

Identificação de fases deformacionais pré-cambrianas na região de Tejuçuoca - CE

Identification of precambrian deformational phases in the region of Tejuçuoca - CE

Sebastian Gonzalez Chiozza¹; César Ulisses Vieira Veríssimo²; Roberto de Azevedo Ferreira Gomes³; Francisco Flávio Rodrigues de Souza Júnior⁴

¹ Universidade Federal do Ceará, Departamento de Geologia, Fortaleza – CE, Brasil. Email: sebastian@ufc.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4245-9883>

² Universidade Federal do Ceará, Departamento de Geologia, Fortaleza – CE, Brasil. Email: verissimo@ufc.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5055-9617>

³ Universidade Federal do Ceará, Departamento de Geologia, Fortaleza – CE, Brasil. Email: robertoafg@alu.ufc.br

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-8073-3229>

⁴ Universidade Federal do Ceará, Departamento de Geologia, Fortaleza – CE, Brasil. Email: juniorsflavio@alu.ufc.br

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4415-5389>

Resumo: Apresentamos novos dados obtidos em um levantamento geológico de detalhe realizado em Tejuçuoca-CE. A área de estudo se localiza no domínio Ceará Central, 30km ao sudeste do Arco Magmático Santa Quitéria (AMSQ), onde predominam as rochas do Complexo Canindé do Ceará (Paleoproterozóico) e do Grupo Ceará (Neoproterozóico). Dados de campo e estudos petrográficos foram integrados ao geoprocessamento de imagens de satélite e dados aerogeofísicos para produzir um mapa geológico litoestrutural de detalhe. A cartografia gerada, junto à análise dos dados estruturais, permitiu identificar quatro fases de deformação que marcam a evolução tectônica pré-cambriana na região, sendo as três últimas correlacionáveis com episódios específicos do ciclo Brasileiro.

A fase D1 representa um evento deformacional pré-brasiliano, que originou uma foliação pretérita posteriormente retrabalhada nas fases subsequentes. A fase D2 está relacionada às etapas colisionais iniciais da Orogênese Brasileira, envolvendo a geração de estruturas com orientação paralela ao eixo do AMSQ. A fase D3 se vincula à etapa colisional avançada da orogênese, onde a tectônica dominada por cavalgamentos associados a processos de deformação interna, reorientaram a foliação. Por último, a fase D4 está relacionada ao desenvolvimento de uma tectônica transcorrente, que representou um estágio pós-colisional de acomodação dos espaços ocupados pelas massas rochosas.

Palavras-chave: Mapeamento geológico; Fases de deformação; Orogênese Brasileira.

Abstract: This study presents new geological and structural data from a detailed survey conducted in Tejuçuoca, Ceará State (NE Brazil). The study area is located within the Central Ceará Domain, 30 km southeast of the Santa Quitéria Magmatic Arc (SQMA), and is dominated by the Canindé do Ceará Complex (Paleoproterozoic) and the Ceará Group (Neoproterozoic). Field observations and petrographic analyses were integrated with satellite imagery and airborne geophysical data to produce a detailed lithostructural map. The resulting cartography and structural data reveal four distinct deformation phases (D1–D4) that record the Precambrian tectonic evolution of the region, with the latter three correlated to specific episodes of the Brasiliano Orogeny. The D1 phase represents a pre-Brasiliano event characterized by a relict foliation that was intensely reworked during subsequent stages. The D2 phase is associated with the early collisional stages of the Brasiliano Orogeny, generating structures parallel to the main SQMA axis. The D3 phase corresponds to an advanced collisional stage dominated by thrust tectonics and internal strain, which strongly reoriented the earlier fabric. Finally, the D4 phase records a post-collisional, transcurrent tectonic regime responsible for the final structural reaccommodation of the rock units.

Keywords: Geological mapping; Deformation phases; Brazilian Orogeny.

1. Introdução

O estudo da deformação polifásica, com ênfase na identificação das estruturas geradas por distintos eventos tectônicos, constitui etapa fundamental para a compreensão da evolução geológica dos cinturões orogênicos. No domínio tectônico Ceará Central, pertencente à Província Borborema e marcado pela presença do Arco Magmático Santa Quitéria, diversos trabalhos têm abordado a deformação no contexto da Orogenia Brasileira. Contudo, tais estudos apresentam limitações quanto ao nível de detalhamento e à abrangência espacial, não contemplando integralmente as áreas afetadas pelos processos tectônicos. Diante desse cenário, o presente trabalho busca contribuir para o avanço do conhecimento da geologia estrutural por meio da análise detalhada de um setor localizado no município de Tejuçuoca, inserido nesse contexto geotectônico e ainda carente de investigações específicas. Até o momento, a área havia sido caracterizada apenas pelas cartas geológicas na escala 1:100.000 — CPRM Tapera SB.24-V-B-II (CASTRO, 2014) e CPRM Iruçuba SA.24-Y-D-V (NALETO, 2014). Entretanto, tais documentos apresentam limitações inerentes à escala utilizada e, adicionalmente, revelam inconsistências na delimitação e descrição de determinadas unidades litoestratigráficas e estruturas geológicas. Considerando esse estado da arte, este estudo apresenta novos dados obtidos em levantamento geológico de detalhe, com o objetivo de caracterizar, mapear e uniformizar a geologia local, fornecendo subsídios para a compreensão mais precisa da evolução tectônica da região.

2. Contexto geológico regional

A Província Borborema (PB) corresponde à principal porção da plataforma pré-cambriana situada no nordeste da América do Sul, configurando-se como um sistema orogênico complexo composto por múltiplos terrenos tectônicos. Esses terrenos incluem núcleos arqueanos, rochas de embasamento gnáissico-migmatítico paleoproterozóico e domínios formados por metassequências supracrustais de idades meso- e neoproterozóicas (ALMEIDA *et al.* 1981; CABY; ARTHAUD, 1998; ARTHAUD *et al.*, 2008). A intensa atividade tectônica do Ciclo Brasileiro – Pan-Africano (600-550 Ma) que envolveu a colisão continental dos crátons São Luís / África Ocidental e São Francisco / Congo, deu origem à configuração atual da PB, caracterizada pelo mencionado mosaico de arcabouços litoestruturais e pela intrusão de numerosos granitoides sin e pós orogênicos (VAN SCHMUS *et al.*, 1995; ARTHAUD *et al.*, 2015). Adicionalmente, como resultado dos eventos orogênicos brasileiros, foram geradas várias zonas de cisalhamento transcorrentes que separam distintos blocos crustais com registros de eventos termotectônicos de idades diversas (BRITO NEVES *et al.*, 2000; ALMEIDA *et al.*, 2021; SANTOS *et al.*, 2017; 2018; 2021; OLIVEIRA; MEDEIROS, 2018).

Dentre os diferentes domínios que compõem a PB, a área de estudo se insere no domínio Ceará Central, caracterizado pelo predomínio das rochas paleoproterozóicas do Complexo Canindé do Ceará e das rochas neoproterozóicas do Grupo Ceará. Nesse domínio, destaca-se ainda o Complexo Tamboril–Santa Quitéria, constituído por metagranitoides, metadioritos e metagabros, além de expressiva participação de metatexitos e diatexitos (Figura 1). As rochas magmáticas deste complexo se distribuem numa faixa com orientação NE-SW e, sob a denominação de Arco Magmático Santa Quitéria (AMSQ), são interpretadas como um dos principais marcos da orogenia brasileira (CAXITO *et al.*, 2020; SANTOS *et al.*, 2023). Neste contexto geológico regional, a área cartografada está localizada ao sudeste do AMSQ, em um setor dominado por rochas metamórficas paleoproterozóicas e neoproterozóicas derivadas de protólitos orto e paradereivados (Figura 2).

3. Metodologia

Com o objetivo de obter uma caracterização geológica de detalhe, foi realizado o mapeamento geológico de uma área de 80 km², integrando levantamentos de campo com a interpretação de material cartográfico de base gerado através do geoprocessamento de imagens de satélite e dados aeromagnetométricos e aerogamaespectrométricos. As fontes de dados foram o Projeto Aerogeofísico do Norte do Ceará (CPRM, 2009), executado no período de 18 de outubro de 2008 a 08 de julho de 2009 pelo Serviço Geológico do Brasil e imagens Landsat 8 obtidas com os sensores Operational Land Imager – OLI e Thermal Infrared Sensor – TIRS (USGS, 2020).

Para efetuar o processamento de dados geofísicos foi empregado o software Oasis Montaj 8.8 (GEOSOFT, 2016). A partir do tratamento de dados aeromagnetométricos foram gerados mapas de anomalia magnética (campo total e redução ao polo), mapas de derivadas espaciais e mapa do sinal analítico. Com base no processamento de dados aerogamaespectrométricos obtiveram-se mapas de canais individuais (K, eTh, eU), mapa ternário (RGB), mapa de fator F, e mapa de razão radiométrica eTh/K.

