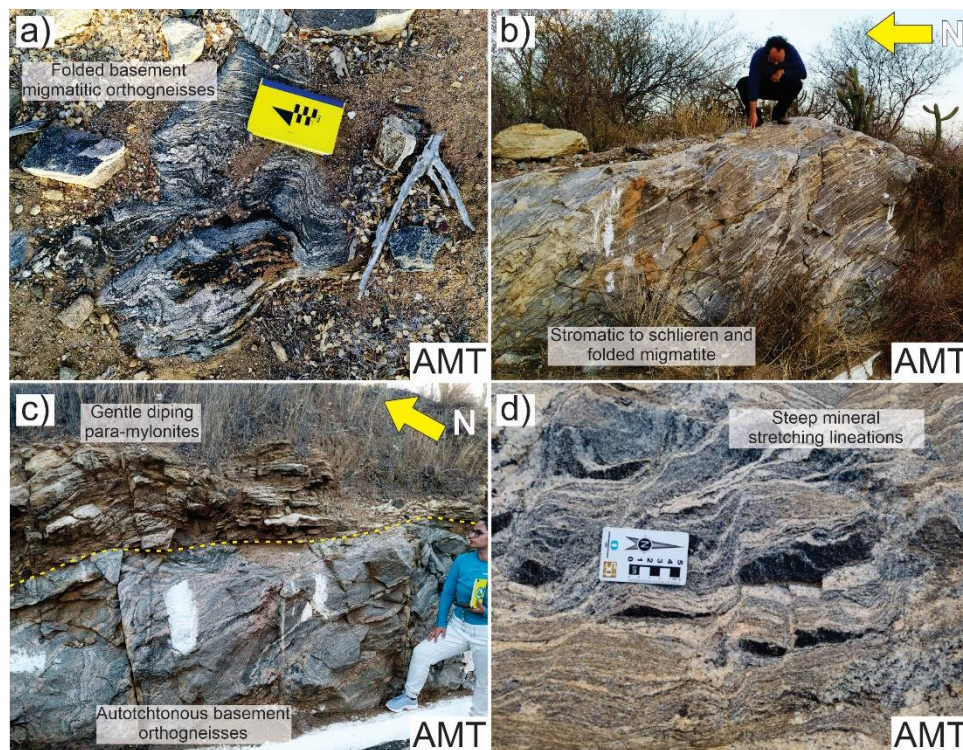


Figure 4.10. Mesoscopic structural features of the Alto Moxotó terrane. a) Folded migmatitic orthogneiss exhibiting sinuous distribution of mesocratic bands from the Floresta Complex. b) Vein-like structures from the migmatized orthogneiss of the Floresta Complex. c) Thrust tectonic contact between migmatized garnet-biotite paragneisses from the Sertânia Complex which overlaps the migmatized and folded migmatitic orthogneiss from the Floresta Complex.

d) Steep mineral stretching lineation composed of aligned and disrupted biotite-amphibole clots.

Domain II: Rio Capibaribe terrane

The Rio Capibaribe terrane displays a dominant fabric of NE trending strike-slip shear zones. These structures are observed in several mylonites to ultramylonites formed in the border of the intrusive metaplutonic rocks and in the basement orthogneisses. The described mosaic-like shape seen in the Transversal Subprovince (Figure 4.1) is reflected by the systematic occurrence of parallel shear zones, that in the study area include the Santo André, Ororobá, Serra do Pinheiro and Apolinário as well as those related with the Congo-Cruzeiro do Nordeste shear zone system, resulting in an elongated “eye shape” arrangement of the regional lineaments (Figure 4.9).

In the NE region of this terrane, the shear zone framework has an ENE-WSW trend associated with proto-mylonites and mylonites cutting across metavolcanosedimentary rocks, also deforming the borders of intrusive rocks (Figure 4.11a), which results in their reshaping. They include a sub-vertical to vertical (75-90°) mylonitic foliation with NW and SE dip directions, associated with gently plunging to sub-horizontal (< 20°) mineral stretching lineations plunging to NE. Foliation planes associated with low to medium dipping angles (35-55°) and associated inclined mineral stretching lineations (35-45°) are common, especially in the areas between the transcurrent structures (Figure 4.9).

The kinematic criteria identified in all shear zones are similar and include C shear bands (Figure 4.11b), asymmetric boudins, and asymmetric σ -type feldspar porphyroclasts (Figure 4.11c and d), and are well-developed in the granitoids rocks.

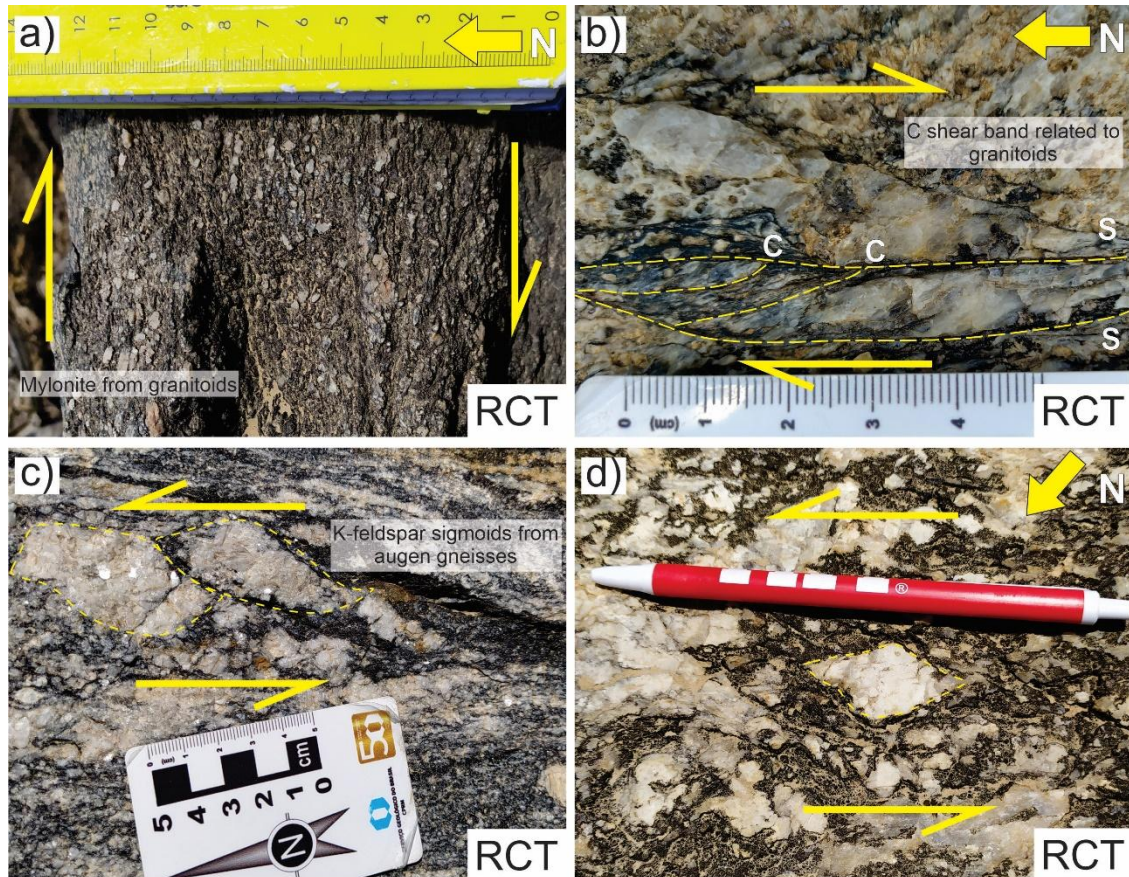


Figure 4.11. Mesoscopic structural features from the Rio Capibaribe terrane. a) Mylonitized intrusive granitoid with feldspar porphyroclasts in a biotite-amphibole matrix from the Apolinário shear zone. b) S-C foliation defined by the sigmoidal feldspar grains and the biotite matrix from the Ororobá shear zone. c) Asymmetric sigmoidal shape of granitic clast defining sinistral kinematics in the Santo André shear zone. d) Asymmetric s-type feldspar porphyroclasts in a biotite-amphibole matrix from the Santo André shear zone.

Domain III: Congo-Cruzeiro do Nordeste shear zone system

The Congo-Cruzeiro do Nordeste shear zone system marks the boundary between the Alto Moxotó and the Rio Capibaribe terranes (Santos and Medeiros, 1999). This system is composed of the NE trending Congo and the Cruzeiro do Nordeste transcurrent shear zones, which have sinistral and dextral kinematics, respectively (Neves et al., 2018). They are characterized by several occurrences of mylonitic to ultramylonitic structures in the strongly migmatized rocks from the basement of the Alto Moxotó terrane as well as supracrustal and granitic rocks within the Rio Capibaribe terrane. They exhibit vertical foliation planes, frequently dipping to SSE

and NE-trending intermediate plunging (33-46°) to subhorizontal mineral stretching lineations composed of biotite-amphibole aggregates (Figure 4.12a and b).

The Congo shear zone presents more restricted kinematic criteria with sinistral shear sense represented by s and d-porphyroclasts and intrafolial folds commonly associated with neosome portions of the metagranitic basement of the Alto Moxotó terrane (Figure 4.12c and d). Cruzeiro do Nordeste shear zone (CNSZ), kinematic criteria display a dextral shear sense and are widespread in mylonitized rocks that crop out all over its extension. Additional deformation markers include S-C foliations, shear bands, and asymmetric boudins (Figure 4.12e). Additionally, the CNSZ exhibits widespread fault breccia with mylonitic, ultramylonitic, and granitic fragments in a strongly recrystallized rock matrix, enriched in biotite, chlorite, and epidote (Figure 4.12f).

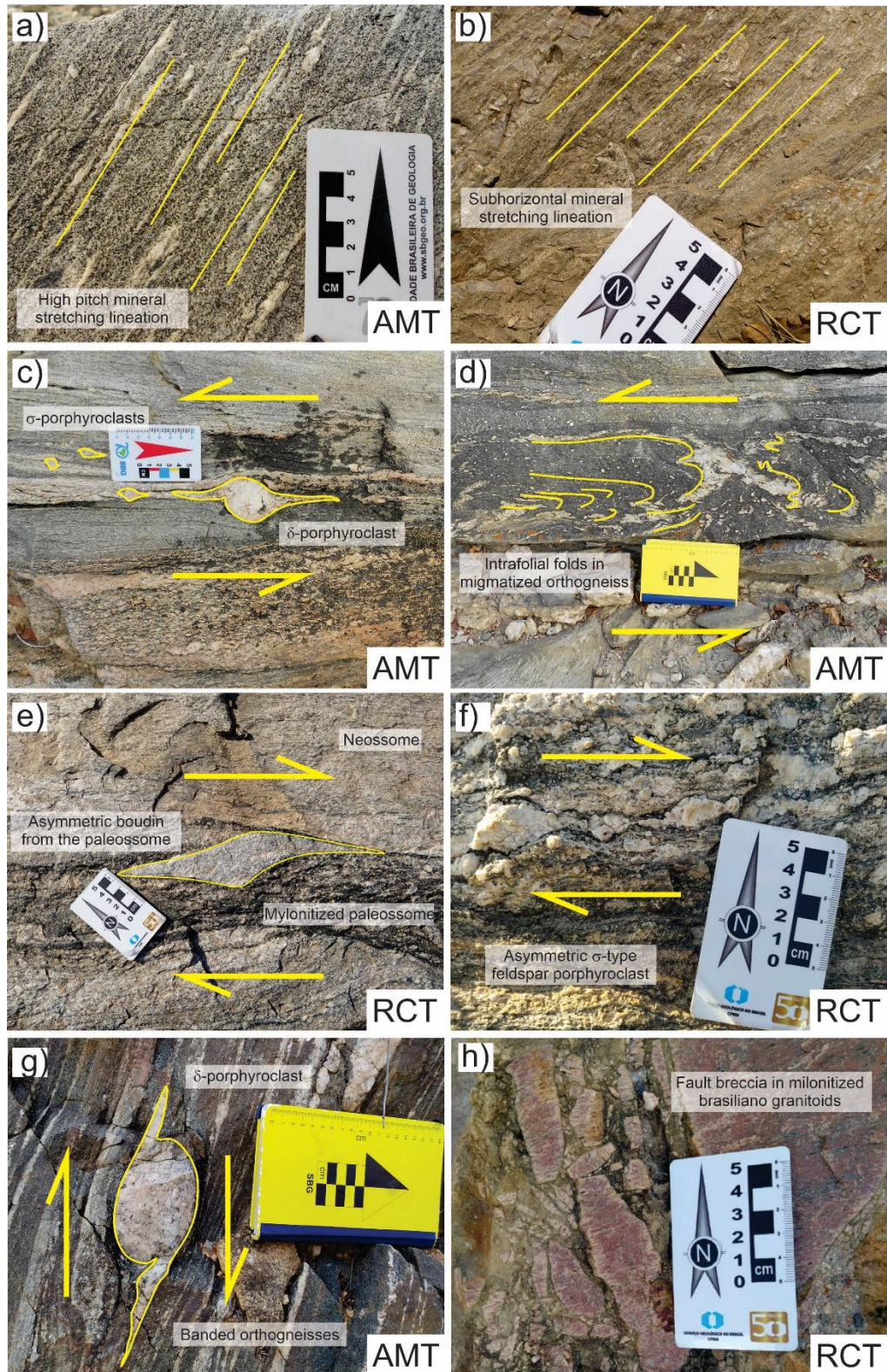


Figure 4.12. Mesoscopic structural features from the Congo-Cruzeiro do Nordeste shear zone system. a) High pitch mineral stretching lineament (33-46°) in banded orthogneiss basement of the Alto Moxotó terrane from the Congo shear zone. b) Subhorizontal mineral stretching lineation in the metavolcanosedimentary rock from the Rio Capibaribe terrane from the

Cruzeiro do Nordeste shear zone. c) s and d-porphyroclasts from the Congo shear zone defining a sinistral kinematic shear sense in the basement of the AMT. d) Intrafolial folds in the neosome from the basement of AMT affected by the Congo shear zone. e) Asymmetric boudin of the paleosome within the mylonitic band from the Cruzeiro do Nordeste shear zone. f) s-type porphyroclast of feldspar defining a dextral shear sense for the Cruzeiro do Nordeste shear zone. g) d-porphyroclast into the metagranitic basement from the AMT defined by the CNSZ. h) Fault breccia in a mylonitized granitoid from the Rio Capibaribe terrane.

Microstructures of the Congo-Cruzeiro do Nordeste shear zone system

To understand the deformational conditions of the boundary between the studied terranes, we analyzed mylonite samples collected along the Congo-Cruzeiro do Nordeste shear zone system, which are the most expressive strike-slip structures in the region crosscutting distinct types of rocks.

In mylonitized orthogneisses composed of feldspar porphyroclasts and bands of quartz and feldspar that alternate with bands of biotite, sphene, epidote, allanite, and apatite as well as minor oxide minerals (Figure 4.13a); the plagioclase and K-feldspar clasts occur as prismatic to rounded/ellipsoidal shapes and sizes varying from $> 500 \mu\text{m}$ to $\sim 4 \text{ mm}$. They are embedded within mylonitic and mica-rich layers. The plagioclase porphyroclasts (up to $\sim 4 \text{ mm}$) are poikiloblastic with rounded to elliptical shapes displaying mechanical twins and antiperthites. Myrmekite occurs locally in porphyroclasts. The porphyroclasts exhibit microfractures that crosscut the entire clast with offsets of $\sim 320 \mu\text{m}$ (Figure 4.13b); shearing in some clasts is observed, with offsets of $\sim 177 \mu\text{m}$, both suggesting a dextral shear sense at the scale of the porphyroclasts (Figure 4.13c).

Within the quartz-feldspathic bands, quartz grains occur as polycrystalline ribbons with lobate boundaries, undulose extinction, and variable sizes ranging from $51 \mu\text{m}$ to 0.3 mm . The quartz ribbons make a S-C fabric highlighting the dextral component of shear (Figure 4.13d). Quartz grains ($\geq 110 \mu\text{m}$) also occurs intermixed with feldspars clasts ($> 285 \mu\text{m}$) and heterogeneously sized lamellae of biotite ($\geq 105 \mu\text{m}$). Quartz and feldspar have rounded shapes and lobate boundaries, whereas the biotite grains have elongated shapes and are subparallel to the mylonitic foliation (Figure 4.13c).

In mylonitized granites, amphibole and feldspar porphyroclasts, with quartz ribbons and minor titanite, epidote and opaque oxides are embedded in a quartz-feldspathic matrix (Figure 4.13e); the amphibole makes up porphyroclasts ($\geq 600 \mu\text{m}$) that are deformed into sigmoid shapes given by the dextral shear sense (Figure 4.13f). The K-feldspar is the main feldspar porphyroclast ($\geq 530 \mu\text{m}$) presenting granular to sigmoidal shapes, with perthite, undulose extinction, sometimes sericitized, and fractured into smaller grains that compose the matrix (Figure 4.13g). The plagioclase grains have rounded shapes and mechanical twins, it is usually fractured in smaller grains composing the matrix. Quartz ribbons are formed by polycrystalline elongated quartz grains, some grains exhibit small protuberances in their tips, indicating the presence of fine-grained bulges towards the neighboring grains (Figure 4.13h). The matrix consists of fractured grains of K-feldspar ($\geq 75 \mu\text{m}$), and plagioclase ($\geq 70 \mu\text{m}$), and minor grains of quartz ($\geq 40 \mu\text{m}$).

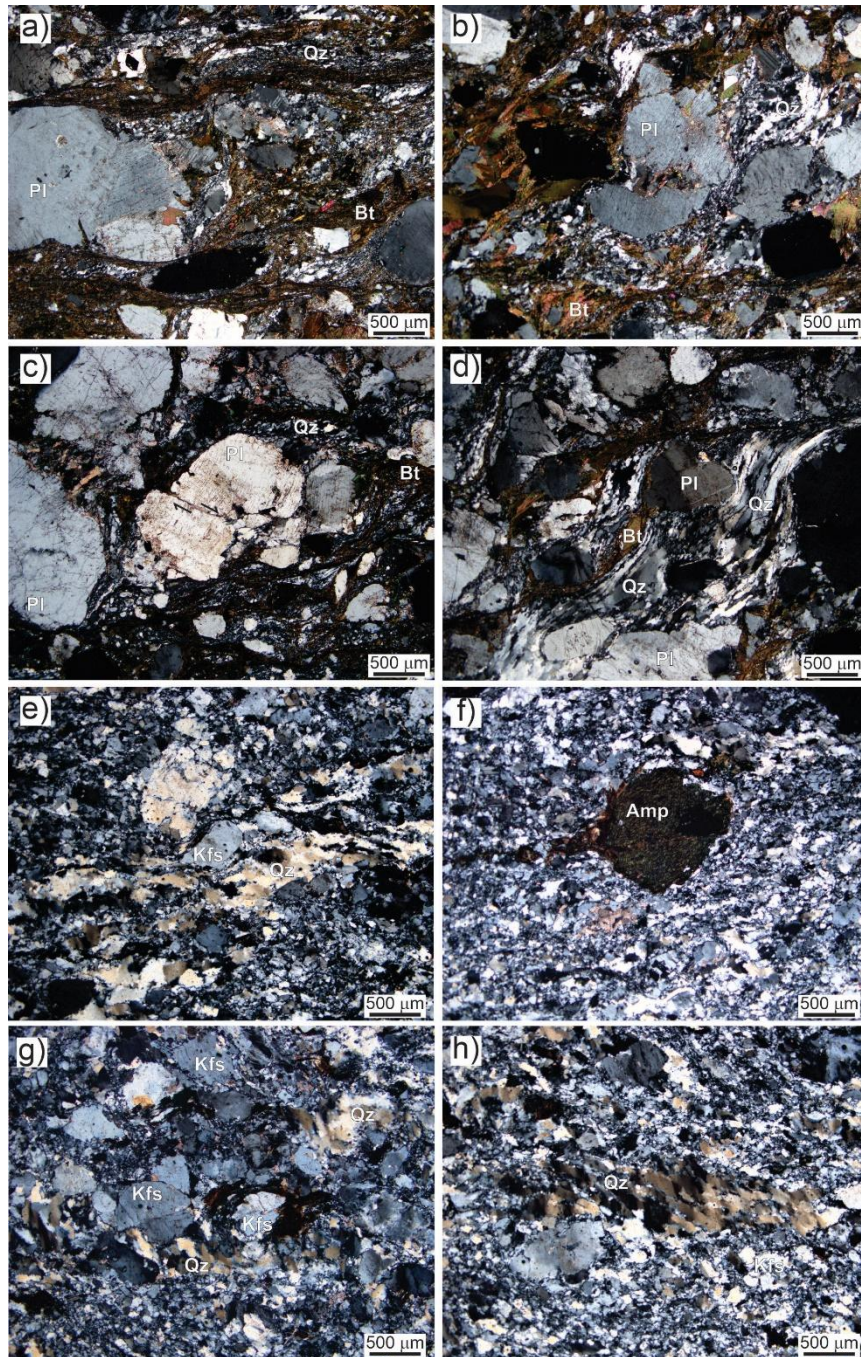


Figure 4.13. Microstructures of the Congo-Cruzeiro do Nordeste shear zone system. a) Overview of the mylonite microstructure with fractured feldspar porphyroclasts, quartz-feldspathic mylonitic band interleaved with the biotite-rich band. b) Fractured plagioclase porphyroclast and adjoining inclined quartz ribbon give the dextral shear sense. d) S-C quartz ribbon formed by polycrystalline quartz of lobate contact giving a dextral sense. e) General view of the mylonitic development with sigmoidal feldspars and quartz ribbons embedded in a quartz-feldspathic matrix. f) Amphibole (Amp) porphyroclast in a sigmoidal shape given by the dextral shear sense. g) K-feldspar porphyroclast with sigmoid shape and fractured, embedded

within the matrix and in contact with the quartz ribbon. h) Quartz ribbon with elongated polycrystalline quartz grains and some fine-grained bulges at the tip.

