



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



Scarlety Ellen Patrocinio Santos

Caracterização estrutural do Lineamento Caeté no
Quadrilátero Ferrífero – MG

Ouro Preto

2025

Scarlety Ellen Patrocinio Santos

Caracterização estrutural do Lineamento Caeté no
Quadrilátero Ferrífero – MG

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Geológica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Geológica.

Orientador: Dr. Issamu Endo

Ouro Preto

2025



FOLHA DE APROVAÇÃO

Digite o nome do autor (Scarlety Ellen Patrocínio Santos)

Digite o título (CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL DO LINEAMENTO CAETÉ NO QUADRILÁTERO FERRÍFERO – MG)

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Geológica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Geológica

Aprovada em 22 de outubro de 2025

Membros da banca

[Doutor] - Prof. Issamu Endo - Orientador(a) (Universidade Federal de Ouro Preto)
[Doutor] - Prof. Leonardo Eustáquio Silva Gonçalves - (Universidade Federal de Ouro Preto)
[Mestranda] - Amabiliane Gonzaga Queiroz - (Universidade Federal de Ouro Preto)

Issamu Endo, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 03/03/2026



Documento assinado eletronicamente por **Issamu Endo, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 03/03/2026, às 17:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1068783** e o código CRC **240F088C**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço o apoio incondicional da minha família: os meus pais, Claudio e Clausia, e minha irmã, Clara. A confiança de vocês me guiou até a realização deste sonho, que não é só meu.

Ao meu orientador, professor Issamu Endo, pelo apoio imediato, pela disponibilidade e pela paciência durante o processo de orientação. A quem expresso minha profunda admiração pela forma com que conduz seu trabalho como docente e pesquisador.

Ao Lucas Medeiros, pela confiança ao compartilhar os dados que possibilitaram o desenvolvimento desta pesquisa e pelo apoio na execução deste trabalho.

Aos amigos e amigas que fizeram parte desta “era geológica”, Natalia, Vanessa, Douglas, Rafaela e Jorge. Minha gratidão pela amizade, convivência e apoio mútuo ao longo do curso.

À amada mansão República Quarto Crescente, às moradoras e ex-alunas, por serem sempre abrigo.

À UFOP, pelo compromisso com ensino público e de qualidade, e à Fundação Gorceix, pelo apoio assistencial. Ao DEGEO com seus professores e funcionários, pela contribuição significativa à minha formação acadêmica e profissional.

RESUMO

O presente trabalho realiza a caracterização estrutural do Lineamento Caeté, situado no Quadrilátero Ferrífero (QFe), com base em mapeamento morfoestrutural, levantamento de campo e extração manual e automática de lineamentos. Os resultados obtidos indicam que, ao contrário da concepção clássica de um traço linear único, o Lineamento Caeté corresponde a um feixe de estruturas paralelas de direção aproximada N120E, concentrado na porção central da Serra das Cambotas. Esse feixe é constituído por falhas transcorrentes, fraturas conjugadas, veios de quartzo dobrados e zonas de cisalhamento rúptil-dúctil, configurando um corredor tectônico ativo em múltiplas fases deformacionais. As análises estruturais revelaram que o lineamento se enquadra em um sistema do tipo Riedel, marcado por cinemática sinistral inicial, posteriormente reativado por movimentação dextral. Essa evolução é atribuída às compressões E-W e N-S associadas às orogenias brasileiras, responsáveis pela movimentação de blocos crustais e pela geração de fraturas do sistema Riedel (R, R', X, P, Y). As estruturas S-C, dobras assimétricas e lineações minerais evidenciam a atuação de regimes não coaxiais de deformação, reforçando o caráter transpressivo e a complexidade estrutural regional. Do ponto de vista metodológico, a extração automática de lineamentos permitiu a obtenção de grande número de traços estruturais, mas apresentou redundâncias associadas à iluminação direcional e às variações litológicas. O contraste do relevo mostrou-se determinante: serras quartzíticas e formações ferríferas sustentam lineamentos contínuos ou dissecados, enquanto áreas de embasamento intemperizado exibem traços difusos. A correlação entre extração manual e automática foi essencial para validar e refinar os resultados, indicando que o uso combinado de múltiplas imagens, poucos ângulos de iluminação e parâmetros ajustados aumenta a confiabilidade na identificação de descontinuidades estruturais. Em escala regional, o Lineamento Caeté integra o conjunto de descontinuidades Az 120°, associado ao Enxame de Diques Pará de Minas, compondo parte da arquitetura em megakink do setor meridional do Cráton São Francisco. As sucessivas reativações desse corredor indicam alta permeabilidade tectônica, o que favoreceu a circulação de fluidos hidrotermais e exerceu papel relevante na metalogênese do QFe, notadamente em depósitos de ferro e ouro. Em síntese, o Lineamento Caeté, na região da Serra das Cambotas, deve ser interpretado não como uma feição isolada, mas como um feixe de estruturas rúpteis e rúptil-dúcteis paralelas, que registra a complexa história de reativações brasileiras sobre estruturas paleoproterozoicas. Essa abordagem reforça a importância de metodologias integradas, combinando geologia estrutural de campo, sensoriamento remoto e técnicas automatizadas, para a compreensão de zonas de cisalhamento compostas e de sua influência no arcabouço geodinâmico e metalogenético do QFe.

Palavras chave: Quadrilátero Ferrífero; Lineamento Caeté; Enxame de Diques Pará de Minas; Serra das Cambotas; Lineamento Azimute 120°

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Vias de acesso a cidade de Barão de Cocais/MG, onde está localizada a Serra das Cambotas.	15
Figura 2 - Modelo esquemático de um regime de cisalhamento, mostrando os sistemas de fraturas de Riedel (R, R', P e X), a foliação e o elipsoide de deformação e sua relação com a direção do cisalhamento principal (D = Y), os eixos de compressão (C) e extensão (Ex), falhas normais (FN) e reversas (FR).	18
Figura 3 - Parâmetros adotados para a extração automática na janela de entrada do software PCI Geomatica 2018.	19
Figura 4 - Representação simplificada do mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero (2019), escala 1:150.000	21
Figura 5 - Coluna Estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero	23
Figura 6 - Sistema de nappes do QFe as principais falhas/zonas de cisalhamento	26
Figura 7- Segmentos do Lineamento Az 125° e as províncias geológicas do Brasil	32
Figura 8 – Imagem da Amplitude do Sinal Analítico do CMA (ASA).	33
Figura 9– Localização dos principais depósitos alcalinos na forma de domo no lineamento Az 125°	34
Figura 10 – Enxames de diques máficos do estado de Minas Gerais e no Quadrilátero Ferrífero	37
Figura 11 - Mapa Geológico do Quadrilátero Ferrífero (Endo <i>et al.</i> 2019) com indicação dos Lineamentos Az 120°: [1]- Congonhas; [2]- Brumadinho; [3]- Mariana; [4]- Fundão; [5]- Caeté; [6]-João Monlevade e [7]-Itabira.	38
Figura 12- Esboço das principais discontinuidades litosféricas do Cráton do São Francisco meridional, Quadrilátero Ferrífero (QFe) e regiões adjacentes.	40
Figura 13- Mapa Magnetométrico Amplitude do Sinal Analítico (Oliveira <i>et al.</i> em preparação) mostrando as principais discontinuidades crustais e a megakink de cinemática sinistral delimitada pelos Lineamentos Az 120 Brumadinho a SW e João Monlevade a NE	41

Figura 14 - Mapa Geológico Estrutural da Serra das Cambotas e Região da Pedra Pintada. Barão de Cocais - Minas Gerais.....	43
Figura 15 – O polo do plano dos principais dados estruturais de campo levantados por Silveira <i>et al.</i> (2024). a) xistosidade - Sn; b) acamamento - S0; lineação de intersecção, c) Li - QFe e d) Li - Espinhaço; lineação mineral, e) Lm – QFe, f) Lm – Espinhaço e g) eixo de dobras brasileiras, por Gomes (2017) e Silveira <i>et al.</i> (2024).....	45
Figura 16- Mapa de lineamentos morfoestruturais traçados manualmente sobre a folha topográfica do IBGE de Barão de Cocais (escala 1:50.000), com sobreposição de imagem de satélite do Google para apoio na interpretação geomorfológica	47
Figura 17 - Lineamentos morfoestruturais extraídos automaticamente, com diagramas de roseta da frequência e do comprimento com o predomínio direcional, obtidos a partir do MDE nas direções de relevo positivos: 0, 30, 45, 315.	50
Figura 18 - Lineamentos morfoestruturais extraídos automaticamente, com diagramas de roseta da frequência e do comprimento com o predomínio direcional, obtidos a partir do MDE nas direções de relevo negativos: 90, 180, 210, 270.....	51
Figura 19 - Localização das estações de trabalho, pontos de maior expressão do Lineamento Caeté nas serras	52
Figura 20- A) Diagrama de Rosa de frequência dos eixos de dobras brasileiras por Gomes (2017) B) Diagrama de Rosa de frequência dos eixos de dobras brasileiras levantados por Silveira <i>et al.</i> (2024).....	53
Figura 21 - Mapa de Eixo de dobras brasileiras levantadas por Simmons (1960), Gomes (2017), Silveira <i>et al.</i> (2024) nas serras das Cambotas, do Garimpo e Dois Irmãos. Unidades litológicas: A3ca – gnaisses e granitos foliados com biotita e hornblenda; A3caal – anfíbolitos; A3co – gnaisses graníticos com biotita, hornblenda e migmatitos; A3rnccs – xistos clorita-sericita-quartzo com raras FFs; A3rnccsmd – xistos clorita-sericita-quartzo com FFs eventuais; A3rnmmq – metamargas, FFs carbonatadas, xistos e metassedimentos; A3rnmmv – metabasaltos e FFs com rochas vulcanoclásticas e pelíticas; A3rnmmvsq – metagrauvacas, xistos e FFs com metachert; MP1e – metarenitos; MP1eas – metaconglomerados e metarenitos; MP1erc – metarenitos com estratificação plano-paralela; MP1erv – metarenitos e metarcóseos intercalados; MP1esm – metarenitos finos a grossos com estratificações diversas; NP1δpl – metadiabásios e metagabros;	

PP1mcb – filitos variados com quartzitos e mármore dolomíticos; PP1mcm – quartzitos, metaconglomerados e quartzo-mica xistos; PP1mic – itabiritos, hematitos, mármore e filitos ferruginosos; PP1mig – mármore e itabiritos, com brechas ferruginosas locais; PP1mpc – quartzitos ferruginosos, filitos e xistos sericíticos; PP2ersc – xistos, quartzitos e quartzitos ferruginosos detríticos; PP2ersmg – FFs, xistos cloríticos e filitos; PP3yc – metagranitoides; PP4δca – metamáficas; Coberturas: Eca – cobertura detrito-laterítica com concreções ferruginosas; e Nce – sedimentos de tálus e solos com fragmentos de rocha.	53
Figura 22 – Estação 09: Zona de cisalhamento rúptil-dúctil direcional de orientação subvertical N120 com indicações de foliação S/C de cinemática dextral.....	56
Figura 23 – Estação 09: Croqui de veio dobrado em "z" com atitude dos eixos, acamamento e xistosidade do afloramento do quartzito Espinhaço	56
Figura 24 – Estação 08: Intrusão máfica de direção N120 com foliação de cisalhamento S[c]	57
Figura 25 – Feixe de lineamentos Az 120 na Serra das Cambotas e o mapa geológico simplificado com as principais falhas de cavalgamento e transcorrentes de Rodrigues (1991).	58
Figura 26- Estação 02: Afloramento de quartzito intensamente fraturado localizado na estrada da Rota do Ferro. Barão de Cocais.	59
Figura 27 - Estação 02: Afloramento de quartzito intensamente fraturado localizado na estrada da Rota do Ferro. Barão de Cocais.	61
Figura 28 – Estação 11 e 12: A), B), C) e D) Alta densidade de fraturas subverticais de direção E-W nos quartzitos do Supergrupo Espinhaço.	62
Figura 29- Estação 13: Conjunto de fraturas subverticais de orientação N-S identificados nas rochas quartzíticas do Supergrupo Estrada Real, na região de Cocais.....	63
Figura 30 - Estação 15: Veios N/S dobrados em um padrão "S" sinistral com orientação preferencial de grãos foliados.....	64
Figura 31 – Estação 11: Sistema de veios de quartzo subverticais N30E seccionado por fraturas N80-100E nos metaquartzitoarenitos do Supergrupo Espinhaço.	65

Figura 32 – Estação 19: Veio dobrado com direção aproximada de Az120-130 nos quartzitos do Supergrupo Estrada Real.	65
Figura 33 - A) Veios na Cachoeira da Cambota, B) Veio com espessura de 3 metros na região sul da área e, C) Cachoeira da Cambota.	66
Figura 34 - Lineamentos automáticos e manuais sobre o mapa geológico da região da Folha Barão de Cocais com a atualização de Silveira <i>et al.</i> (2024) e Silveira (2026, em preparação).	68
Figura 35– Diagrama de rosetas da extração automática: frequência e comprimento acumulado	69
Figura 36 – Diagrama de rosetas da extração manual: frequência, comprimento acumulado e Riedel.....	69
Figura 37- Esquema interpretativo do sistema de cisalhamento não-coaxial do tipo Riedel associado ao Lineamento Caeté, na região das Serras das Cambotas e do Garimpo. O plano de fluxo principal (Y ou D) está orientado segundo o azimuth N120 de atitude subvertical, ancorado no embasamento cristalino, com o desenvolvimento de fraturas típicas do sistema Riedel (R, R', P, X e T), indicando um regime transcorrente com cinemática composta. Predomina o deslocamento sinistral da fase F1, sobreposto por um regime dextral subordinado, associado à fase F2; ambas as fases correspondem a reativações relacionadas à tectônica Brasileira. A zona de cisalhamento exibe características que variam do comportamento rúptil ao rúptil -dúctil, refletindo diferentes condições de deformação em distintos níveis crustais e unidades litológicas (e.g. Tchalenko, 1970, Petit, 1987).	70
Figura 38 - Afloramento de quartzito do SG Estrada Real na região do alto de Cocais com a representação da cinemática de reativação dextral sobre a sinistral.....	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Parâmetros adotados para a detecção de bordas no software PCI Geomatica 2018.	19
Tabela 2 - Escala de parâmetros configurada segundo Goulart <i>et al.</i> (2022).....	48
Tabela 3- Número de lineamentos e direções obtidas de acordo com o modo angular da extração automática.....	49
Tabela 4 - Índice dos eixos de dobras brasileiras na região da Serra das Cambotas, Barão de Cocais/MG.....	55
Tabela 5 - Padrão do sistema de fraturas nas rochas quartzíticas dos supergrupos Estrada Real e Espinhaço.....	59
Tabela 6 - Atitudes de veios de quartzo nas serras das Cambotas e Garimpo.	66