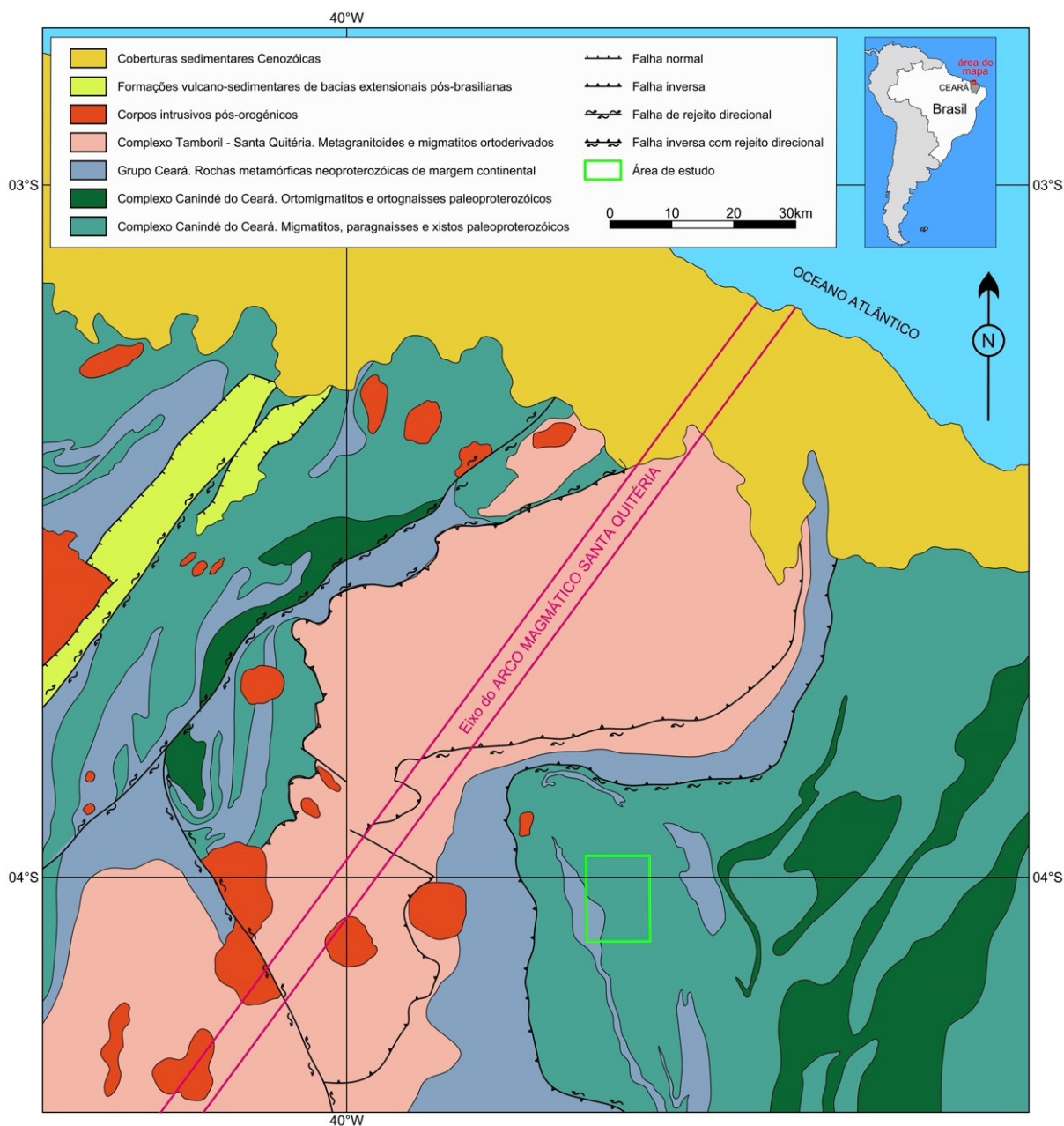


Figura 1 – Mapa de situação da área estudada no contexto geológico regional. Coordenadas geodésicas (WGS84).
Fonte: Pinéo *et al.* (2020).

O geoprocessamento das imagens Landsat foi realizado através do software Qgis 3.36 (QGIS Development Team, 2024), incluindo aplicação de correção atmosférica e elaboração de produtos RGB com diversas combinações de bandas destinados a realçar diferenças no comportamento espectral dos diferentes tipos litológicos.

Os trabalhos de campo, envolvendo caracterizações litológicas, amostragem, análise geométrica e cinemática de estruturas e execução de medições estruturais, foram realizados em duas campanhas realizadas de 27/11/2023 a 01/12/2023 e de 23/07/2024 a 27/07/2024. Os instrumentos de campo incluíram martelo geológico, cinzel, bússola tipo Brunton e lupa de mão com aumento de 15X. Para georreferenciamento, armazenamento de informações e registros fotográficos dos pontos levantados, foram utilizados aparelhos celulares com o aplicativo Avenza Maps 4.4 (AVENZA SYSTEMS INC.,

2023). Adicionalmente, os registros correspondentes a cada ponto foram documentados de forma analógica em caderneta de campo.

Após observações de campo e inspeção macroscópica, 12 amostras foram selecionadas de uma população mais ampla, para investigações petrográficas. A microscopia de luz transmitida e refletida foi utilizada em seções delgadas polidas a fim de identificar as fases minerais e determinar características texturais e estruturais. As lâminas petrográficas foram confeccionadas no Laboratório de Laminação (LAMIN) do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Ceará (UFC).

Com base nos dados de campo e nos produtos gerados por geoprocessamento, as principais litologias foram demarcadas: ortognaisses foram localizados conforme a interpretação da imagem gamaespectrométrica ternária (RGB), situando-se nos locais com baixa concentração de tório (Th), potássio (K) e urânio (U) e nas imagens aeromagnetométricas em sítios com alta resposta magnética devido à presença de magnetita na composição das rochas. As regiões com maiores teores de Th, K e U coincidem com os paragnaisses, mármore e anfibolitos, os quais tiveram seus limites demarcados fundamentalmente com base nas observações de campo.

Os dados estruturais foram organizados sistematicamente em planilhas de cálculo e foram processados através do software Stereonet (ALLMENDINGER *et al.*, 2013; CARDOZO; ALLMENDINGER, 2013). Na confecção de estereogramas adotou-se a rede de igual área (Schmidt) com projeção no hemisfério inferior; para o traçado dos contornos aplicou-se o método de contagem que utiliza círculos com área de 1% do círculo unitário (SCHMIDT, 1925). Os valores de melhor ajuste para elaboração de diagramas π foram obtidos através do cálculo de autovetores a partir dos dados direcionais, considerando dobras cilíndricas (MARDIA; JUPP, 2000).

4. Resultados

4.1. Geologia local

Como resultado foi produzido um mapa geológico litoestrutural na escala 1:12.500 (Figura 2), que apresenta um maior nível de detalhe em relação à cartografia existente para a mesma área até o momento (Folhas Irauçuba e Taperauba 1:100.000). De acordo com a cartografia regional vigente integrada no Mapa Geológico de Ceará (PINÊO *et al.*, 2020), o território estudado se encontra amplamente dominado por rochas de idade paleoproterozóica correspondentes à Unidade Paragnaisse Migmatítico do Complexo Canindé do Ceará, com presença subordinada nos setores NW e SW, de rochas neoproterozóicas do Grupo Ceará. No presente trabalho as rochas identificadas foram classificadas em 5 litofácies do Complexo Canindé do Ceará (migmatitos e gnaisses paraderivados, ortognaisses, anfibolitos, rochas calcissilicáticas e gonditos) e 3 litofácies do Grupo Ceará (gnaisses e micaxistos paraderivados, mármore e quartzitos). Adicionalmente, identificaram-se uma ocorrência de Fe (magnetita gnaisses), corpos pegmatíticos e quartzo hidrotermal.

4.1.1 Complexo Canindé do Ceará - Unidade Paragnaisse Migmatítico

- Migmatitos e gnaisses paraderivados

Os afloramentos desta unidade litológica ocorrem majoritariamente na forma de lajedos, com coloração acinzentada. As rochas apresentam bandejamento gnáissico exibindo taxa variável de fusão parcial, alternando entre termos gnáissicos, migmatitos metatexiticos e, mais raramente, diatexiticos (Figura 3A e 3B). As bandas possuem espessuras que vão de milimétricas a centimétricas, e granulação de fina a média. A estrutura granoblástica é predominante nas porções leucocráticas, enquanto que as bandas melanocráticas estão caracterizadas por um padrão estrutural lepidoblástico. Os minerais essenciais que definem a composição são quartzo (5% a 10%), biotita (10% a 15%), microclínio (20% a 25%), plagioclásio (30% a 40%) e muscovita (10% a 15%); com granada (1%), magnetita (1%) e zircão (1% a 2%) como minerais acessórios (Figuras 4A e 4B). Sericita (3% a 5%) e epidoto (1%) ocorrem como minerais de alteração.