DISCUSSION

Geophysical signature

Terranes (*sensu* Coney et al., 1980) record contrasting geological histories, representing blocks of the Earth's crust usually fault-bounded and are considered the major constituents of accretionary orogens (Howell et al., 1985). Since processes of formation of most Precambrian accretionary orogens are difficult to assess due to superimposition of younger tectonic events or erosion of structures, geophysical studies have been an important tool to provide fundamental insights (Vaughan et al., 2005; Cawood et al. 2009). Key geophysical contrasts presented in the magnetic and gamma-spectrometric maps of the Borborema Province suggest that the Alto Moxotó and Rio Capibaribe terranes represent distinct crustal entities that amalgamated during the assembly of Gondwana in South America. The gamma-ray data displays contrasting compositions between both terranes, where the Alto Moxotó shows high to medium radiometric values of eTh and eU, typical of rocks representing ancient lithosphere within the Borborema Province (e.g., Santos et al., 2017a). On the other hand, the Rio Capibaribe terrane is distinguished by its high K (%) contents associated to the abundant Brasiliano-related plutonic rocks, especially porphyritic high-K granitoids (e.g., Mariano et al., 1996), typical from this terrane (e.g., Brito Neves et al., 2013) and scarce throughout the Alto Moxotó (Santos et al., 2017b). Corroborating these compositional differences, studies on Curie depths have shown that the Alto Moxotó terrane has a shallow Curie depth associated with positive residual Bouguer anomaly indicating an enrichment in the crust by radioelements, whereas the Rio Capibaribe terrane has a deep Curie surface associated with positive residual Bouguer anomaly suggesting an increase of rocks depleted in radioelements in the lower crust (Correa et al. 2016).

The first-order magnetic lineaments coincided with the majority of shear and thrust zones that sometimes mark the division of the magnetic domains whereas the second-order magnetic lineaments correspond to the main deformation patterns given by those major structures. Structural domains I to II, V and VI are mostly correlated to the characteristic folded fabric of the Alto Moxotó terrane given by the several thrust-related structures, which are marked by a gentle-dipping foliation mylonitic belt, imprinted by the Rio da Barra shear zone at the contact

between metasedimentary and orthogneisses. The magnetic domain IV shows the strongly NE-SW trend in the Alto Moxotó terrane due to the influence of the Congo-Cruzeiro do Nordeste shear zone system. Being the proposed as terrane boundary (Santos and Medeiros, 1999), such shear zone system comprises strongly NE-SW oriented magnetic lineations well marked in the Euler solutions. The Rio Capibaribe terrane presents a contrasting magnetic signature, with major evidence of positive anomalies and strongly oriented NE-SW and E-W lineaments displayed by structural domains VII to X, which are related to abundant E-W and NE-SW strike-slip shear zones, giving rise to the “eye-shaped” geometry of the Rio Capibaribe Terrane.

Microstructural analysis

At mesoscopic scale, the deformation markers of both terranes are evident in the geophysical and structural maps. The Alto Moxotó structural domain clearly distinguishes by the widespread folded migmatites and orthogneisses where the gentle-dipping foliation with steep lineation marks most of the thrusting character of the Rio da Barra thrust shear zone. In contrast, the Rio Capibaribe structural domain consists of large NE-SW and E-W sub-vertical to vertical dipping mylonitic corridors with gently plunging lineation. The Congo-Cruzeiro do Nordeste shear zone system structural domain forms large mylonitic corridors with characteristic vertical foliation planes with intermediate-plunging stretching lineations.

The description of microstructural data includes bulging and subgrain rotation recrystallizations with variant size subgrains (50 μm to 0.3 mm) showing interlobate and ameboid contacts observed in mylonitic samples of the terrane boundary agreeing with intermediate-temperature ($> 490\text{ }^{\circ}\text{C}$) development of the S-C fabrics (e.g., Olsen and Kohlstedt, 1985; Mainprice et al., 1986; Simpson and Wintsch, 1989; Miller and Paterson, 1994; Stipp et al., 2002). Quartz ribbons are also associated with myrmekite developed around K-feldspar porphyroclasts, indicating deformation at moderate temperature ($\sim 400\text{--}500\text{ }^{\circ}\text{C}$). The fractures in plagioclase crystals resulting in an incorporation of small grains in the mylonite foliation, together with the ductile deformation of dynamic recrystallization processes in quartz grains and the mechanically deformed plagioclase twins evidence the Congo-Cruzeiro do Nordeste shear zone system deformation at the brittle-ductile transition (Handy et al., 2007; Castellan et al. 2020; Viegas et al. 2021). Such aspect has been constrained by Miranda et al. (2020), which also report a continuous transition from high-temperature (c. $650\text{ }^{\circ}\text{C}$) to low-temperature (c. $300\text{ }^{\circ}\text{C}$) behavior of the Cruzeiro do Nordeste shear zone.

Tectonic implications

Accretionary orogens often display complex compositional and magnetic signatures, that develop in response to the complex interplay of sedimentary, magmatic, metamorphic and deformational events (e.g., Kusky and Bradley, 1999; Collins, 2002; Cawood et al. 2009, 2012). The terranes studied here present a clear distinction in geophysical data and changes in the regional orientation indicate the juxtaposition of two discrete blocks and point to the presence of accretionary process.

Geophysical data concerning the Congo-Cruzeiro do Nordeste shear zone system as a suture between the Alto Moxotó and Rio Capibaribe terranes has been previously discussed (Oliveira, 2008; Correa et al., 2016; Oliveira and Medeiros, 2018; Santos et al., 2021). These authors have described a conspicuous paired negative and positive gravity anomaly, also corroborated by distinct Curie surfaces, along the proposed boundary, which is typical of accreted terranes (e.g., Thomas, 1983; Pilkington, 1990). Evidence of accretionary processes using magnetotelluric, gravimetric, and magnetometric modeling are also found in counterparts of the Borborema Province such as in the Tuareg Shield (Hoggar) and Yaoundé domain in the Central African fold belt (Lima et al., 2015; Padilha et al., 2017).

In the Borborema Province, the change in the plunge of the lineation has been interpreted as the result of strain partitioning (Neves et al., 2005) or as the result of diachronous episodes of terrane assembly (Santos et al., 2017b). In any case, we might suggest here that the assembly events between the Alto Moxotó and Rio Capibaribe terranes might have involved initial frontal collision followed by strike-slip extrusion as proposed by Ganade de Araújo et al., (2013). According to these authors, assembly episodes dated at 620 and 570 Ma mark the record of granitic intrusions along the main shear zones of the province and can be envisaged as the timespan for the collage between the terranes. Despite the lack of HP and UHP rocks related to the terrane boundary, recently described metamafic and meta-ultramafic rocks along Pernambuco shear zone further south, interpreted as possible ophiolitic remnants (Lira Santos et al., 2022; Santos et al., 2022a), might represent missing pieces on the terrane collage history of the eastern Borborema Province. Alternatively, terrane collage might be marked by hidden or cryptic suture zones, also including dry structures (see Santos and Caxito, 2021).

CONCLUSIONS

The Alto Moxotó and Rio Capibaribe terranes consist of two distinct geological domains separated by the Congo-Cruzeiro do Nordeste shear zone system. The AMT displays Archean to Paleoproterozoic folded rocks with high to medium eTh and eU radioelement signatures,

marked by folded magnetic lineaments and steep lineation mylonitic belt. In contrast, the RCT shows high K radioelement value correlated to the Neoproterozoic intrusive rocks that are crosscut by several NE-SW and E-W shear zones that correlate to same orientation magnetic lineaments and imprint an intermediate to subhorizontal plunging lineations. In this sense, based on the contrasting lithotypes, geophysical signatures and deformational patterns displayed by both terranes, we interpret them as initially spatially discrete units with their amalgamation marking the onset of the Brasiliano Orogeny. The strong NE-SW magnetic lineaments, the change of the dip in the lineation, and the presence of structural markers indicating moderate temperatures, reinforce that the Congo-Cruzeiro do Nordeste shear zone system can be considered a terrane boundary and the terrane accretion model should be considered in similar regions along western Gondwana.

ACKNOWLEDGMENTS

This paper is part of the first authors' Ph.D. and she would like to thanks the Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico for the PhD's scholarship. This work was supported by the Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Estudos Tectônicos, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, and Australian Research Council (grant FL160100168). We also thank the Brazilian Geological Survey (CPRM) for providing access to the geophysical data for academic purposes.

REFERENCES

- Accioly, A.C.A., 2001. *Geologia, Geoquímica e Significado Tectônico do Complexo Metanortositico de Passira – Província Borborema-Nordeste Brasileiro* (PhD's Thesis). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Accioly, A.C.A., Santos, C.A., Santos, E. . J., Brito Neves, B.B., Rodrigues, J.B., McReath, I., 2010. Geochronology and Geochemistry of the meta-volcanic rocks from Riacho do Tigre Complex, Borborema ProvinceNortheastern Brazil, in: South American Symposium on Isotope Geology, 7. Brasília.
- Alkmim, F.F., Marshak, S., Pedrosa-Soares, A.C., Peres, G.G., Cruz, S.C.P., Whittington, A., 2006. Kinematic evolution of the Araçuaí-West Congo orogen in Brazil and Africa: Nutcracker tectonics during the Neoproterozoic assembly of Gondwana. *Precambrian Research* 149, 43–64. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2006.06.007>

- Almeida, F.F.M., Hasui, Y., Brito Neves, B.B., Fuck, R.A., 1981. Brazilian structural provinces: An introduction. *Earth-Science 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, G.M., Fuck, R.A., Dantas, E.L., Lima, S.S., 2022. Oblique collision and accretionary processes in the South Borborema Province: Insights from structural geology and geophysical data. *Tectonophysics* 844, 229607. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2022.229607>
- Almeida, G.M., Fuck, R.A., Lima, D.P.D., Dantas, E.L., 2021. Accretion tectonics in Western Gondwana highlighted by the aeromagnetic signature of the Sergipano Belt, NE Brazil. *Tectonophysics* 802, 228742. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2021.228742>
- Araïbia, K., Amri, K., Amara, M., Bendaoud, A., Hamoudi, M., Pedrosa-Soares, A., de Andrade Caxito, F., 2022. Characterizing terranes and a Neoproterozoic suture zone in Central Hoggar (Tuareg Shield, Algeria) with airborne geophysics and Landsat 8 OLI data. *Journal of African Earth Sciences* 187, 104455. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2022.104455>
- Araújo Neto, J.F., Santos, G.L., Souza, I.M.B.A. e, Barreto, S.B., Santos, L.C.M.L., Bezerra, J.P.S., Carrino, T.A., 2018. Integration of remote sensing and airborne geophysical data applied to geological mapping: a case study of the Vieirópolis region (Paraíba), Rio Grande do Norte Subprovince, Borborema Province. *Geologia USP. Série Científica* 18, 89–103. <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v18-140834>
- Barbosa, V.C.F., Silva, J.B.C., 2005. Deconvolução de Euler: passado, presente e futuro - um tutorial. *Revista Brasileira de Geofísica* 23. <https://doi.org/10.1590/s0102-261x2005000300004>
- Beltrando, M., Hermann, J., Lister, G., Compagnoni, R., 2007. On the evolution of orogens: Pressure cycles and deformation mode switches. *Earth and Planetary Science Letters* 256, 372–388. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.01.022>
- Black, R., Latouche, L., Liégeois, J.P., Caby, R., Bertrand, J.M., 1994. Pan-African displaced terranes in the Tuareg shield (central Sahara). *Geology* 22, 641. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1994\)022<0641:padtit>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1994)022<0641:padtit>2.3.co;2)
- Brito Neves, B.B., Fuck, R.A., Pimentel, M.M., 2014. The Brasiliano collage in South America: a review. *Brazilian Journal of Geology* 44, 493–518. <https://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 America. *Brazilian Journal of Geology* 46, 491–508. <https://doi.org/10.1590/2317-4889201620160004>
- Brito Neves, B.B., Santos, E.J., Van Schmus, W.R., 2000. Tectonic history of the Borborema Province, northeastern Brazil, in: Cordani, U., Milani, E.J., Thomaz Filho, A., Campos, D.A. (Eds.), Proceedings of the Thirty-First International Geological Congress. *Tectonic Evolution of South America*, pp. 151–182.
- Brito Neves, B.B., Silva Filho, A.F., 2019. Superterreno Pernambuco-Alagoas (PEAL) na Província Borborema: ensaio de regionalização tectônica. *Geologia USP. Série Científica* 19, 3–28. <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v19-148257>
- Brito Neves, B.B., Spröesser, W.M., Petronilho, L.A., Souza, S.L., 2013. Contribuição à Geologia e à Geocronologia do Terreno Rio Capibaribe (TRC, Província Borborema). *Geologia USP. Série Científica* 13, 97–122. <https://doi.org/10.5327/z1519-874x2013000200006>
- Brito Neves, B.B., Van Schmus, W.R., Santos, L.C.M.L., 2020. Alto Moxotó Terrane, a fragment of Columbia supercontinent in the Transversal Zone interior: Borborema Province, Northeast Brazil. *Brazilian Journal of Geology* 50. <https://doi.org/10.1590/2317-4889202020190077>
- Castellan, P., Viegas, G., Faleiros, F.M., 2020. Brittle–ductile fabrics and $P - T$ conditions of deformation in the East Pernambuco shear zone (Borborema Province, NE Brazil). *Journal of the Geological Society* 178. <https://doi.org/10.1144/jgs2020-109>
- Castro, L.G., Ferreira, F.J.F., 2015. Arcabouço geofísico-estrutural da porção meridional do Cinturão Ribeira. *Brazilian Journal of Geology* 45, 499–516. <https://doi.org/10.1590/2317-4889201520150007>
- Cawood, P.A., Buchan, C., 2007. Linking accretionary orogenesis with supercontinent assembly. *Earth-Science Reviews* 82, 217–256. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2007.03.003>
- Cawood, P.A., Chowdhury, P., Mulder, J.A., Hawkesworth, C.J., Capitanio, F.A., Gunawardana, P.M., Nebel, O., 2022. Secular evolution of continents and the Earth system. *Reviews of Geophysics*. <https://doi.org/10.1029/2022rg000789>

- Cawood, P.A., Hawkesworth, C.J., Dhuime, B., 2012. The continental record and the generation of continental crust. *Geological Society of America Bulletin* 125, 14–32. <https://doi.org/10.1130/b30722.1>
- Cawood, P.A., Kröner, A., Collins, W.J., Kusky, T.M., Mooney, W.D., Windley, B.F., 2009. Accretionary orogens through Earth history. *Geological Society, London, Special Publications* 318, 1–36. <https://doi.org/10.1144/sp318.1>
- Cawood, P.A., Pisarevsky, S.A., Leitch, E.C., 2011. Unraveling the New England orocline, east Gondwana accretionary margin. *Tectonics* 30, 1–15. <https://doi.org/10.1029/2011tc002864>
- Caxito, F., Uhlein, A., Stevenson, R., Uhlein, G.J., 2014. Neoproterozoic oceanic crust remnants in northeast Brazil. *Geology* 42, 387–390. <https://doi.org/10.1130/g35479.1>
- Caxito, F.A., Basto, C.F., Santos, L.C.M.L., Dantas, E.L., Medeiros, V.C., Dias, T.G., Barrote, V., Hagemann, S., Alkmim, A.R., Lana, C., 2021. Neoproterozoic magmatic arc volcanism in the Borborema Province, NE Brazil: possible flare-ups and lulls and implications for western Gondwana assembly. *Gondwana Research* 92, 1–25. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2020.11.015>
- Caxito, F.A., Santos, L.C.M.L., Ganade, C.E., Bendaoud, A., Fettous, E.-H., Bouyo, M.H., 2020. Toward an integrated model of geological evolution for NE Brazil-NW Africa: The Borborema Province and its connections to the Trans-Saharan (Benino-Nigerian and Tuareg shields) and Central African orogens. *Brazilian Journal of Geology* 50. <https://doi.org/10.1590/2317-4889202020190122>
- Caxito, F.A., Uhlein, A., Dantas, E.L., Stevenson, R., Salgado, S.S., Dussin, I.A., Sial, A.N., 2016. A complete Wilson Cycle recorded within the Riacho do Pontal Orogen, NE Brazil: Implications for the Neoproterozoic evolution of the Borborema Province at the heart of West Gondwana. *Precambrian Research* 282, 97–120. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2016.07.001>
- Chala, D., Tairou, M.S., Wenmenga, U., Kwékam, M., Affaton, P., Kalsbeek, F., Tossa, C., Houéto, A., 2015. Pan-African deformation markers in the migmatitic complexes of Parakou–Nikki (Northeast Benin). *Journal of African Earth Sciences* 111, 387–398. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2015.08.009>

- Collins, A.S., Windley, B.F., 2002. The Tectonic Evolution of Central and Northern Madagascar and Its Place in the Final Assembly of Gondwana. *The Journal of Geology* 110, 325–339. <https://doi.org/10.1086/339535>
- Coney, P.J., Jones, D.L., Monger, J.W.H., 1980. Cordilleran suspect terranes. *Nature* 288, 329–333. <https://doi.org/10.1038/288329a0>
- Cordani, U.G., Pimentel, M.M., Araújo, C.E.G., Fuck, R.A., 2013. The significance of the Transbrasiliiano-Kandi tectonic corridor for the amalgamation of West Gondwana. *Brazilian Journal of Geology* 43, 583–597. <https://doi.org/10.5327/z2317-48892013000300012>
- Cordani, U.G., Sato, K., Sproessner, W., Fernandes, F.S., 2016. U-Pb zircon ages of rocks from the Amazonas Territory of Colombia and their bearing on the tectonic history of the NW sector of the Amazonian Craton. *Brazilian Journal of Geology* 46, 5–35. <https://doi.org/10.1590/2317-4889201620150012>
- Correa, R.T., Vidotti, R.M., Oksum, E., 2016. Curie surface of Borborema Province, Brazil. *Tectonophysics* 679, 73–87. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.04.037>
- Corrigan, D., Pehrsson, S., Wodicka, N., de Kemp, E., 2009. The Palaeoproterozoic Trans-Hudson Orogen: a prototype of modern accretionary processes. *Geological Society, London, Special Publications* 327, 457–479. <https://doi.org/10.1144/sp327.19>
- 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, Troia Massif, northern Borborema Province, Brazil: Implications for Paleoproterozoic subduction-accretion processes. *Journal of South American Earth Sciences* 59, 45–68. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2015.01.007>
- CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2010. *Projetos Aerogeofísicos Pernambuco - Paraíba e Paraíba - Rio Grande do Norte: relatório final do levantamento e processamento dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos*. LASA & PROSPECTORS, Rio de Janeiro.
- Dantas, E.L., Souza, Z.S., Wernick, E., Hackspacher, P.C., Martin, H., Xiaodong, D., Li, J.-W., 2013. Crustal growth in the 3.4–2.7Ga São José de Campestre Massif, Borborema Province, NE Brazil. *Precambrian Research* 227, 120–156. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2012.08.006>

- de Souza, Z.S., Martin, H., Peucat, J.-J., Jardim de Sá, E.F., Macedo, M.H.F., 2007. Calc-Alkaline Magmatism at the Archean–Proterozoic Transition: the Caicó Complex Basement (NE Brazil). *Journal of Petrology* 48, 2149–2185. <https://doi.org/10.1093/petrology/egm055>
- Fonseca, A.C., Piffer, G.V., Nachtergaele, S., Van Ranst, G., De Grave, J., Novo, T.A., 2020. Devonian to Permian post-orogenic denudation of the Brasília Belt of West Gondwana: insights from apatite fission track thermochronology. *Journal of Geodynamics* 137, 101733. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2020.101733>
- Fossen, H., Meira, V.T., Cavalcante, C., Konopásek, J., Janoušek, V., 2021. Comment to “Neoproterozoic magmatic arc systems of the central Ribeira belt, SE-Brazil, in the context of the West-Gondwana pre-collisional history: A review.” *Journal of South American Earth Sciences* 107, 103052. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.103052>
- Ganade de Araujo, C.E., Cordani, U.G., Basei, M.A.S., Castro, N.A., Sato, K., Sproesser, W.M., 2012. U–Pb detrital zircon provenance of metasedimentary rocks from the Ceará Central and Médio Coreau Domains, Borborema Province, NE-Brazil: Tectonic implications for a long-lived Neoproterozoic active continental margin. *Precambrian Research* 206–207, 36–51. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2012.02.021>
- Ganade de Araujo, C.E., Weinberg, R.F., Cordani, U.G., 2013. Extruding the Borborema Province (NE-Brazil): a two-stage Neoproterozoic collision process. *Terra Nova* 26, 157–168. <https://doi.org/10.1111/ter.12084>
- Ganade de Araújo, C.E., Lanari, P., Rubatto, D., Hermann, J., Weinberg, R.F., Basei, M.A.S., Tesser, L.R., Caby, R., Agbossoumondé, Y., Ribeiro, C.M., 2021. Magmatic flare-up causes crustal thickening at the transition from subduction to continental collision. *Communications Earth & Environment* 2. <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00103-z>
- Guimarães, I.P., Silva Filho, A.F., Melo, S.C., Macambira, M.B., 2005. Petrogenesis of A-type Granitoids from the Alto Moxoto and Alto Pajeu Terranes of the Borborema Province, ne Brazil: Constraints from Geochemistry and Isotopic Composition. *Gondwana Research* 8, 347–362. [https://doi.org/10.1016/s1342-937x\(05\)71140-0](https://doi.org/10.1016/s1342-937x(05)71140-0)
- Heilbron, M., Duarte, B.P., Valeriano, C.M., Simonetti, A., Machado, N., Nogueira, J.R., 2010. Evolution of reworked Paleoproterozoic basement rocks within the Ribeira belt (Neoproterozoic), SE-Brazil, based on U–Pb geochronology: Implications for paleogeographic

reconstructions of the São Francisco-Congo paleocontinent. *Precambrian Research* 178, 136–148. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2010.02.002>

Heilbron, M., Silva, L.G.E., Almeida, J.C.H., Tupinambá, M., Peixoto, C., Valeriano, C.M., Lobato, M., Rodrigues, S.W.O., Ragatky, C.D., Silva, M.A., Monteiro, T., Freitas, N.C., Miguens, D., Girão, R., 2020. Proterozoic to Ordovician geology and tectonic evolution of Rio de Janeiro State, SE-Brazil: insights on the central Ribeira Orogen from the new 1:400,000 scale geologic map. *Brazilian Journal of Geology* 50. <https://doi.org/10.1590/2317-4889202020190099>

Hollanda, M.H.B.M., Archanjo, C.J., Bautista, J.R., Souza, L.C., 2015. Detrital zircon ages and Nd isotope compositions of the Seridó and Lavras da Mangabeira basins (Borborema Province, NE Brazil): Evidence for exhumation and recycling associated with a major shift in sedimentary provenance. *Precambrian Research* 258, 186–207. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2014.12.009>

Houketchang Bouyo, M., Zhao, Y., Penaye, J., Zhang, S.H., Njel, U.O., 2015. Neoproterozoic subduction-related metavolcanic and metasedimentary rocks from the Rey Bouba Greenstone Belt of north-central Cameroon in the Central African Fold Belt: New insights into a continental arc geodynamic setting. *Precambrian Research* 261, 40–53. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2015.01.012>

Howell, D.G., 2015. *Principles of Terrane Analysis*. Springer Dordrecht.