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	APRESENTAÇÃO	13
1.1.1	LOCALIZAÇÃO	14
1.2	OBJETIVOS	15
1.3	JUSTIFICATIVA	15
1.4	MATERIAIS E MÉTODOS	16
1.4.1	Revisão Bibliográfica	16
1.4.2	Trabalho de campo	16
1.4.3	Análise estrutural	17
1.4.4	Extração automática de lineamentos estruturais	18
2	CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL	21
2.1	CONTEXTO GEOTECTÔNICO	21
2.1.1	O Quadrilátero Ferrífero	21
2.2	ESTRATIGRAFIA DO QFe.....	22
2.2.1	Complexos Metamórficos.....	23
2.2.2	Supergrupo Rio das Velhas	24
2.2.3	Supergrupo Minas.....	24
2.2.4	Supergrupo Estrada Real	24
2.2.5	Suítes Intrusivas Máficas e Ultramáficas	25
2.2.6	Cobertura Cenozoica	25
2.3	ARCABOUÇO ESTRUTURAL.....	25
2.3.1	Estruturas contínuas.....	25
2.3.2	Estruturas descontínuas	27
3	LINEAMENTO AZIMUTE 125°	29

3.1	CONCEITO DE LINEAMENTO	29
3.2	CARACTERIZAÇÃO DO LINEAMENTO AZ 125°	30
3.2.1	Aspecto Geotectônico	30
3.2.2	Aspecto Geofísico.....	32
3.2.3	Aspecto Geologia Econômica.....	33
3.3	REATIVAÇÃO DE DESCONTINUIDADES CRUSTAIS	34
4	LINEAMENTO AZIMUTE 125° NO QFe	36
4.1	INTRODUÇÃO.....	36
4.2	LINEAMENTO AZIMUTE 120°	37
4.2.1	Enxame de Diques Pará de Minas	38
4.2.2	Caracterização dos Lineamentos Az 120° no QFe.....	39
4.3	MINERALIZAÇÕES DE Fe e Au ASSOCIADAS.....	40
5	O LINEAMENTO CAETÉ NA SERRA DAS CAMBOTAS	42
5.1	INTRODUÇÃO.....	42
5.2	ANÁLISE DE LINEAMENTOS	46
5.2.1	Extração manual	46
5.2.2	Extração automática.....	48
5.3	O LINEAMENTO CAETÉ NA SERRA DAS CAMBOTAS	52
5.3.1	Estruturas dúcteis: dobras brasileiras, foliação, zonas de cisalhamento	53
5.3.2	Estruturas rúpteis: falhas transcorrentes, fraturas, veios.....	58
5.4	DISCUSSÃO	67
6	CONCLUSÕES	74
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77

APÊNDICE A – Tabela acervo de pontos do Lineamento Caeté na Serra das Cambotas

**APÊNDICE B – Cruzamento de dados dos lineamentos morfoestruturais traçados
manualmente**

92

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

A arquitetura favorável da litosfera refere-se ao conjunto de estruturas que ela contém e o controle que essas estruturas exercem na mineralização. Em determinadas regiões litosféricas, há maior probabilidade de ocorrência de mineralizações (*e.g.* maior probabilidade de encontrar depósitos hidrotermais na crosta superior; kimberlitos na litosfera mantélica), por esse motivo, destaca-se a importância de compreender a relação espacial e genética de alguns tipos de depósitos (como depósitos hidrotermais e magmáticos) e as estruturas litosféricas que os hospedam (Dadalto, 2022; Endo *et al.*, 2024a, 2024b; McCuaig; Hronsky, 2017).

Para Richards (2000) os lineamentos crustais de grande escala são reconhecidos como corredores, com até 30 km de largura, de feições geológicas, estruturais, geomorfológicas ou geofísicas alinhadas, que se destacam em relação às direções geológicas regionais. Esses lineamentos são frequentemente difíceis de serem observados em campo, uma vez que a escala e as inter-relações dessas feições são muito amplas para serem mapeadas, exceto em escala regional. Consequentemente, eles são mais facilmente identificados a partir de imagens de satélite ou de mapas gravimétricos e magnéticos. Acredita-se que tais lineamentos sejam expressões superficiais de antigas estruturas profundas da crosta ou trans-litosféricas, que foram periodicamente reativadas como zonas de fraqueza durante eventos tectônicos subsequentes. Essas zonas de fraqueza, especialmente nas interseções, podem atuar como canais de alta permeabilidade, favorecendo a ascensão de magmas e fluidos provenientes de maiores profundidades. As condições mais favoráveis à intrusão magmática ocorrem quando essas estruturas estão submetidas a regimes de tensão ou transtração.

Estudos aeromagnetométricos têm contribuído significativamente para a identificação dessas estruturas na litosfera, permitindo compreender a colocação de corpos máficos ao longo de zonas de fraqueza crustais. Nesses estudos, destacam-se os enxames de diques, definidos como conjuntos de diques de idades e relações genéticas semelhantes, formados em um mesmo contexto geodinâmico de intrusão (Chaves & Neves, 2005). Os trabalhos de Endo *et al.* (2024a,

2024b) descrevem extensos diques com orientação geral NW-SE, interpretados como importantes descontinuidades litosféricas que integram o complexo arcabouço estrutural do Quadrilátero Ferrífero. Esses diques compõe o Enxame de Diques Pará de Minas (EDPM), cuja orientação predominante é N120E (Az 120°), correspondendo ao denominado por Rocha (2013) como Lineamento Az 125° em Minas Gerais.

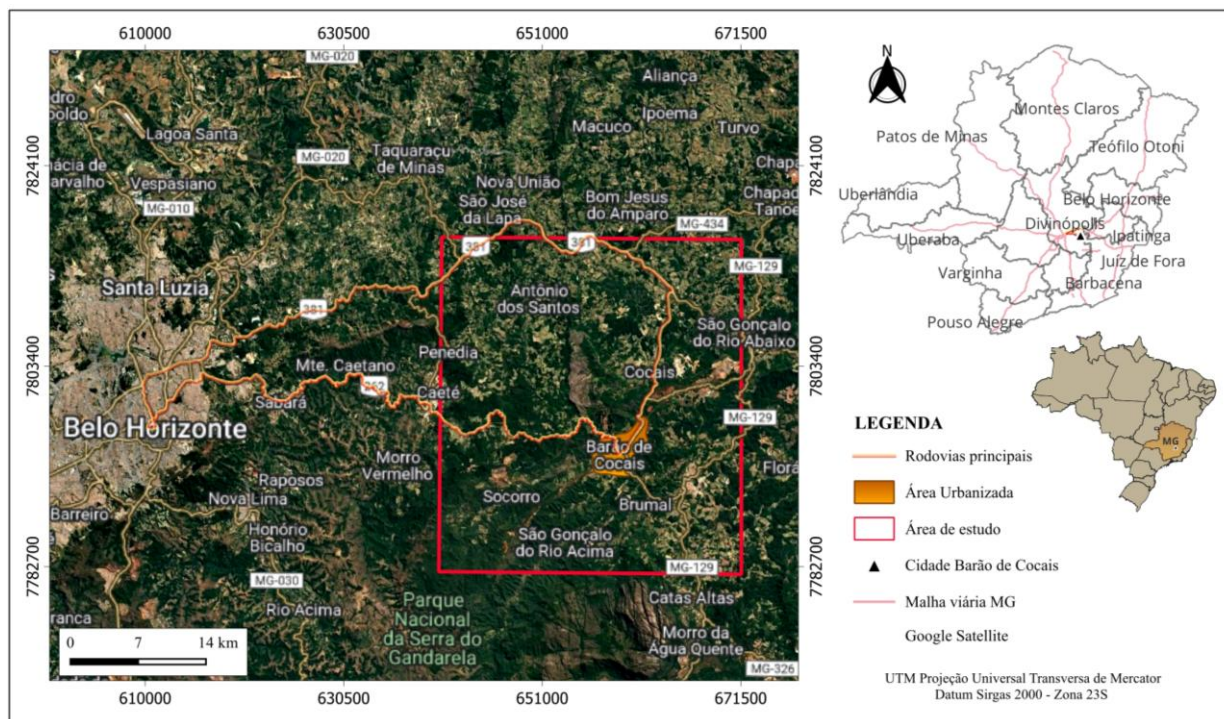
Visando complementar os dados de campo na caracterização de estruturas frágeis, cuja investigação ainda é incipiente no Quadrilátero Ferrífero, empregou-se um método automatizado de detecção de lineamentos. Essa técnica baseia-se na geração de imagens de relevo sombreado, controladas pela direção da iluminação, obtidas a partir de um Modelo Digital de Elevação (MDE). O MDE oferece uma base topográfica precisa para delimitar formas de relevo, proporções de declives e redes de drenagem, essenciais para o entendimento das estruturas tectônicas e processos geomorfológicos (Pohl & Van Genderen, 1998). O processamento automático utiliza algoritmos de detecção de bordas, em parâmetros pré definidos pelo operador, gerando como resultado um arquivo vetorial georreferenciado.

A partir disso, pretende-se compreender a influência das estruturas frágeis nos mecanismos do sistema mineral da província QFe, na região do domínio do Lineamento Caeté.

1.1.1 LOCALIZAÇÃO

A Serra das Cambotas está localizada no município de Barão de Cocais e nas imediações do município de Caeté, ambos situados na Região Metropolitana de Belo Horizonte, Minas Gerais. Partindo da capital, o trajeto se dá pela rodovia BR-381 com sentido a cidade de Barão de Cocais, até aproximadamente o quilômetro 386, onde se toma a rodovia MG-436, que conduz à entrada da cidade e às áreas de estudo (FIG. 1).

Figura 1 - Vias de acesso a cidade de Barão de Cocais/MG, onde está localizada a Serra das Cambotas.



Fonte: Produzido pelo autor (2025), com base em dados do IBGE (2022).

1.2 OBJETIVOS

O presente projeto tem por objetivo principal documentar as características estruturais (geometria e cinemática) do Lineamento Caeté que secciona o substrato do Quadrilátero Ferrífero (QFe).

Os objetivos específicos são:

- Definir a natureza e o comportamento estrutural do Lineamento Caeté;
- Descrever sua geometria e cinemática, com base em dados de campo e análise morfoestrutural;
- Identificar e interpretar o estilo estrutural da zona de dano associada ao lineamento;
- Analisar a expressão e a continuidade dos lineamentos de azimute 120° (Az 120°) nas coberturas do QFe.

1.3 JUSTIFICATIVA

O entendimento dos mecanismos de migração dos fluidos hidrotermais por meio de condutos tectônicos, seja por falhas e/ou fraturas crustais, que possibilitaram a formação de

depósitos de Fe e Au no Quadrilátero Ferrífero ainda não está bem esclarecido. Trabalhos recentes, como o de Dadalto (2022), confirma a relação entre as fraturas crustais preenchidas por diques máficos do QFe e o fluxo de fluidos mineralizantes, favorecido pela reativação dessas estruturas. Nesse contexto, as fraturas de geometria tabular e orientação vertical, preenchidas por corpos de diques máficos, constituem condutos propícios para a ascensão de fluidos hidrotermais ao longo da crosta.

Neste sentido, este projeto pretende contribuir para o entendimento do fluxo de fluidos hidrotermais por meio da caracterização das propriedades litoestruturais dos Lineamentos Az 120° que seccionam o substrato do QFe, a partir da caracterização estrutural do Lineamento Caeté.

1.4 MATERIAIS E MÉTODOS

1.4.1 Revisão Bibliográfica

A revisão bibliográfica que fundamenta este trabalho foi estruturada em três eixos principais: os aspectos conceituais de lineamentos; as metodologias de análise e extração de lineamentos; e os trabalhos regionais anteriores voltados à investigação de estruturas rúpteis no QFe. Para tanto foram consultados trabalhos sobre o Lineamento Az 125°, à ocorrência dos enxames de diques máficos no Cráton do São Francisco e no Quadrilátero Ferrífero, além de trabalhos de mapeamento realizados na região de estudo e trabalhos da metodologia de geoprocessamento empregadas na extração automática de lineamentos estruturais.

1.4.2 Trabalho de campo

O trabalho de campo foi realizado durante os dias 18 a 23 de março e 13 a 16 de abril de 2024, ao todo, foram 10 dias de atividades. Nesse período, foram coletados dados geológico-estruturais em afloramentos pertencentes aos Complexos Metamórficos Caeté e Cocalis, aos Supergrupos Minas, Estrada Real e Espinhaço, e à Suíte Máfica Pedro Lessa, na região das Serras das Cambotas e do Garimpo, no município de Barão de Cocalis (MG).

O levantamento de dados estruturais foi realizado ao longo de seções transversais em escala 1:10.000. Nas seções, buscou-se evidências que permitissem um melhor entendimento das estruturas que controlam as características do lineamento, considerando os eventos tectônicos através das estruturas de deformação: zonas de cisalhamento, foliações em diques e veios, falhas, fraturas, eixo de dobras. Realizando-se um levantamento sistemático de fraturas,

com registro da intensidade, persistência, direções principais e relações de corte, de modo a caracterizar as zonas de dano e a geometria estrutural associada ao Lineamento Caeté.