- Ortognaisses

Os ortognaisses da região aparecem em forma de lajedos de cor cinza clara. Apresentam estrutura foliada com bandas mais ou menos definidas que possuem espessuras finas e médias (Figura 3C). Diferenciam-se bandas fêlsicas com textura granoblástica compostas majoritariamente por plagioclásio (30% a 40%), microclínio (10% a 20%) e quartzo (10% a 20%), e bandas máficas com textura lepidoblástica concentrando biotita (10% a 20%) e ocasionalmente hornblenda (Figuras 4C

e 4D). Minerais acessórios como magnetita (1%) e zircão (1%) podem estar presentes em ambas composições. De forma geral, os minerais aparecem em cristais anédricos a subédricos com tamanho fino a médio.

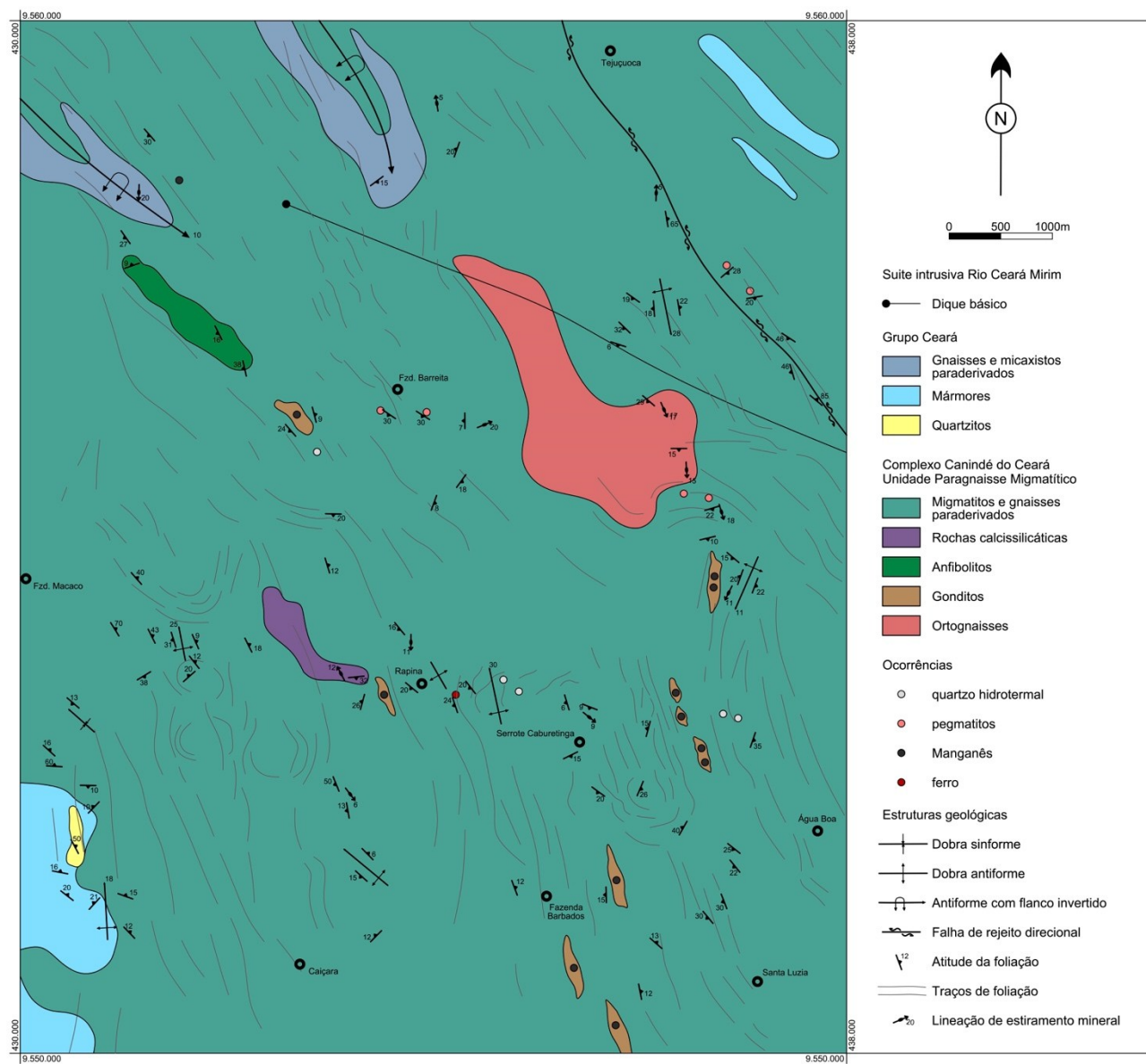


Figura 2 – Mapa geológico da área estudada. Coordenadas UTM zona 24M (WGS84).

Fonte: Autores (2026).

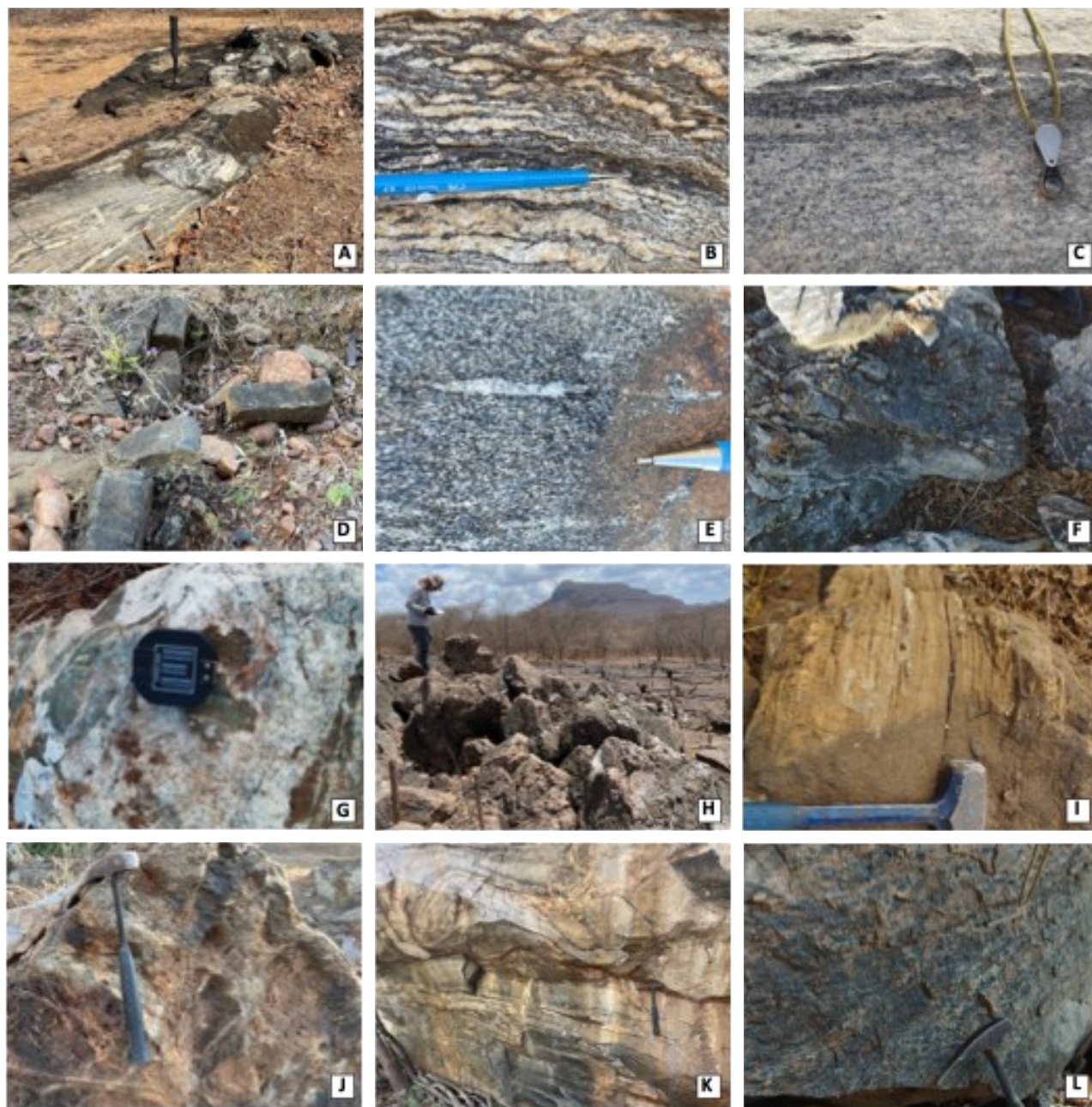


Figura 3 – Fotografias de afloramentos e perspectivas macroscópicas dos litotipos da Unidade Paragnaisse Migmatítico do Complexo Canindé do Ceará. A) e B) Migmatitos e gnaisses paraderivados; C) Ortognaisses; D) e E) Anfibolitos; F) e G) Rochas calcissilicáticas; H), I) e J) Ocorrências de manganês; K) e L) Ocorrência de ferro. Fonte: Autores (2026).