Howell, D.G., Jones, D.L., Schermer, E.R., 1985. Tectonostratigraphic terranes of the Circum-Pacific region, in: Tectonostratigraphic Terranes of the Circum-Pacific Region. *Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources Earth Science Series* 1, pp. 3–30.

Isles, D.J., Rankin, L.R., 2013. *Geological Interpretation of Aeromagnetic Data*. Geology. <https://doi.org/10.1190/1.9781560803218>

Jessell, M.W., Begg, G.C., Miller, M.S., 2016. The geophysical signatures of the West African Craton. *Precambrian Research* 274, 3–24. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2015.08.010>

Kelemen, P.B., Behn, M.D., 2016. Formation of lower continental crust by relamination of buoyant arc lavas and plutons. *Nature Geoscience* 9, 197–205. <https://doi.org/10.1038/ngeo2662>

- Kröner, A., Cordani, U., 2003. African, southern Indian and South American cratons were not part of the Rodinia supercontinent: evidence from field relationships and geochronology. *Tectonophysics* 375, 325–352. [https://doi.org/10.1016/s0040-1951\(03\)00344-5](https://doi.org/10.1016/s0040-1951(03)00344-5)
- Kuhn, S., Cracknell, M.J., Reading, A.M., 2018. Lithologic mapping using Random Forests applied to geophysical and remote-sensing data: A demonstration study from the Eastern Goldfields of Australia. *Geophysics* 83, B183–B193. <https://doi.org/10.1190/geo2017-0590.1>
- Kusky, T.M., Bradley, D.C., 1999. Kinematic analysis of mélangé fabrics: examples and applications from the McHugh Complex, Kenai Peninsula, Alaska. *Journal of Structural Geology* 21, 1773–1796. [https://doi.org/10.1016/s0191-8141\(99\)00105-4](https://doi.org/10.1016/s0191-8141(99)00105-4)
- Lima, H.M., Pimentel, M.M., de Lira Santos, L.C.M., Dantas, E.L., 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* 90, 54–69. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2018.12.002>
- Lima, M.V.A.G., Berrocal, J., Soares, J.E.P., Fuck, R.A., 2015. Deep seismic refraction experiment in northeast Brazil: New constraints for Borborema province evolution. *Journal of South American Earth Sciences* 58, 335–349. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2014.10.007>
- Lira Santos, G., Santos, L.C.M.L., Araújo Neto, J.F., 2022. Um olhar sobre os minerais de asbesto: aspectos históricos e geológicos e estudo de caso do Sítio Xilili (PE), porção central da Província Borborema. *Geociências* 41, 63–73. <https://doi.org/10.5016/geociencias.v41i1.16327>
- Mainprice, D., Bouchez, J.-L., Blumenfeld, P., Tubià, J.M., 1986. Dominant c slip in naturally deformed quartz: Implications for dramatic plastic softening at high temperature. *Geology* 14, 819. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1986\)14<819:dcslip>2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1986)14<819:dcslip>2.0.co;2)
- Mariano, G., Neves, S.P., Silva Filho, A.F., Guimarães, I.P., 2001. Diorites of the High-K Calc-Alkalic Association: Geochemistry and Sm-Nd Data and Implications for the Evolution of the Borborema Province, Northeast Brazil. *International Geology Review* 43, 921–929. <https://doi.org/10.1080/00206810109465056>

- Mariano, G., Sial, A.N., Cruz, M.J.M., Conceição, H., 1996. The Potassic Calc-Alkalic Itaporanga Batholith, Northeastern Brazil: Mineral Chemistry and Oxygen-Isotope Data. *International Geology Review* 38, 74–86. <https://doi.org/10.1080/00206819709465325>
- Mbang, C.M.S., Basseka, C.A., Kamguia, J., Etamè, J., Njiteu Tchoukeu, C.D., Pemi Mouzong, M., 2018. Mapping of Deep Tectonic Structures of Central and Southern Cameroon by an Interpretation of Surface and Satellite Magnetic Data. *International Journal of Geophysics* 2018, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2018/5845670>
- Meira, V.T., García-Casco, A., Juliani, C., Almeida, R.P., Schorscher, J.H.D., 2015. The role of intracontinental deformation in supercontinent assembly: insights from the Ribeira Belt, Southeastern Brazil (Neoproterozoic West Gondwana). *Terra Nova* 27, 206–217. <https://doi.org/10.1111/ter.12149>
- Miensopust, M.P., Jones, A.G., Muller, M.R., Garcia, X., Evans, R.L., 2011. Lithospheric structures and Precambrian terrane boundaries in northeastern Botswana revealed through magnetotelluric profiling as part of the Southern African Magnetotelluric Experiment. *Journal of Geophysical Research* 116. <https://doi.org/10.1029/2010jb007740>
- Miller, R.B., Paterson, S.R., 1994. The transition from magmatic to high-temperature solid-state deformation: implications from the Mount Stuart batholith, Washington. *Journal of Structural Geology* 16, 853–865. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(94\)90150-3](https://doi.org/10.1016/0191-8141(94)90150-3)
- Miranda, T.S., Neves, S.P., Celestino, M.A.L., Roberts, N.M.W., 2020. Structural evolution of the Cruzeiro do Nordeste shear zone (NE Brazil): Brasiliano-Pan-African- ductile-to-brittle transition and Cretaceous brittle reactivation. *Journal of Structural Geology* 141, 104203. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2020.104203>
- Neves, S.P., Bruguier, O., Bosch, D., Silva, J.M.R., Mariano, G., 2008. U–Pb ages of plutonic and metaplutonic rocks in southern Borborema Province (NE Brazil): Timing of Brasiliano deformation and magmatism. *Journal of South American Earth Sciences* 25, 285–297. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2007.06.003>
- Neves, S.P., Bruguier, O., Silva, J.M.R., Bosch, D., Alcantara, V.C., Lima, C.M., 2009. The age distributions of detrital zircons in metasedimentary sequences in eastern Borborema Province (NE Brazil): Evidence for intracontinental sedimentation and orogenesis? *Precambrian Research* 175, 187–205. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2009.09.009>

- Neves, S.P., Lages, G.A., Brasilino, R.G., Miranda, A.W.A., 2015. Paleoproterozoic accretionary and collisional processes and the build-up of the Borborema Province (NE Brazil): Geochronological and geochemical evidence from the Central Domain. *Journal of South American Earth Sciences* 58, 165–187. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2014.06.009>
- Neves, S.P., Mariano, G., Correia, P.B., Silva, J.M.R., 2006. 70 m.y. of synorogenic plutonism in eastern Borborema Province (NE Brazil): temporal and kinematic constraints on the Brasiliano Orogeny. *Geodinamica Acta* 19, 213–236. <https://doi.org/10.3166/ga.19.213-236>
- Neves, S.P., Monié, P., Bruguier, O., Silva, J.M.R., 2012. Geochronological, thermochronological and thermobarometric constraints on deformation, magmatism and thermal regimes in eastern Borborema Province (NE Brazil). *Journal of South American Earth Sciences* 38, 129–146. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2012.06.003>
- Neves, S.P., Santos, T.A.S., Medeiros, P.C., Amorim, L.Q., Casimiro, D.C.G., 2018. Interference fold patterns in regional unidirectional stress fields: A result of local kinematic interactions. *Journal of Structural Geology* 115, 304–310. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2018.04.012>
- Neves, S.P., Silva, J.M.R., Bruguier, O., 2017. Geometry, kinematics and geochronology of the Sertânia Complex (central Borborema Province, NE Brazil): Assessing the role of accretionary versus intraplate processes during West Gondwana assembly. *Precambrian Research* 298, 552–571. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.07.006>
- 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 (eastern Borborema Province, NE Brazil). *Journal of Structural Geology* 27, 1513–1527. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2005.02.002>
- Neves, S.P., Tommasi, A., Vauchez, A., Carrino, T.A., 2021. The Borborema Strike-Slip Shear Zone System (NE Brazil): Large-Scale Intracontinental Strain Localization in a Heterogeneous Plate. *Lithosphere* 2021. <https://doi.org/10.2113/2021/6407232>
- Oliveira, E.P., McNaughton, N.J., Armstrong, R., 2010. Mesoarchaeon to Palaeoproterozoic growth of the northern segment of the Itabuna–Salvador–Curaçá orogen, São Francisco craton, Brazil. *Geological Society, London, Special Publications* 338, 263–286. <https://doi.org/10.1144/sp338.13>

Oliveira, R.G., 2008. *Arcabouço geofísico, isostasia e causas do magmatismo cenozóico da província Borborema e de sua margem continental (Nordeste do Brasil)* (PhD's Thesis). Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Oliveira, R.G., Medeiros, W.E., 2018. Deep crustal framework of the Borborema Province, NE Brazil, derived from gravity and magnetic data. *Precambrian Research* 315, 45–65. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2018.07.004>

Olsen, T.S., Kohlstedt, D.L., 1985. Natural deformation and recrystallisation of some intermediate plagioclase feldspars. *Tectonophysics* 111, 107–131.

Oriolo, S., Schulz, B., Geuna, S., González, P.D., Otamendi, J.E., Sláma, J., Druguet, E., Siegesmund, S., 2021. Early Paleozoic accretionary orogens along the Western Gondwana margin. *Geoscience Frontiers* 12, 109–130. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.07.001>

Padilha, A.L., Vitorello, I., Pádua, M.B., Fuck, R.A., 2017. Cryptic signatures of Neoproterozoic accretionary events in northeast Brazil imaged by magnetotellurics: Implications for the assembly of West Gondwana. *Tectonophysics* 699, 164–177. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.01.022>

Pedrosa Jr., N.C., Vidotti, R.M., Fuck, R.A., Oliveira, K.M.L., Castelo Branco, R.M.G., 2015. Structural framework of the Jaibaras Rift, Brazil, based on geophysical data. *Journal of South American Earth Sciences* 58, 318–334. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2014.07.005>

Pereira, L.C.L., Santos, L.C.M.L., Carrino, T.A., 2019. The role of airborne geophysics in the investigation of gold occurrences in the Itapetim Region, Borborema Province, Northeast Brazil. *Brazilian Journal of Geology* 49. <https://doi.org/10.1590/2317-4889201920190028>

Reid, A.B., Allsop, J.M., Granser, H., Millett, A.J., Somerton, I.W., 1990. Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution. *Geophysics* 55, 80–91. <https://doi.org/10.1190/1.1442774>

Reid, A.B., Ebbing, J., Webb, S.J., 2014. Avoidable Euler Errors - the use and abuse of Euler deconvolution applied to potential fields. *Geophysical Prospecting* 62, 1162–1168. <https://doi.org/10.1111/1365-2478.12119>

Rodrigues, S.W.O., Brito Neves, B.B., 2008. Padrões isotópicos Sm-Nd no limite entre os terrenos Alto Pajeú e Alto Moxotó (PB). *Revista Brasileira de Geociências* 38, 209–225. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.2008381209225>

Sá, J.M., Bertrand, J.M., Leterrier, J., Macedo, M.H.F., 2002. Geochemistry and geochronology of pre-Brasiliano rocks from the Transversal Zone, Borborema Province, Northeast Brazil. *Journal of South American Earth Sciences* 14, 851–866. [https://doi.org/10.1016/s0895-9811\(01\)00081-5](https://doi.org/10.1016/s0895-9811(01)00081-5)

Santos, A.C.L., Padilha, A.L., Fuck, R.A., Pires, A.C.B., Vitorello, I., Pádua, M.B., 2014. Deep structure of a stretched lithosphere: Magnetotelluric imaging of the southeastern Borborema province, NE Brazil. *Tectonophysics* 610, 39–50. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.10.008>

Santos, L.C.M.L., Caxito, F., 2021. Accretionary models for the Neoproterozoic evolution of the Borborema Province: advances and open questions. *Brazilian Journal of Geology* 51. <https://doi.org/10.1590/2317-4889202120200104>

Santos, L.C.M.L., Caxito, F.A., Bouyo, M.H., Ouadahi, S., Araïbia, K., Lages, G.A., Santos, G.L., Pitombeira, J.P.A., Cawood, P.A., 2022a. Relics of ophiolite-bearing accretionary wedges in NE Brazil and NW Africa: connecting threads of western Gondwana's ocean during Neoproterozoic times. *Geosystems and Geoenvironment* 100148. <https://doi.org/10.1016/j.geogeo.2022.100148>

Santos, L.C.M.L., Dantas, E.L., Cawood, P.A., Lages, G.A., Lima, H.M., Santos, E.J., Caxito, F.A., 2019. Early to late Neoproterozoic subduction-accretion episodes in the Cariris Velhos Belt of the Borborema Province, Brazil: Insights from isotope and whole-rock geochemical data of supracrustal and granitic rocks. *Journal of South American Earth Sciences* 96, 102384. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102384>

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., 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-West 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., Vidotti, R.M., Cawood, P.A., Santos, E.J., Fuck, R.A., Lima, H.M., 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., Lages, G.A., Caxito, F.A., Dantas, E.L., Cawood, P.A., Lima, H.M., Lima, F.J.C., 2022b. Isotopic and geochemical constraints for a Paleoproterozoic accretionary orogen in the Borborema Province, NE Brazil: Implications for reconstructing Nuna/Columbia. *Geoscience Frontiers* 13, 101167. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2021.101167>

Santos, L.C.M.L., Oliveira, R.G., Lages, G.A., Dantas, E.L., Caxito, F., Cawood, P.A., Fuck, R.A., Lima, H.M., Santos, G.L., Araújo Neto, J.F., 2021. Evidence for Neoproterozoic terrane accretion in the central Borborema Province, West Gondwana deduced by isotopic and geophysical data compilation. *International Geology Review* 64, 1574–1593. <https://doi.org/10.1080/00206814.2021.1944332>

Santos, L.C.M.L., Pereira, C.S., Lima, H.M., Guedes, P., Medeiros, R., Silva, J., Araújo Neto, J.F., Santos, G.L., Paixão, M.S., 2020. Description and hierarchy of ductile deformation events in the Camalaú region, state of Paraíba, central portion of the Alto Moxotó Terrane, Borborema Province, Brazil. *Journal of the Geological Survey of Brazil* 3, 25–31. <https://doi.org/10.29396/jgsb.2020.v3.n1.2>

Sial, A.N., Ferreira, V.P., 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>

Simpson, C., Wintsch, R.P., 1989. Evidence for deformation-induced K-feldspar replacement by myrmekite. *Journal of Metamorphic Geology* 7, 261–275. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.1989.tb00588.x>

Stein, C.A., Stein, S., Elling, R., Keller, G.R., Kley, J., 2017. Is the “Grenville Front” in the central United States really the Midcontinent Rift?. *GSA Today* 28, 4–10. <https://doi.org/10.1130/gsatg357a.1>

Stipp, M., Stünitz, H., Heilbronner, R., Schmid, S.M., 2002. The eastern Tonale fault zone: a “natural laboratory” for crystal plastic deformation of quartz over a temperature range from 250 to 700°C. *Journal of Structural Geology* 24, 1861–1884. [https://doi.org/10.1016/s0191-8141\(02\)00035-4](https://doi.org/10.1016/s0191-8141(02)00035-4)

- Thompson, D.T., 1982. EULDPH: A new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data. *GEOPHYSICS* 47, 31–37. <https://doi.org/10.1190/1.1441278>
- Van Schmus, W.R., Brito Neves, B.B., Hackspacher, P., Babinski, M., 1995. and geochronologic studies of the eastern Borborema Province, Northeastern 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., Brito Neves, B.B., Williams, I.S., Hackspacher, P.C., Fetter, A.H., Dantas, E.L., Babinski, M., 2003. The Seridó Group of NE Brazil, a late Neoproterozoic pre- to syn-collisional basin in West Gondwana: insights from SHRIMP U–Pb detrital zircon ages and Sm–Nd crustal residence (TDM) ages. *Precambrian Research* 127, 287–327. [https://doi.org/10.1016/s0301-9268\(03\)00197-9](https://doi.org/10.1016/s0301-9268(03)00197-9)
- 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>
- Vaucher, A., Neves, S., Caby, R., Corsini, M., Egydio-Silva, M., Arthaud, M., Amaro, V., 1995. The Borborema shear zone system, NE Brazil. *Journal of South American Earth Sciences* 8, 247–266. [https://doi.org/10.1016/0895-9811\(95\)00012-5](https://doi.org/10.1016/0895-9811(95)00012-5)
- Viegas, G., Archanjo, C.J., Hollanda, M.H.B.M., Vaucher, A., 2014. Microfabrics and zircon U–Pb (SHRIMP) chronology of mylonites from the Patos shear zone (Borborema Province, NE Brazil). *Precambrian Research* 243, 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2013.12.020>
- Viegas, G., Hidas, K., Castellan, P., 2021. Structural relationships between ultramylonite, pseudotachylyte and cataclasite in the East Pernambuco shear zone (Borborema Province, NE Brazil). *Journal of Structural Geology* 147, 104346. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2021.104346>
- Viegas, G., Santos, L.C.M.L., Yokoyama, E., Archanjo, C.J., Raposo, M.I.B., Seoane, K., Leite, G.M., 2022. Magnetic fabric of the early-Ediacaran Itapetim monzogranitic pluton: magma flow during oblique extension along strike-slip shear zones (Eastern Brazil). *Journal of Structural Geology* 164, 104738. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2022.104738>
- Viola, G., Henderson, I.H.C., Bingen, B., Thomas, R.J., Smethurst, M.A., de Azavedo, S., 2008. Growth and collapse of a deeply eroded orogen: Insights from structural, geophysical, and

geochronological constraints on the Pan-African evolution of NE Mozambique. *Tectonics* 27, n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2008tc002284>

Wu, Q., Ramezani, J., Zhang, H., Wang, J., Zeng, F., Zhang, Y., Liu, F., Chen, J., Cai, Y., Hou, Z., Liu, C., Yang, W., Henderson, C.M., Shen, S., 2021. High-precision U-Pb age constraints on the Permian floral turnovers, paleoclimate change, and tectonics of the North China block. *Geology* 49, 677–681. <https://doi.org/10.1130/g48051.1>

Zouaghi, T., Ferhi, I., Bédir, M., Youssef, M.B., Gasmi, M., Inoubli, M.H., 2011. Analysis of Cretaceous (Aptian) strata in central Tunisia, using 2D seismic data and well logs. *Journal of African Earth Sciences* 61, 38–61. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2011.05.002>

5 ARTIGO II – UM OLHAR SOBRE OS MINERAIS DE ASBESTO: ASPECTOS HISTÓRICOS E GEOLÓGICOS E ESTUDO DE CASO DO SÍTIO XILILI (PE), PORÇÃO CENTRAL DA PROVÍNCIA BORBOREMA

Publicado em: Revista Geociências. Unesp.

Recebido em 14 de outubro de 2021; aceito em 20 de fevereiro de 2022

DOI: <https://doi.org/10.5016/geociencias.v41i1.16327>

Glenda Lira Santos^{1*}, Lauro César Montefalco de Lira Santos^{1,2}, José Ferreira de Araújo Neto¹

¹Programa de Pós-Graduação em Geociências, Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, Brasil; ²Departamento de Geologia, Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, Brasil

*Autor correspondente: Glenda Lira Santos

Resumo

Asbesto ou amianto são nomes genéricos dados a minerais que possuem hábito fibroso e morfologia alongada. Estes subdividem-se em silicatos do grupo da serpentina: crisotila e do grupo dos anfibólios: crocidolita (variedade da riebeckita), amosita (variedade da cummingtonita-grunerita), além da antofilita, tremolita e actinolita. São minerais de grande apelo econômico por possuírem elevada flexibilidade, resistência ao calor, eletricidade e tração. Apesar de sua toxicidade, estas fibras são utilizadas há milhares de anos na indústria de construção civil e automobilística. São encontrados principalmente em rochas ultramáficas metassomatizadas e o principal depósito de asbesto, do tipo crisotila, no Brasil, ocorre na mina Cana Brava, Goiás. Neste trabalho tratamos como estudo de caso a ocorrência de asbesto antofilítico do Sítio Xilili (próximo a cidade de Arcoverde, Pernambuco). O asbesto ocorre em lentes de rochas ultramáficas serpentinizadas compostas por antigorita, serpentina, talco, magnesita e clorita encaixadas nas rochas metavulcanosedimentares do Complexo Riacho do Tigre, Terreno Rio Capibaribe, da Província Borborema. São apresentados aspectos mineralógicos, petrográficos e de campo, os quais trazem informações sobre como identificar um depósito de asbesto através de técnicas petrográficas.

Palavras-chave: Minerais de asbesto; Rochas ultramáficas; Província Borborema.