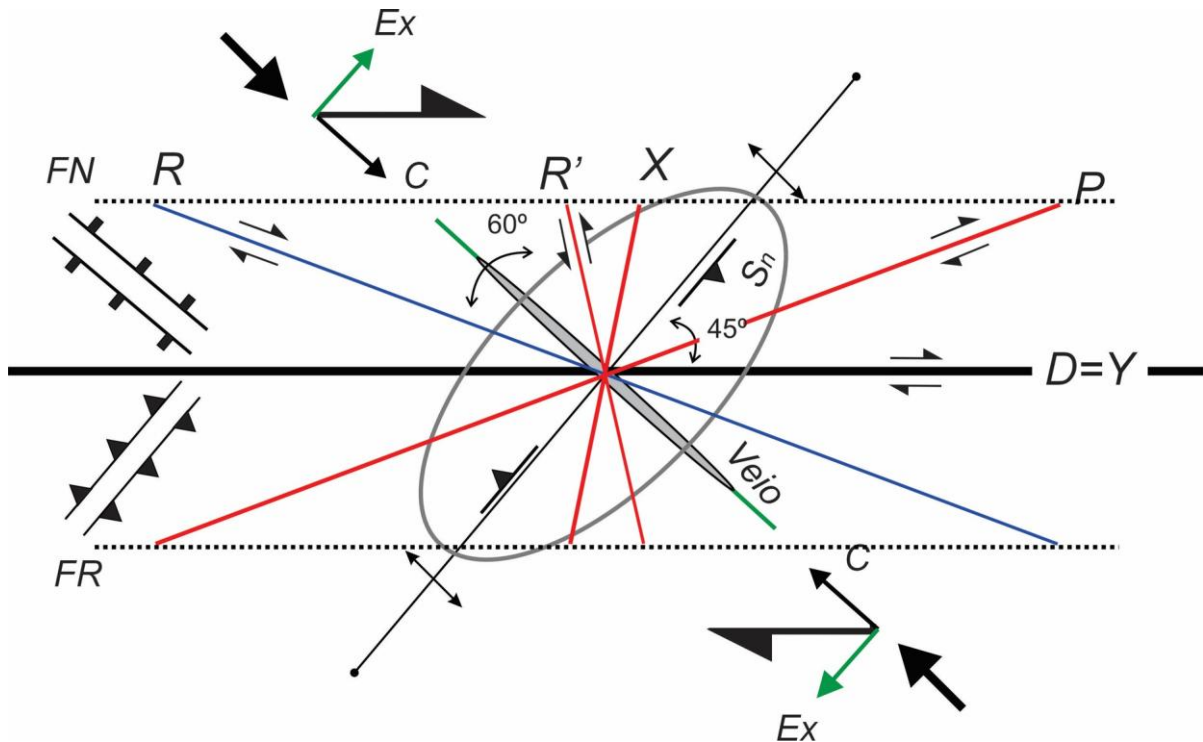
1.4.3 Análise estrutural

A análise estrutural se baseou na classificação e catalogação dos dados de campo, e nos resultados da extração automática de lineamentos. Os dados foram organizados em estereogramas e diagramas de rosetas para a análise estatística e geométrica das estruturas. Posteriormente, esses resultados foram sobrepostos ao mapa geológico estrutural da área de estudo permitindo comparar as estruturas internas e externas à zona de dano do Lineamento Az 120°. Aqui, da observação dos padrões característicos das estruturas, nós as interpretamos como feições do Modelo de Riedel.

As feições do Modelo de Riedel são fraturas de cisalhamento subsidiárias que se propagam a uma curta distância da falha principal, sendo contemporâneas ao movimento principal. A FIG. 2 ilustra a terminologia e a geometria dos sistemas de fraturas associados ao modelo de cisalhamento de Riedel desenvolvidos numa zona de falha de transcorrente dextral. O esquema representa a relação entre as estruturas rúpteis e dúcteis geradas durante a deformação progressiva, incluindo os sistemas R, R', P, X e C, a foliação e o elipsoide de deformação em relação à direção do cisalhamento principal ($D = Y$) e aos eixos de compressão (C) e extensão (Ex). No campo de tensões, a direção da maior tensão (σ_1) corta o ângulo entre R e R' além de formar um ângulo de aproximadamente 45° a linha de falha principal. As falhas normais (FN) e reversas (FR) se desenvolvem como respostas rúpteis ao campo de tensões, enquanto as FN se formam em domínios extensionais ou transtensionais, as FR estão relacionadas a domínios compressivos ou transpressivos.

No modelo, as fraturas R são falhas sintéticas, as primeiras a se desenvolver, com orientação em baixo ângulo (10-20°) e no sentido horário em regime dextral ou anti-horário, em regime sinistral. As R' são as falhas antitéticas, com deslocamento oposto ao movimento principal e orientação em alto ângulo (~75°) com a falha principal. As fraturas P, simétricas às R, formam-se em pequenos ângulos com a direção de cisalhamento principal, enquanto as estruturas Y, formadas tardiamente, são subparalelas à falha principal. As fraturas de cisalhamento X são tardias, antitéticas e desenvolvem-se em alto ângulos (~60° a 80°) em relação à direção Y.

Figura 2 - Modelo esquemático de um regime de cisalhamento, mostrando os sistemas de fraturas de Riedel (R, R', P e X), a foliação e o elipsoide de deformação e sua relação com a direção do cisalhamento principal ($D = Y$), os eixos de compressão (C) e extensão (Ex), falhas normais (FN) e reversas (FR).



Fonte: Autor (2025)

1.4.4 Extração automática de lineamentos estruturais

O procedimento de extração de lineamentos estruturais baseou-se no processamento digital de imagens de Modelos Digitais de Elevação (MDE), iniciando-se pela geração de relevo sombreado através de iluminação solar artificial. Como demonstrado por Javhar et al. (2019), o contraste produzido pelo sombreado com transições entre áreas claras e escuras, realça efetivamente descontinuidades geológicas.

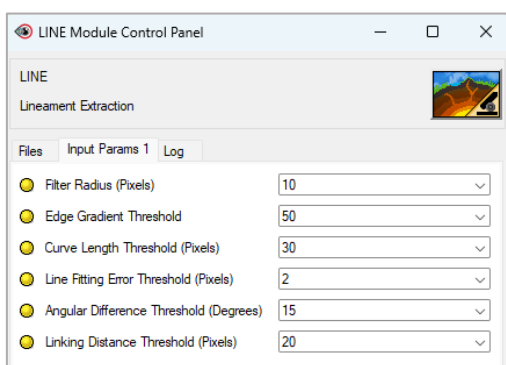
O modelo digital de elevação escolhido foi o do radar SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), com resolução espacial de 30 metros. Para a definição da área de interesse, utilizou-se os limites da folha topográfica 1:50.000 de Barão de Cocais/IBGE.

O processamento inicial foi realizado no software ArcGIS, utilizando a ferramenta “Hillshade”, ajustando-se os parâmetros de iluminação da seguinte forma: Ângulo de altitude da fonte de luz acima do horizonte: 45°; Azimute solar: variável, em abordagem multiazimutal, gerando oito modelos de relevo sombreado distintos.

As imagens obtidas foram então importadas para o software PCI Geomatica 2018, onde a ferramenta “Lineament Extraction” detectou automaticamente as feições lineares nas imagens, registrando-as como polilinhas vetoriais georreferenciadas.

Os parâmetros adotados (FIG. 3 e TAB. 1) foram ajustados conforme as recomendações de Goulart et al. (2022), buscando maximizar a precisão e reduzir a redundância na identificação das feições estruturais.

Figura 3 - Parâmetros adotados para a extração automática na janela de entrada do software PCI Geomatica 2018



Fonte: O autor (2025), a partir de PCI Geomatica (2018)

Tabela 1- Parâmetros adotados para a detecção de bordas no software PCI Geomatica 2018 (inglês/português).

Parâmetro	Valor adotado	Descrição/Função
Raio do filtro (Filter Radius)	10	Especifica o tamanho do raio do filtro de detecção de limites e determina o menor nível de detalhe a ser detectado na imagem de entrada
Limiar de gradiente de borda (Edge Gradient Threshold)	50	Controla a sensibilidade para detecção de bordas e produz uma imagem de saída binária
Limiar de comprimento de curva (Curve Length Threshold)	30	Define o comprimento mínimo de uma curva, para ser considerada um lineamento
Limiar de ajuste de linha (Line Fitting Error Threshold)	2	Controla o ajuste de segmentos de linha a segmentos detectados, sendo seu valor especificado em número de pixels
Limiar de diferença angular (Angular Difference Threshold)	15	Define o ângulo máximo entre os segmentos para que possam ser unidos como um único
Limiar de distância de ligação (Linking Distance Threshold)	20	Distância máxima entre dois segmentos para que sejam conectados como uma linha contínua

Fonte: O autor (2025), a partir de PCI Geomatica (2018)

Para determinar a orientação dos lineamentos extraídos, foi utilizada a ferramenta “Add Bearings to Linear Features” pertencente ao toolbox “Spatial Data Management (SDM)” que

permitiu calcular automaticamente os azimutes dos lineamentos extraídos, atribuindo a cada feição uma direção precisa. Estes dados de azimuth obtidos foram, então, exportados e processados no software OpenStereo para geração dos diagramas de roseta. A partir desses diagramas, foi possível realizar a análise estatística das frequências de orientação, identificando os principais padrões estruturais associadas aos regimes tectônicos regionais presentes na área de estudo.

A adoção de uma abordagem combinada, de métodos automatizados e interpretação manual, garante uma análise de lineamentos mais robusta, como também possibilita um refinamento das estruturas identificadas, como será mostrado neste estudo.

CAPÍTULO 2

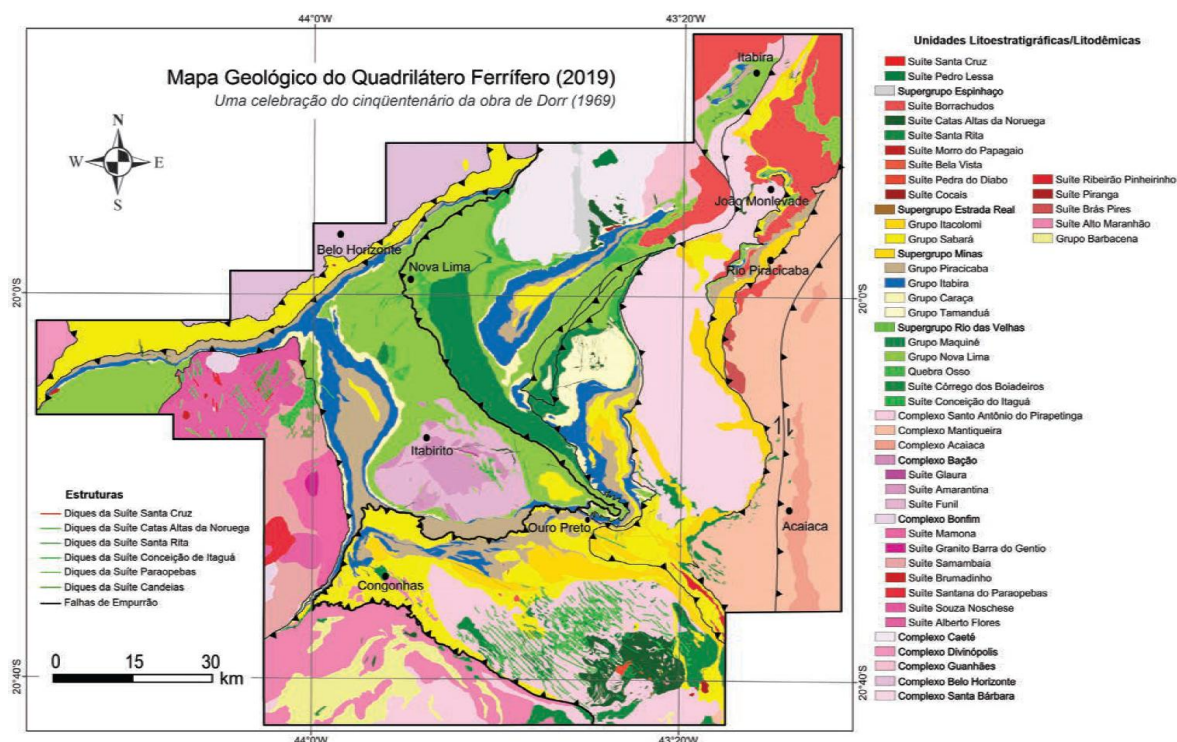
CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

2.1 CONTEXTO GEOTECTÔNICO

2.1.1 O Quadrilátero Ferrífero

O Quadrilátero Ferrífero (FIG. 4) constitui uma importante província mineral localizada no centro de Minas Gerais na porção meridional do Cráton do São Francisco (extensa região tectonicamente estabilizada ao final do Paleoproterozoico), e que é limitado pelas orogenias Brasilianas: a Faixa Araçuaí, a leste; a Faixa Brasília, a oeste; o Cinturão Mineiro, ao sul; a Faixa Rio Preto, a noroeste; e as faixas Riacho do Pontal e Sergipano, a nordeste (Almeida, 1977). O Quadrilátero Ferrífero é um terreno polideformado formado por uma diversidade de rochas datadas do pré-cambriano ao fanerozoico.

Figura 4 - Representação simplificada do mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero (2019), escala 1:150.000



Fonte: Endo *et al.* (2019)

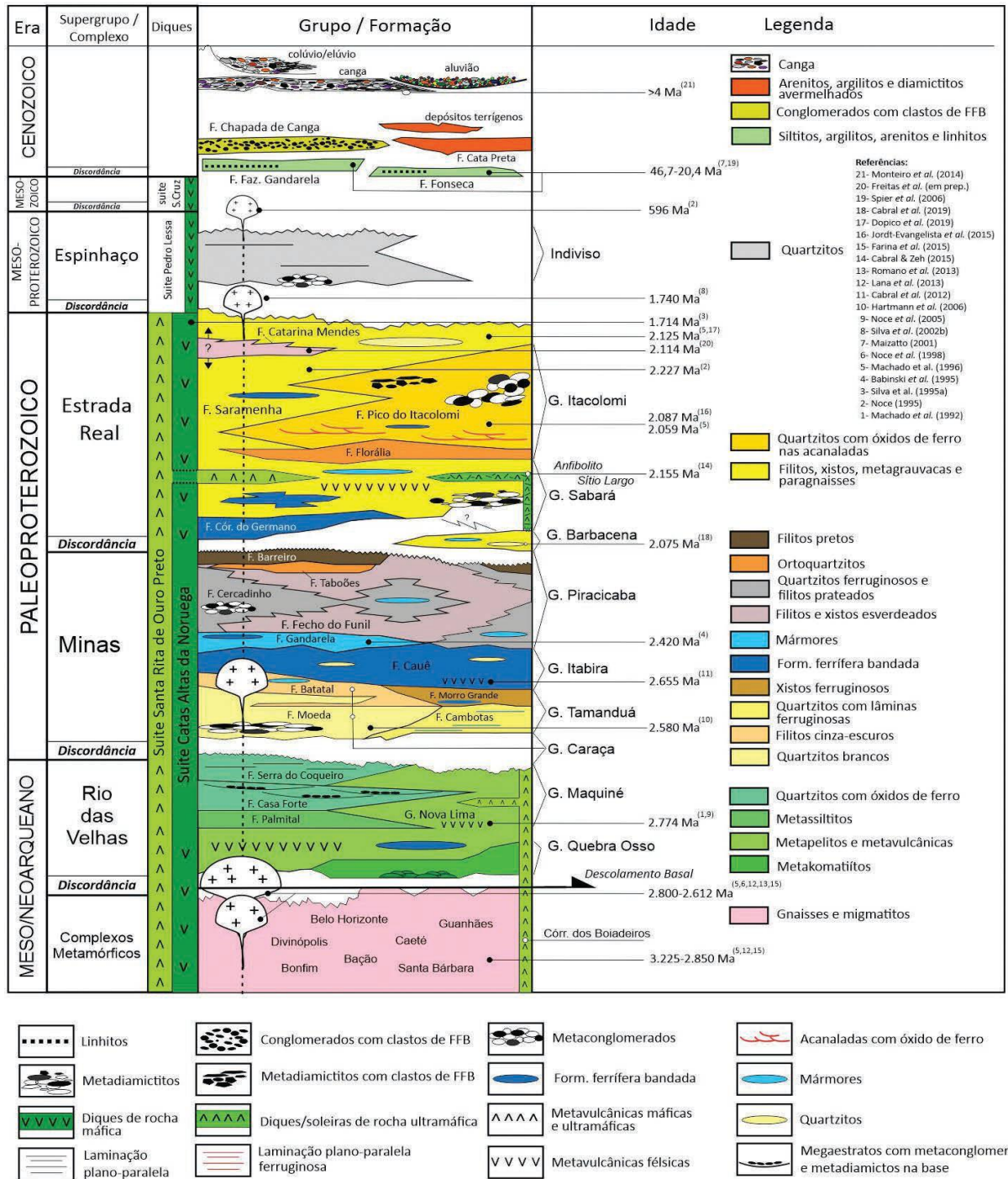
Essa heterogeneidade litológica e estrutural complexa é resultado de uma longa e multifásica evolução crustal em que sucessivos eventos tectônicos, metamórficos e magmáticos se superpuseram. A região é composta essencialmente por um embasamento pré-cambriano complexo, que engloba rochas graníticas e gnáissicas, intrusões máficas/ultramáficas, e espessas sequências metassedimentares (≥ 14.000 m) (Dorr, 1969).