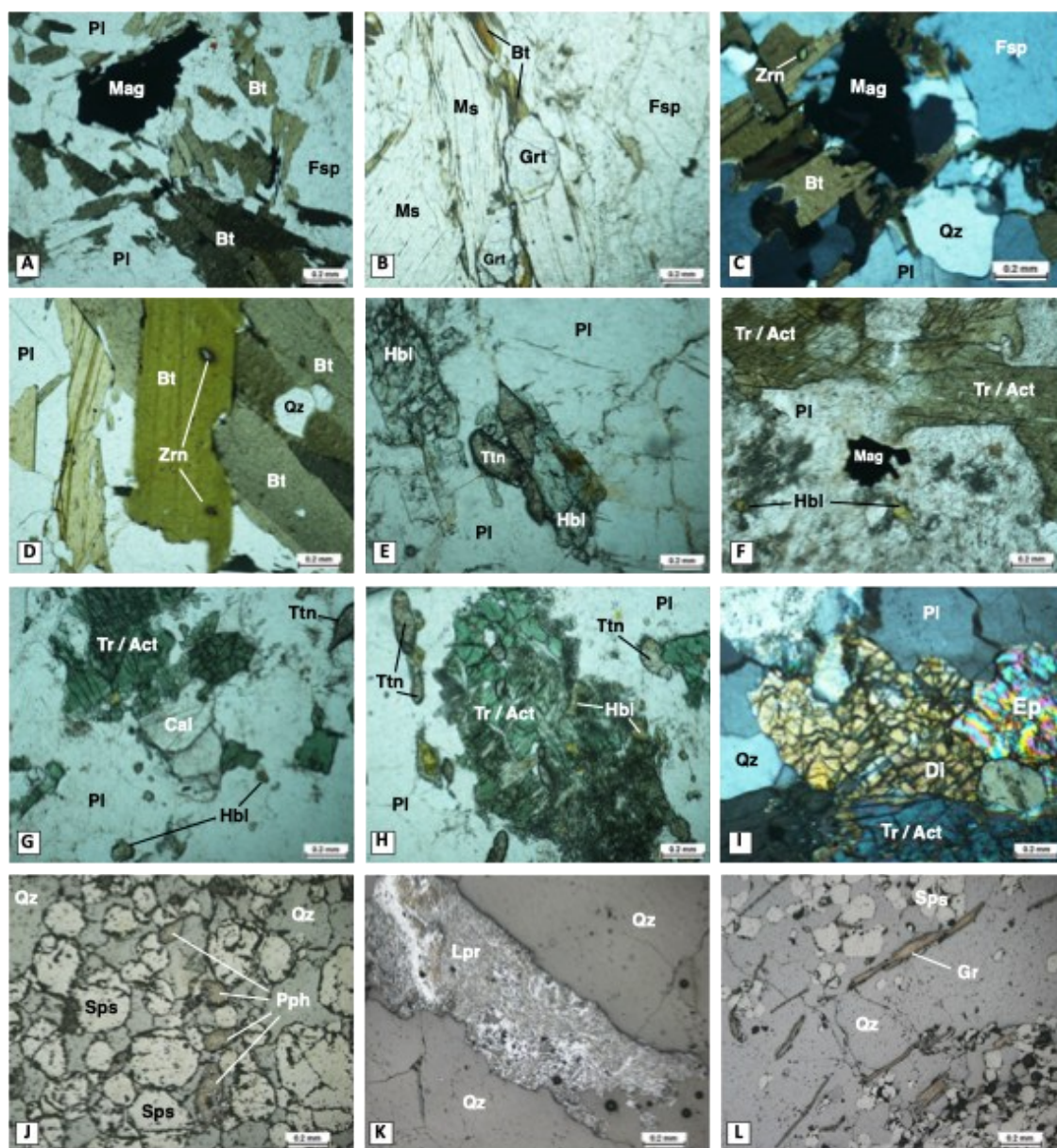


Figura 4 – Fotomicrografias dos litotipos da Unidade Paragneisse Migmatítico do Complexo Canindé do Ceará. LT: Luz transmitida – LR: Luz Refletida – CA: Com analisador – SA: Sem analisador. A) e B) Migmatitos e gnaisses paraderivados (LT - SA); C) Ortogneisse (LT - CA); D) Ortogneisse (LT - SA); E) e F) Anfibolitos (LT - SA); G) e H) Rochas calcissilicáticas (LT - SA); I) Rochas calcissilicáticas (LT - CA); J) Gonditos (LT - SA); K) e L) Gonditos (LR - SA). Simbologia mineral conforme Warr (2021): biotita (Bt), calcita (Cal), diopsídio (Di), epidoto (Ep), espessartita (Sps), feldspato (Fsp), grafita (Gr), granada (Grt), hornblenda (Hbl), litioforita (Lpr), magnetita (Mag), muscovita (Ms), pirofanita (Pph), plagioclásio (Pl), quatrzo (Qz), titanita (Ttn), tremolita/actinolita (Tr/Act), zircão (Zrn).
Fonte: Autores (2026).

- Anfibolitos

São rochas de cor cinza escura que ocorrem em zonas de solos argilosos de cor castanho escuro configurando pequenos afloramentos erráticos de blocos arredondados (Figura 3D). Exibem textura granoblástica ou nematoblástica equigranular,

fina a média com predomínio de cristais anédricos a subédricos (Figura 3E). Estão compostas principalmente por hornblenda (20% a 30%), plagioclásio (10% a 20%) e augita (10% a 15%), acompanhados por titanita (4% a 5%) e magnetita (1%) em quantidades acessórias (Figuras 4E e 4F). Reconhecem-se tremolita/actinolita (10% a 20%) e sericita (4% a 5%) gerados por processos retrometamórficos e/ou de alteração.

- Rochas calcissilicáticas

São rochas de cor cinza esbranquiçada que ocorrem de forma isolada ou como intercalações nas rochas anfibolíticas, apresentando textura granoblástica média a grossa com predomínio de cristais anédricos e subédricos (Figuras 3F e 3G). Os minerais essenciais que definem a composição são: hornblenda (20% a 30%), plagioclásio (15% a 20%), microclínio (6% a 7%), quartzo (8% a 10%), diopsídio (10% a 15%) e tremolita/actinolita (15% a 20%), podendo incluir componentes acessórios como titanita, apatita, granada, clinozoisita, biotita, calcita, epidoto e magnetita (Figuras 4G, 4H e 4I).

- Gonditos

Os gonditos constituem manifestações de protominério de Mn que ocorrem em afloramentos concentrados no setor SE da área de estudo intercalados nos paragneisses na forma de pequenos promontórios de morfologia irregular (Figuras 3H, 3I e 3J). Os afloramentos exibem cor marrom escura e em ocasiões apresentam foliação de fina a média. Pode ser afirmado que correspondem a corpos estreitos e alinhados formando lentes boudinadas e estiradas segundo direção NNW. Os gonditos estão compostos por espessartita (40% a 60%), óxidos/hidróxidos de manganês (8% a 10%) e quartzo (30% a 40%) (Figuras 4J, 4K e 4L). Como minerais acessórios podem ser encontrados pirofanita (3%), grafita (5%), biotita (3%), litioforita (3%) e sulfetos (1%). Nestas rochas destacam-se abundantes veios de quartzo com espessura variável desenvolvendo estruturas de stockwork (Figura 3J).

- Ocorrência de ferro - Magnetita gnaiss

Tendo como rochas encaixantes os paragneisses migmatíticos do Complexo Canindé do Ceará, foi registrada uma ocorrência de ferro situada na ladeira ocidental do Cerro Caburetinga, nas proximidades da Fazenda Rapina. A mesma ocorre numa área de aproximadamente 30 x 30m onde afloram grandes blocos de um litotipo com estrutura gnáissica contendo bandas de cor cinza compostas essencialmente por magnetita com textura maciça ou disseminada e tamanho de grão fino a médio (Figuras 3K e 3L). Em média, a composição da rocha contém magnetita (40%), plagioclásio (40%), quartzo (18%) e granada (2%).

4.1.2 Grupo Ceará

- Gnaisses e micaxistos paraderivados

A representação cartográfica deste litotipo define corpos lenticulares alongados e dobrados, caracterizados por variações entre micaxistos e paragneisses aluminosos por vezes migmatizados. As rochas afloram em lajedos e blocos com coloração cinza clara nos quais eventualmente se reconhece a estratificação primaria preservada com intercalações de fácies metapelíticas e metapsamíticas (Figura 5A). Apresentam texturas granoblástica e lepidoblástica e composição dominada por biotita, plagioclásio e quartzo com proporções variáveis de muscovita, granada e silimanita (Figura 6A).

- Mármore

Geralmente afloram em lajedos extensos de cor branca ou cinza esbranquiçada, que com frequência exibem intenso fraturamento sistemático (Figura 5B). Os mármore apresentam textura granoblástica fina a média composta por cristais anédricos a subédricos de calcita (30% a 40%), dolomita (20% a 30%), tremolita (10% a 20%) e flogopita (10% a 20%). Minerais acessórios como escapolita e grafita ocasionalmente participam da composição em proporção inferior a 1%. Reconhecem-se alterações de epidoto substituindo tremolita e talco preenchendo fraturas (Figuras 6B e 6C).

- Quartzitos

São encontrados em um setor reduzido associados aos mármorees que dominam a porção SW da área cartografada.