Abstract

Asbestos is a generic name given to minerals that have a fibrous habit and elongated morphology. These minerals subdivide into silicates from the serpentine group: chrysotile and, the amphibole group: crocidolite (var. riebeckite), amosite (var. cummingtonite-grunerite), besides anthophyllite, tremolite, and actinolite. They are minerals with great economic appeal since they have high flexibility, heat, electricity, and traction resistance. Despite their toxicity, those fibers are utilized for thousands of years in the civil construction and automobile industries. Asbestos is found mainly in metasomatized ultramafic rocks, and the main asbestos deposit, from the chrysotile type, in Brazil, occurs in the Cana Brava Mine, Goiás. In this paper, we deal with the case study of the Sítio Xilili (near Arcoverde City, Pernambuco) anthophyllitic asbestos occurrence. The asbestos occurs as lenses in the serpentized ultramafic rocks composed of antigorite, serpentine, talc, magnesite, and chlorite, which are hosted by the metavolcanosedimentary rock from the Riacho do Tigre Complex, Rio Capibaribe Terrane, Borborema Province. Mineralogical, petrographic, and field data aspects are presented to add information on how to identify asbestos deposits through petrographic analysis.

Keywords: Abestos minerals; Ultramafic rocks; Borborema Province.

INTRODUÇÃO

Os termos “asbesto” e “amianto” provêm do grego “a-sbestos” e “a-mianto” e significam inextinguível, incorruptível e são termos comerciais/industriais utilizados para descrever um grupo específico de minerais fibrosos utilizados há milhares de anos. Seu hábito de cristalização se define por uma associação de longas fibras polifilamentosas com razão comprimento/largura de 3:1, permitindo agrupá-las em duas categorias: grupos das serpentinas (crisotila) e do anfibólio (crocidolita, antofilita, amosita, tremolita e actinolita). Estes minerais possuem características físico-química semelhantes, porém se diferenciam em composição química e estrutural (Ross et al., 2007). Geralmente, as fibras dos cristais de anfibólio são retas, duras,

pontiagudas (crocidolita) e quebradiças (antofilita e tremolita), já as fibras de serpentina são mais onduladas, flexíveis e macias (Queiroga et al., 2005 e referências ali contidas).

Desde a antiguidade, têm-se registros do uso deste grupo de minerais, onde mais de 95% dos minerais de asbesto que vêm sendo comercializados são provenientes do tipo mais abundante, a crisotila (Ross & Virta, 2001). Os depósitos de asbesto são associados, principalmente, às rochas ultramáficas, carbonatos serpentinizados e formações ferríferas bandadas (Ross, 1987). A prospecção deste tipo de minério, quando associada a rochas ultramáficas, é baseada em métodos geofísicos como a magnetometria (aérea e terrestre), já que a intensa serpentinização destas rochas podem concentrar uma grande quantidade de magnetita (Kennedy, 1990). O mapeamento utilizando imageamento espectroscópico também vem sendo aplicado, com eficiência, para reconhecimento de variedades mineralógicas. Por exemplo, Swayze et al. (2009) conseguiram mapear áreas onde o acesso é limitado e identificar regiões com presença de poeira de asbesto para contenção.

Os minerais de asbesto têm grande importância econômica, com destaque para a construção civil e indústria automobilística devido sua resistência ao calor, flexibilidade, alta resistência à tração, grande área de superfície para relação de massa, resistência elétrica e à degradação química (Strohmeier et al., 2010). A larga diversidade de propriedades exibida por estas fibras naturais vem sendo fonte de exploração e procura em escala mundial, entretanto estas características são as mesmas responsáveis por numerosas doenças ligadas ao sistema respiratório.

O amplo banimento do uso e exploração das fibras de asbesto devido a sua nocividade levou a numerosos trabalhos relacionando o asbesto às doenças respiratórias (e.g. Nogueira et al., 1975; Castro & Gomes, 1997; Capellozzi, 2000; Mendes, 2001; Terra Filho et al. 2006; Craighead & Gibbs, 2008; Oury et al. 2014). Não obstante, pouca bibliografia, especialmente em português, foi produzida nas últimas décadas com relação as características deste tipo de minério, que ainda apresenta forte apelo industrial (e.g. Skinner et al., 1988; Scliar, 1998; Virta, 2001, Strohmeier et al., 2010). Neste sentido, este trabalho tem por objetivo apresentar o estado da arte concernente aos aspectos históricos e geológicos dos minerais de asbesto. Adicionalmente, como estudo de caso, é apresentado aspectos mineralógicos, petrográficos e de campo sobre a ocorrência de asbesto do Sítio Xilili, localizado no Sertão do estado de Pernambuco. Esta ocorrência é conhecida desde a década de 1970, porém, até o presente momento, não existem trabalhos detalhados com foco na geologia da ocorrência.

HISTÓRICO E ASPECTOS ECONÔMICOS

O asbesto foi identificado, primariamente, como fibras suficientemente flexíveis de coloração cinza a branca para uso de tecelagem, além de ser incombustível e imutável à altas temperaturas (Skinner et al., 1988). O registro mais antigo data de 2500 a.C. na Finlândia e é representado pelo uso de antofilita para reforçar utensílios de matéria prima de argila (Europaeus-Äyräpää, 1930). Também são reportados outros usos antigos das fibras de asbesto, como fabricação de pavios de lâmpada, roupas de crematório e papel (Skinner et al., 1988). No século XIX, a produção de asbesto alcançou a escala industrial na fabricação de têxteis, o que levou a exploração mundial em depósitos no Canadá, África do Sul e antiga URSS (Figura 5.1; Virta, 2002 e referências nele contidas). Somente no século XX, as fibras de asbesto foram fortemente utilizadas como material isolante térmico, principalmente para suprir demandas durante a Segunda Guerra Mundial, especialmente para a fabricação de navios (Virta, 2002).

Além de isolante, o asbesto também foi comercializado na indústria civil para a fabricação de fibrocimentos (mistura de cimento e cerca de 10% de amianto; Scliar, 1998), utilizados majoritariamente em tubos para distribuição de água potável, coleta e rede de esgotos (Ferreira Filho & Linares, 2009); e na indústria automobilística, em freios, embreagens e juntas de asbesto. Estima-se que cerca de 98% do asbesto produzido no mundo é destinado ao fibrocimento (92%), produtos de fricção (6%) e indústria têxtil (2%) (Garcia et al., 2010). Até o ano de 2017, as grandes exportações do asbesto concentraram-se na Rússia (62%), Cazaquistão (18%) e Brasil (17%). Apesar das grandes reservas localizadas no Canadá, a última grande exportação mundial de asbesto neste país, com 8,4%, deu-se em 2011 (The Observatory Economic Complexity, 2020).



Figura 5.1. Principais ocorrências de depósitos de minerais de asbesto no mundo. Fonte: Modificado de Virta & Mann (1994).

No Brasil, as primeiras citações da ocorrência de asbesto remontam ao início do século XX em Minas Gerais, Ceará e Paraíba, com explorações minoritárias na Bahia (Figura 5.2; Scliar, 1998). Com o advento do fibrocimento, a procura por esta commodity se intensificou, principalmente com a chegada das grandes empresas mineradoras europeias, como a Brasilit (atualmente, pertencente ao grupo francês Saint-Gobain) e a Eternit (hoje, companhia de capital aberto). O mapeamento de novas jazidas de crisotila, entre os anos de 1950 e 1960, nos estados de Goiás, Bahia, Minas Gerais e Rio Grande do Sul, ocorreram com a criação da S.A. Mineração em Amianto (SAMA) pela Brasilit e, pela Sociedade Brasileira de Mineração (FAMA). Entretanto, a principal descoberta se deu com o depósito de crisotila, de classe mundial, conhecido como Cana Brava (Minaçu-GO). Por volta da década de 1980, com a grande exploração deste minério em Goiás, o Brasil se tornou autossuficiente na produção, classificando-se como exportador de fibras de asbesto, chegando a produzir no ano 2003, cerca de 230 mil toneladas.

Por outro lado, entre as décadas 1960 e 1970, a descoberta dos problemas de saúde associados a longas exposições às fibras de asbesto no ar, levou a uma grande redução na produção desta commodity, principalmente na Europa Ocidental e Estados Unidos (Virta, 2002). No Brasil, o banimento de anfibólio asbesto se deu em 1995, enquanto que o banimento do uso do asbesto crisotila ocorreu em 2017 com a declaração à inconstitucionalidade do artigo 2º da Lei Federal 9.055/1995, que permitia a exploração deste tipo de amianto. Atualmente, a discussão sobre a

inconstitucionalidade da lei continua, e, no estado de Goiás, a Sama/Eternit possui a autorização para continuação da lavra afirmando cumprir os métodos de segurança necessários.

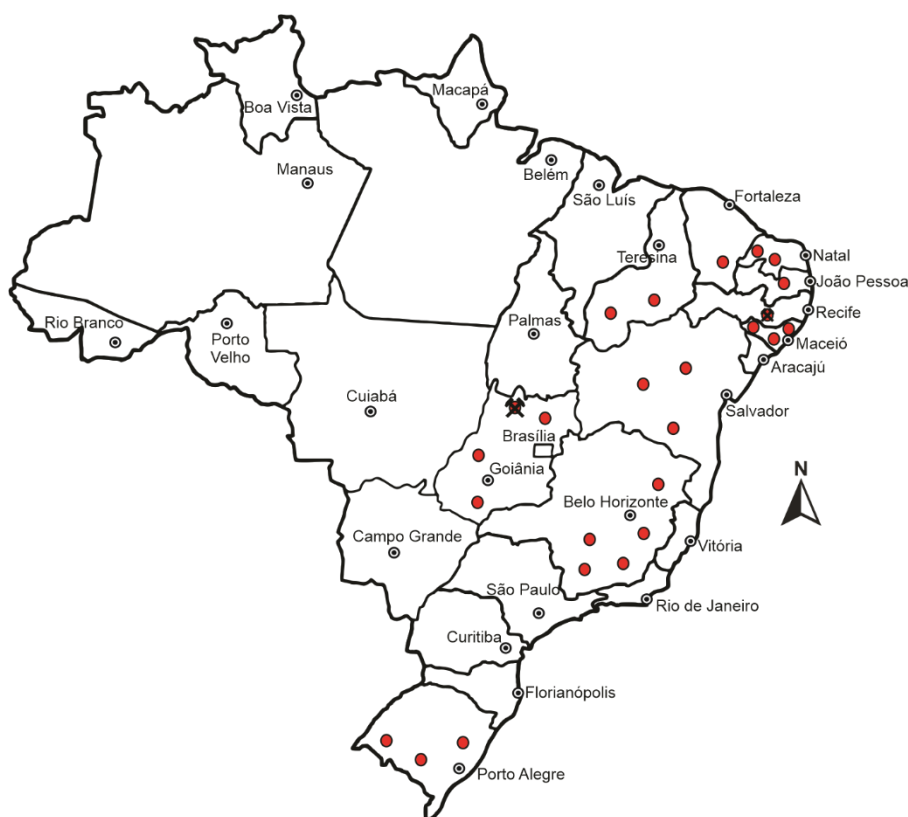


Figura 5.2. Ocorrências de asbesto do tipo crisotila no Brasil. Destaque para a mineração de Cana Brava em Minaçu (GO) detentora da maior produção de crisotila no Brasil até 2017 e a ocorrência do antofilita asbesto do Sítio Xilili em Arcoverde (PE), descrita no presente trabalho. Modificado de Scliar (1998).

ASPECTOS MINERALÓGICOS

Dentro dos silicatos existem três grupos que usualmente exibem morfologia fibrosa: serpentina, anfibólio e zeólita, porém somente os dois primeiros possuem apelo comercial e são enquadrados como minerais de asbesto. A serpentina e o anfibólio, quando exibem hábito fibroso e morfologia alongada, são chamados de “asbestiforme” (Skinner et al., 1988), e possuem comumente uma razão largura/altura maior que 20:1 (Strohmeier et al., 2010).

Seis minerais fazem parte dos minerais de asbesto, subdividido em duas classes: (i) grupo da serpentina: a crisotila, conhecida como amianto branco; e (ii) grupo do anfibólio: crocidolita (variedade da riebeckita) conhecida como amianto azul, amosita (variedade da cummingtonita-

grunerita) conhecida como amianto marrom, além da antofilita, tremolita e actinolita (Tabela 5.1; Steel & Wylie, 1981; Queiroga et al., 2005; Strohmeier et al., 2010). Quando exibem hábito “asbestiforme”, os anfibólios devem ser designados como asbesto, já que estes podem ocorrer em outras morfologias.

Tabela 5.1. Principais características físicas e químicas dos minerais de asbesto. □ - vazio no sítio “A” da estrutura do anfibólio. Fonte: Virta (2005).

Propriedades	Crisotila	Amosita	Crocidolita	Antofilita	Tremolita asbesto	Actinolita asbesto
Composição	$\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	$\square\{\text{Fe}^{2+}_2\}\{\text{Fe}^{2+}_5\}(\text{Si}_8\text{O}_{22})(\text{OH})_2$	$\square\{\text{Na}_2\}\{\text{Fe}^{2+}_3\text{Fe}^3\}_2\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	$\square\{\text{Mg}_2\}\{\text{Mg}_5\}(\text{Si}_8\text{O}_{22})(\text{OH})_2$	$\square\{\text{Ca}_2\}\{\text{Mg}_5\}(\text{Si}_8\text{O}_{22})(\text{OH})_2$	$\square\{\text{Ca}_2\}\{\text{Mg}_{4,5-2,5}\text{Fe}_{0,5-2,5}\}(\text{Si}_8\text{O}_{22})(\text{OH})_2$
Sistema Cristalino	Monoclínico	Monoclínico	Monoclínico	Ortorrômbico	Monoclínico	Monoclínico
Cor	Branco, cinza, verde	Cinza esfumado ou marrom	Azul lavanda, azul metálico	Branco acinzentado, verde amarronzado ou verde	Branco acinzentado, esverdeado, amarelado, azulado	Esverdeado
Brilho	Sedoso	Vítreo a perolado	Sedoso a terroso	Vítreo a perolado	Sedoso	Sedoso
Dureza	2,5-4,0	5,5-6,0	4	5,5-6,0	5,5	±6,0
Estrutura	Altamente fibroso, fino e facilmente separável	Lamelar ou fibras grossas e finas e asbestiforme	Fibroso	Lamelar ou asbestiforme	Longo ou prismático e agregados fibrosos	Cristais e prismáticos reticulados longos e fibras
Peso específico	2,4-2,6	3,1-3,25	3,2-3,3	2,85-3,1	2,9-3,2	3,0-3,2
Propriedades ópticas	Biaxial positivo, extinção paralela	Biaxial positivo, extinção paralela	Biaxial positivo e negativo, extinção paralela	Biaxial positivo, extinção paralela	Biaxial negativo, extinção inclinada	Biaxial negativo, extinção inclinada
Índice de refração	1,51-1,55	±1,64	1,7, pleocróico	±1,61	±1,61	± 1,63, fracamente pleocróico
Textura ao toque	Macio a duro, também sedoso	Grosso mas flexível	Macio a duro	Duro	Geralmente duro, às vezes macio	Duro
Flexibilidade	Boa	Boa	Boa	Pobre	Pobre	Pobre

Resistência ao calor	Alta	Boa, quebradiço a altas temperaturas	Baixo, fusível	Muito boa	Razoável a bom	Não disponível
Tipo de mineralização	“Cross fiber”, “Slip fiber” e “Mass fiber”	“Cross fiber”	“Cross fiber”	“Slip fiber” e “Mass fiber”	“Slip fiber” e “Mass fiber”	“Slip fiber” e “Mass fiber”
Paragênese	Rochas ultramáficas serpentinizadas, mármores dolomíticos serpentinizados	Formações ferríferas bandadas metamorfizadas, de origem sedimentar	Formações ferríferas bandadas metamorfizadas, de origem sedimentar	Talco- e biotita xistos	Veios de corpos ultramáficos metamorfizados	Veios de corpos ultramáficos metamorfizados
Impurezas	Ferro, cromo, níquel e cálcio	Ferro	Ferro	Ferro	Cálcio	Cálcio e ferro

Crisotila

A crisotila pertence ao grupo da serpentina, cuja fórmula química é $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$, onde Si^{4+} pode ser substituído por Al^{3+} e Fe^{3+} , enquanto Fe^{2+} , Fe^{3+} e Al^{3+} podem substituir Mg^{2+} (Stroink et al., 1980; O’Hanley & Dyar 1998). Este mineral é formado por uma camada de tetraedros de sílica em uma rede cristalina pseudohexagonal, que se une a uma camada de octaedros de Mg ($[\text{Mg}_6\text{O}_4(\text{OH})_8]^{-4}$; Virta, 2002) numa proporção de 1:1 (Figura 5.3a; Pollastri et al., 2016). As camadas de tetraedros de sílica (T) e de octaedros de magnésio (O) compartilham átomos de oxigênio, que usualmente estariam separados por distâncias de 0,305 nm na camada de sílica, e de 0,342 nm na camada de magnésio (Skinner et al., 1988).

Estas diferenças causam tensões nas camadas TO, compensadas com o enrolamento destas camadas em torno do eixo x. Consequentemente, formam-se várias camadas encurvadas concêntricas ao eixo x da fibra, resultando em uma estrutura tubular de diâmetros variados, mas com uma média de diâmetro interno e externo com cerca de 250 Å e 75 Å, respectivamente (Figura 5.3b; Yada, 1971; Deer et al., 2013). Contudo, esta estrutura não compensa, suficientemente, o desajuste na camada TO, ocasionando a formação de núcleos vazios de diâmetros entre 50-80 Å entre as camadas, os quais podem eventualmente ser preenchidos por fases amorfas ricas em sílica e ferro (Cressey et al., 1994; Pollastri et al., 2016).

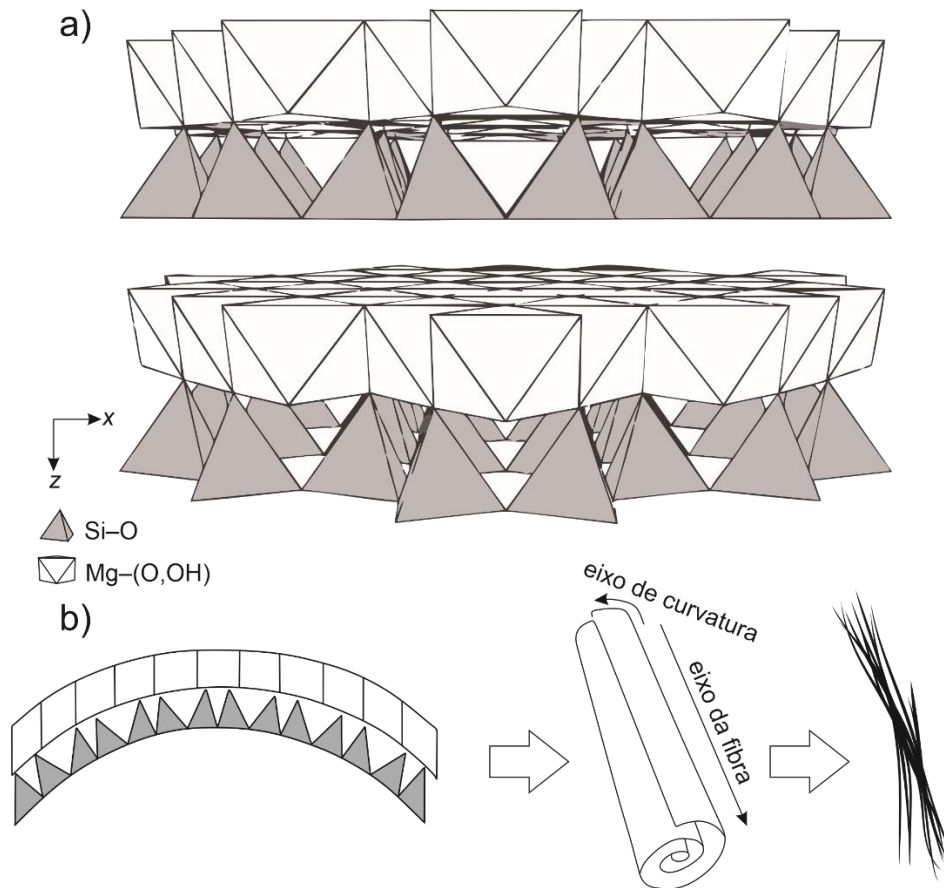


Figura 5.3. Estrutura da crisotila. a) Esquema da estrutura unitária da crisotila onde uma camada de tetraedros de Si se une a camadas de octaedros de Mg. b) Dobramento das camadas de TO resultando em uma microestrutura de camadas enroladas (“papyrus-like”) que compõe uma fibra de crisotila. Modificado de Pollastri et al. (2016).

Grupo do Anfibólio

O grupo do anfibólio compreende a maioria dos minerais de asbesto, porém nem todos cristalizam-se com o hábito asbestiforme. Estes formam cadeias duplas, onde a proporção de Si(Al):O tem razão de 4:11. A fórmula química simplificada para o anfibólio, segundo Hawthorne et al. (2012), é $A B_2 C_5 T_8 O_{22} W_2$, onde $A = \square, Na, K, Ca, Pb, Li$; $B = Na, Ca, Mn^{2+}, Fe^{2+}, Mg, Li$; $C = Mg, Fe^{2+}, Mn^{2+}, Al, Fe^{3+}, Mn^{3+}, Cr^{3+}, Ti^{4+}, Li$; $T = Si, Al, Ti^{4+}, Be$; e $W = (OH), F, Cl, O^{2-}$. As variedades conhecidas dos minerais de anfibólio asbesto e suas fórmulas químicas são:

Grunerita (var. amosita) – $\square\{Fe^{2+}\}_2\{Fe^{3+}\}_2(Si_8O_{22})(OH)_2$;

Riebeckita (var. crocidolita) - $\square\{\text{Na}_2\}\{\text{Fe}_2^{+3}\text{Fe}_3^{+2}\}\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$;

Tremolita - $\square\{\text{Ca}_2\}\{\text{Mg}_5\}(\text{Si}_8\text{O}_{22})(\text{OH})_2$;

Actinolita - $\square\{\text{Ca}_2\}\{\text{Mg}_{4.5-2.5}\text{Fe}_{0.5-2.5}\}(\text{Si}_8\text{O}_{22})(\text{OH})_2$;

Antofilita - $\square\{\text{Mg}_2\}\{\text{Mg}_5\}(\text{Si}_8\text{O}_{22})(\text{OH})_2$;

$\square$ - vazio no sítio “A” da estrutura do anfibólio.