2.2 ESTRATIGRAFIA DO QFe

O trabalho de Endo et al., (2020) atualizou a coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero (FIG. 5). A região é subdividida estratigraficamente nas seguintes unidades principais:

- i) Complexos Metamórficos, constituídos de gnaisses bandados ou não, migmatitos, granitoides, anfibolitos e corpos máficos/ultramáficos;
- ii) Supergrupo Rio das Velhas, constituído por rochas metassedimentares clásticas e químicas, metavulcanoclásticas e por rochas metavulcânicas félsicas, máficas e ultramáficas;
- iii) Supergrupo Minas, constituído por rochas metassedimentares clásticas e químicas;
- iv) Supergrupo Estrada Real, constituído por rochas metassedimentares clásticas e químicas e por rochas metavulcânicas félsicas, máficas e ultramáficas;
- v) Grupo Barbacena, constituído por rochas metassedimentares clásticas e químicas e por rochas metavulcânicas máficas e ultramáficas;
- vi) Supergrupo Espinhaço, constituído majoritariamente por metarenitos e metaconglomerados;
- vii) Unidades sedimentares, correspondentes às coberturas do Paleógeno ao Holoceno, constituídas por sedimentos terrígenos.

Figura 5 - Coluna Estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero



Fonte: Endo *et al.* (2020)

2.2.1 Complexos Metamórficos

Os complexos metamórficos que compõem o embasamento cristalino arqueano do Quadrilátero Ferrífero incluem os complexos Bonfim, Caeté, Belo Horizonte, Santa Bárbara e Bação. Esses complexos são predominantemente formados por uma associação de ortognaisses

e migmatitos, com idades entre 2,61 e 3,22 bilhões de anos, além de granitoides, anfibolitos e intrusões máficas a ultramáficas em menor proporção (Farina et al., 2015; Lana et al., 2013; Romano et al., 2013).

2.2.2 Supergrupo Rio das Velhas

O Supergrupo Rio das Velhas é definido como uma sequência estratigráfica do tipo *greenstone belt*. Inicialmente, esta unidade compreendia os grupos Nova Lima e Maquiné, separados por um contato que varia de gradacional a discordante (Dorr, 1969; Baltazar & Zucchetti, 2007). A inclusão do Grupo Quebra Osso na base da sequência foi posteriormente formalizada por Endo *et al.* (2020). Este supergrupo constitui o principal cinturão metavulcanossedimentar arqueano do Quadrilátero Ferrífero e contém os mais importantes depósitos de ouro da região (Lobato et al., 2001). Suas rochas, intensamente deformadas, exibem metamorfismo da fácies xisto-verde até anfibolito e incluem basaltos, komatiitos, lavas riolíticas e intercalações de rochas metassedimentares. O vulcanismo félsico, com idade aproximada de 2,77 Ga, é contemporâneo ao plutonismo granítico dos complexos metamórficos Caeté e Bonfim, ao passo que as intrusões máficas e ultramáficas ocorreram em torno de 2,67 Ga (Endo & Machado, 2002).

2.2.3 Supergrupo Minas

A sequência paleoproterozoica Supergrupo Minas é definida como uma associação de litotipos metassedimentar que sucede ao SG Rio das Velhas na estratigrafia por discordância e se diferencia por natureza de formação, constituindo uma sequência continental-marinha de aproximadamente 3.424m de (Dorr 1969; apud Endo *et al.* 2020). A sequência é de tamanha proporção que ocorre em grande parte do Quadrilátero Ferrífero, e é devido as suas características que a região foi denominada como tal. Da sua base ao topo é composta pelos grupos Tamanduá, Caraça, Itabira e Piracicaba. Uma nova subdivisão do SG Minas é proposta por Endo *et al.* 2019a, tornando os Grupos Sabará e Itacolomi unidades de um novo supergrupo, o Supergrupo Estrada Real.

2.2.4 Supergrupo Estrada Real

Endo *et al.* (2019a) propõe a redefinição do Grupo Sabará de Almeida et al., (2005) que pertencendo ao SG Minas (Renger *et al.*, 1994) agora passa a ser composto por três unidades: Formação Córrego do Germano (base) caracterizada por formação ferrífera bandada granular e

quartzitos ferruginosos; Formação Saramenha com as intercalações de metadiamictitos, metapelitos, metarritimitos, metarenitos, xistos e filitos negros com clastos esporádicos de granitoides e quartzitos ferruginosos (Almeida *et al.* 2005); e, Formação Catarina Mendes (topo) constituída essencialmente de biotita-quartzo xistos, quartzitos e filitos.

O Grupo Itacolomi é constituído pelos ortoquartzitos da Formação Florália, na sua base, e dos quartzitos “tipo Itacolomi” (Dorr, 1969), com estratificação cruzada acanalada, camadas de filito e metaconglomerados, traços de hematita que conferem a característica de um quartzito ferruginoso (Herz, 1978), da Formação Pico do Itacolomi.

2.2.5 Suítes Intrusivas Máficas e Ultramáficas

São mapeadas no Quadrilátero Ferrífero duas gerações de rochas intrusivas após o evento Minas. Um primeiro evento magmático que gera a Suíte Santa Rita de Ouro Preto, ultramáfica, com diques de direção NW-SE, e corpos batolíticos de variadas extensões. O segundo evento, de idade 1,714 Ma (Silva *et al.*, 1995), agora máfico, da Suíte Catas Altas da Noruega, que forma um enxame de diques, com direção preferencial NW-SE e raramente NE-SW na região meridional do QFe e E-W e N-S nos demais setores (Endo *et al.* 2019a,b), e um corpo batolítico. Dois eventos magmáticos distintos que cortam os litotipos supracrustais em diferentes partes do QFe.

2.2.6 Cobertura Cenozoica

Pacotes de sedimentos do cenozoico ocorrem no QFe assentados sob o embasamento e/ou supracrustais, sendo controlados tectonicamente pelas respectivas bacias sedimentares. São sedimentos de origem flúvio-lacustres, lateríticos-detriticos, alúvio-coluviais e elúvio-coluviais.

2.3 ARCABOUÇO ESTRUTURAL

2.3.1 Estruturas contínuas

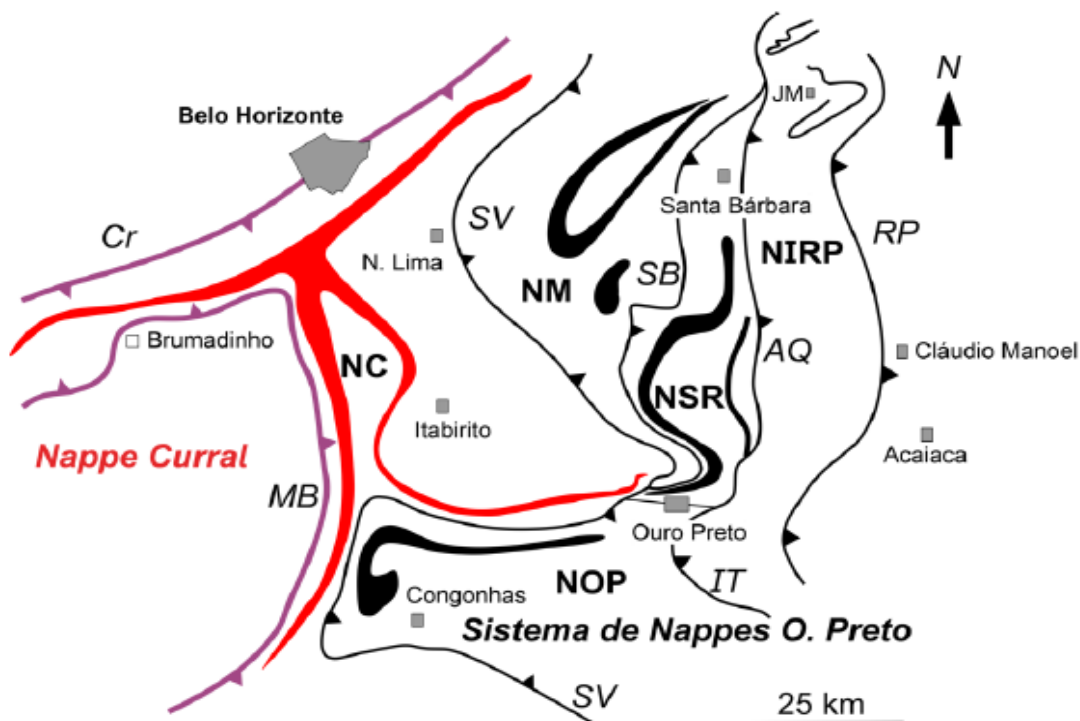
Os trabalhos de Almeida, (2004), Endo *et al.*, (2005, 2020) configuram o arcabouço estrutural do QFe em dois sistemas de nappes de tectônica epidérmica (*thin-skin*): A Nappe Curral, recumbente, alóctone e com vergência para N-NE e o Sistema de Nappes Ouro Preto com vergência para S-SW (FIG. 6).

A *nappe* Curral envolve as unidades do *greenstone* do Supergrupo Rio das Velhas e do Supergrupo Minas sobre a superfície de descolamento basal Moeda-Bonfim, seguida de uma tectônica do embasamento de antepaís (*thick-skin*) com o envolvimento dos complexos metamórficos Bonfim e Bação (Endo *et al.*, 2020).

O Sistema de Nappes Ouro Preto é constituído de quatro nappes: Nappe Maquiné, inferior; Nappe Santa Rita; Nappe Ouro Preto e Nappe Itabira-Rio Piracicaba, superior, delimitadas pelas falhas São Bento, Água Quente, Itacolomi, Rio Piracicaba e pela superfície de cavalgamento basal do sistema denominada Zona de Cisalhamento São Vicente. Ele envolve as unidades do *greenstone* do Supergrupo Rio das Velhas, supergrupos Minas e Estrada Real sobre a superfície de descolamento basal São Vicente, seguida de uma tectônica do embasamento de pós-país (*thick-skin*) com o envolvimento dos complexos metamórficos Santa Bárbara e Guanhões (Endo *et al.*, 2020).

Figura 6 - Sistema de nappes do QFe as principais falhas/zonas de cisalhamento

NC- Nappe Curral, NM- Nappe Maquiné, NSR- Nappe Santa Rita, NIRP- Nappe Itabira-Rio Piracicaba, NOP- Nappe Ouro Preto; SB- São Bento, AQ- Água Quente, RP- Rio Piracicaba, IT- Itacolomi, Cr- Curral; MB- Moeda Bonfim (descolamento basal da Nappe Curral), SV- São Vicente (descolamento basal do Sistema de Nappes Ouro Preto).



Fonte: Retirado de Dadalto (2022) adaptado de Endo *et al.* (2020).

2.3.2 Estruturas descontínuas

Santos (1986) identificou cinco sistemas principais de fraturamento no Quadrilátero Ferrífero (QFe): NNE-SSW, NE-SW, E-W, NW-SE e NNW-SSE. Além disso, o autor destacou que fraturas com orientação NW-SE já apresentavam indícios de atividade desde o Arqueano, durante fases tectônicas rúptil-dúcteis de caráter compressional. Essas fraturas estão associadas às foliações de alto grau metamórfico presentes na porção oeste do complexo migmatito-granulítico de Minas Gerais. Posteriormente, essas estruturas foram reativadas em um regime rúptil-distensional, atuando como controle estrutural para a direção da bacia Greenstone Belt do Rio das Velhas. Em seu estudo, Santos analisou a região do Quadrilátero Ferrífero e do Espinhaço Meridional por meio da fotointerpretação de imagens TM/LANDSAT, identificando padrões estruturais distintos. Segundo o autor, as estruturas tectônicas rúpteis, como fraturas (juntas e falhas) e as estruturas dúcteis-rúpteis (foliações e xistosidades) destacam-se nas imagens como alinhamentos lineares no relevo e na drenagem.

As juntas associam-se principalmente a feições lineares negativas na drenagem, frequentemente discordantes em relação ao eixo principal do plano de assimetria. Já as falhas manifestam-se como discontinuidades em zonas homólogas, marcadas pela repetição de padrões texturais e pela persistência de estruturas ao longo de alinhamentos topográficos e hidrográficos. O movimento dos blocos é reconhecível pelo deslocamento lateral dessas zonas, bem como pela ruptura e arrasto das feições lineares adjacentes. Quanto às foliações, estas se expressam como linhas positivas no relevo e negativas na drenagem, alinhadas ao plano de assimetria em regiões com orientação estrutural bem definida.

A pesquisa demonstrou a presença de zonas de cisalhamento transcorrentes com movimentação sinistral e orientação preferencial N35-45W, amplamente detectadas na região. Igualmente relevantes são as zonas de cisalhamento com movimento de empurrão/reverso, previamente documentadas em estudos anteriores, que ocorrem predominantemente nas unidades quartzíticas dos Supergrupos Espinhaço e Minas. Nessas unidades, observa-se o desenvolvimento de intensa foliação milonítica com orientação NS, típica dessas sequências, além de sua marcada presença nos contatos litoestratigráficos.

O estudo também identificou outras estruturas importantes, incluindo: dobras com eixos orientados NS, Falhas normais com direção EW, Zonas de cisalhamento transcorrentes

sinistrais nas direções N50-60W e N15-25W, Zonas de cisalhamento transcorrentes dextrais com orientações N30-40E e N55-65E.