Observam-se em pequenos lajedos com foliação incipiente ou como blocos rolados dispersos de cor esbranquiçada (Figura 5C). Na composição destas rochas predomina o quartzo fino com presença subordinada de muscovita.



Figura 5 – Fotografia de afloramentos dos litotipos do Grupo Ceará. A) Micaxistos paraderivados; B) Mármorees; C) Quartzitos.

Fonte: Autores (2026).

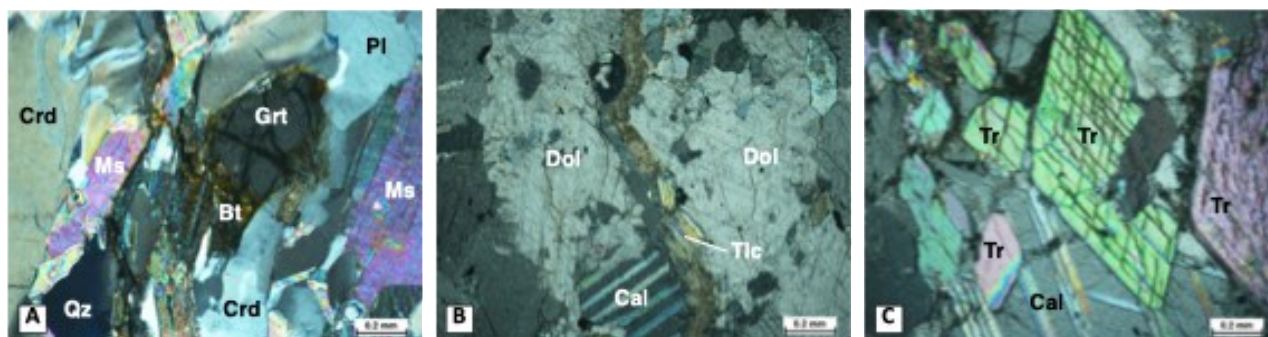


Figura 6 – Fotomicrografias dos litotipos do Grupo Ceará.

LT: Luz transmitida – LR: Luz Refletida – CA: Com analisador – SA: Sem analisador. A) Gnaisses paraderivados (LT - CA); B) e C) Mármorees (LT - CA). Simbologia mineral conforme Warr (2021): biotita (Bt), calcita (Cal), cordierita (Crd), dolomita (Dol), granada (Grt), muscovita (Ms), plagioclásio (Pl), quartzo (Qz), talco (Tlc), tremolita (Tr).

Fonte: Autores (2026).

4.2 Geologia estrutural

A partir do levantamento de estruturas em campo, junto com a interpretação dos produtos cartográficos gerados por geoprocessamento e a integração de informações de trabalhos anteriores, foi gerada uma base de dados estruturais para a área de estudo (Figura 2). A análise estrutural desses dados foi realizada considerando a distribuição espacial das informações, a caracterização geométrica e cinemática das estruturas e os resultados obtidos do tratamento estatístico.

A estruturação principal apresenta direção noroeste, com predomínio de foliações que mergulham com baixo a médio ângulo para SW e NE; outras direções ocorrem localmente, associadas à sobreposição de dobramentos. Além das foliações,

as principais feições estruturais macroscópicas observadas na área são dobras e uma zona de cisalhamento transcorrente no setor NE.

Como resultado dos estudos realizados foram identificadas quatro fases de deformação dútil representadas por conjuntos de estruturas tectônicas com estilo estrutural e orientação consistentes. A seguir descrevem-se os elementos estruturais que integram cada fase.

- Primeira fase de deformação (D1)

S1: foliação materializada através de um bandamento gnáissico caracterizado pela alternância de bandas leucocráticas e melanocráticas com espessuras variáveis. Afeta as litologias de idade Paleoproterozóica que compõem o Complexo Canindé do Ceará e em virtude de ter sido modificada e retrabalhada pelas fases deformacionais posteriores, não preserva atitude estrutural passível de medição.

Não foram registradas lineações de estiramento vinculadas a D1.

- Segunda fase de deformação (D2)

S2: foliação que modifica parcialmente a orientação de S1 em virtude da geração de dobras suaves com planos axiais orientados na direção NE. Como consequência dos dobramentos, a foliação S2 se manifesta localmente com strike NE e mergulhos suaves que alternam para NW e SE.

F2: dobras com planos axiais subverticais orientados na direção NE e eixos com caimento de baixo ângulo (12° a 19°) em duas direções opostas: NE e SW (Figura 7A).

Não foram registradas lineações de estiramento vinculadas a D2.



Figura 7 – Fotografias de dobras observadas em afloramentos.

Fonte: Autores (2026).

- Terceira fase de deformação (D3)

S3: foliação com strike NNW e mergulhos de baixo a médio ângulo com sentido variável para SW e NE, produzida através da reorientação da foliação S2. A foliação S3 está presente em todas as litologias da área definindo xistosidades e/ou bandamentos caracterizados pela alternância de bandas máficas e fêlsicas com espessuras variáveis de milimétricas a centimétricas. A estrutura bandada ocorre principalmente nos paragneisses, litotipo dominante na área de estudo, e com frequência apresenta evidências de migmatização.

F3: dobras com eixos com caimento de baixo ângulo (0° a 30°) em duas direções opostas: NNW e SSE. Planos axiais orientados na direção NNW, paralelos ao strike da foliação S3. No setor noroeste ocorrem antiformes de flanco invertido, com superfície axial paralela à foliação principal (S3) e eixos com suave caimento para sudeste. No setor centro – sul as dobras apresentam planos axiais subverticais com direção NNW e eixos com caimento de baixo ângulo (0° a 30°) na direção NNW (Figura 7B).

L3: estiramento mineral reconhecido na trama das rochas gnáissicas, com caimento de baixo ângulo (05° a 30°) nas direções NNW e SSE. Estruturas de *boudin* definidas pelos afloramentos lenticulares de gonditos indicam estiramento segundo a direção NNW-SSE.

- Quarta fase de deformação (D4)

Representada por uma zona de cisalhamento transcorrente, de direção noroeste, localizada no quadrante nordeste da área estudada. A feição característica desta estrutura é uma foliação milonítica de alto mergulho (S4) com direção NW, que oblitera estruturas pretéritas. Segundo Naleto (2018) na região da Fazenda do Carlos a estrutura apresenta cinemática sinistral, evidenciada pela orientação de porfiroclastos assimétricos do tipo sigma e superfícies S-C (Figura 8).

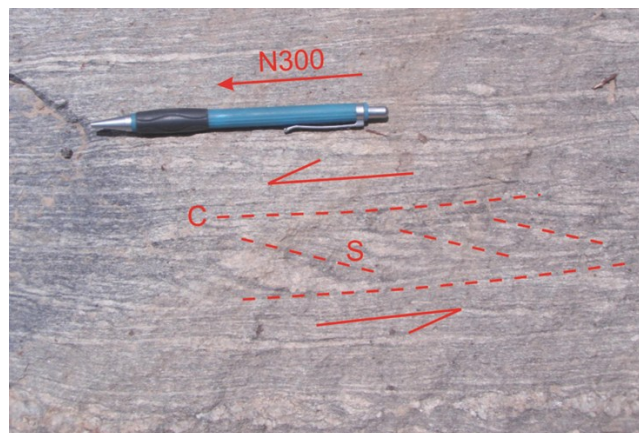


Figura 8 – Superfícies S-C com cinemática sinistral em zona de cisalhamento transcorrente.
Fonte: Naleto (2018).

4.2.1 Análise de Dobras

As dobras observadas na área apresentam dimensões decimétricas a métricas e podem ser apreciadas em diversos afloramentos. No entanto, a análise estrutural das mesmas, através de representações cartográficas e estereogramas, permite identificar a existência de dobramentos de ordem inferior e maiores dimensões, envolvendo comprimentos de onda de várias centenas de metros.

Na Tabela 1 e nas Figuras 9 e 10 apresentamos a análise pormenorizada das duas gerações de dobras reconhecidas na área. A primeira geração (F2) apresenta planos axiais subverticais com direção NE e eixos com caimento de baixo ângulo (12° a 19°) em duas direções opostas: NE e SW. A segunda (F3) apresenta planos axiais subverticais com direção NNW e eixos com caimento de baixo ângulo (0° a 30°) nas direções NNW e SSE. Em ambos casos predomina um padrão de dobramento suave com ângulo interflancos maior que 120° .

O caimento em direções opostas que se reconhece tanto para os eixos F2 quanto para os F3 é decorrente da sobreposição dos dobramentos produzida após a terceira fase de deformação. Em virtude dessa sobreposição de dobramentos, a cartografia mostra que as foliações medidas na área exibem sentidos de mergulho em todas as direções e, em determinados

setores, os traços de foliação insinuam feições de redobramento do tipo “domo e bacia” (Figura 10). No entanto, destaca-se que a análise estatística realizada a partir da integração de todos os dados de foliação coletados ($n=146$) reflete, de forma geral, a configuração estrutural gerada na fase D3, dominada por foliações na direção NNW e dobramentos com eixos seguindo esse mesmo trend (Figura 11).