A formação de anfibólio asbestiforme resulta do crescimento ao longo de uma direção cristalográfica de uma fibra de um único cristal (Skinner et al., 1988). Estes minerais, geralmente, ocorrem em veios criados a partir de preenchimento de fraturas. Quando abertas, estas fraturas produzem regiões de deformação negativa que associadas ao fluxo de soluções influenciam na nucleação, crescimento e direção das fibras (Ross, 1981). Usualmente, as fibras de anfibólio asbestiformes apresentam uma maior tendência a conter defeitos cristalinos, comparando-se aos não asbestiformes (e.g. defeitos de Wadsley, geminação e desordem na largura da cadeia; Steel & Wylie, 1981; Virta, 2002). A concentração de defeitos em minerais de anfibólio asbesto pode ser um importante fator no papel de formação das fibras, já que imperfeições nas superfícies (100) e (010) podem atuar como planos de enfraquecimento, facilitando a separação lateral das fibras (Steel & Wylie, 1981).

ASPECTOS GENÉTICOS

A gênese de depósitos para que formem as fibras de asbesto requer condições químicas, de nucleação e crescimento, de modo que devam permanecer durante longo período, permitindo o crescimento contínuo de cadeias de silicatos (Whittaker, 1979). Os minerais de asbesto ocorrem, principalmente, em rochas ultramáficas e máficas (e.g. dunitos e anfibolitos) metassomatizadas e subsequentemente cisalhadas e silicificadas e raramente em rochas carbonáticas (e.g. dolomito e mármore) serpentinizadas. Podem ocorrer ainda associadas às formações ferríferas bandadas submetidas à metamorfismo termal e intrusões alcalinas (Van Gosen, 2007).

Dentre os depósitos, aqueles onde o asbesto pode ser facilmente separado da rocha encaixante, facilitando o processo de exploração são considerados economicamente viáveis (Ferreira Filho & Linares, 2009).

Crisotila

A crisotila ocorre como veios em serpentinitos, rochas ultramáficas parcialmente serpentinizadas e mármores dolomíticos (Virta, 2002). Os principais depósitos deste asbesto são encontrados em serpentinitos, formados por processos de alteração hidrotermal de rochas máficas/ultramáficas (Van Gosen, 2007). Vários fatores são determinantes para o desenvolvimento das fibras de crisotila em serpentinitos: (i) ausência de foliação, devido ao impedimento do processo de fraturamento por esta textura; (ii) proximidades a zonas de falha ativa durante a mudança na orientação do campo de deformação; (iii) serpentinito deve estar no campo de estabilidade da crisotila; e (iv) não pode haver elevado incremento de temperatura (Harvey-Kelly, 1995).

Os depósitos tipo crisotila são divididos em: *cross fibers*, *slip fibers* e *mass fibers*. O processo de mineralização de crisotila em *cross fibers* é o mais comum e pode ser explicado, primeiramente, pelo encaixe e subsequente alteração de rochas ultramáficas para serpentinitos, que sofrem deformações estruturais (*e.g.* dobramento, falhamento e cisalhamento). Quando fraturado, o serpentinito exibe áreas propensas a processos hidrotermais e deformação transpressional (*e.g.* Mina Cassiar; Harvey-Kelly, 1995). Assim, os cristais fibrosos da crisotila crescem perpendiculares às fraturas, mantidas abertas pela pressão hidrostática, e têm seu comprimento limitado pela largura da fratura (Hendry, 1965). Um exemplo brasileiro deste tipo de depósito, ocorre na Mina de Cana Brava (GO), onde crisotila é encontrada na forma de veios compactos, preenchendo fraturas em ultramafitos formando estruturas conhecidas como “stockwork” (Correia, 1994; Ferreira Filho & Linares, 2009).

Os depósitos do tipo *slip fiber* resultam da extrema deformação de serpentinitos, os quais são bastante fraturados em consequência da saturação em fluidos hidrotermais e recristalização, resultando no crescimento das fibras paralelas às faces das fraturas. Os depósitos do tipo *mass fiber* revelam fortes processos de fraturamento em serpentinitos, onde as fibras ocorrem como pequenas placas ou aglomerados brancos.

Amosita e Crocidolita

Apesar da pequena diferença composicional, amosita e crocidolita possuem origem similar, ocorrendo em formações ferríferas bandadas metamorfizadas (Hendry, 1965). A crocidolita é inicialmente cristalizada em riebeckita maciça, em condições de temperatura e pressão

moderadas, e a transformação para o hábito asbestiforme pode resultar da instabilidade durante a deformação cisalhante (Harvey-Kelly, 1995; Deer et al., 2013). A crocidolita foi extensamente explorada nos depósitos das províncias Cape e Transvaal na África do Sul, em Hamersley Range no oeste da Austrália e da Bolívia. Na África do Sul e no oeste da Austrália, a crocidolita ocorre como *cross-fibers*, similar a crisotila, em fraturas relativamente paralelas aos planos de estratificação das formações ferríferas. A amosita ocorre comumente associada a magnetita e quartzo, ou granada almandina e olivina fayalita (bandas de eulysita; Harvey-Kelly, 1995).

Antofilita, Tremolita e Actinolita

Com depósitos mundialmente conhecidos na Finlândia (Ilgren & Hoskens, 2018), a antofilita hospeda-se principalmente em talco- e biotita xistos. Ocorre como lentes formadas pelo produto de zona de reação (anfíbolização e serpentinização) entre rochas ultramáficas (e.g. peridotito serpentinizados) e demais rochas da região como granitos e pegmatitos (Kennedy, 1990; Harvey-Kelly, 1995).

Tremolita e actinolita asbestos são reportados em veios de corpos ultramáficos metamorfizados e foram explorados no leste dos Estados Unidos e em alguns países, como a Índia, ainda podem ser explorados (Van Gosen, 2007). Skarns também são litotipos favoráveis à formação de tremolita-actinolita asbestos, já que as variedades prismáticas destes minerais são comumente observadas em corpos de substituição em mármore (Van Gosen, 2007).

TÉCNICAS DE IDENTIFICAÇÃO DE MINERAIS ASBESTIFORMES

Para caracterização mineralógica (fibras maiores que 5 μm), as fibras de asbesto são identificadas por suas propriedades ópticas através do microscópio petrográfico e quando muito finas, por microscópios eletrônicos de varredura e de transmissão. Neste trabalho, a técnica da microscopia petrográfica foi utilizada e pode ser encontrada abaixo. A composição química pode ser avaliada utilizando a espectrometria por fluorescência de raios-X ou espectroscopia de fotoelétrons excitados por raios-X (Virta, 2002), enquanto sua estrutura cristalina é identificada através de difração de raios-X (Yada, 1971; Virta, 2002).

Outras técnicas de caracterização ainda podem ser aplicadas, como a espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier, onde os asbestos apresentam bandas de absorção

próximas a 3680 e 3650 cm^{-1} associadas à vibração de estiramento de Mg–OH e bandas próximas a 1000 e 950 cm^{-1} típicas do estiramento de Si–O–Si (Kusiorowski et al., 2012). A recente técnica de imageamento hiperspectral foi aplicada em materiais cimentícios contendo fibras de asbesto como crisotila e crocidolita, onde foi possível a identificação e localização na amostra destes minerais através de um método não destrutivo (Bonifazi et al., 2015). Ainda, através da análise termodiferencial e termogravimétrica, a crisotila, por exemplo, pode ser identificada pela forte curva exotérmica com pico em 830 °C, a diferenciando de outros minerais associados, como o talco (Virta, 2002).

OCORRÊNCIA DE ASBESTO DO SÍTIO XILILI (PE)

Localizado no Nordeste do Brasil, o Serpentinó Xilili está geologicamente inserido na Província Borborema, definida por Almeida et al. (1981), no contexto da Sub-Província Transversal, no Terreno Rio Capibaribe (Fig. 5.4a; Van Schmus et al., 2011; Santos et al., 2021). Este corpo metamórfico, provavelmente derivado de um peridotito, ocorre como lentes bastante intemperizadas compostas por antigorita, serpentina, talco, magnesita e clorita de coloração esverdeada a esbranquiçada dentro do pacote de rochas metavulcanosedimentares do Complexo Riacho do Tigre (Fig. 5.4b; Santos et al., 2017). Neste serpentinó, destaca-se o asbesto antofilítico do Sítio Xilili ocorrendo em veios irregulares associados a anfíbolitos e serpentinó (Santos, 1971; Milet et al., 1984). O asbesto do Sítio Xilili aflora em garimpos abandonados e são identificados pela presença de um solo areno-argiloso, marrom avermelhado que podem ser observados por imagens de satélite (Fig. 5.4c). Estes solos são comumente observados com concreções ferruginosas e fragmentos de rochas metamáficas/metaultramáficas muito alteradas (Fig. 5.4d).

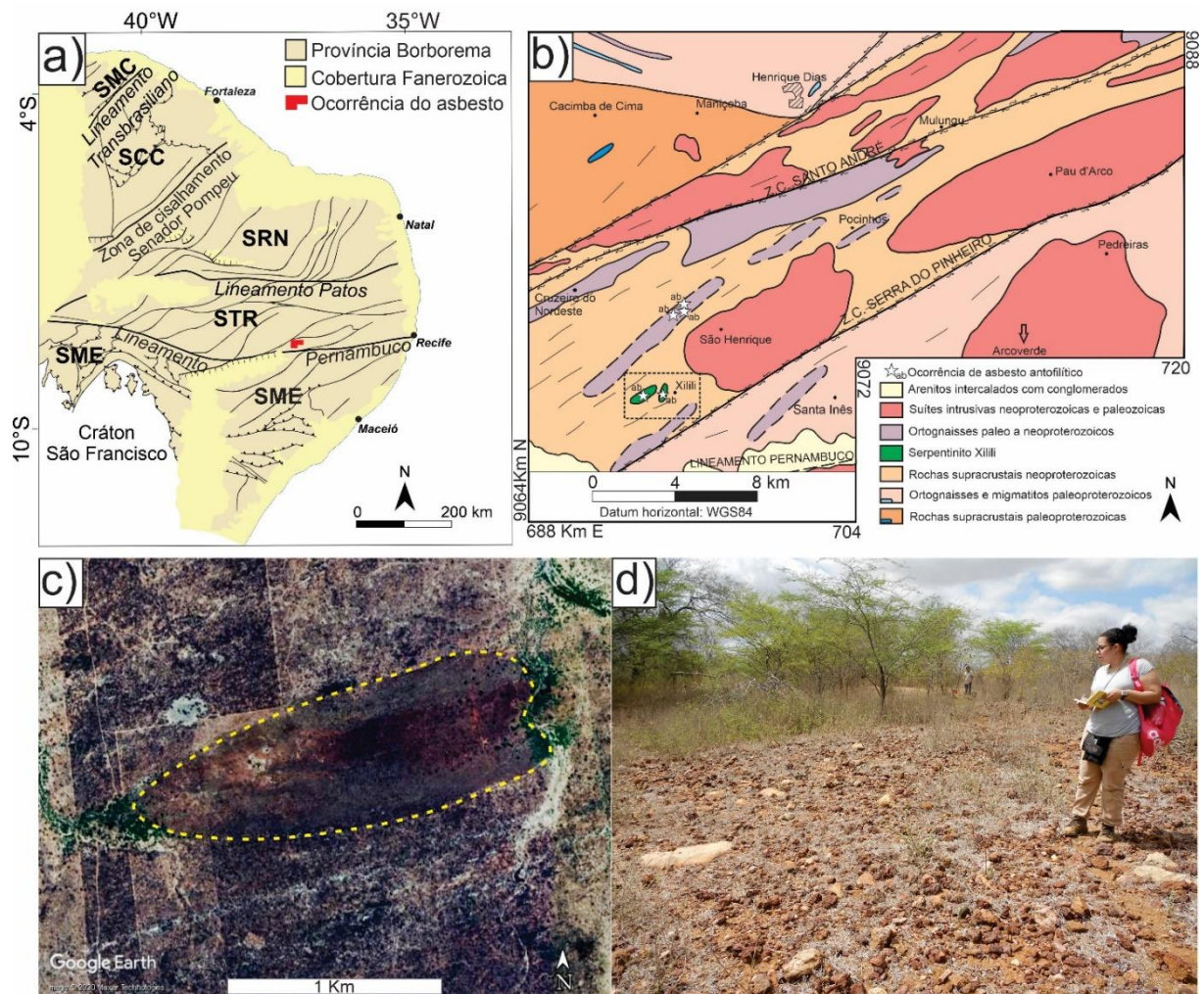


Figura 5.4. Contexto geológico de ocorrência do Serpentinito Xilili. a) Compartimentação da Província Borborema. Modificado de Santos et al. (2014). b) Mapa simplificado do contexto geológico local de ocorrência do Serpentinito Xilili, onde se encontra a ocorrência do asbesto antifilítico. O quadrado pontilhado representa a localização de asbesto do Sítio Xilili (PE). Modificado de Santos et al. (2017). c) Imagem de satélite do Google Earth demonstrando a ocorrência da lente do Serpentinito Xilili, onde estão localizadas as mineralizações de asbesto. d) Solo areno-argiloso marrom avermelhado com cobertura de concreções lateríticas e rochas metaultramáficas intemperizadas.

O antifilita asbesto ocorre, majoritariamente, como depósitos do tipo *mass-fiber*, onde as fibras de antifilita são amareladas com brilho sedoso, curtas e quebradiças sendo agrupadas e dispostas de forma aleatória (Figura 5.5a). Também são observadas as fibras de antifilita como agregados maciços de fibras paralelas, amarela-amarronzadas de brilho sedoso, alongadas e quebradiças, com aspecto semelhante a uma madeira (Figura 5.5b), típicas de depósitos antifilíticos do tipo *slip fiber*, como descrito por Anderson (1956). Por vezes, o asbesto em

mass fiber apresenta, em porções menos alteradas, cristais colunares de antofilita, com brilho vítreo e coloração amarronzada, apresentando um traço de clivagem bom e partição perpendicular ao eixo C do cristal. Variações de cores observadas em amostras são correlacionadas com a presença de talco e clorita, que conferem colorações esbranquiçadas e esverdeadas ao asbesto antofilítico, respectivamente.

Microscopicamente, o asbesto do tipo *mass fiber* é composto por antofilita asbestiforme e relictos cristalinos, além de magnetita e raramente clorita secundária. As fibras de antofilita são incolores, em sua maioria, manchadas pela alteração da magnetita, formando grandes massas de fibras dispostas aleatoriamente (Figura 5.5c). Os cristais relictos de antofilita são prismáticos subédricos, incolores e dispostos aleatoriamente, geralmente com um traço de clivagem paralelo ao eixo C do cristal, e partição perpendicular ao mesmo eixo, a qual se encontra preenchida por magnetita (Figura 5.5d). A magnetita também ocorre como grãos subédricos a anédricos e bastante alterados, e eventualmente ocorrem intercalados com as fibras de asbesto.

Quando do tipo *slip fiber*, as fibras são incolores, mas em sua maioria manchadas por alteração de magnetita para aglomerados de óxidos de ferro. São observados poucos cristais relictos de antofilita, comparado ao tipo *mass fiber*. As fibras são, por vezes, dispostas com uma leve orientação e em algumas porções, as partições perpendiculares ao eixo C do cristal preenchidas por magnetita (Figura 5.5e). Os cristais de antofilita do tipo *slip fiber* também permitiram observar que a formação das fibras de asbestos antofilíticos se deram através da separação de cristalitos nas bordas dos grãos alongados ao eixo C, que se desagregam formando as fibras de asbesto, como descrito também por Veblen (1980) (Figura 5.5f).

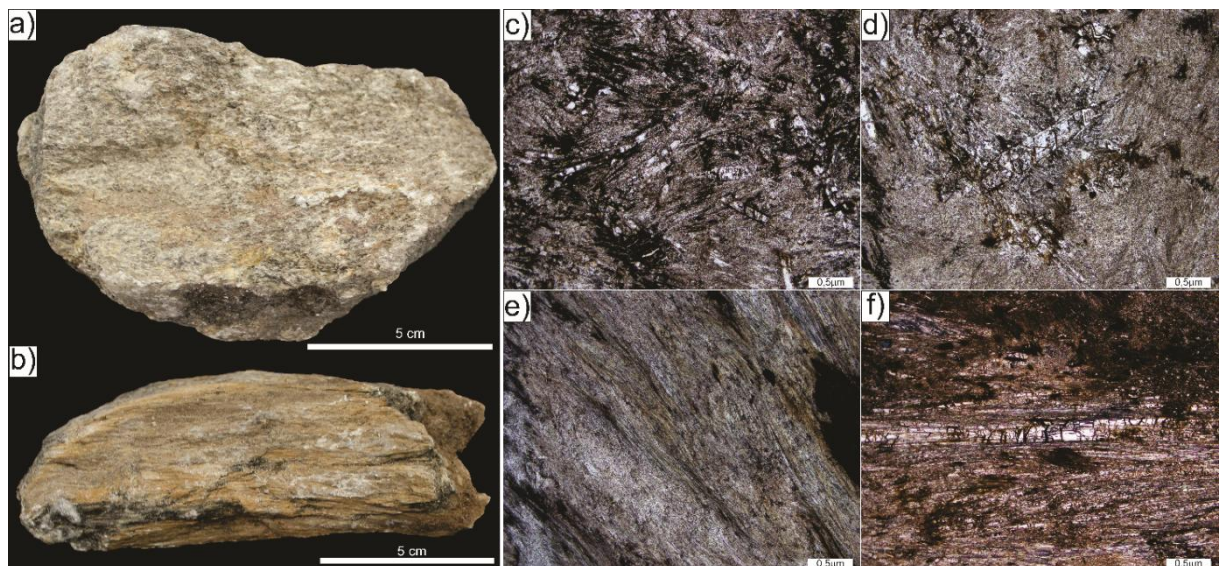


Figura 5.5. Asbesto do Sítio Xilili. a) Ocorrência do tipo *mass fiber* onde as fibras são curtas e agregadas de forma aleatória. b) Ocorrência do tipo *slip fiber* determinada pelas fibras longas e paralelas entre si resultando em um aspecto semelhante a madeira. c) Microfotografia a polarizadores paralelos de asbesto do tipo *mass fiber* demonstrando as fibras e cristais da antofilita dispostos aleatoriamente na amostra. As manchas escuras observadas associadas à grande massa de fibras e cristais são resultado da alteração da magnetita, estas também deixam um aspecto amarelado nas fibras, observadas principalmente macroscopicamente. d) Microfotografia a polarizadores paralelos de asbesto do tipo *mass fiber* destacando o cristal incolor e tabular de antofilita, com partição perpendicular ao eixo C preenchida pelo material de alteração da magnetita, que também mancha as fibras do asbesto. e) Microfotografia a polarizadores paralelos de asbesto do tipo *slip fiber*, em que se observa a partição perpendicular ao eixo C preenchida pelo material de alteração da magnetita perpendicular aos aglomerados das fibras de antofilita paralelas ao eixo maior do cristal. f) Cristal de antofilita alongado ao eixo C formando fibras de asbesto em suas bordas por desagregação.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por diversas décadas, os minerais de asbesto, principalmente crisotila, crocidolita e amosita, constaram como uns dos mais importantes e estudados minerais industriais. Aproximadamente 3000 produtos derivados destas fibras podem ser produzidos, com as principais aplicações concentrando-se no fibrocimento (canos, telhas e caixas d'água), materiais de fricção, gaxetas e papeis (Harvey-Kelly, 1995). O amplo emprego do amianto devido as suas propriedades resistentes à combustão e maleabilidade, dificilmente equiparadas a outros materiais, fazem com que esse grupo de minerais seja de difícil substituição.

Por outro lado, o estudo de ocorrências de asbesto pode trazer informações importantes concernentes ao caráter econômico e geológico de grande importância, tendo em vista que em sua grande maioria, os depósitos de asbesto estão associados às rochas ultramáficas, que são alvos de importância econômica (e.g. Depósitos ricos em Ni, Cu, Grupo da Platina, Ti e Fe; Ripley & Li, 2018). No caso do depósito de asbesto antofilítico do Sítio de Xilili, este trabalho traz uma primeira descrição voltada para a mineralogia de um depósito conhecido desde a década de 1970. Ainda, é demonstrada como se pode identificar a ocorrência de minerais de asbesto, neste caso antofilita asbesto, através da observação em campo, de amostras macroscópicas e através de lâmina delgada em microscópio petrográfico.

REFERÊNCIAS

- Almeida, F. F. M.; Hashui, Y.; Brito Neves, B.B.; Fuck, R. A. 1981. Brazilian structural provinces: an introduction. *Earth-Science Reviews* 17, 1-29.
- Bonifazi, G.; Copobianco, G.; Serranti, S. 2015. Hyperspectral Imaging Applied to the Identification and Classification of Asbestos Fibers. *2015 IEEE Sensors Journal*, 1-4.
- Castro, H. A. & Gomes, V. R. 1997. Doenças do aparelho respiratório relacionadas à exposição ao amianto. *Revista Pulmão* 6, 162-170.
- Capellozzi, V. L. 2000. Asbesto, asbestose e câncer: critérios diagnósticos. *Jornal Brasileiro de Pneumologia* 27 (4), 206-218.
- Correia, C.T. 1994. *Petrologia do Complexo Máfico-Ultramáfico de Cana Brava, Goiás*. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo-SP.
- Craighead, J. E. & Gibbs, A. R. 2008. *Asbestos and Its Diseases*. Nova Iorque: Oxford University Press, 410p.
- Cressey B. A.; Cressey, G.; Cernik, R. J. 1994. Structural variations in chrysotile asbestos fibers revealed by synchrotron X-ray diffraction and high resolution transmission electron microscopy. *Canadian Mineralogist* 32, 257-270,
- Deer, W. A.; Howie, R. A.; Zussman, J. 2013. *An Introduction to the Rock Forming Minerals 3rd edition*. Nova Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 495p.
- Europaeus-Äyräpää, A. 1930. Die relative Chronologie der steinzeitliche Keramik in Finnland I & II. *Acta Archaeologica I: Fasc. 2 & 3*.
- Ferreira Filho, O. B. & Linares, W. B. 2009. Crisotila. In: DNPM, Silva Rodrigues, S .F. (Org.). *Economia Mineral do Brasil*. Brasília: DNPM, p.655-679.
- Garcia, R.; Duarte, E.; Khoury, J.; Carreira, L.; Silva, G.; Thame, A. M. 2010. *Relatório do Grupo de Trabalho da Comissão de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável da Câmara dos Deputados destinado à análise das implicações do uso do amianto no Brasil*. Câmara dos Deputado do Brasil, 682p.
- Harvey-Kelly, F. E. L. 1995. *Asbestos occurrences in British Columbia*. British Columbia: British Columbia Ministry of Energy, Mines and Petroleum Resources, 102p.