CAPÍTULO 3

LINEAMENTO AZIMUTE 125°

3.1 CONCEITO DE LINEAMENTO

Para Gabrielsen & Olesen (2024), a análise de lineamentos continua sendo um conceito relevante em geologia estrutural, pois não é um conceito analítico obsoleto (*e.g.* Rocha, 2013; Gabrielsen & Braathen, 2014; Deng et al., 2021, Hamann et al., 2024; Jonathan et al., 2024). É essencial que essas análises sejam integradas a investigações geológicas de campo de última geração, ou seja, à "verdade fundamental" obtida em campo. Embora o termo “lineamento” tenha sido usado com menor frequência na literatura geológica por algum tempo, ele foi revitalizado com a popularização de dados de sensoriamento remoto por satélite a partir da década de 1970.

O termo “lineamento” foi introduzido por Hobbs em 1904 para descrever relações espaciais com morfologia linear que incluíam: 1) cristas de cumes ou limites de áreas elevadas; 2) linhas de drenagem; 3) linhas de costa; 4) limites de formações geológicas; e 5) tipos petrográficos de rochas ou linhas de afloramento e posteriormente ampliou a definição, incluindo ravinas e vales alinhados, destacando o aspecto tectônico e sismotectônico dos lineamentos (Hobbs et al., 1912).

Na literatura recente, o termo “lineamento” é utilizado principalmente para referir-se a estruturas geológicas de origem tectônica. Segundo O’Leary et al. (1976), a análise de lineamentos é amplamente aplicada na descrição e análise de estruturas resultantes de tectônica rúptil ou rúptil-ductil, como falhas e fraturas, por meio de dados de sensoriamento remoto em escalas variáveis, do regional ao local (*e.g.*, Hobbs, 1904; Al Khatieb & Norman, 1982). Nesse sentido, O’Leary et al. (1976) definem lineamento como “uma característica linear ou curvilínea, identificada por métodos de sensoriamento remoto, que provavelmente representa o traço de intersecção entre uma feição estrutural planar ou subplanar, como uma falha e a “superfície terrestre”. Em geral, entre os conjuntos de dados de lineamentos podem incluir sistemas de diques e veios, uma vez que estes frequentemente exibem estruturas lineares

detectáveis em dados ópticos, multiespectrais e de campo potencial (*e.g.*, Hall, 1986; Deng et al., 2021; Bouiflane et al., 2017; Demarco et al., 2020; Montsion et al., 2021).

Gabrielsen & Braathen (2014) expandiram a definição, introduzindo o termo “lineamento de fratura” para designar lineamentos que coincidem com zonas de alta densidade de fraturas, as quais provavelmente representam áreas de fraqueza tectônica induzidas por tensões no substrato rochoso, como corredores de fratura (Nur, 1982; Souque et al., 2019) e falhas. Enfatizam também que, uma vez caracterizada a verdadeira natureza de um lineamento, o termo deve refletir o nível de conhecimento da estrutura, sendo mais apropriado denominá-lo como “lineamento de fratura”, “corredor de fratura”, “falha” ou “dique (enxame)” ao invés de simplesmente “lineamento”.

Dentre os principais sistemas de descontinuidades regionais do Brasil, destaca-se o Lineamento Az 125°, cuja caracterização estrutural e geofísica é detalhada a seguir.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DO LINEAMENTO AZ 125°

O lineamento Azimute 125° é uma estrutura geológica de grande importância, reconhecida como a principal referência na localização de depósitos de kimberlitos (Bardet, 1977) e carbonatitos (Gonzaga & Tompkins, 1991) no Brasil, estendendo-se de Rondônia até a costa do Rio de Janeiro e aflorando pontualmente em Mato Grosso, Goiás e Minas Gerais (Bardet, 1977; Gonzaga & Tompkins, 1991; Rocha, 2013); sua formação abrange um intervalo tectônico de 950 a 80 milhões de anos, refletindo a complexidade evolutiva da região, sendo interpretado como um conjunto de falhas ao longo de uma antiga linha de fraqueza crustal que teria funcionado como conduto para magma alcalino e máfico-potássico do Permiano-Triássico ao Cretáceo tardio (Almeida, 2006). A convergência dessas evidências estruturais, geofísicas e metalogenéticas reforça a relevância do Az 125° como uma das principais zonas de fraqueza profundas do território brasileiro, justificando a necessidade de estudos integrados sobre sua evolução, reativações e controle no magmatismo e na formação de depósitos minerais associados.

3.2.1 Aspecto Geotectônico

O mega lineamento intercepta cinco terrenos tectônicos distintos no Brasil (FIG. 7): as províncias Amazônica, Paraná, Tocantins, Mantiqueira e São Francisco. Ele atua como limite

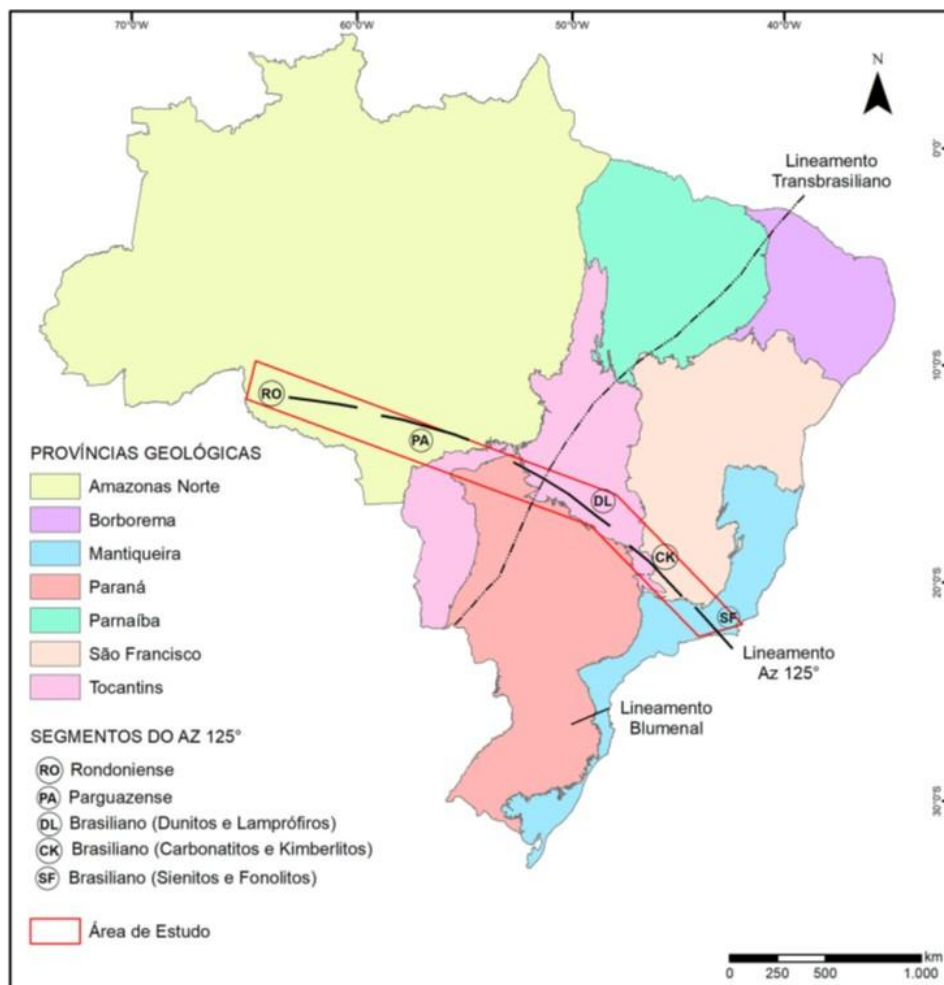
entre domínios tectônicos e, principalmente, como canal preferencial para o magmatismo, o que reforça seu papel estrutural.

Rocha (2013) interpretou três sistemas de lineamentos do Az 125 que haveriam tido uma formação simultânea e durante três eventos tectono-magmáticos distintos:

- (i) Evento Brasileiro: entre 950 Ma e 520 Ma – período caracterizado por intensa atividade tectônica e magmática, formação de falhas e intrusões magmáticas;
- (ii) Fragmentação do Supercontinente Gondwana: em cerca de 180 Ma – também relacionado a atividade tectônica, formação de novas estruturas geológicas;
- (iii) Pluma de Trindade: entre 90 e 80 Ma – a passagem da pluma de Trindade foi uma fonte para injeção de magma em determinadas partes do Az 125°.

Esses eventos sucessivos consolidam o Az 125° como uma das mais persistentes zonas de fraqueza da crosta brasileira, reativada em múltiplos estágios tectono-magmáticos desde o Neoproterozoico.

Figura 7- Segmentos do Lineamento Az 125° e as províncias geológicas do Brasil



Fonte: Retirado de Rocha (2013); modificado de (Gonzaga; Tompkins, 1991).

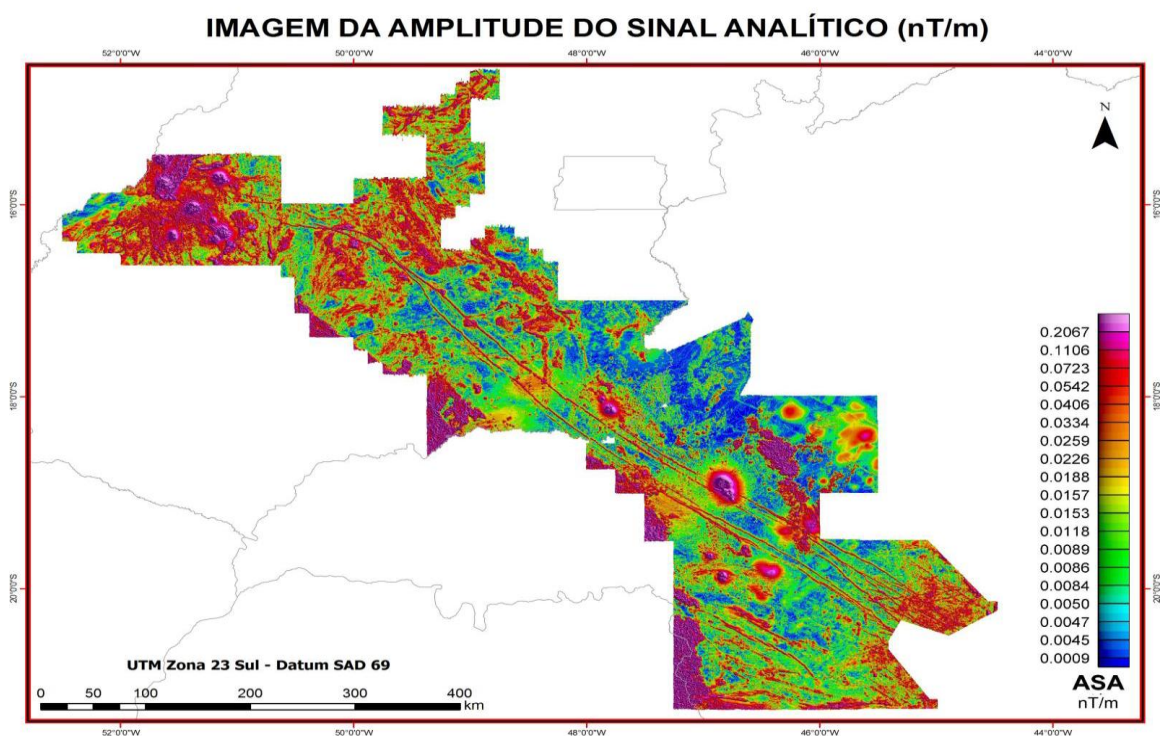
3.2.2 Aspecto Geofísico

A assinatura magnética do lineamento é caracterizada por um conjunto de feições lineares quase retilíneas na direção NW-SE, com continuidade regional em subsuperfície evidenciada no mapa de amplitude do sinal analítico da FIG. 8, que realça as bordas e geometrias das fontes magnéticas. Ao longo do lineamento, observam-se anomalias circulares e ovais, associadas a corpos intrusivos. Os estudos de Moraes et al. (2021) realizaram uma caracterização geofísica detalhada, identificaram mais de 3.000 anomalias magnetométricas circulares ao longo do lineamento, as quais estão possivelmente ligadas a corpos kimberlíticos. As estimativas de profundidade foram obtidas pela deconvolução de Euler, método que utiliza os gradientes espaciais do campo magnético para calcular, de forma direta, a posição e a profundidade das fontes magnéticas, indicando valores de cerca de 1 km a leste e 5 km a oeste do Lineamento Transbrasiliano. Também foi calculada a profundidade da superfície de Curie, limite térmico na crosta acima do qual os minerais perdem sua

magnetização natural, resultando em média de 42 km ao longo do Lineamento Azimute 125°, algo que estaria controlado pelo contexto geológico do final do Neoproterozoico. As profundidades Curie pouco profundas encontradas ao longo do Az 125° estão provavelmente relacionadas com as anomalias magnéticas circulares de alta suscetibilidade. Estas anomalias estão diretamente associadas aos corpos intrusivos alcalinos (tais como Catalão, Serra Negra e Salitre).

Essas evidências geofísicas reforçam o caráter profundo e multifásico do Lineamento Az 125°, sugerindo uma origem crustal complexa associada a plumas mantélicas e reativações tardias.

Figura 8 – Imagem da Amplitude do Sinal Analítico do CMA (ASA).



Fonte: Rocha 2013

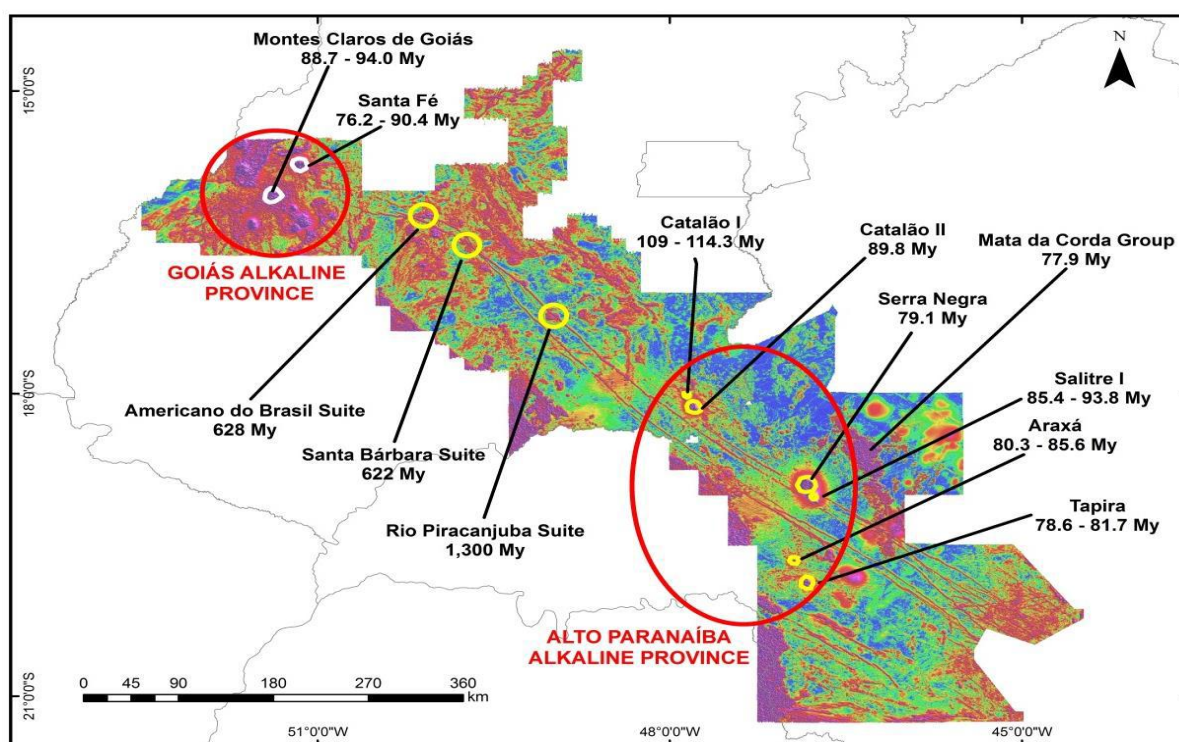
3.2.3 Aspecto Geologia Econômica

Na porção central do Az 125° estão localizadas a Província Ígnea do Alto Parnaíba e a Província Alcalina de Goiás (FIG. 9), duas das maiores províncias alcalinas do mundo (Junqueira-Brod *et al.*, 2002). O próprio lineamento foi definido pela primeira vez por Bardet (1977) por ser como uma zona diamantífera de direção ESE-WNW (N125°E) com extensão de 1800 km variando entre 200 a 300km em largura.