Adicionalmente, cabe destacar que em diversos setores os gnaisses incluem dobras intrafoliais (Figura 7C), que podem ser interpretadas como dobras parasitas de ordem maior associadas aos dobramentos principais que dominam a área.

Tabela 1 – Parâmetros e localização das dobras analisadas na Figura 10. Indicam-se: atitude do eixo, atitude do plano axial (formato DIP AZ / DIP), ângulo interflancos e número de medições utilizadas na análise (n). Coordenadas UTM zona 24M (WGS84).

Ponto	Easting	Northing	Eixo	Plano axial	Â Interflancos	n	Fase
1	435966.051	9557285.800	197/15	111/76	168	4	D2
2	433318.038	9553636.701	232/14	143/90	174	2	D2
3	431582.438	9553867.242	037/12	126/87	164	4	D2
4	430537.098	9553369.104	043/13	313/89	165	4	D2
5	430885.075	9551396.935	010/18	281/88	127	2	D2
6	434200.363	9550841.631	302/03	033/90	151	2	D3
7	433355.933	9551778.832	310/00	040/83	163	2	D3
8	431264.639	9553657.303	336/03	246/87	108	11	D3
9	434596.050	9553461.753	319/30	231/86	55	8	D3

Fonte: Autores (2026).

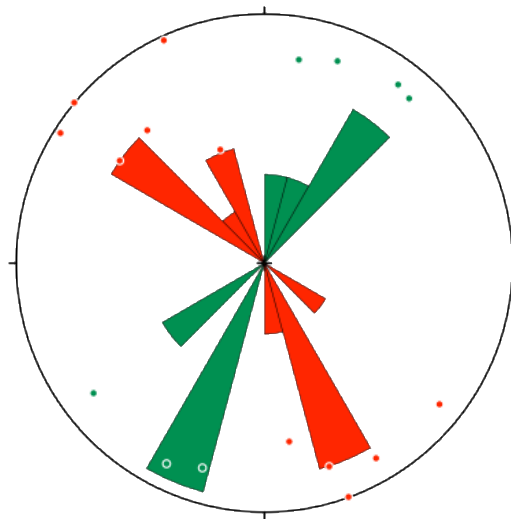


Figura 9 – Diagrama em roseta com direções de caimento das dobras. Em sobreposição, estereograma com representação dos eixos. F2 ($n=7$, verde) e F3 ($n=11$, vermelho).

Fonte: Autores (2026).

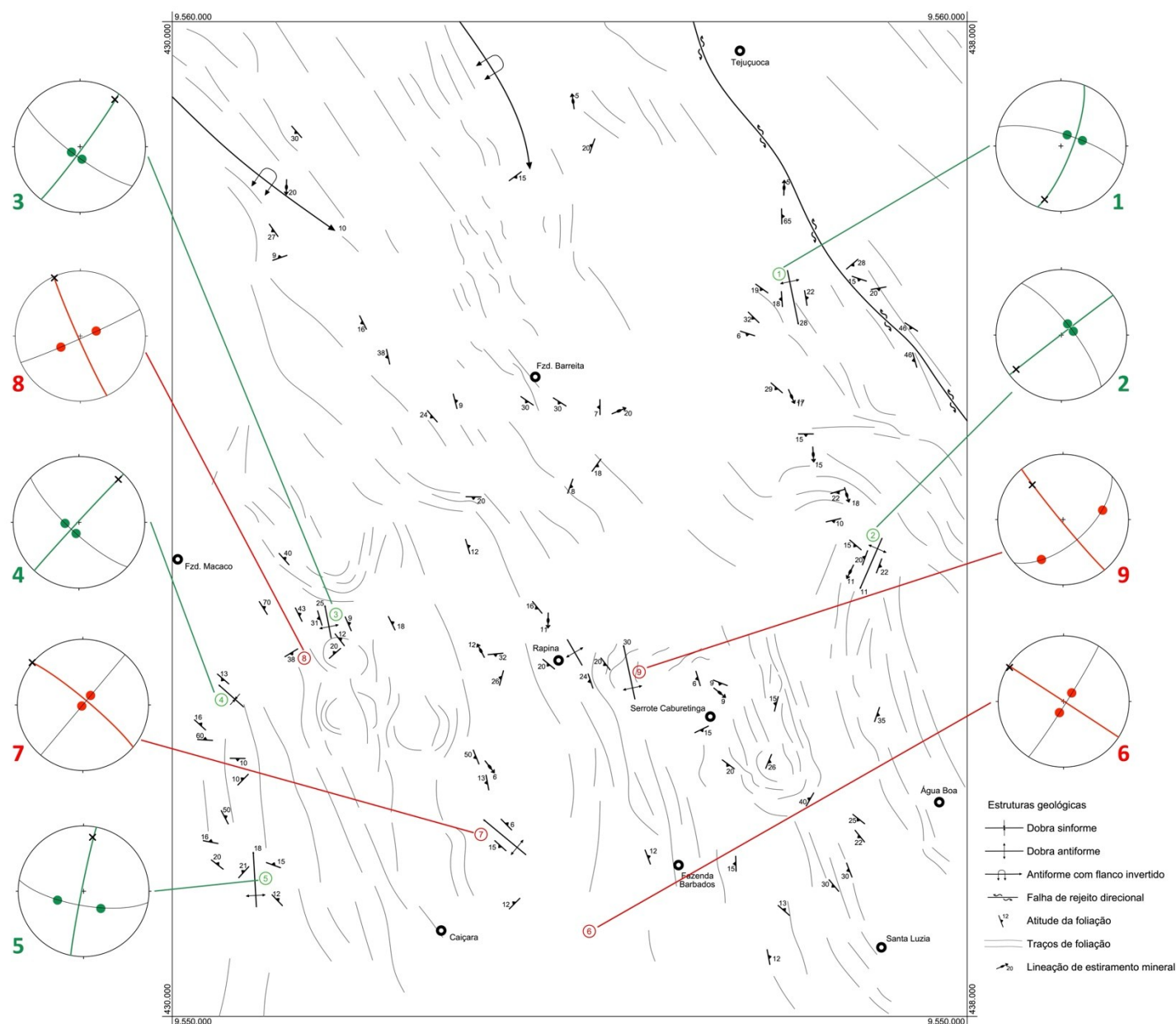


Figura 10 – Distribuição e análise das dobras F2 (verde) e F3 (vermelho). A representação das dobras em estereogramas inclui círculo π (traço preto) flancos (pontos na cor), plano axial (traço na cor) e eixo (X). Os parâmetros e a localização de cada dobra estão detalhados na tabela 1. Coordenadas UTM zona 24M (WGS84).

Fonte: Autores (2026).

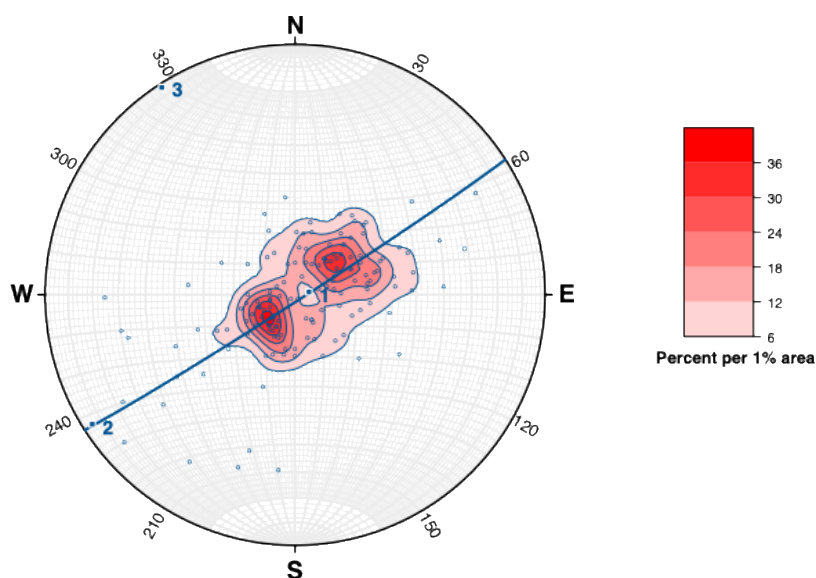


Figura 11 – Estereograma com representação de todas as foliações medidas na área ($n=146$), com diagrama de contornos, círculo π e eixo π .

Fonte: Autores (2026).

5. Discussão

5.1 Critérios adotados na cartografia

Visando manter coerência e consistência, a nomenclatura das litologias cartografadas no mapa geológico apresentado na Figura 2, está de acordo com as descrições litológicas da folha Irauçuba CPRM SA.24-Y-D-V (NALETO, 2014) e o Mapa Geológico de Ceará (PINÊO *et al.*, 2020). Nesse sentido, para facilitar a correlação com outras áreas e evitar designações ambíguas, as denominações utilizadas na folha Taperuaba CPRM SB.24-V-B-II (CASTRO, 2014) foram desconsideradas pelo fato de serem discrepantes e com abrangência limitada. Como foi exposto, na região foram cartografadas cinco unidades litológicas atribuídas ao Complexo Canindé do Ceará (migmatitos e gnaisses paraderivados, ortognaisses, anfibolitos, rochas calcissilicáticas e gonditos) e 3 unidades pertencentes ao Grupo Ceará (gnaisses e micaxistos paraderivados, mármore e quartzitos). Adicionalmente, no mapa geológico foram sinalizados locais de ocorrência de minério de Fe, minério de Mn, corpos pegmatíticos e veios de quartzo hidrotermal.