- Hawthorne, F. C.; Oberti, R.; Harlow, G. E.; Maresch, W. V.; Martin, R. F.; Schumacher, J. C., Welch, M. D. 2012. Nomenclature of the amphibole supergroup. *American Mineralogist* 97, 2031-2048.
- Hendry, N. W. The Geology, occurrences, and major uses of Asbestos. 1965. *Annals of the New York Academy of Sciences* 132, 12–21.
- Kennedy, B. A. 1990. *Surface Mining, 2 ed.* Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc., 1194p.
- Ilgren, E. B. & Hoskens, J. 2018. Anthophyllite Asbestos: The Role of Fiber Width in Mesothelioma Induction Part 2: Further Epidemiological Studies of Occupational, Domestic and Environmental Exposure to Finnish Anthophyllite Asbestos. *Environment and Pollution* 7 (1), 24-35.
- Kusiorowski, R.; Zaremba, T.; Piotrowski, J.; Adamek, J. 2012. Thermal decomposition of different types of asbestos. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 109, 693-704.
- Mendes, R. 2001. Asbesto (amianto) e doença: revisão do conhecimento científico e fundamentação para uma urgente mudança da atual política brasileira sobre a questão. *Cadernos de Saúde Pública* 17 (1), 7-29.
- Milet, H. A. R (Coordenador). 1984. *Projeto cadastramento das ocorrências minerais do Estado de Pernambuco*. Recife: Minérios do Brasil; SUDENE. 261p.
- Nogueira, D. D.; Certain, D. A.; Uesugui, S. J.; Koga, R. K.; Ribeiro, H. P. 1975. Asbestose no Brasil: um risco ignorado. *Revista de Saúde Pública* 9 (3), 427-432.
- O’hanley, D. S. & Dyar, M. D. 1998. The composition of chrysotile and its relationship with lizardite. *Canadian Mineralogist* 36, 727-740.
- Oury, T. D.; Sporn, T. A.; Roggli, V. L. 2014. *Pathology of Asbestos-Associated Diseases*. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 357p.
- Pollastri, S.; Perchiazzi, N.; Lezzerini, M.; Plaisier, J. R.; Cavallo, A.; Dalconi, M. C.; Gandolfi, N. B.; Gualtieri, A. F. 2016. The crystal structure of mineral fibres. 1. Chrysotile. *Periodico di Mineralogia* 85, 249-259.

Queiroga, N. C. M.; Pamplona, R. I.; Linares, W. B.; Luz, A. B.; Pontes, I. F. Amianto. In: Luz, A. B.; Lins, F. A. F. (Coordenadores). 2005. *Rochas & minerais industriais: usos e especificações*. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, p. 85-106.

Ripley, E. M. & Li, C. Metallic Ore Deposits Associated With Mafic To Ultramafic Igneous Rocks. In: Mondal, S. K.; Griffin, W. L. (Coordenadores). 2018. *Processes and Ore Deposits of Ultramafic-Mafic Magmas through Space and Time*. Amsterdam: Elsevier, p. 79-111.

Ross, M. The geologic occurrences and health hazards of amphibole and serpentine asbestos. In: VEBLEN, D. R. (Coordenador). 1981. *Amphiboles and other hydrous pyriboles—Mineralogy*. Washington, D.C.: Mineralogical Society of America Reviews in Mineralogy, p. 279-319.

Ross, M. 1987. Minerals and Health: The Asbestos Problem. In: Pierce, H. W. (Coordenador) *Proceedings of the 21st Forum on the Geology of Industrial*. Arizona: Arizona Bureau of Geology and Mineral Technology Special Paper, p. 83-89.

Ross, M.; Langer, A. M.; Nord, G. L.; Nolan, R. P.; Lee, R. J.; Van Orden, D. & Addison, J. 2007. The mineral nature of asbestos. *Regulatory Toxicology and Pharmacology* 52, S26-S30.

Ross, M. & Virta, R. L. 2001. Occurrence, production and uses of asbestos. In: Nolan, R. P.; Langer, A. M.; Ross, M.; Wicks, F. J.; Martin, R. F., (Coordenadores), *The Health Effects of Chrysotile Asbestos*. Ottawa: The Canadian Mineralogist, Special Publication 5, p. 79–88.

Santos, C. A.; Accioly, A. C. A.; Leite, P. R. B.; Lins, C. A. C.; Santos, R. B.; Mendes, V. A., Bezerra, D. R. S. 2017. *Geologia e Recursos Minerais da Folha Sertânia, Estados de Pernambuco e Paraíba*. CPRM, Recife, PE, 158 p.

Santos, E. J. 1971. *Síntese da geologia do pré-cambriano da folha Arcoverde - Nordeste do Brasil*: relatório preliminar sobre o levantamento geológico da Folha Arcoverde, escala 1:200.000. Recife: SUDENE, 33p.

Santos, L. C. M. L.; Fuck, R. A.; Santos, E. J.; Dantas, E. L. 2014. Análise Tectônica de Terrenos: Metodologia, Aplicação em Cinturões Orogênicos e Exemplo Das Províncias Tocantins e Borborema, Brasil. *Geonomos* 22 (2), 51-63.

Santos, L.C.M.; Oliveira, R.G.; Lages, G.A.; Dantas, E.L.; Caxito, F.A.; Cawood, P.A.; Fuck, R.A.; Lima, H.M.; Santos, G.L.; Araújo Neto, J.F. 2021. Evidence for Neoproterozoic terrane

accretion in the central Borborema Province, West Gondwana deduced by isotopic and geophysical data compilation. *International Geology Review* 63, 1-20.

Scliar, C. 1998. *Amianto: Mineral Mágico ou Maldito? Ecologia Humana e Disputa Político-Econômica*. Belo Horizonte: CDI, 152p.

Skinner, H. C. W.; Ross, M.; Frondel, C. 1988. *Asbestos and other fibrous materials*. Nova Iorque: Oxford University Press, 204p.

Steel, E. & Wylie, A. G. 1981. Mineralogical Characteristics of Asbestos. In: RIORDON, P.H. (Coordenador), *Geology of Asbestos Deposit, USA*: Society for Mining Metallurgy, p. 93-99.

Strohmeier, B. R.; Huntington, J. C.; Bunker, K. L.; Sanchez, M. S.; Allison, K.; Lee, R. J. 2010. What is asbestos and why is it important? Challenges of defining and characterizing asbestos. *International Geology Reviews* 52 (7-8), 801-872

Stroink, G.; Blaauw, C.; White, C. G.; Leiper, W. 1980. Mössbauer characteristics of UICC standard reference asbestos samples. *The Canadian Mineralogist* 18, 285-290,

Swayze, G. A.; Kokaly, R. F.; Higgins, C. T.; Clinkenbeard, J. P.; Clark, R. N.; Lowers, H. A.; Sutley, S. J. 2009. Mapping potentially asbestos-bearing rocks using imaging spectroscopy. **Geology** 37 (8), 763-766.

Terra Filho, M.; Freitas, J. B. P.; Nery, L. E. 2006. Doenças asbesto-relacionadas. *Jornal Brasileiro de Pneumologia* 32 (2), S48-S53.

The Observatory Economic Complexity. *Which countries export Asbestos?* Disponível em: https://oec.world/en/visualize/tree_map/hs92/export/show/all/2524/2011/. Acessado em: 25fev2020.

Van Gosen, B. S. 2007. The Geology of Asbestos in the United States and Its Practical Applications. *Environmental & Engineering Geoscience* 13 (1), 55-68.

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.

Veblen, R. D. 1980. Anthophyllite asbestos: microstructures, intergrown sheet silicates, and mechanisms of fiber formation. *American Mineralogist* 65, p. 1075-1086.

Virta, R. L. 2001. *Some facts about asbestos Virginia*: U.S. Geological Survey Fact Sheet FS-012-01, 4p.

Virta, R. L. 2002. *Asbestos—Geology, mineralogy, mining, and uses*. Virginia: U.S. Geological Survey Open-File Report 02-149, 35p.

VIRTA, R. L. 2005. *Mineral Commodity Profiles—Asbestos*: U.S. Geological Survey Circular 1255–KK, 56 p.

Virta, R. L. & Mann, E. L. 1994. Asbestos. In: CARR, D. D. (Coordenador) *Industrial minerals and rocks (6th ed.)*. Colorado: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., p. 97-124.

Whittaker, E. J. W. 1979. Mineralogy, chemistry and crystallography of amphibole asbestos. In: LEDOUX, R. L. (Coordenador). *Short Course in Mineralogical Techniques of Asbestos Determination*. Ottawa: Mineralogical Association of Canada, pp. 1–34.

Yada, K. 1971. Study of Microstructure of Chrysotile Asbestos by High Resolution Electron Microscopy. *Acta Crystallographica*, v. A27, 659-664.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os estudos desenvolvidos na Província Borborema são diversos, entre eles, muitos pesquisadores buscam entender sua evolução geotectônica, principalmente, em termos dos eventos neoproterozoicos. Como foco principal desta discussão, a Subprovíncia Transversal é considerada um alvo a ser desvendado, e uma coletânea estudos neste viés vêm sendo desenvolvidos nos domínios presentes. Entretanto, para o Terreno Rio Capibaribe a evolução das pesquisas não evoluiu de forma similar. Sendo assim, esta tese busca com a integração dos dados evidenciar, à luz do caráter acrescionário, o desenvolvimento geotectônico para a porção oriental da Subprovíncia Transversal, além de demonstrar a ocorrência de asbesto antofilítico associado ao Complexo Riacho do Tigre do Terreno Rio Capibaribe.

A análise de dados desenvolvida nesta tese apresenta evidências para a tectônica acrescionária dada pelos distintos domínios geológicos, geofísicos e estruturais entre os Terrenos Rio Capibaribe e Alto Moxotó, limitados pelo Sistema de Cisalhamento Congo-Cruzeiro do Nordeste. Neste contexto, diversos estudos utilizando dados geológicos, geofísicos e estruturais contrastantes entre domínios geológicos são indicadores do conceito da existência de terrenos e da tectônica acrescionária. Assim, conclui-se nos parágrafos abaixo através de uma coletânea de dados que embasam a hipótese de terrenos para o TRC e o TAM, corroborada também por diversos estudos que demonstram contrastes observados em anomalias gravimétricas residuais de Bouguer e de superfícies Curie.

Assim, foi observado que o Terreno Rio Capibaribe se constitui de rochas supracrustais neoproterozoicas com expressivas intrusões de granitoides brasileiros, recortados por extensas zonas de cisalhamento de ENE-WSW, que refletem em domínios geofísicos de alta concentração do radioelemento K, distribuída em 8 dos 14 domínios radiométricos. Os domínios magnéticos para o TRC apresentam um *trend* geral NE-SW a ENE-SWS para 1º e 2ª ordens de lineamentos que refletem em soluções rasas até medianas para a deconvolução de Euler (250 m > profundidades < 1000 m). O domínio estrutural do TRC, com feições macroscópicas similares aos domínios magnéticos, inclui foliações miloníticas, associadas às zonas de cisalhamento, subverticais a verticais com caimento para NW e SW, associadas a lineações sub-horizontais a suaves. Critérios cinemáticos como bandas de cisalhamento C, boudins assimétricos e porfiroclastos de feldspato definem uma cinemática sinistral para a zona de cisalhamento Serra do Pinheiro, e dextral para as zonas de cisalhamento Apolinário, Santo André e Ororobá.

Por outro lado, o Terreno Alto Moxotó constitui-se de rochas essencialmente paleoproterozoicas, com dobramentos expressivos, dada pela extensa zona de empurrão que limita o embasamento ortognáissico do supracrustal. Tais características refletem em concentrações elevadas a medianas para os radioelementos eTh e eU distribuídos em 5 dos 14 domínios radiométricos. Os domínios magnéticos foram mais abrangentes do TAM (6 domínios), onde predominam lineamentos de 1º ordem dobrados, também visíveis nos dados de deconvolução de Euler para soluções rasas (profundidades < 250 m). Ainda, corroborando com os dados magnéticos, o domínio estrutural do TAM se caracteriza por ortognaisses bandados e migmatizados com dobras gentis a suaves que refletem a zona de cisalhamento de empurrão Rio da Barra, onde ocorrem foliações com caimento NNW com lineação mineral de alto rake.

O Sistema de Cisalhamento Congo-Cruzeiro do Nordeste, de cinemática sinistral (Congo) e dextral (Cruzeiro do Nordeste), foi descrito como um possível limite entre os terrenos Rio Capibaribe e Alto Moxotó. Indicadores são dados tanto pela análise de microestruturas, das quais apresentam fábricas S-C e recristalização de subgrão de quartzo por *bulging* e rotação que indicam temperatura próximas a 500 °C. Ainda, o domínio estrutural para o SCCCNE demonstra um corredor milonítico de lineações com caimento intermediários, que distingue do caimento alto para o TAM e subvertical do TRC, sendo um fator resultante da colagem dos terrenos, causado pelo particionamento dos esforços. Ainda, pode-se citar a presença de rochas máficas e ultramáficas do Serpentinito Xilili interpretada como possível remanescente ofiolítico, evidenciando a colagem de terrenos entre o TRC e TAM.

Em termos econômicos, pode-se citar para o Terreno Rio Capibaribe a grande ocorrência de corpos graníticos utilizados para pisos, revestimentos e brita. Adicionalmente, o TRC também hospeda mineralizações de asbesto antofilítico, que apesar da comercialização proibida, teve uma grande contribuição econômica na década de 1970. Esta tese traz uma primeira descrição da ocorrência de asbesto localizados no Sítio Xilili, inseridos no Complexo Riacho do Tigre, próximo ao limite dos terrenos. Foram observadas ocorrências do tipo slip-fiber e mass fiber, associados a metamafitos e metaultramafito. Tendo em vista a ocorrência desta mineralização e sua posição próxima ao Sistema de Cisalhamento Congo-Cruzeiro do Nordeste, pode-se propor algumas hipóteses a serem respondidas em trabalhos futuros, das quais trazem a luz a presença de fluidos responsáveis para a formação deste asbesto e se estão conectados ao limite dos terrenos, e sua gênese em mais de uma geração (uma fase dúctil conectada ao depósito slip-fiber e uma fase rúptil conectada ao depósito mass fiber).

REFERÊNCIAS

- Accioly, A. C. A. 2001. *Geologia, Geoquímica e Significado Tectônico do Complexo Metanortositico de Passira – Província Borborema-Nordeste Brasileiro*. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 168 p.
- Accioly, A.C.A. et al. 2015. *Geologia e Recursos Minerais da Folha Pesqueira SC.24-X-B-II. Escala 1:100.000. Estados de Pernambuco e Paraíba*. Recife: CPRM.
- Accioly, A. C. A., McCreath, I., Santos, E. J., Guimarães, I. P., Santos, C.A. 2003. The ages of crystallization and metamorphism of the Passira Anorthosite Complex- Borborema Province- Brasil, Northeast Brazil. In: *South American Symposium on Isotope Geology*, 4., 2003. Salvador, Short Papers, p. 487-490.
- Accioly, A.C.A., Santos, C.A., Santos, E. J., Brito Neves, B.B., Rodrigues, J.B., McCreath, I., 2010. Geochronology and Geochemistry of the meta-volcanic rocks from Riacho do Tigre Complex, Borborema Province Northeastern Brazil, in: *South American Symposium on Isotope Geology*, 7. Brasília. CD-ROM.
- Alkmim, F.F., Marshak, S., Pedrosa-Soares, A.C., Peres, G.G., Cruz, S.C.P., Whittington, A., 2006. Kinematic evolution of the Araçuaí-West Congo orogen in Brazil and Africa: Nutcracker tectonics during the Neoproterozoic assembly of Gondwana. *Precambrian Research* 149, 43–64. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2006.06.007>
- Almeida, F. F. M.; Hashui, Y.; Brito Neves, B.B.; Fuck, R. A. 1981. Brazilian structural provinces: an introduction. *Earth-Science Reviews* 17, 1-29.
- Almeida, G.M., Fuck, R.A., Dantas, E.L., Lima, S.S., 2022. Oblique collision and accretionary processes in the South Borborema Province: Insights from structural geology and geophysical data. *Tectonophysics* 844, 229607. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2022.229607>
- Almeida, G.M., Fuck, R.A., Lima, D.P.D., Dantas, E.L., 2021. Accretion tectonics in Western Gondwana highlighted by the aeromagnetic signature of the Sergipano Belt, NE Brazil. *Tectonophysics* 802, 228742. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2021.228742>
- Araïbia, K., Amri, K., Amara, M., Bendaoud, A., Hamoudi, M., Pedrosa-Soares, A., de Andrade Caxito, F., 2022. Characterizing terranes and a Neoproterozoic suture zone in Central Hoggar

(Tuareg Shield, Algeria) with airborne geophysics and Landsat 8 OLI data. *Journal of African Earth Sciences* 187, 104455. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2022.104455>

Araújo Neto, J.F., Santos, G.L., Souza, I.M.B.A. e, Barreto, S.B., Santos, L.C.M.L., Bezerra, J.P.S., Carrino, T.A., 2018. Integration of remote sensing and airborne geophysical data applied to geological mapping: a case study of the Vieirópolis region (Paraíba), Rio Grande do Norte Subprovince, Borborema Province. *Geologia USP. Série Científica* 18, 89–103. <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v18-140834>

Barbosa, V.C.F., Silva, J.B.C., 2005. Deconvolução de Euler: passado, presente e futuro - um tutorial. *Revista Brasileira de Geofísica* 23. <https://doi.org/10.1590/s0102-261x2005000300004>

Beltrando, M., Hermann, J., Lister, G., Compagnoni, R., 2007. On the evolution of orogens: Pressure cycles and deformation mode switches. *Earth and Planetary Science Letters* 256, 372–388. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.01.022>

Black, R., Latouche, L., Liégeois, J.P., Caby, R., Bertrand, J.M., 1994. Pan-African displaced terranes in the Tuareg shield (central Sahara). *Geology* 22, 641. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1994\)022<0641:padtit>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1994)022<0641:padtit>2.3.co;2)

Bonifazi, G.; Copobianco, G.; Serranti, S. 2015. Hyperspectral Imaging Applied to the Identification and Classification of Asbestos Fibers. *2015 IEEE Sensors Journal*, 1-4.

Brito Neves B.B. 1975. *Regionalização Geotectônica do Pré-Cambriano Nordestino*. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 198 p.

Brito Neves, B. B. 2020. Província Borborema, síntese retrospectiva do conhecimento. In: A. Bartorelli, W. Teixeira, B. B. Brito Neves (Eds.). *Geologia e Evolução Tectônica do continente Sul-Americano: a contribuição de Umberto Cordani*. São Paulo: Solaris Edições Culturais, p. 203-249.

Brito Neves, B.B., Fuck, R.A., Pimentel, M.M., 2014. The Brasiliano collage in South America: a review. *Brazilian Journal of Geology* 44, 493–518. <https://doi.org/10.5327/z2317-4889201400030010>

Brito Neves, B.B., Santos, T.J.S., Dantas, E.L. 2022. O Terreno Tectonoestratigráfico São Pedro: Oeste da Zona Transversal – Província Borborema. *Geologia USP. Série Científica* 22 (4), 45–69. <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v22-197489>

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 America. *Brazilian Journal of Geology* 46, 491–508. <https://doi.org/10.1590/2317-4889201620160004>

Brito Neves, B.B., Santos, E.J., Van Schmus, W.R., 2000. Tectonic history of the Borborema Province, northeastern Brazil, in: Cordani, U., Milani, E.J., Thomaz Filho, A., Campos, D.A. (Eds.), Proceedings of the Thirty-First International Geological Congress. *Tectonic Evolution of South America*, pp. 151–182. <https://doi.org/10.1144/SP294.4>

Brito Neves, B.B., Silva Filho, A.F., 2019. Superterreno Pernambuco-Alagoas (PEAL) na Província Borborema: ensaio de regionalização tectônica. *Geologia USP. Série Científica* 19, 3–28. <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v19-148257>

Brito Neves, B.B., Spröesser, W.M., Petronilho, L.A., Souza, S.L., 2013. Contribuição à Geologia e à Geocronologia do Terreno Rio Capibaribe (TRC, Província Borborema). *Geologia USP. Série Científica* 13, 97–122. <https://doi.org/10.5327/z1519-874x2013000200006>

Brito Neves, B.B., Van Schmus, W.R., Campos Neto, M.C. 2018. Sistema de dobramentos Piancó-Alto Brígida (PE-PB-CE). Regionalização geotectônica e geocronologia. *Geologia USP. Série Científica* 18(4), 149–171. <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v18-142182>

Brito Neves, B.B., Van Schmus, W.R., Santos, L.C.M.L., 2020. Alto Moxotó Terrane, a fragment of Columbia supercontinent in the Transversal Zone interior: Borborema Province, Northeast Brazil. *Brazilian Journal of Geology* 50. <https://doi.org/10.1590/2317-4889202020190077>

Brito Neves, B.B., Silva Filho, A.F., 2019. Superterreno Pernambuco-Alagoas (PEAL) na Província Borborema: ensaio de regionalização tectônica. *Geologia USP. Série Científica* 19, 3–28. <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v19-148257>

Campos Neto, M. C, Brito Neves, B.B., Bittar, S.M B. 1994. *Domínio tectônico Rio Pajeú: orogênese no ciclo Brasileiro Panafricano*. São Paulo, 62p. (Relatório Científico, FAPESP, Geociências 92/2079-5).