Os autores Gonzaga & Tompkins (1991) segmentaram o lineamento em cinco partes de acordo com seus depósitos: no Rio de Janeiro predominam os corpos sieníticos e de fonólitos; na região do Triângulo Mineiro, uma predominância de carbonatitos e kimberlitos; em Goiás, predominância de corpos ultrabásicos alcalinos e de lamprófios; no Mato Grosso, ocorrências de vários corpos de kimberlitos mineralizados; e Rondônia, com predominância de kimberlitos estéreis ou com baixo teor de diamantes.

A distribuição dos corpos alcalinos ao longo do Az 125° evidencia seu papel como zona preferencial de ascensão magmática e condicionante metalogenético de províncias ígneas e diamantíferas.

Figura 9– Localização dos principais depósitos alcalinos na forma de domo no lineamento Az 125°



Fonte: Rocha 2013

3.3 REATIVAÇÃO DE DESCONTINUIDADES CRUSTAIS

A concentração e orientação do campo de tensões na cobertura, fundamentais para o processo de fraturamento, estão diretamente relacionadas à distribuição das principais estruturas do embasamento. Na cobertura situada diretamente acima dessas descontinuidades, o sistema de tensão pode favorecer a reativação de estruturas pré-existentes, como falhas, fraturas ou planos de estratificação inclinados, que estejam alinhados aos novos eixos principais

de tensão. Essa reativação pode levar à concentração de tensão em áreas de perturbação das falhas, como nas suas extremidades, irregularidades de mergulho ou direção (*dip/strike*), degraus ou interseções entre falhas, que atuam como núcleos para a nucleação e propagação de corredores de fratura (Souque *et al.*, 2019).

CAPÍTULO 4

LINEAMENTO AZIMUTE 125° NO QFe

4.1 INTRODUÇÃO

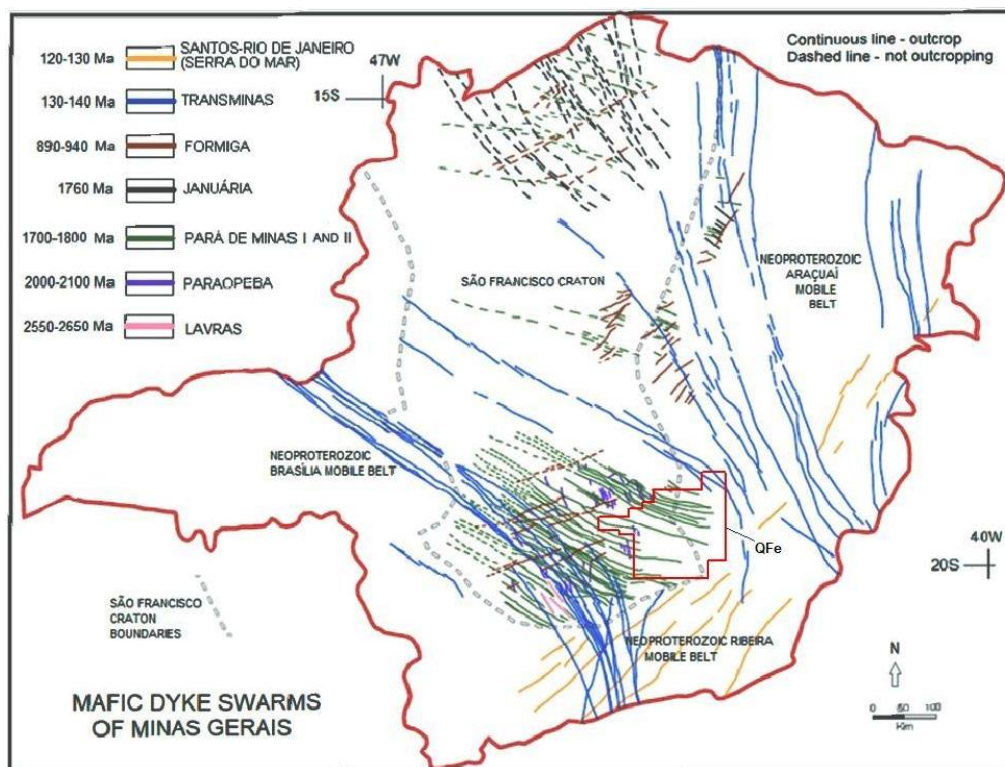
Os enxames de diques máficos pré-cambrianos são marcantes no sul do Cráton do São Francisco (SFC), onde atravessam tanto os complexos do embasamento quanto as sequências supracrustais, incluindo o chamado sistema de riftes do Espinhaço. Esses diques registram eventos geológicos significativos relacionados a regimes de extensão e transpressão crustal, que moldaram o cráton desde o Neoarqueano ao Toniano, sendo informações valiosas sobre o momento da ruptura da litosfera ao longo do tempo geológico (Chaves, 2011; Girardi et al., 2017; Caxito et al., 2020).

Por meio de estudos aeromagnetométricos, Chaves (2013) identificou sete enxames de diques máficos em Minas Gerais. Dentre eles, dois: Paraopeba (2,10 Ga, Riachão) e Pará de Minas (1,71 Ga, Estateriano) interceptam a província do Quadrilátero Ferrífero (FIG. 10).

Endo et al. (2024a, 2024b) descrevem extensos diques com orientação geral NW-SE como importantes descontinuidades litosféricas do complexo arcabouço estrutural da província mineral localizada na borda meridional do Cráton do São Francisco e regiões adjacentes.

O Lineamento Az 125° em Minas Gerais é conhecido como o Enxame de Diques Pará de Minas (EDPM) e possui orientação N120E (Az 120°).

Figura 10 – Enxames de diques máficos do estado de Minas Gerais e no Quadrilátero Ferrífero



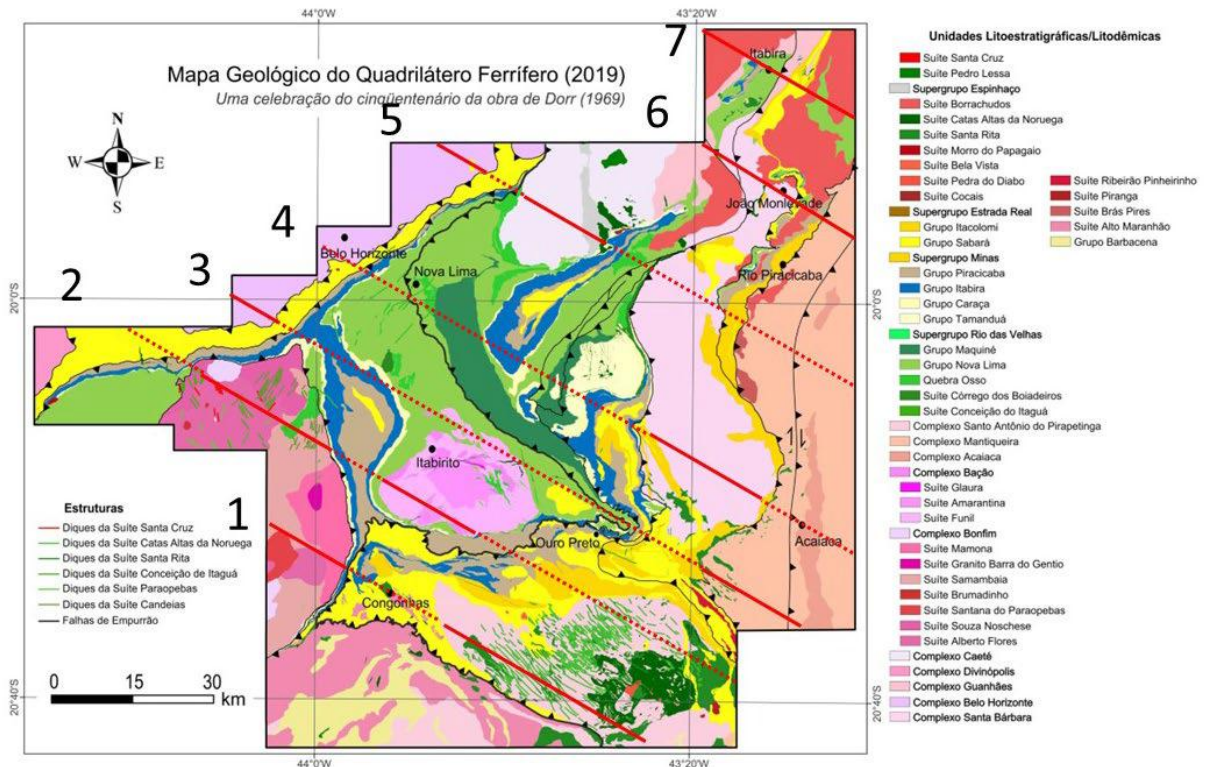
Fonte: modificado de Chaves et al. (2021)

4.2 LINEAMENTO AZIMUTE 120°

Após a Orogenia Minas, o magmatismo máfico do período Estateriano (ca. 1,7 Ga) originou o Enxame de Diques Máficos Pará de Minas (EDPM), vinculado a um regime extensional pós-orogênico que precedeu o rifteamento Espinhaço. Episódios magmáticos subsidiários, datados em torno de 0,9 Ga, marcam a Tafrogênese Toniana. No Quadrilátero Ferrífero, esse enxame inclui os diques máficos da Suíte Catas Altas da Noruega, os diques ultramáficos da Suíte Santa Rita de Ouro Preto e os diques máficos da Suíte Pedro Lessa, todos correlativos ao EDPM.

Dessa forma, os principais diques máficos EDPM integram o Sistema de Lineamentos Azimute 120°. Este sistema compreende sete lineamentos principais: Congonhas, Brumadinho, Mariana, Fundão, Caeté, João Monlevade e Itabira (FIG. 11). Esses lineamentos representam zonas de fraqueza crustal de alta conectividade, fundamentais para o entendimento da reativação tectônica e da migração de fluidos mineralizantes no QFe (Endo et al., 2024a, 2024b; Queiroz et al., 2024).

Figura 11 - Mapa Geológico do Quadrilátero Ferrífero (Endo *et al.* 2019) com indicação dos Lineamentos Az 120°: [1]- Congonhas; [2]- Brumadinho; [3]- Mariana; [4]- Fundão; [5]- Caeté; [6]-João Monlevade e [7]-Itabira.



Fonte: Queiroz *et al.* (2024)

4.2.1 Enxame de Diques Pará de Minas

O Enxame de Diques Máficos Pará de Minas pode ser interpretado como o primeiro episódio regional de magmatismo máfico associado a um regime extensional pós-orogênico, responsável pela tentativa de ruptura da litosfera Paleoproterozoica estabilizada após a Orogenia Minas. Esse evento marca o início do desenvolvimento do sistema de riftes do Espinhaço, configurando-se como um importante estágio de distensão intraplaca (Girardi *et al.*, 2017).

Cederberg *et al.* (2016) identificaram pelo menos três gerações distintas de diques máficos no enxame Pará de Minas, datadas em: 1795 Ma (1798 ± 4 , 1791 ± 7 e 1793 ± 18 Ma), 1710 Ma (1702 ± 13 e 1717 ± 11 Ma) e 766 ± 36 Ma. As duas primeiras gerações paleoproterozoicas estão relacionadas à tectônica intraplaca que originou a Bacia Espinhaço, enquanto o evento Toniano (~766 Ma) reflete uma nova reabertura litosférica durante a Tafrogênese pré-Brasiliana. Esses pulsos sucessivos evidenciam a persistência e a reativação periódica de zonas de fraqueza crustal herdadas da Orogenia Minas.

O EDPM constitui um enxame de proporções gigantescas, com tendência NW-SE, que atinge até 100 m de largura e aproximadamente 1400 km de comprimento contínuo. São diques paralelos que estão ao longo do sul do Cráton do São Francisco até o orógeno Brasília. Através de lineamentos magnéticos, ele é rastreável desde o estado de Minas Gerais até o sul do estado de Goiás, ele se estende sob o cinturão de dobras e empurrões do orógeno Neoproterozoico de Brasília.

Petrograficamente, os diques são constituídos por diabásios a gabros de afinidade toleítica, sendo a maioria maciços ou ocasionalmente porfíricos. São compostos principalmente por labradorita-andesina e augita, com pequenas quantidades de ilmenita, K-feldspato intersticial, quartzo, apatita, zircão ou baddeleyita. A textura predominante é subofítica, mas alguns diques são porfíricos, caracterizados por fenocristais de plagioclásio paralelos às suas paredes (Girardi *et al.*, 2017). A textura subofítica se mantém na porção mais interna do cráton enquanto que perto de sua borda, eles aparecem como xisto verde oriundo da sobrecarga e metamorfismo associado à Orogenia Brasileira (Chaves, 2001).

4.2.2 Caracterização dos Lineamentos Az 120° no QFe

A expressão magnetométrica desses lineamentos é nitidamente reconhecida nos complexos metamórficos (Belo Horizonte, Bonfim, Santa Bárbara e Mantiqueira), enquanto se apresenta de forma mais difusa nas sequências supracrustais do QFe. Todos os diques do sistema exibem foliação de cisalhamento, desenvolvida pela tectônica Brasileira de encurtamento EW, posteriormente sobreposto pela NS.