5.2 Síntese da evolução tectono-metamórfica pré-cambriana

A descrição e análise do arranjo estrutural da área estudada, em consonância com as características litoestratigráficas locais e regionais, indicam a existência de quatro fases deformacionais.

A fase D1 representa um evento deformacional pré-brasiliano, que deu origem à foliação pretérita (S1) que foi retrabalhada pelas fases subsequentes. A origem da foliação S1 pode ser atribuída ao evento metamórfico Rhyaciano-Orosiriano que afetou o Complexo Canindé do Ceará aproximadamente entre 2.090 Ma e 1.950 Ma, atingindo o pico metamórfico sob condições da fácies granulito e, posteriormente, sofrendo metamorfismo retrógrado em fácies anfibolito (MUNIZ *et al.*, 2022).

A fase D2 está relacionada às etapas colisionais iniciais da Orogênese Brasileiro-Pan-Africana, com geração de estruturas cuja orientação acompanha a direção do eixo do arco magmático Santa Quitéria (Figura 12). Localmente, essas estruturas estão representadas pela foliação S2, que apresenta mergulhos moderados para noroeste e sudeste, e pelas dobras F2, cujos eixos orientam-se na direção NE-SW. Como ilustrado na Figura 12, interpreta-se que durante esta fase, os esforços compressivos apresentavam orientação NW-SE. Observando-se também que essa orientação do principal tensor compressivo é consistente com a distribuição das litologias paleoproterozóicas do Complexo Canindé do Ceará, as quais

apresentam uma organização com desenvolvimento longitudinal perpendicular a direção de compressão D2, sugerindo que essas unidades foram intensamente afetadas durante essa fase.

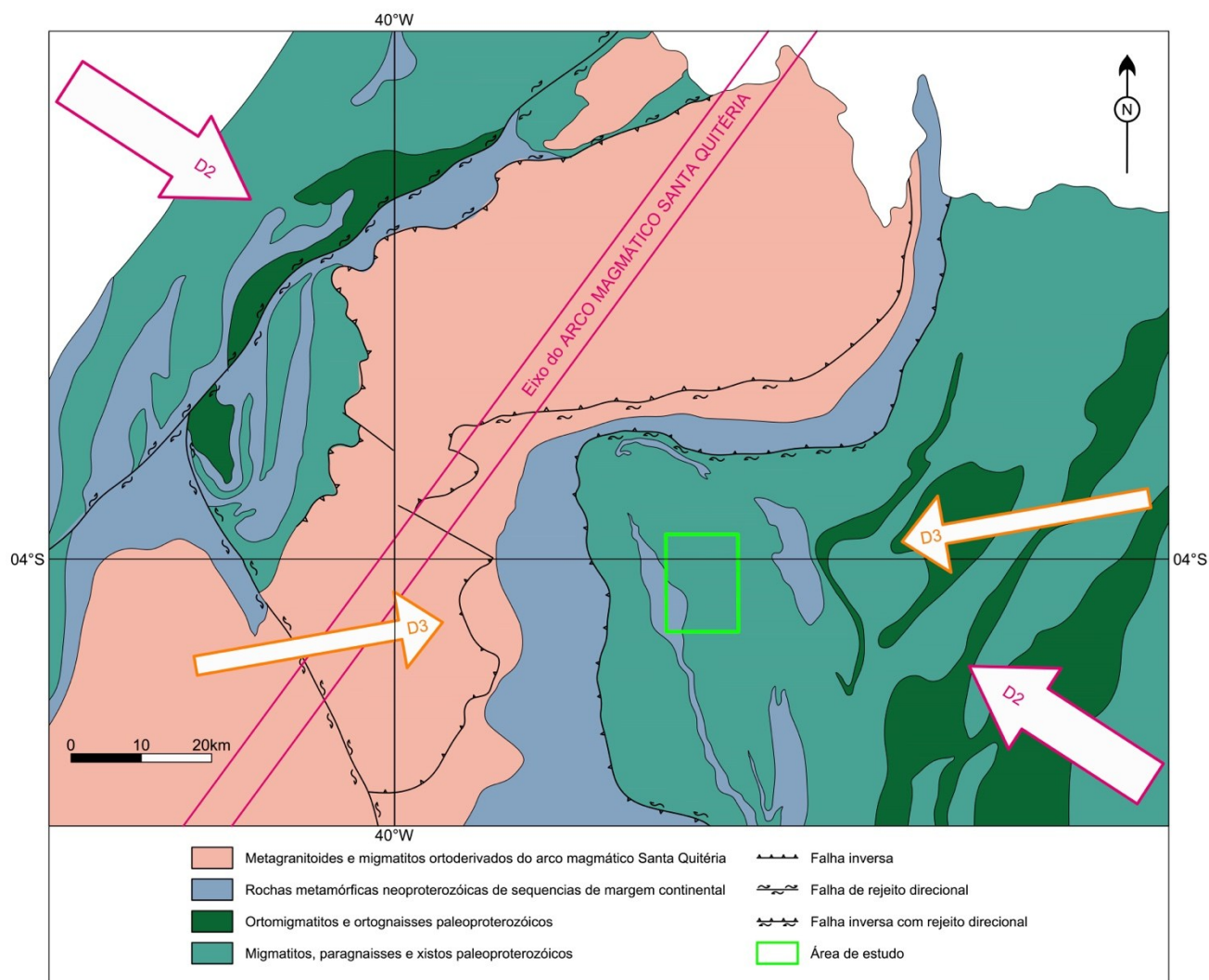


Figura 12 – Esquema cartográfico simplificado mostrando a distribuição das principais unidades pré-cambrianas e estruturas no contexto regional da área estudada. São indicadas a orientação do eixo do AMSQ e as direções de compressão interpretadas para as fases de deformação D2 e D3. Coordenadas geodésicas (WGS84).

Fonte: Pinéo *et al.* (2020).

A fase D3 está relacionada à etapa colisional avançada da Orogênese Brasiliano-Pan-Africana, sendo uma fase dominada por um intenso transporte tectônico, que permitiu resolver espacialmente a acomodação das massas rochosas em um ambiente altamente compressional (BRITO NEVES *et al.*, 2000). Este processo ocorreu predominantemente através da geração de cavalgamentos de escala regional associados a processos de deformação interna, que levaram à reorientação da foliação de acordo com a atitude dos planos de falha, acompanhada pela geração de dobras com eixos sub-horizontais paralelos à direção da foliação (CAXITO *et al.*, 2020; FERREIRA *et al.*, 2020).

Localmente, a fase D3 afetou a área estudada através de esforços compressivos e transporte tectônico na direção ENE (Figura 12), acarretando o desenvolvimento de foliações (S3) com strike NNW-SSE e dobras (F3) com eixos e planos axiais subparalelos à essa foliação. Concomitantemente, nesta fase desenvolveram-se processos extensionais na direção NNW-SSE, evidenciados pelo estiramento mineral (L3) observado na trama das rochas e pelas faixas de boudins de

gonditos representados na cartografia. Adicionalmente, se observa que as rochas neoproterozóicas do Grupo Ceará, localmente exibem desenvolvimento longitudinal perpendicular a direção de compressão D3, sugerindo que as mesmas adotaram essa orientação a partir da deformação produzida por esta fase.

A fase de deformação D4 está relacionada ao desenvolvimento de uma tectônica transcorrente (ARCHANJO *et al.*, 2021; ARTHAUD *et al.*, 2008), que representa um estágio pós-colisional de escape lateral de terrenos e se manifesta na área de estudo com a zona de cisalhamento de rejeito direcional identificada na porção nordeste, onde a deformação oblitera estruturas pretéritas das rochas imprimindo uma foliação milonítica de alto ângulo (S4) com direção NW e cinemática sinistral (NALETO, 2018).

De acordo com Souza Junior e Gomes (2024) os litotipos descritos foram inicialmente metamorfizados sob condições de grau médio (fácies anfibolito baixo) e sofreram posteriormente processos retrometamórficos de baixo grau (fácies xistos verdes). O primeiro episódio metamórfico, atribuído à fase de deformação D2, ficou registrado através de presença de biotita, muscovita, plagioclásio, microclínio e granada na paragênese das rochas paraderivadas, observando-se também a participação de hornblenda e clinopiroxênio nas rochas ortoderivadas.

O retrometamorfismo sobreposto ficou evidenciado através da formação de epidoto nas bordas da biotita e a alteração do plagioclásio para sericita nos paragneisses, e na substituição parcial da hornblenda por epidoto, biotita ou tremolita/actinolita nas rochas ortoderivadas. A existência de texturas mimerquíticas e antipertíticas também é atribuída pelos mencionados autores aos processos do metamorfismo retrógrado associados à fenômenos de resfriamento e recristalização mineral. Estima-se que estas transformações ocorreram na fase D3, sob condições de menor temperatura.