Capellozzi, V. L. 2000. Asbesto, asbestose e câncer: critérios diagnósticos. *Jornal Brasileiro de Pneumologia* 27 (4), 206-218.

Castellan, P., Viegas, G., Faleiros, F.M., 2020. Brittle–ductile fabrics and $P - T$ conditions of deformation in the East Pernambuco shear zone (Borborema Province, NE Brazil). *Journal of the Geological Society* 178. <https://doi.org/10.1144/jgs2020-109>

Castro, L.G., Ferreira, F.J.F., 2015. Arcabouço geofísico-estrutural da porção meridional do Cinturão Ribeira. *Brazilian Journal of Geology* 45, 499–516. <https://doi.org/10.1590/2317-4889201520150007>

Castro, H. A. & Gomes, V. R. 1997. Doenças do aparelho respiratório relacionadas à exposição ao amianto. *Revista Pulmão* 6, 162-170.

Cawood, P.A., Buchan, C., 2007. Linking accretionary orogenesis with supercontinent assembly. *Earth-Science Reviews* 82, 217–256. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2007.03.003>

Cawood, P.A., Chowdhury, P., Mulder, J.A., Hawkesworth, C.J., Capitanio, F.A., Gunawardana, P.M., Nebel, O., 2022. Secular evolution of continents and the Earth system. *Reviews of Geophysics*. <https://doi.org/10.1029/2022rg000789>

Cawood, P.A., Hawkesworth, C.J., Dhuime, B., 2012. The continental record and the generation of continental crust. *Geological Society of America Bulletin* 125, 14–32. <https://doi.org/10.1130/b30722.1>

Cawood, P.A., Kröner, A., Collins, W.J., Kusky, T.M., Mooney, W.D., Windley, B.F., 2009. Accretionary orogens through Earth history. *Geological Society, London, Special Publications* 318, 1–36. <https://doi.org/10.1144/sp318.1>

Cawood, P.A., Pisarevsky, S.A., Leitch, E.C., 2011. Unraveling the New England orocline, east Gondwana accretionary margin. *Tectonics* 30, 1–15. <https://doi.org/10.1029/2011tc002864>

Caxito, F.A., Basto, C.F., Santos, L.C.M.L., Dantas, E.L., Medeiros, V.C., Dias, T.G., Barrote, V., Hagemann, S., Alkmim, A.R., Lana, C., 2021. Neoproterozoic magmatic arc volcanism in the Borborema Province, NE Brazil: possible flare-ups and lulls and implications for western Gondwana assembly. *Gondwana Research* 92, 1–25. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2020.11.015>

Caxito, F.A., Santos, L.C.M.L., Ganade, C.E., Bendaoud, A., Fettous, E.-H., Bouyo, M.H., 2020. Toward an integrated model of geological evolution for NE Brazil-NW Africa: The Borborema Province and its connections to the Trans-Saharan (Benino-Nigerian and Tuareg shields) and Central African orogens. *Brazilian Journal of Geology* 50. <https://doi.org/10.1590/2317-4889202020190122>

Caxito, F.A., Santos, L.C.M.L., Uhlein, A., Dantas, E.L., Alkmim, A.R., Lana, C. 2020. New U-Pb (SHRIMP) and first Hf isotope constraints on the Tonian (1000-920 Ma) Cariris Velhos event, Borborema Province, NE Brazil. *Brazilian Journal of Geology* 50 (2), e20190082. <https://doi.org/10.1590/2317-4889202020190082>

Caxito, F.A., Uhlein, A., Dantas, E.L., Stevenson, R., Salgado, S.S., Dussin, I.A., Sial, A.N., 2016. A complete Wilson Cycle recorded within the Riacho do Pontal Orogen, NE Brazil: Implications for the Neoproterozoic evolution of the Borborema Province at the heart of West Gondwana. *Precambrian Research* 282, 97–120. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2016.07.001>

Chala, D., Tairou, M.S., Wenmenga, U., Kwékam, M., Affaton, P., Kalsbeek, F., Tossa, C., Houéto, A., 2015. Pan-African deformation markers in the migmatitic complexes of Parakou–Nikki (Northeast Benin). *Journal of African Earth Sciences* 111, 387–398. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2015.08.009>

CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2010. *Projetos Aerogeofísicos Pernambuco - Paraíba e Paraíba - Rio Grande do Norte: relatório final do levantamento e processamento dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos*. LASA & PROSPECTORS, Rio de Janeiro.

Collins, A.S., Windley, B.F., 2002. The Tectonic Evolution of Central and Northern Madagascar and Its Place in the Final Assembly of Gondwana. *The Journal of Geology* 110, 325–339. <https://doi.org/10.1086/339535>

Coney, P.J., Jones, D.L., Monger, J.W.H., 1980. Cordilleran suspect terranes. *Nature* 288, 329–333. <https://doi.org/10.1038/288329a0>

Correia, C.T. 1994. *Petrologia do Complexo Máfico-Ultramáfico de Cana Brava, Goiás*. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo-SP.

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. <https://doi.org/10.5327/z2317-48892013000300012>

Cordani, U.G., Sato, K., Sproessner, W., Fernandes, F.S., 2016. U-Pb zircon ages of rocks from the Amazonas Territory of Colombia and their bearing on the tectonic history of the NW sector of the Amazonian Craton. *Brazilian Journal of Geology* 46, 5–35. <https://doi.org/10.1590/2317-4889201620150012>

Correa, R.T., Vidotti, R.M., Oksum, E., 2016. Curie surface of Borborema Province, Brazil. *Tectonophysics* 679, 73–87. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.04.037>

Corrigan, D., Pehrsson, S., Wodicka, N., de Kemp, E., 2009. The Palaeoproterozoic Trans-Hudson Orogen: a prototype of modern accretionary processes. *Geological Society, London, Special Publications* 327, 457–479. <https://doi.org/10.1144/sp327.19>

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, Troia Massif, northern Borborema Province, Brazil: Implications for Paleoproterozoic subduction-accretion processes. *Journal of South American Earth Sciences* 59, 45–68. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2015.01.007>

Craighead, J. E. & Gibbs, A. R. 2008. *Asbestos and Its Diseases*. Nova Iorque: Oxford University Press, 410p.

Cressey B. A.; Cressey, G.; Cernik, R. J. 1994. Structural variations in chrysotile asbestos fibers revealed by synchrotron X-ray diffraction and high resolution transmission electron microscopy. *Canadian Mineralogist* 32, 257-270.

Dantas, E.L., Souza, Z.S., Wernick, E., Hackspacher, P.C., Martin, H., Xiaodong, D., Li, J.-W., 2013. Crustal growth in the 3.4–2.7Ga São José de Campestre Massif, Borborema Province, NE Brazil. *Precambrian Research* 227, 120–156.

<https://doi.org/10.1016/j.precamres.2012.08.006>

Deer, W. A.; Howie, R. A.; Zussman, J. 2013. *An Introduction to the Rock Forming Minerals 3rd edition*. Nova Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 495p.

de Souza, Z.S., Martin, H., Peucat, J.-J., Jardim de Sá, E.F., Macedo, M.H.F., 2007. Calc-Alkaline Magmatism at the Archean–Proterozoic Transition: the Caicó Complex Basement (NE Brazil). *Journal of Petrology* 48, 2149–2185. <https://doi.org/10.1093/petrology/egm055>

Europaeus-Äyräpää, A. 1930. Die relative Chronologie der steinzeitliche Keramik in Finnland I & II. *Acta Archaeologica I: Fasc. 2 & 3*.

Ferreira, V. P., Sial, A. N.; Pimentel, M. M., Moura, C. A. 2004. Intermediate to acidic magmatism and crustal evolution in the Transversal Zone, Northeast Brazil. In: Mantesso-Neto, V.; Bartorelli, A.; Carneiro, C. D. R.; Brito Neves, B. B. *Geologia do continente Sul-Americano: evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo: Beca, 2004, p. 189-201.

Ferreira Filho, O. B. & Linares, W. B. 2009. Crisotila. In: DNPM, Silva Rodrigues, S .F. (Org.). *Economia Mineral do Brasil*. Brasília: DNPM, p.655-679.

Fonseca, A.C., Piffer, G.V., Nachtergaele, S., Van Ranst, G., De Grave, J., Novo, T.A., 2020. Devonian to Permian post-orogenic denudation of the Brasília Belt of West Gondwana: insights from apatite fission track thermochronology. *Journal of Geodynamics* 137, 101733. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2020.101733>

Fossen, H., Meira, V.T., Cavalcante, C., Konopásek, J., Janoušek, V., 2021. Comment to “Neoproterozoic magmatic arc systems of the central Ribeira belt, SE-Brazil, in the context of the West-Gondwana pre-collisional history: A review.” *Journal of South American Earth Sciences* 107, 103052. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.103052>

Ganade de Araujo, C.E., Cordani, U.G., Basei, M.A.S., Castro, N.A., Sato, K., Sproesser, W.M., 2012. U–Pb detrital zircon provenance of metasedimentary rocks from the Ceará Central and Médio Coreau Domains, Borborema Province, NE-Brazil: Tectonic implications for a long-

lived Neoproterozoic active continental margin. *Precambrian Research* 206-207, 36–51. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2012.02.021>

Ganade de Araújo C.E., Weinberg R.F., Cordani U.G. 2014. Extruding the Borborema Province (NE-Brazil): a two-stage Neoproterozoic collision process. *Terra Nova* 26(2), 157–168. <https://doi.org/10.1111/ter.12084>

Ganade de Araújo, C.E., Lanari, P., Rubatto, D., Hermann, J., Weinberg, R.F., Basei, M.A.S., Tesser, L.R., Caby, R., Agbossoumondé, Y., Ribeiro, C.M., 2021. Magmatic flare-up causes crustal thickening at the transition from subduction to continental collision. *Communications Earth & Environment* 2. <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00103-z>

Garcia, R.; Duarte, E.; Khoury, J.; Carreira, L.; Silva, G.; Thame, A. M. 2010. *Relatório do Grupo de Trabalho da Comissão de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável da Câmara dos Deputados destinado à análise das implicações do uso do amianto no Brasil*. Câmara dos Deputado do Brasil, 682p.

Guimarães, I.P., Brito, M.F.L., Lages, G.A., Silva Filho, A.F., Santos, L., Brasilino, R.G. 2015. Tonian granitic magmatism of the Borborema Province, NE Brazil: A review. *Journal of South American Earth Sciences*, 68, 97-112, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2015.10.009>

Guimarães, I. P.; Silva Filho, A. F. 1998. Nd-- and Srisotopic and U-Pb geochronology constraints for the evolution of the Bom Jardim and Toritama complexes: evidences for Transamazonian enriched mantle under Borborema Tectonic Province, Brazil. *International Geology Review* 40, 500–527

Guimarães, I. P., Silva Filho, A. F., Almeida, C. N.; Macambira, M. B., Armstrong, R. 2011. U-Pb SHRIMP data constraints on calc-alkaline granitoids with 1.3-1.6 Ga Nd TDM model Ages from the central domain of the Borborema province, NE Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 31, 383-396. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2011.03.001>

Guimarães, I. P., Silva Filho, A. F., Almeida, C.N., Van Schmus, W. R., Araújo, J. M. M., Melo, S. C., Melo, E. B. 2004. Brasileiro (Pan-African) granitic magmatism in the Pajeú-Paraíba belt, Northeast Brazil: an isotopic and geochronological approach. *Precambrian Research*, 135, 23-53. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2004.07.004>

Guimarães, I.P., Silva Filho, A.F., Melo, S.C., Macambira, M.B., 2005. Petrogenesis of A-type Granitoids from the Alto Moxoto and Alto Pajeu Terranes of the Borborema Province, ne Brazil: Constraints from Geochemistry and Isotopic Composition. *Gondwana Research* 8, 347–362. [https://doi.org/10.1016/s1342-937x\(05\)71140-0](https://doi.org/10.1016/s1342-937x(05)71140-0)

Harvey-Kelly, F. E. L. 1995. *Asbestos occurrences in British Columbia*. British Columbia: British Columbia Ministry of Energy, Mines and Petroleum Resources, 102p.

Hawthorne, F. C.; Oberti, R., Harlow, G. E.; Maresch, W. V., Martin, R. F., Schumacher, J. C., Welch, M. D. 2012. Nomenclature of the amphibole supergroup. *American Mineralogist* 97, 2031–2048.

Heilbron, M., Duarte, B.P., Valeriano, C.M., Simonetti, A., Machado, N., Nogueira, J.R., 2010. Evolution of reworked Paleoproterozoic basement rocks within the Ribeira belt (Neoproterozoic), SE-Brazil, based on U–Pb geochronology: Implications for paleogeographic reconstructions of the São Francisco-Congo paleocontinent. *Precambrian Research* 178, 136–148. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2010.02.002>

Heilbron, M., Silva, L.G.E., Almeida, J.C.H., Tupinambá, M., Peixoto, C., Valeriano, C.M., Lobato, M., Rodrigues, S.W.O., Ragatky, C.D., Silva, M.A., Monteiro, T., Freitas, N.C., Miguens, D., Girão, R., 2020. Proterozoic to Ordovician geology and tectonic evolution of Rio de Janeiro State, SE-Brazil: insights on the central Ribeira Orogen from the new 1:400,000 scale geologic map. *Brazilian Journal of Geology* 50. <https://doi.org/10.1590/2317-4889202020190099>

Hendry, N. W. The Geology, occurrences, and major uses of Asbestos. 1965. *Annals of the New York Academy of Sciences* 132, 12–21.

Hollanda, M.H.B.M., Archanjo, C.J., Bautista, J.R., Souza, L.C., 2015. Detrital zircon ages and Nd isotope compositions of the Seridó and Lavras da Mangabeira basins (Borborema Province, NE Brazil): Evidence for exhumation and recycling associated with a major shift in sedimentary provenance. *Precambrian Research* 258, 186–207. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2014.12.009>

Houketchang Bouyo, M., Zhao, Y., Penaye, J., Zhang, S.H., Njel, U.O., 2015. Neoproterozoic subduction-related metavolcanic and metasedimentary rocks from the Rey Bouba Greenstone

Belt of north-central Cameroon in the Central African Fold Belt: New insights into a continental arc geodynamic setting. *Precambrian Research* 261, 40–53. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2015.01.012>

Howell, D. G. 1995. *Principles of Terrane Analysis: new applications for Global Tectonics*. 2nd Ed. London: Chapman & Hall, 122 p.

Howell, D.G., 2015. *Principles of Terrane Analysis*. Springer Dordrecht.

Howell, D.G., Jones, D.L., Schermer, E.R., 1985. Tectonostratigraphic terranes of the Circum-Pacific region, in: Tectonostratigraphic Terranes of the Circum-Pacific Region. *Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources Earth Science Series* 1, pp. 3–30.

Ilgren, E. B. & Hoskens, J. 2018. Anthophyllite Asbestos: The Role of Fiber Width in Mesothelioma Induction Part 2: Further Epidemiological Studies of Occupational, Domestic and Environmental Exposure to Finnish Anthophyllite Asbestos. *Environment and Pollution* 7 (1), 24-35.

Isles, D.J., Rankin, L.R., 2013. *Geological Interpretation of Aeromagnetic Data*. *Geology*. <https://doi.org/10.1190/1.9781560803218>

Jardim de Sá, E.F., Legrand, J.M., Hackspacher, P.C. 1981. Contraste de estilos estruturais e metamórficos na Faixa Dobrada Sergipana. *Revista Brasileira de Geociências* 11, p. 128-137.

Jessell, M.W., Begg, G.C., Miller, M.S., 2016. The geophysical signatures of the West African Craton. *Precambrian Research* 274, 3–24. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2015.08.010>

Kennedy, B. A. 1990. *Surface Mining, 2 ed*. Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc., 1194p.

Kröner, A., Cordani, U., 2003. African, southern Indian and South American cratons were not part of the Rodinia supercontinent: evidence from field relationships and geochronology. *Tectonophysics* 375, 325–352. [https://doi.org/10.1016/s0040-1951\(03\)00344-5](https://doi.org/10.1016/s0040-1951(03)00344-5)

Kuhn, S., Cracknell, M.J., Reading, A.M., 2018. Lithologic mapping using Random Forests applied to geophysical and remote-sensing data: A demonstration study from the Eastern Goldfields of Australia. *Geophysics* 83, B183–B193. <https://doi.org/10.1190/geo2017-0590.1>

Kusiorowski, R.; Zaremba, T.; Piotrowski, J.; Adamek, J. 2012. Thermal decomposition of different types of asbestos. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 109, 693-704.

Kusky, T.M., Bradley, D.C., 1999. Kinematic analysis of mélange fabrics: examples and applications from the McHugh Complex, Kenai Peninsula, Alaska. *Journal of Structural Geology* 21, 1773–1796. [https://doi.org/10.1016/s0191-8141\(99\)00105-4](https://doi.org/10.1016/s0191-8141(99)00105-4)

Lima, F. J. C.; Brasilino, R. G.; Lages, G. A. 2018. *Carta geológica-geofísica: folha SC-24-X-A-III - Custódia, estado de Pernambuco*. Recife: CPRM, Escala 1:100.000.

Lima, H.M., Pimentel, M.M., Santos, L.C.M.L., Dantas, E.L., 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* 90, 54–69. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2018.12.002>

Lima, M.V.A.G., Berrocal, J., Soares, J.E.P., Fuck, R.A., 2015. Deep seismic refraction experiment in northeast Brazil: New constraints for Borborema province evolution. *Journal of South American Earth Sciences* 58, 335–349. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2014.10.007>

Lira Santos, G., Santos, L.C.M.L., Araújo Neto, J.F., 2022. Um olhar sobre os minerais de asbestos: aspectos históricos e geológicos e estudo de caso do Sítio Xilili (PE), porção central da Província Borborema. *Geociências* 41, 63–73. <https://doi.org/10.5016/geociencias.v41i1.16327>

Lira Santos, G., Santos, L.C.M.L., Vidotti, R.M., Cawood, P.A., Viegas, G., Queiroga, G. 2023. Crustal architecture of Neoproterozoic terrains of western Gondwana revealed by integrated geophysical and structural data on the eastern Borborema Province, NE Brazil. *Journal of South American Earth Sciences* 127, 104375. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104375>

Mainprice, D., Bouchez, J.-L., Blumenfeld, P., Tubià, J.M., 1986. Dominant c slip in naturally deformed quartz: Implications for dramatic plastic softening at high temperature. *Geology* 14, 819. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1986\)14<819:dcslip>2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1986)14<819:dcslip>2.0.co;2)

Mariano, G., Neves, S.P., Silva Filho, A.F., Guimarães, I.P., 2001. Diorites of the High-K Calc-Alkalic Association: Geochemistry and Sm-Nd Data and Implications for the Evolution of the

Borborema Province, Northeast Brazil. *International Geology Review* 43, 921–929. <https://doi.org/10.1080/00206810109465056>

Mariano, G., Sial, A.N., Cruz, M.J.M., Conceição, H., 1996. The Potassic Calc-Alkalic Itaporanga Batholith, Northeastern Brazil: Mineral Chemistry and Oxygen-Isotope Data. *International Geology Review* 38, 74–86. <https://doi.org/10.1080/00206819709465325>

Mascarenhas, J.C. et al. 2009.

Mbang, C.M.S., Basseka, C.A., Kamguia, J., Etamè, J., Njiteu Tchoukeu, C.D., Pemi Mouzong, M., 2018. Mapping of Deep Tectonic Structures of Central and Southern Cameroon by an Interpretation of Surface and Satellite Magnetic Data. *International Journal of Geophysics* 2018, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2018/5845670>

Medeiros, V. C. 2000. *Aracaju - NE: folha SC.24-X estados da Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe e Bahia. Escala 1:500.000*. Brasília: CPRM, 2000. 1 CD-ROM; mapas. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil - PLGB.

Medeiros, V.C., Medeiros, W.E., Jardim de Sá, E.F. 2011. Utilização de imagens aerogamaespectrométricas, Landsat ETM+E aeromagnéticas no estudo do arcabouço crustal da porção central do domínio da Zona Transversal, Província Borborema, NE do Brasil. *Revista Brasileira de Geofísica* 29 (10), 83–97.

Meira, V.T., García-Casco, A., Juliani, C., Almeida, R.P., Schorscher, J.H.D., 2015. The role of intracontinental deformation in supercontinent assembly: insights from the Ribeira Belt, Southeastern Brazil (Neoproterozoic West Gondwana). *Terra Nova* 27, 206–217. <https://doi.org/10.1111/ter.12149>

Mendes, R. 2001. Asbesto (amianto) e doença: revisão do conhecimento científico e fundamentação para uma urgente mudança da atual política brasileira sobre a questão. *Cadernos de Saúde Pública* 17 (1), 7-29.

Miensopust, M.P., Jones, A.G., Muller, M.R., Garcia, X., Evans, R.L., 2011. Lithospheric structures and Precambrian terrane boundaries in northeastern Botswana revealed through magnetotelluric profiling as part of the Southern African Magnetotelluric Experiment. *Journal of Geophysical Research* 116. <https://doi.org/10.1029/2010jb007740>

Milet, H. A. R (Coordenador). 1984. *Projeto cadastramento das ocorrências minerais do Estado de Pernambuco*. Recife: Minérios do Brasil; SUDENE. 261p.