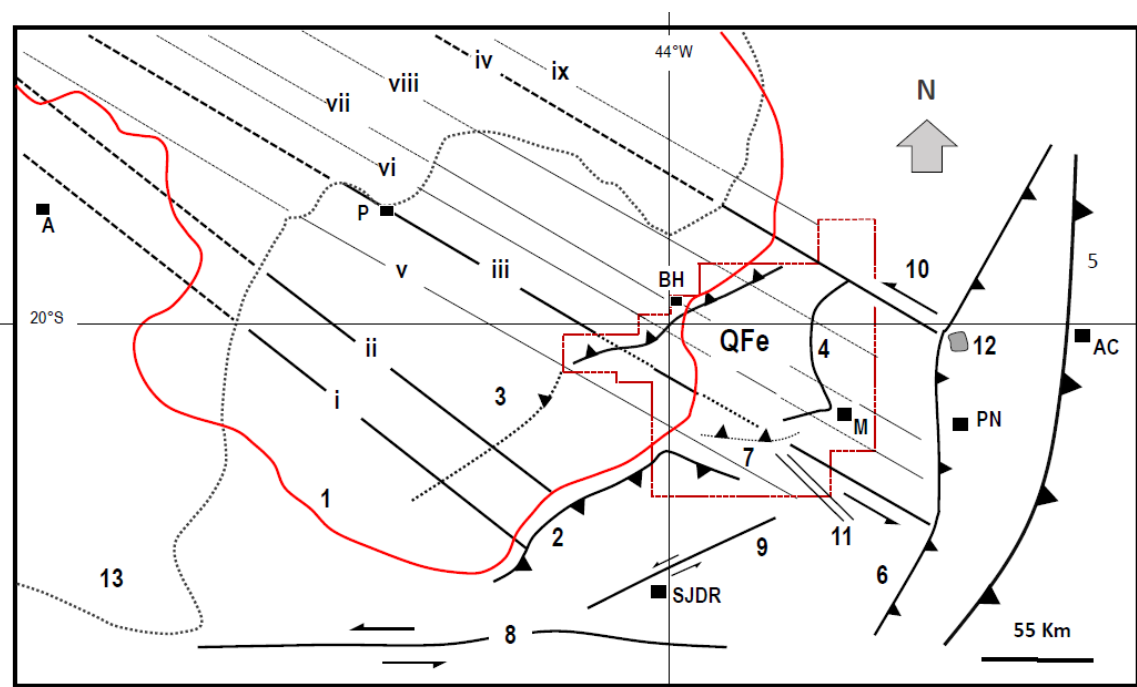
A reativação Brasileira provocou a rotação das camadas, fraturamentos, cisalhamentos, falhamentos e dobramentos. A influência dessa reativação na orientação das camadas é evidente, com rotação para a direção 120°, perceptível ao longo dos Lineamentos Az 120°. Um exemplo claro ocorre no Lineamento Brumadinho, que, ao interceptar as serras do Curral e da Moeda desloca as unidades Minas ali representadas. Outro fator da reativação é a transformação das descontinuidades crustais em condutos para migração de fluidos hidrotermais durante o episódio pulsante (*e.g.* Dadalto, 2022).

A FIG. 12 discrimina as estruturas de primeira ordem que integram o complexo conjunto da arquitetura da litosfera do QFe, com detalhe para os lineamentos Az 120: Brumadinho (iii), João Monlevade (iv), Congonhas (v), Mariana (vi), Fundão (vii), Caeté (viii), Itabira (ix). 1) Limite do Cráton do São Francisco meridional; 2) Sutura Paleoproterozoica; 3) Falha de

Infracavalcamento Serra do Curral; 4) Falha de Água Quente; 5) Sutura Brasileira de Abre Campo; 6) Limite da Nappe Mantiqueira balizada no contato oeste do Grupo Dom Silvério; 7) Falha de Infracavalcamento Dom Bosco; 8) Zona de Cisalhamento Campo do Meio; 9) Zona de Cisalhamento Lenheiro; 10) Componente de cisalhamento direcional sinistral; 11) Enxame de diques máficos e ultramáficos; 12) Charnquito Pedra Dourada; 13) Limite da cobertura cratônica; Lineamentos Azimute 130°: Araxá (i) e Patrocínio (ii); Localidades: A- Araxá, P- Pitangui, BH- Belo Horizonte, M- Mariana, PN- Ponte Nova, AC- Abre Campo e SJDR- São João Del Rei.

Essas estruturas compõem um sistema de descontinuidades crustais interconectadas que delimitam o arcabouço estrutural do QFe, controlam a segmentação litosférica e condicionam a arquitetura dos sistemas mineralizantes relacionados à Orogenia Brasileira.

Figura 12- Esboço das principais descontinuidades litosféricas do Cráton do São Francisco meridional, Quadrilátero Ferrífero (QFe) e regiões adjacentes.



Fonte: Retirado de Endo *et al.* (2024b)

4.3 MINERALIZAÇÕES DE Fe e Au ASSOCIADAS

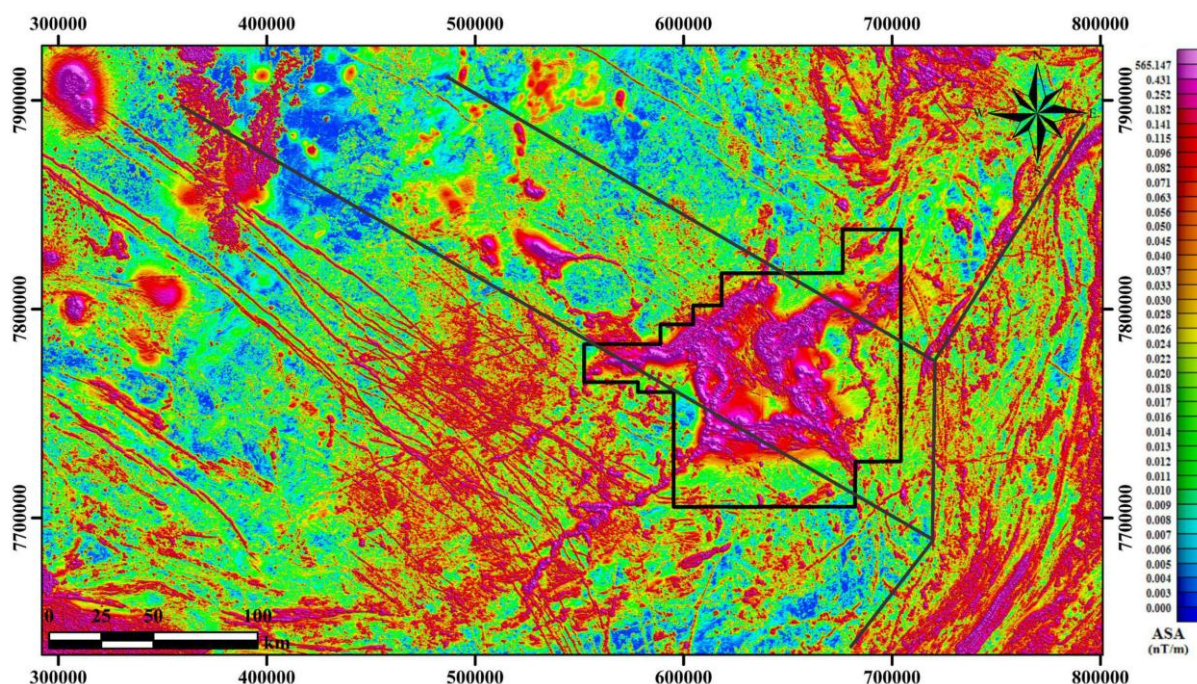
A distribuição, composição e múltiplos episódios de intrusão do EDPM revelam seu papel como uma das principais anisotropias crustais do setor meridional do Cráton São Francisco. Essas descontinuidades foram posteriormente reutilizadas e reativadas sob regime transpressivo durante a Orogenia Brasileira, dando origem ao Sistema de Lineamentos de

Azimute 120°, que condiciona a arquitetura estrutural e a migração de fluidos mineralizantes no Quadrilátero Ferrífero.

Os estudos indicam que os Lineamentos Azimute 120° desempenharam um papel crucial na formação do sistema mineral da província metalogenética. Funcionando como planos de fluxo de uma megakink sinistral, com os limites SW e NE definidos pelos lineamentos Brumadinho e João Monlevade, respectivamente (FIG. 13), essa megakink se conecta à *nappe* Mantiqueira, uma megaestrutura Brasileira formada na lapa da sutura de Abre Campo (Endo *et al.*, 2024a, 2024b; Queiroz *et al.*, 2024).

Ademais, as características do lineamento configuram uma rede de anisotropias como falhas, fraturas, zonas de cisalhamento, que atuam como estruturas de permeabilidade para o movimento dos fluidos mineralizadores. A conexão deste sistema com os eventos tectônicos da fase Brasiliana impulsiona a formação e a distribuição de depósitos de ferro e ouro na região.

Figura 13- Mapa Magnetométrico Amplitude do Sinal Analítico (Oliveira *et al.* em preparação) mostrando as principais discontinuidades crustais e a megakink de cinemática sinistral delimitada pelos Lineamentos Az 120 Brumadinho a SW e João Monlevade a NE



Fonte: Retirado de Queiroz *et al.* (2024)

CAPÍTULO 5

O LINEAMENTO CAETÉ NA SERRA DAS CAMBOTAS

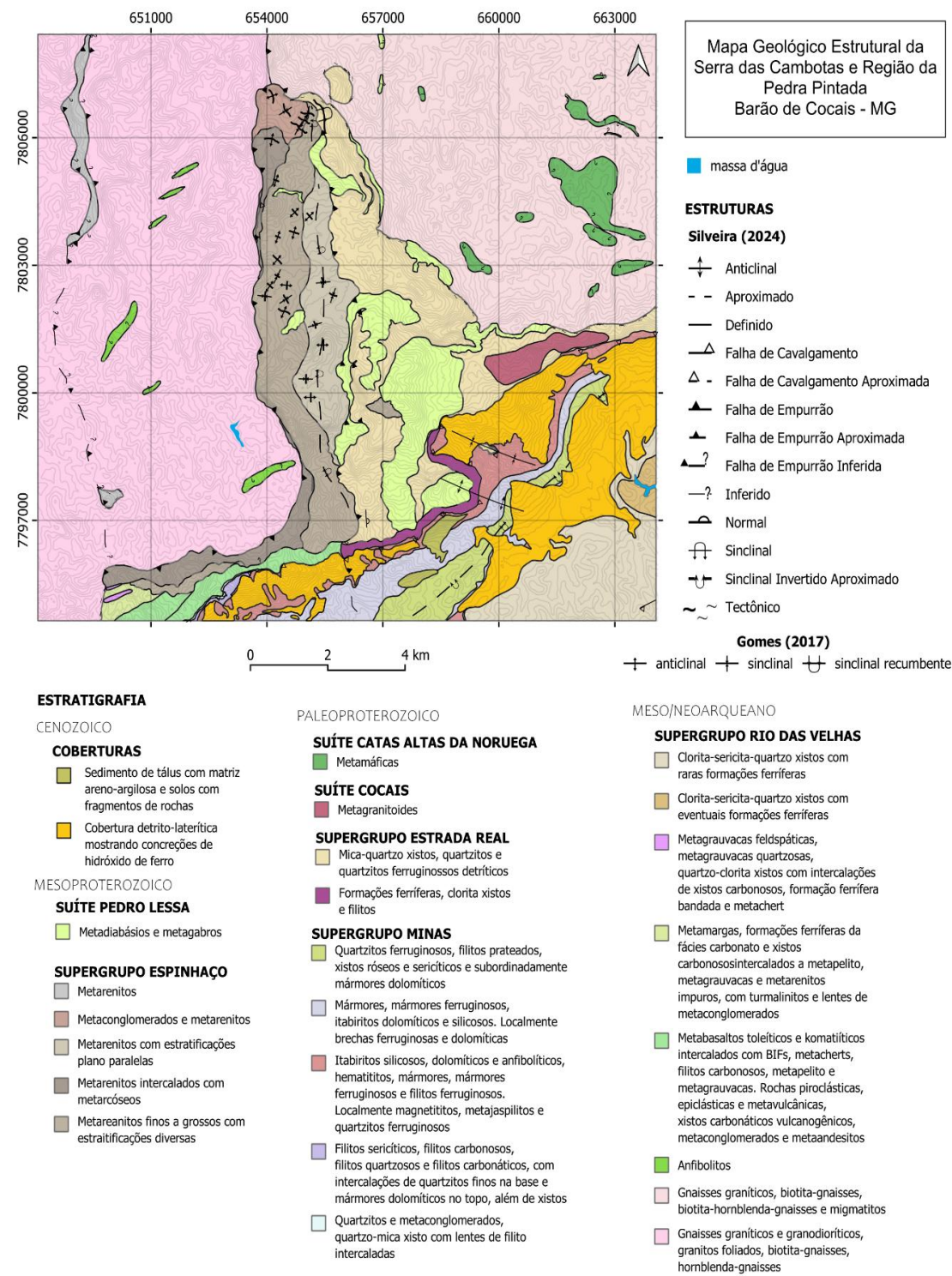
5.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, apresenta-se a geologia da área de estudo a partir dos produtos de mapeamento que culminaram neste trabalho e no novo mapa geológico de Silveira et al. (2024). Também adotamos elementos estruturais do mapeamento de Gomes (2017). São apresentados o acervo de estruturas que atestam a expressão do Lineamento Caeté - Az 120 na Serra das Cambotas e região da Pedra Pintada com uma discussão integrada a análise dos lineamentos cartográficos. O Lineamento Caeté representa a expressão local da reativação do EDPM sob o regime Brasileiro, controlando estruturas na Serra das Cambotas.

A Serra das Cambotas, um espigão de orientação N-S, encontra-se “encaixada” entre os complexos migmatíticos de Caeté e Cocaís, posicionada sob a estrutura regional do Sinclinal Gandarela (FIG. 14). A área apresenta três domínios litológicos e estruturais principais: (i) rochas paleoproterozoicas do Supergrupo Estrada Real (Quadrilátero Ferrífero); (ii) unidades mesoproterozoicas do Supergrupo Espinhaço; e (iii) intrusões máficas e metaígneas da Suíte Pedro Lessa. O Supergrupo Espinhaço, na Serra das Cambotas, é composto por metarenitos finos com estratificações planares, cruzadas tabulares e tangenciais intercaladas por camadas metapelíticas. Essas rochas encontram-se dobradas formando o Sinclinal Cambotas, que apresenta o flanco leste invertido e eixo com caimento sub-horizontal de direção N-S (Silveira *et al.* 2024 e (Medeiros da Silveira, 2026). No setor leste, o Supergrupo Estrada Real é formado por quartzo-clorita-xistos com camadas de formação ferrífera e quartzitos tabulares, brancos com formações ferríferas localizadas. Além disso, rochas básicas máficas, como metadiabásios e metagabros da Suíte Pedro Lessa, foram mapeadas ao longo de toda a área de estudo. As rochas da Suíte Pedro Lessa afloram como corpos intrusivos, enquanto as camadas quartzíticas, de modo geral, mergulham para leste, com as seguintes medianas estruturais (FIG. 15): no Domínio Estrada Real (ou QFe), acamamento (S0) 140/35, xistosidade (Sn) 97/32, lineação mineral (Lm) 102/32, lineação de interseção (Li) 107/20; no Domínio Espinhaço, acamamento

(S0) 120/30, xistosidade (Sn) 95/40, lineação mineral (Lm) 95/26, lineação de interseção (Li) 175/20.