6. Conclusões

O mapa geológico produzido aumenta o detalhamento da área estudada, constituindo uma fonte de informação litoestrutural na escala 1:12.500 com potencial para contribuir com os mapeamentos regionais. No todo, foram cartografadas 5 litofácies do Complexo Canindé do Ceará (migmatitos e gnaisses paraderivados, ortogneisses, anfibolitos, rochas calcissilicáticas e gonditos) e 3 litofácies do Grupo Ceará (gnaisses e micaxistos paraderivados, mármore e quartzitos). Como complemento ao produto cartográfico, foi apresentada a caracterização petrográfica de cada uma das unidades litológicas identificadas.

Através de análise estrutural realizada foram identificadas quatro fases de deformação dúctil que podem ser correlacionadas com quatro episódios distintos dentro da evolução regional: um evento deformacional pré-brasiliano (D1), a etapa inicial da colisão da Orogênese Brasileiro-Pan-Africana (D2), a etapa colisional avançada da Orogênese Brasileiro-Pan-Africana (D3) e um estágio pós-colisional dominado por uma tectônica de cisalhamento com rejeito direcional (D4).

Adicionalmente destacamos que na área estudada foram identificadas ocorrências de manganês e ferro.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Departamento de Geologia (DEGEO) da Universidade Federal do Ceará (UFC) pelo suporte técnico e de infraestrutura. Além disso, reconhecem o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro (CNPq/ICMBio/FAPs 18/2017).

Referências

- Allmendinger, R. W., Cardozo, N. C., Fisher, D. *Structural Geology Algorithms: Vectors & Tensors*. Cambridge, England: Cambridge University Press, 2013. 289p.
- Almeida, F.F.M., Hasui, Y., Brito Neves, B.B., Fuck, R.A. Brazilian structural provinces: an introduction. *Earth-Science Reviews* 17 (1/2), 1–29. 1981.
- 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* 2 (5), 228742. 2021
- Archanjo, C.J., Hollanda, M.H.B.M., Viegas, L.G. Late Ediacaran lateral-escape tectonics as recorded by the Patos shear zone (Borborema Province, NE Brazil). *Brazilian Journal of Geology*, 51 (2), e20200132. 2021.

- Arthaud, M.H., Caby, R., Fuck, R.A., Dantas, E.L., Parente, C.V. Geology of the Northern Borborema Province NE Brazil and its correlation with Nigeria, NW Africa. *Geological Soc. Lond. Spec. Publ.* 294, 49–67. 2008.
- Arthaud, M.H., Vasconcelos, A.M., Nogueira Neto, J.A., Oliveira, F.V.C., Parente, C.V., Monie, J.P., Caby, R., Fetter, A.H. Main structural features of Precambrian domains from Ceará (NE Brazil). *Abstracts of the International Conference on Precambrian and Cratons Tectonics*, Ouro Preto, 84-85. 1998.
- Arthaud, M.H., Fuck, R., Dantas, E.L., Santos, T.J.S., Caby, R., Armstrong, R. The Neoproterozoic Ceará Group, Ceará Central domain, NE Brazil: deposition age and provenance of detrital material. New insights from U-Pb and Sm-Nd geochronology. *Journal of South American Earth Sciences* 58, 223–237. 2015
- Avenza Systems. Avenza Maps. Versão 4.4. Aplicativo móvel. Toronto: Avenza Systems Inc., 2023.
- Brito Neves, B.B., Santos, E.J., Van Schmus, W.R. Tectonic history of the Borborema Province, northeastern Brazil. In: Cordani, U., Milani, E.J., Thomaz Filho, A., Campos, D.A. (Eds.), *Tectonic Evolution of South America. Proceedings of the Thirty-first International Geological Congress*, Rio de Janeiro, Brazil, 151–182. 2000.
- Caby, R., Arthaud, M.H. Major Precambrian nappes of the Brazilian Belt, Ceará, Northeast Brazil. *Geology* 14, 871-874. 1986.
- Cardozo, N., Allmendinger, R.W. Spherical projections with OSXStereonet. *Computers & Geosciences* 51, 193-205. 2013.
- Castro, N.A. Mapa geológico: folha SB.24-V-B-II, Taparuaba (Escala 1:100.000). CPRM, 2014. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/17661>. Acesso em: 08/03/2023.
- Caxito, F.A., Santos, L.C.M.L., Ganade de Araújo, C.E., Bendaoud, A., Fettous, E.-H., Bouyo Houketchang, M. 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 (2), 1–38. 2020.
- CPRM - Serviço Geológico do Brasil. Projeto Aerogeofísico Norte do Ceará: relatório final do levantamento e processamento dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos. Rio de Janeiro: Prospectores Aerolevantamentos e Sistemas, 2009. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/items/5db4d54a-c6a0-4eda-9dd8-357362dece97>. Acesso em: 22/06/2024.
- Geosoft. Oasis Montaj. Versão 8.8. Software geofísico. [S.l.]: Geosoft, 2016.
- Ferreira, A.C.D., Dantas, E.L., Fuck, R.A., Nedel, I.M. Arc accretion and crustal reworking from late Archean to Neoproterozoic in Northeast Brazil. *Scientific Reports* 10, 7855. 2020.
- Mardia, K., Jupp, P. *Directional Statistics*. Chichester, United Kingdom: John Wiley & Sons, Ltd., 2009. 464p.
- Muniz, R.L., Santos, T.J.S., Dantas, E.L., Fuck, R.A. Rhyacian-Orosirian Khondalite Belt in the Borborema Province (NE Brazil): An active margin setting based on U–Pb zircon and monazite constraints. *Geological Journal*, 57(9), 3808–3828. 2022.
- Naletto, J.L.C. Folha SA.24-Y-D-V Irauçuba (Escala 1:100.000). CPRM, 2014. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/20425>. Acesso em: 08/03/2023.
- Naletto, J.L.C. Geologia e recursos minerais da folha Irauçuba – SA.24-Y-D-V: estado do Ceará. Escala 1:100.000. Fortaleza: CPRM, 79p. 2018. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/20425>. Acesso em: 17/11/2024.
- Oliveira, R.G., Medeiros, W.E. Deep crustal framework of the Borborema Province, NE Brazil, derived from gravity and magnetic data. *Precambrian Research* 315, 45–65. 2018.
- QGIS Development Team. QGIS Geographic Information System. Versão 3.36. [S.l.]: Open Source Geospatial Foundation Project, 2024.

-
- Pinéo, T.R.G., Palheta, E.S.M., Costa, F.G., Vasconcelos, A.M., Gomes, I.P., Gomes, F.E.M., Bessa, M.D.M.R., Lima, A.F., Holanda, J.L.R., Freire, D.P.C. projeto geologia e recursos minerais do Estado do Ceará. Mapa Geológico do Estado do Ceará (Escala 1:500.000). CPRM, 2020. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/20418>. Acesso em: 09/03/2023.
- 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. 2017.
- Santos, L.C.M.L., Dantas, E.L., Cawood, P.A., Lages, G.A., Lima, H.M., Santos, E.J. Accretion Tectonics in Western Gondwana Deduced from Sm-Nd Isotope Mapping of Terranes in the Borborema Province, NE Brazil. *Tectonics* 37 (8), 2727–2743. 2018
- 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. Evidence for Neoproterozoic terrane accretion in the central Borborema Province, West Gondwana deduced by isotopic and geophysical data compilation. *International Geology Review*, 64 (11), 1574–1593. 2021
- Santos, L.C.M.L., Caxito, F.A., Bouyo, M.H., Ouadahi, S., Araújo, K., Lages, G.A., Santos, G.L., Pitombeira, J.P.A., Cawood, P.A. 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* 2 (3), 100148. 2023.
- Schmidt, W. Gefügestatistik. *Tschermaks Mineralogische und Petrographische Mitteilungen*, 38, 392–423. 1925.
- Souza Júnior, F.F.R., Gomes, R.A.F. Mapeamento geológico-estrutural de terrenos cársticos na folha Tapera SB.24-V-B-II com escala de detalhe 1:12.500. Trabalho de conclusão de curso. 129p. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE. 2024.
- U.S. Geological Survey (USGS). Earth Resources Observation and Science (EROS) Center. Landsat 8-9. Operational Land Imager / Thermal Infrared Sensor Level-2, Collection 2, 2020. <https://doi.org/10.5066/P9OGBGM6>. Disponível em: <https://usgs.gov>. Acesso em: 14/05/2024.
- Van Schmus, W.R., Brito Neves, B.B., Hackspacher, P., Babinski, M. U/Pb and Sm/Nd geochronologic studies of eastern Borborema Province, northeastern Brazil: initial conclusions. *Journal of South American Earth Sciences* 8, 267–288. 1995.
- Warr, L.N. (2021). IMA-CNMNC approved mineral symbols. *Mineralogical Magazine*, 85 (3), 291 – 320. 2021.