Miller, R.B., Paterson, S.R., 1994. The transition from magmatic to high-temperature solid-state deformation: implications from the Mount Stuart batholith, Washington. *Journal of Structural Geology* 16, 853–865. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(94\)90150-3](https://doi.org/10.1016/0191-8141(94)90150-3)

Miranda, T.S., Neves, S.P., Celestino, M.A.L., Roberts, N.M.W., 2020. Structural evolution of the Cruzeiro do Nordeste shear zone (NE Brazil): Brasiliano-Pan-African- ductile-to-brittle transition and Cretaceous brittle reactivation. *Journal of Structural Geology* 141, 104203. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2020.104203>

Neves, S.P., Bruguier, O., Bosch, D., Silva, J.M.R., Mariano, G., 2008. U–Pb ages of plutonic and metaplutonic rocks in southern Borborema Province (NE Brazil): Timing of Brasiliano deformation and magmatism. *Journal of South American Earth Sciences* 25, 285–297. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2007.06.003>

Neves, S. P.; Bruguier, O.; Mariano, G.; Silva, M. R. 2011. *O magmatismo pós-Cariris Velhos, Pré-brasiliano na porção oriental da Província Borborema: implicações tectônicas*. In: Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos, 13., 2011. Campinas-SP, Abstracts... Campinas, p.148-150 (também em CD-ROM)

Neves, S.P., Bruguier, O., Silva, J.M.R., Bosch, D., Alcantara, V.C., Lima, C.M., 2009. The age distributions of detrital zircons in metasedimentary sequences in eastern Borborema Province (NE Brazil): Evidence for intracontinental sedimentation and orogenesis? *Precambrian Research* 175, 187–205. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2009.09.009>

Neves, S.P., Lages, G.A., Brasilino, R.G., Miranda, A.W.A., 2015. Paleoproterozoic accretionary and collisional processes and the build-up of the Borborema Province (NE Brazil): Geochronological and geochemical evidence from the Central Domain. *Journal of South American Earth Sciences* 58, 165–187. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2014.06.009>

Neves, S.P., Mariano, G., Correia, P.B., Silva, J.M.R., 2006. 70 m.y. of synorogenic plutonism in eastern Borborema Province (NE Brazil): temporal and kinematic constraints on the Brasiliano Orogeny. *Geodinamica Acta* 19, 213–236. <https://doi.org/10.3166/ga.19.213-236>

- Neves, S.P., Monié, P., Bruguier, O., Silva, J.M.R., 2012. Geochronological, thermochronological and thermobarometric constraints on deformation, magmatism and thermal regimes in eastern Borborema Province (NE Brazil). *Journal of South American Earth Sciences* 38, 129–146. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2012.06.003>
- Neves, S.P., Santos, T.A.S., Medeiros, P.C., Amorim, L.Q., Casimiro, D.C.G., 2018. Interference fold patterns in regional unidirectional stress fields: A result of local kinematic interactions. *Journal of Structural Geology* 115, 304–310. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2018.04.012>
- Neves, S.P., Silva, J.M.R., Bruguier, O., 2017. Geometry, kinematics and geochronology of the Sertânia Complex (central Borborema Province, NE Brazil): Assessing the role of accretionary versus intraplate processes during West Gondwana assembly. *Precambrian Research* 298, 552–571. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.07.006>
- 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 (eastern Borborema Province, NE Brazil). *Journal of Structural Geology* 27, 1513–1527. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2005.02.002>
- Neves, S.P., Tommasi, A., Vauchez, A., Carrino, T.A., 2021. The Borborema Strike-Slip Shear Zone System (NE Brazil): Large-Scale Intracontinental Strain Localization in a Heterogeneous Plate. *Lithosphere* 2021. <https://doi.org/10.2113/2021/6407232>
- Nogueira, D. D.; Certain, D. A.; Uesugui, S. J.; Koga, R. K.; Ribeiro, H. P. 1975. Asbestose no Brasil: um risco ignorado. *Revista de Saúde Pública* 9 (3), 427-432.
- O’hanley, D. S. & Dyar, M. D. 1998. The composition of chrysotile and its relationship with lizardite. *Canadian Mineralogist* 36, 727-740.
- Oliveira, E.P., McNaughton, N.J., Armstrong, R., 2010. Mesoarchaeon to Palaeoproterozoic growth of the northern segment of the Itabuna–Salvador–Curaçá orogen, São Francisco craton, Brazil. *Geological Society, London, Special Publications* 338, 263–286. <https://doi.org/10.1144/sp338.13>

Oliveira, R.G., 2008. *Arcabouço geofísico, isostasia e causas do magmatismo cenozóico da província Borborema e de sua margem continental (Nordeste do Brasil)* (PhD's Thesis). Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Oliveira, R.G., Medeiros, W.E., 2018. Deep crustal framework of the Borborema Province, NE Brazil, derived from gravity and magnetic data. *Precambrian Research* 315, 45–65. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2018.07.004>

Olsen, T.S., Kohlstedt, D.L., 1985. Natural deformation and recrystallisation of some intermediate plagioclase feldspars. *Tectonophysics* 111, 107–131.

Oriolo, S., Schulz, B., Geuna, S., González, P.D., Otamendi, J.E., Sláma, J., Druguet, E., Siegesmund, S., 2021. Early Paleozoic accretionary orogens along the Western Gondwana margin. *Geoscience Frontiers* 12, 109–130. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.07.001>

Oury, T. D.; Sporn, T. A.; Roggli, V. L. 2014. *Pathology of Asbestos-Associated Diseases*. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 357p.

Padilha, A.L., Vitorello, I., Pádua, M.B., Fuck, R.A., 2017. Cryptic signatures of Neoproterozoic accretionary events in northeast Brazil imaged by magnetotellurics: Implications for the assembly of West Gondwana. *Tectonophysics* 699, 164–177. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.01.022>

Pedrosa Jr., N.C., Vidotti, R.M., Fuck, R.A., Oliveira, K.M.L., Castelo Branco, R.M.G., 2015. Structural framework of the Jaibaras Rift, Brazil, based on geophysical data. *Journal of South American Earth Sciences* 58, 318–334. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2014.07.005>

Pereira, L.C.L., Santos, L.C.M.L., Carrino, T.A., 2019. The role of airborne geophysics in the investigation of gold occurrences in the Itapetim Region, Borborema Province, Northeast Brazil. *Brazilian Journal of Geology* 49. <https://doi.org/10.1590/2317-4889201920190028>

Pollastri, S.; Perchiazzi, N.; Lezzerini, M.; Plaisier, J. R.; Cavallo, A.; Dalconi, M. C.; Gandolfi, N. B.; Gualtieri, A. F. 2016. The crystal structure of mineral fibres. 1. Chrysotile. *Periodico di Mineralogia* 85, 249-259.

Queiroga, N. C. M.; Pamplona, R. I.; Linares, W. B.; Luz, A. B.; Pontes, I. F. Amianto. In: Luz, A. B.; Lins, F. A. F. (Coordenadores). 2005. *Rochas & minerais industriais: usos e especificações*. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, p. 85-106.

Reid, A.B., Allsop, J.M., Granser, H., Millett, A.J., Somerton, I.W., 1990. Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution. *Geophysics* 55, 80–91.
<https://doi.org/10.1190/1.1442774>

Reid, A.B., Ebbing, J., Webb, S.J., 2014. Avoidable Euler Errors - the use and abuse of Euler deconvolution applied to potential fields. *Geophysical Prospecting* 62, 1162–1168.
<https://doi.org/10.1111/1365-2478.12119>

Ripley, E. M. & Li, C. Metallic Ore Deposits Associated With Mafic To Ultramafic Igneous Rocks. In: Mondal, S. K.; Griffin, W. L. (Coordenadores). 2018. *Processes and Ore Deposits of Ultramafic-Mafic Magmas through Space and Time*. Amsterdam: Elsevier, p. 79-111.

Rodrigues, S.W.O., Brito Neves, B.B., 2008. Padrões isotópicos Sm-Nd no limite entre os terrenos Alto Pajeú e Alto Moxotó (PB). *Revista Brasileira de Geociências* 38, 209–225.
<https://doi.org/10.25249/0375-7536.2008381209225>

Ross, M. The geologic occurrences and health hazards of amphibole and serpentine asbestos. In: VEBLEN, D. R. (Coordenador). 1981. *Amphiboles and other hydrous pyriboles—Mineralogy*. Washington, D.C.: Mineralogical Society of America Reviews in Mineralogy, p. 279-319.

Ross, M. 1987. Minerals and Health: The Asbestos Problem. In: Pierce, H. W. (Coordenador) *Proceedings of the 21st Forum on the Geology of Industrial*. Arizona: Arizona Bureau of Geology and Mineral Technology Special Paper, p. 83-89.

Ross, M.; Langer, A. M.; Nord, G. L.; Nolan, R. P.; Lee, R. J.; Van Orden, D. & Addison, J. 2007. The mineral nature of asbestos. *Regulatory Toxicology and Pharmacology* 52, S26-S30.

Ross, M. & Virta, R. L. 2001. Occurrence, production and uses of asbestos. In: Nolan, R. P.; Langer, A. M.; Ross, M.; Wicks, F. J.; Martin, R. F., (Coordenadores), *The Health Effects of Chrysotile Asbestos*. Ottawa: The Canadian Mineralogist, Special Publication 5, p. 79–88.

- Sá, J.M., Bertrand, J.M., Leterrier, J., Macedo, M.H.F., 2002. Geochemistry and geochronology of pre-Brasiliano rocks from the Transversal Zone, Borborema Province, Northeast Brazil. *Journal of South American Earth Sciences* 14, 851–866. [https://doi.org/10.1016/s0895-9811\(01\)00081-5](https://doi.org/10.1016/s0895-9811(01)00081-5)
- Santos, A.C.L., Padilha, A.L., Fuck, R.A., Pires, A.C.B., Vitorello, I., Pádua, M.B., 2014. Deep structure of a stretched lithosphere: Magnetotelluric imaging of the southeastern Borborema province, NE Brazil. *Tectonophysics* 610, 39–50. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.10.008>
- Santos, C.A. 2012. *Cinturão de Cisalhamento Congo – Cruzeiro do Nordeste, uma descontinuidade crustal no Domínio da Zona Transversal, Província Borborema*. Tese (Doutorado) – Departamento de Geologia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 152 p.
- Santos, C. A.; Accioly, A. C. A; Leite, P. R. B.; Lins, C. A. C.; Santos, R. B.; Mendes, V. A., Bezerra, D. R. S. 2017. *Geologia e Recursos Minerais da Folha Sertânia, Estados de Pernambuco e Paraíba*. CPRM, Recife, PE, 158 p.
- Santos, E.J., 1996. Ensaio preliminar sobre terrenos e tectônica acrescionária na Província Borborema. In: *SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 39º, Salvador, Proceedings*, pp. 47-50.
- Santos, E. J. 1971. *Síntese da geologia do pré-cambriano da folha Arcoverde - Nordeste do Brasil: relatório preliminar sobre o levantamento geológico da Folha Arcoverde, escala 1:200.000*. Recife: SUDENE, 33p.
- Santos, E. J., Brito Neves, B.B. 1984. A Província Borborema. In: Almeida, F. F. M., Hasui, Y. *O pré-cambriano do Brasil*. São Paulo: Edgard Blucher, 378p. Cap.5 p.123 - 186.
- 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, 31, Rio de Janeiro. Annals...* CD-ROM.
- Santos, E. J.; Medeiros, V. 1997. Constraints from granitic plutonism on proterozoic crustal growth of the zona transversal domain, Província Borborema, NE Brazil. In: *International Symposium on Granites and Their Associated Mineralizations, 2., 1997. Salvador-BA. Extended Abstracts...* Salvador-BA, p. 237-239.

Santos, E.J., Medeiros, V.C., 1999. Constraints from granitic plutonism on proterozoic crustal growth of the Transverse Zone, Borborema Province, NE-Brazil. *Revista Brasileira de Geociências* 29, 73-84.

Santos, E.J., Van Schmus, W.R., Kozuch, M., Brito Neves, B.B. 2010. The Cariris Velhos tectonic event in Northeastern 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., Caxito, F., 2021. Accretionary models for the Neoproterozoic evolution of the Borborema Province: advances and open questions. *Brazilian Journal of Geology* 51.
<https://doi.org/10.1590/2317-4889202120200104>

Santos, L.C.M.L., Caxito, F.A., Bouyo, M.H., Ouadahi, S., Araïbia, K., Lages, G.A., Santos, G.L., Pitombeira, J.P.A., Cawood, P.A., 2022a. Relics of ophiolite-bearing accretionary wedges in NE Brazil and NW Africa: connecting threads of western Gondwana's ocean during Neoproterozoic times. *Geosystems and Geoenvironment* 100148.
<https://doi.org/10.1016/j.geogeo.2022.100148>

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

Santos, L.C.M.L., Dantas, E.L., Cawood, P.A., Lages, G.A., Lima, H.M., Santos, E.J., Caxito, F.A., 2019. Early to late Neoproterozoic subduction-accretion episodes in the Cariris Velhos Belt of the Borborema Province, Brazil: Insights from isotope and whole-rock geochemical data of supracrustal and granitic rocks. *Journal of South American Earth Sciences* 96, 102384.
<https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102384>

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.M., Cawood, P.A., Santos, E.J., Fuck, R.A., Lima, H.M., 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., 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-West 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.; Fuck, R. A.; Santos, E. J.; Dantas, E. L. 2014. Análise Tectônica de Terrenos: Metodologia, Aplicação em Cinturões Orogênicos e Exemplo Das Províncias Tocantins e Borborema, Brasil. *Geonomos* 22 (2), 51-63.

Santos, L.C.M.L., Lages, G.A., Caxito, F.A., Dantas, E.L., Cawood, P.A., Lima, H.M., Lima, F.J.C., 2022b. Isotopic and geochemical constraints for a Paleoproterozoic accretionary orogen in the Borborema Province, NE Brazil: Implications for reconstructing Nuna/Columbia. *Geoscience Frontiers* 13, 101167. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2021.101167>

Santos, L.C.M.L., Oliveira, R.G., Lages, G.A., Dantas, E.L., Caxito, F., Cawood, P.A., Fuck, R.A., Lima, H.M., Santos, G.L., Araújo Neto, J.F., 2021. Evidence for Neoproterozoic terrane accretion in the central Borborema Province, West Gondwana deduced by isotopic and geophysical data compilation. *International Geology Review* 64, 1574–1593. <https://doi.org/10.1080/00206814.2021.1944332>

Santos, L.C.M.L., Pereira, C.S., Lima, H.M., Guedes, P., Medeiros, R., Silva, J., Araújo Neto, J.F., Santos, G.L., Paixão, M.S., 2020. Description and hierarchy of ductile deformation events in the Camalaú region, state of Paraíba, central portion of the Alto Moxotó Terrane, Borborema Province, Brazil. *Journal of the Geological Survey of Brazil* 3, 25–31. <https://doi.org/10.29396/jgsb.2020.v3.n1.2>

Scliar, C. 1998. *Amianto: Mineral Mágico ou Maldito? Ecologia Humana e Disputa Político-Econômica*. Belo Horizonte: CDI, 152p.

Sial, A.N., Ferreira, V.P., 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>

Simpson, C., Wintsch, R.P., 1989. Evidence for deformation-induced K-feldspar replacement by myrmekite. *Journal of Metamorphic Geology* 7, 261–275. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.1989.tb00588.x>

Skinner, H. C. W.; Ross, M.; Frondel, C. 1988. *Asbestos and other fibrous materials*. Nova Iorque: Oxford University Press, 204p.

Steel, E. & Wylie, A. G. 1981. Mineralogical Characteristics of Asbestos. In: RIORDON, P.H. (Coordenador), *Geology of Asbestos Deposit, USA*: Society for Mining Metallurgy, p. 93-99.

Stein, C.A., Stein, S., Elling, R., Keller, G.R., Kley, J., 2017. Is the “Grenville Front” in the central United States really the Midcontinent Rift?. *GSA Today* 28, 4–10.
<https://doi.org/10.1130/gsatg357a.1>

Stipp, M., Stünitz, H., Heilbronner, R., Schmid, S.M., 2002. The eastern Tonale fault zone: a “natural laboratory” for crystal plastic deformation of quartz over a temperature range from 250 to 700°C. *Journal of Structural Geology* 24, 1861–1884. [https://doi.org/10.1016/s0191-8141\(02\)00035-4](https://doi.org/10.1016/s0191-8141(02)00035-4)

Strohmeier, B. R.; Huntington, J. C.; Bunker, K. L.; Sanchez, M. S.; Allison, K.; Lee, R. J. 2010. What is asbestos and why is it important? Challenges of defining and characterizing asbestos. *International Geology Reviews* 52 (7-8), 801-872

Stroink, G.; Blaauw, C.; White, C. G.; Leiper, W. 1980. Mössbauer characteristics of UICC standard reference asbestos samples. *The Canadian Mineralogist* 18, 285-290,

Swayze, G. A.; Kokaly, R. F.; Higgins, C. T.; Clinkenbeard, J. P.; Clark, R. N.; Lowers, H. A.; Sutley, S. J. 2009. Mapping potentially asbestos-bearing rocks using imaging spectroscopy. *Geology* 37 (8), 763-766.

Terra Filho, M.; Freitas, J. B. P.; Nery, L. E. 2006. Doenças asbesto-relacionadas. *Jornal Brasileiro de Pneumologia* 32 (2), S48-S53.

The Observatory Economic Complexity. *Which countries export Asbestos?* Disponível em: https://oec.world/en/visualize/tree_map/hs92/export/show/all/2524/2011/. Acessado em: 25fev2020.

Thompson, D.T., 1982. EULDPH: A new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data. *GEOPHYSICS* 47, 31–37. <https://doi.org/10.1190/1.1441278>

Van Gosen, B. S. 2007. The Geology of Asbestos in the United States and Its Practical Applications. *Environmental & Engineering Geoscience* 13 (1), 55-68.

Van Schmus, W.R., Brito Neves, B.B., Hackspacher, P., Babinski, M., 1995. and geochronologic studies of the eastern Borborema Province, Northeastern 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., Brito Neves, B.B., Williams, I.S., Hackspacher, P.C., Fetter, A.H., Dantas, E.L., Babinski, M., 2003. The Seridó Group of NE Brazil, a late Neoproterozoic pre- to syn-collisional basin in West Gondwana: insights from SHRIMP U–Pb detrital zircon ages and Sm–Nd crustal residence (TDM) ages. *Precambrian Research* 127, 287–327. [https://doi.org/10.1016/s0301-9268\(03\)00197-9](https://doi.org/10.1016/s0301-9268(03)00197-9)

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>

Vaucher, A., Neves, S., Caby, R., Corsini, M., Egydio-Silva, M., Arthaud, M., Amaro, V., 1995. The Borborema shear zone system, NE Brazil. *Journal of South American Earth Sciences* 8, 247–266. [https://doi.org/10.1016/0895-9811\(95\)00012-5](https://doi.org/10.1016/0895-9811(95)00012-5)

Veblen, R. D. 1980. Anthophyllite asbestos: microstructures, intergrown sheet silicates, and mechanisms of fiber formation. *American Mineralogist* 65, p. 1075-1086.

Viegas, G., Archanjo, C.J., Hollanda, M.H.B.M., Vaucher, A., 2014. Microfabrics and zircon U–Pb (SHRIMP) chronology of mylonites from the Patos shear zone (Borborema Province, NE Brazil). *Precambrian Research* 243, 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2013.12.020>

- Viegas, G., Hidas, K., Castellan, P., 2021. Structural relationships between ultramylonite, pseudotachylyte and cataclasite in the East Pernambuco shear zone (Borborema Province, NE Brazil). *Journal of Structural Geology* 147, 104346. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2021.104346>
- Viegas, G., Santos, L.C.M.L., Yokoyama, E., Archanjo, C.J., Raposo, M.I.B., Seoane, K., Leite, G.M., 2022. Magnetic fabric of the early-Ediacaran Itapetim monzogranitic pluton: magma flow during oblique extension along strike-slip shear zones (Eastern Brazil). *Journal of Structural Geology* 164, 104738. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2022.104738>
- Viola, G., Henderson, I.H.C., Bingen, B., Thomas, R.J., Smethurst, M.A., de Azavedo, S., 2008. Growth and collapse of a deeply eroded orogen: Insights from structural, geophysical, and geochronological constraints on the Pan-African evolution of NE Mozambique. *Tectonics* 27, n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2008tc002284>
- Virta, R. L. 2001. *Some facts about asbestos Virginia*: U.S. Geological Survey Fact Sheet FS-012-01, 4p.
- Virta, R. L. 2002. *Asbestos—Geology, mineralogy, mining, and uses*. Virginia: U.S. Geological Survey Open-File Report 02-149, 35p.
- VIRTA, R. L. 2005. *Mineral Commodity Profiles—Asbestos*: U.S. Geological Survey Circular 1255–KK, 56 p.
- Virta, R. L. & Mann, E. L. 1994. Asbestos. In: CARR, D. D. (Coordenador) *Industrial minerals and rocks (6th ed.)*. Colorado: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., p. 97-124.
- Whittaker, E. J. W. 1979. Mineralogy, chemistry and crystallography of amphibole asbestos. In: LEDOUX, R. L. (Coordenador). *Short Course in Mineralogical Techniques of Asbestos Determination*. Ottawa: Mineralogical Association of Canada, pp. 1–34.
- Wu, Q., Ramezani, J., Zhang, H., Wang, J., Zeng, F., Zhang, Y., Liu, F., Chen, J., Cai, Y., Hou, Z., Liu, C., Yang, W., Henderson, C.M., Shen, S., 2021. High-precision U-Pb age constraints on the Permian floral turnovers, paleoclimate change, and tectonics of the North China block. *Geology* 49, 677–681. <https://doi.org/10.1130/g48051.1>

Yada, K. 1971. Study of Microstructure of Chrysotile Asbestos by High Resolution Electron Microscopy. *Acta Crystallographica*, v. A27, 659-664.

Kelemen, P.B., Behn, M.D., 2016. Formation of lower continental crust by relamination of buoyant arc lavas and plutons. *Nature Geoscience* 9, 197–205. <https://doi.org/10.1038/ngeo2662>

Zouaghi, T., Ferhi, I., Bédir, M., Youssef, M.B., Gasmi, M., Inoubli, M.H., 2011. Analysis of Cretaceous (Aptian) strata in central Tunisia, using 2D seismic data and well logs. *Journal of African Earth Sciences* 61, 38–61. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2011.05.002>