Figura 14 - Mapa Geológico Estrutural da Serra das Cambotas e Região da Pedra Pintada. Barão de Cocais - Minas Gerais



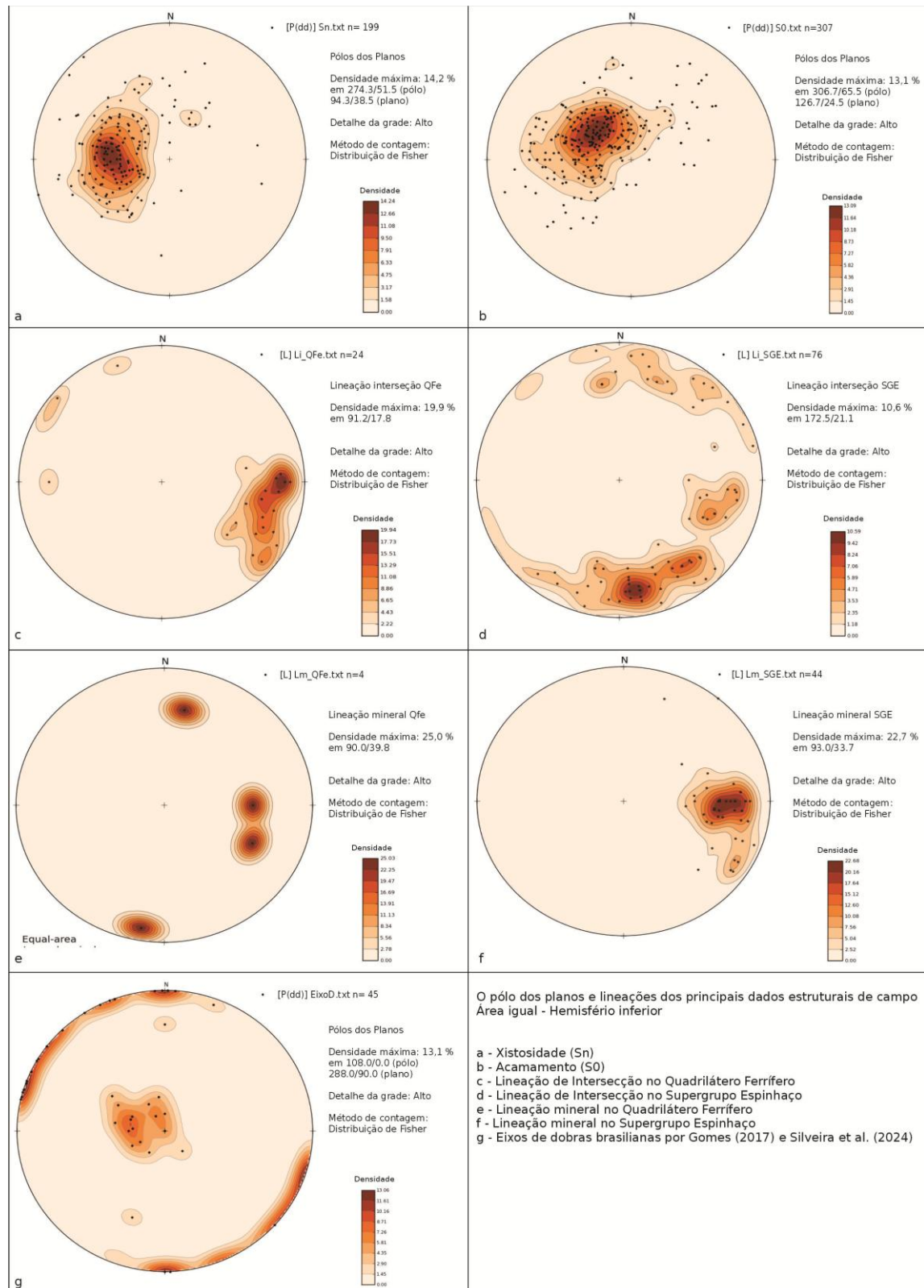
Fonte: (Silveira *et al.*, 2024, Medeiros da Silveira, 2026)

A falha de empurrão Fazenda do Garimpo com topo dirigido para W marca o contato entre o domínio Espinhaço com o QFe. A inversão estratigráfica e estrutural observada no flanco leste do Sinclinal Cambotas é resultado da sobreposição das unidades do Supergrupo Estrada Real por meio dessa falha. Ambas as estruturas, o Sinclinal Cambotas e a Falha Fazenda do Garimpo, estariam relacionadas ao evento Brasileiro em sua fase de encurtamento E-W responsável pela nucleação de empurrões e zonas de cisalhamento oblíquas que reativaram descontinuidades preexistentes do EDPM.

As estereonetes (FIG. 15) evidenciam que as lineações e eixos de dobra possuem caimentos preferenciais para SE, compatíveis com o transporte tectônico dirigido para W durante o encurtamento E-W da fase Brasileira. A coincidência entre os polos das S_n e L_m indica um regime transpressivo, no qual os planos de cisalhamento e as lineações se alinham segundo o azimute 120° , compatível com o campo de deformação regional do Sistema Az 120° proposto.

Gomes (2017) cartografou a presença de dobras em todo o domínio Espinhaço da área de estudo, o caimento das dobras é orientado para ESE-WNW (FIG. 15). Seu trabalho concluiu que a deformação posterior à sedimentação foi acomodada principalmente na forma de dobras, com possível reativação de antigas falhas.

Figura 15 – O polo do plano dos principais dados estruturais de campo levantados por Silveira *et al.* (2024). a) xistosidade - Sn; b) acamamento - S0; lineação de intersecção, c) Li - QFe e d) Li - Espinhaço; lineação mineral, e) Lm – QFe, f) Lm – Espinhaço e g) eixo de dobras brasileiras, por Gomes (2017) e Silveira *et al.* (2024)



Fonte: produzido pelo autor

5.2 ANÁLISE DE LINEAMENTOS

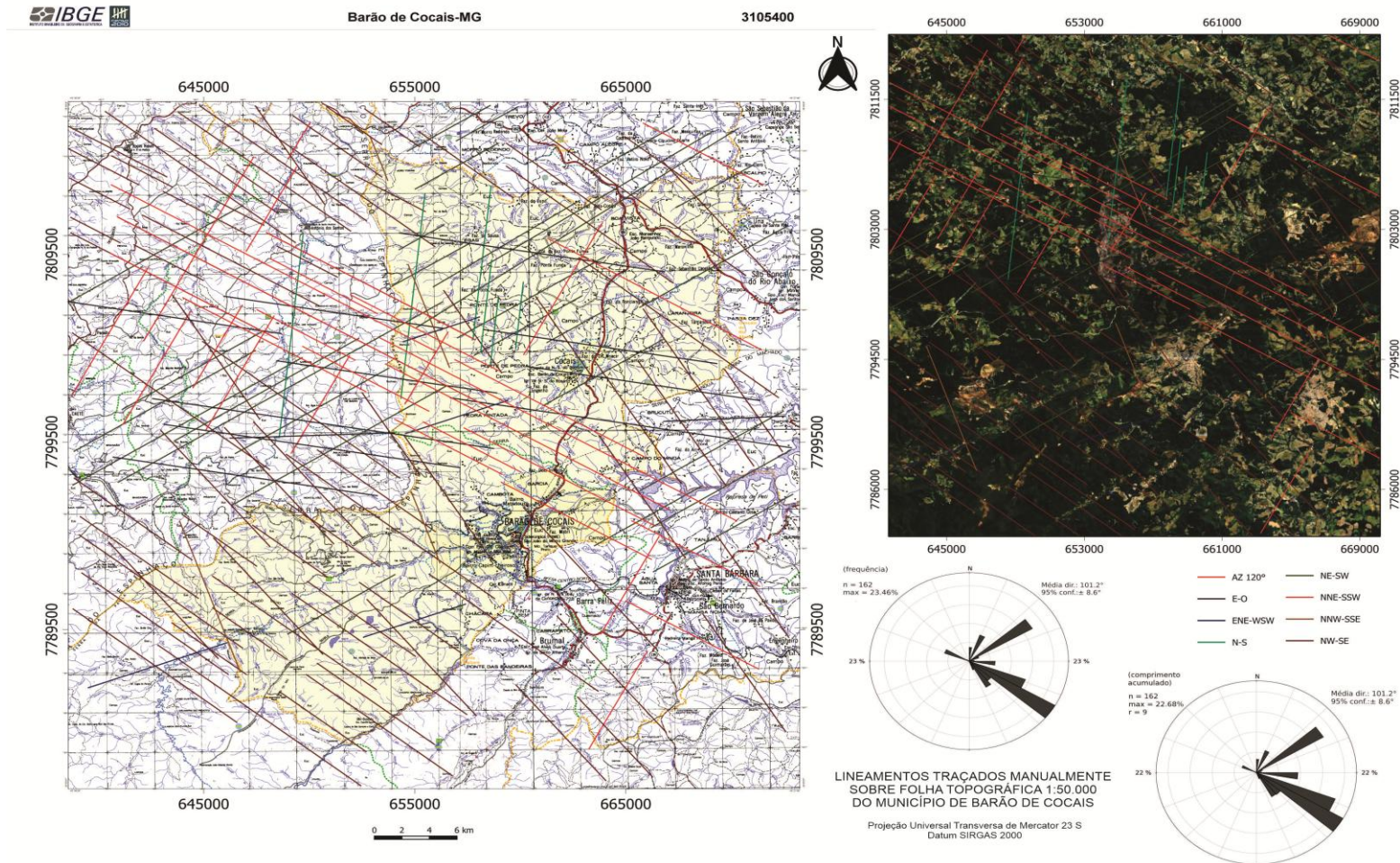
5.2.1 Extração manual

Neste trabalho, utilizaremos o termo lineamento morfoestrutural no sentido definido por O’Leary *et al.* (1976), Peters & Shea (1988) e Gabrielsen & Braathen (2014), para designar uma feição linear, ou um conjunto de feições lineares alinhadas, identificadas em imagens de satélite, fotografias aéreas e/ou mapas topográficos. Essas feições representam o traço de interseção entre estruturas geológicas planares ou subplanares, como falhas, fraturas ou diques, e a superfície terrestre. O arranjo linear inclui os seguintes elementos morfoestruturais retilíneos: segmentos de drenagens (relevo negativo), cristas (relevo positivo) e/ou quebras no relevo.

Para validação dos lineamentos extraídos automaticamente, um mapa de referência é elaborado a partir da extração manual. A principal vantagem da extração manual é a facilidade em distinguir a olho nu, o tipo de lineamento, ou seja, se as feições lineares possuem origem tectônica ou artificiais (Javhar *et al.*, 2019).

A extração manual foi realizada a partir do mapa topográfico de Barão de Cocais, na escala 1:50.000, resultando na identificação de 149 lineamentos morfoestruturais (Apêndice. B) com azimutes nas direções N–S, NNE–SSW, NE–SW, ENE–WSW, E–W, NW–SE e NNW–SSE. Como foco deste estudo, os lineamentos com azimuth 120° correspondentes à direção NW–SE, foram destacados em vermelho.

Figura 16- Mapa de lineamentos morfoestruturais traçados manualmente sobre a folha topográfica do IBGE de Barão de Cocais (escala 1:50.000), com sobreposição de imagem de satélite do Google para apoio na interpretação geomorfológica



Fonte: Elaborado por S.E.P. Santos

5.2.2 Extração automática

O método de extração automática tem como vantagem a velocidade e precisão na identificação de bordas através de um recurso computacional. O reconhecimento através de um algoritmo facilita a detecção de feições que não são perceptíveis a olho nu e possibilita o traçado de um número elevado de linhas em curto espaço de tempo. Ao contrário da experiência manual, as técnicas auxiliadas por computador minimizam a dependência do intérprete (Raghavan et al. 1993)

A seleção dessa técnica foi fundamentada em sua capacidade de proporcionar uma análise abrangente e multidimensional do ambiente investigado, permitindo uma caracterização mais detalhada dos aspectos geológicos, geomorfológicos e estruturais da área de estudo. Nesta situação, a aplicação de modelos de elevação é essencial, uma vez que eles oferecem dados topográficos que auxiliam na interpretação e validação de estruturas lineares, além de reduzir ambiguidades na análise de imagens de sensoriamento remoto, principalmente em áreas com relevo complexo, como no QFe. As imagens de relevo sombreado evidenciam fronteiras entre as áreas sombreadas e não sombreadas, que podem indicar a presença de lineamentos.

A MDE foi submetida ao processamento de relevo sombreado (“hillshade”), que simula uma fonte de luz incidindo sobre o relevo, e reproduz o terreno em escalas de cinza numa imagem rasterizada. As diferentes imagens foram submetidas ao algoritmo LINE no software PCI Geomatica, que realizou a extração automática dos lineamentos.

Os parâmetros adotados (TAB. 3) para a extração automatizada foram ajustados conforme indicado no estudo de Goulart et al. (2022).

Tabela 2 - Escala de parâmetros configurada segundo Goulart *et al.* (2022)

Parâmetro	Valor
Raio do filtro	10
Limiar de gradiente de borda	50
Limiar de comprimento de curva	30
Limiar de ajuste de linha	2
Limiar de diferença angular	15
Limiar de distância de ligação	20

As figuras, FIG. 17 e FIG. 18, apresentam os resultados do processamento, organizados conforme as feições de relevo positivo e negativo, característica ressaltada a partir do

processamento de relevo sombreado do MDE nos respectivos ângulos de incidência. Relevo positivo foi ressaltado nos ângulos 0°, 30°, 45°, 315°, e relevo negativo 90°, 180°, 210°, 270°.

O número de lineamentos extraídos automaticamente por ângulo de iluminação é mostrado na TAB. 4. O ângulo de 30° retornou o maior número de lineamentos em comparação aos outros ângulos, caracterizando-se como um “outlier”. Além dele, as maiores quantidades de lineamentos extraídos são obtidas nas direções 0°, 45°, 315°.

As rosetas de frequência (FIG 17 e FIG 18) demonstraram uma distribuição bidirecional, comum a todos os ensaios. Além disso, o comportamento do comprimento ponderado pouco se diferenciou da frequência direcional nas rosetas, sugerindo que os lineamentos mais longos ou significativos também estão na direção predominante.

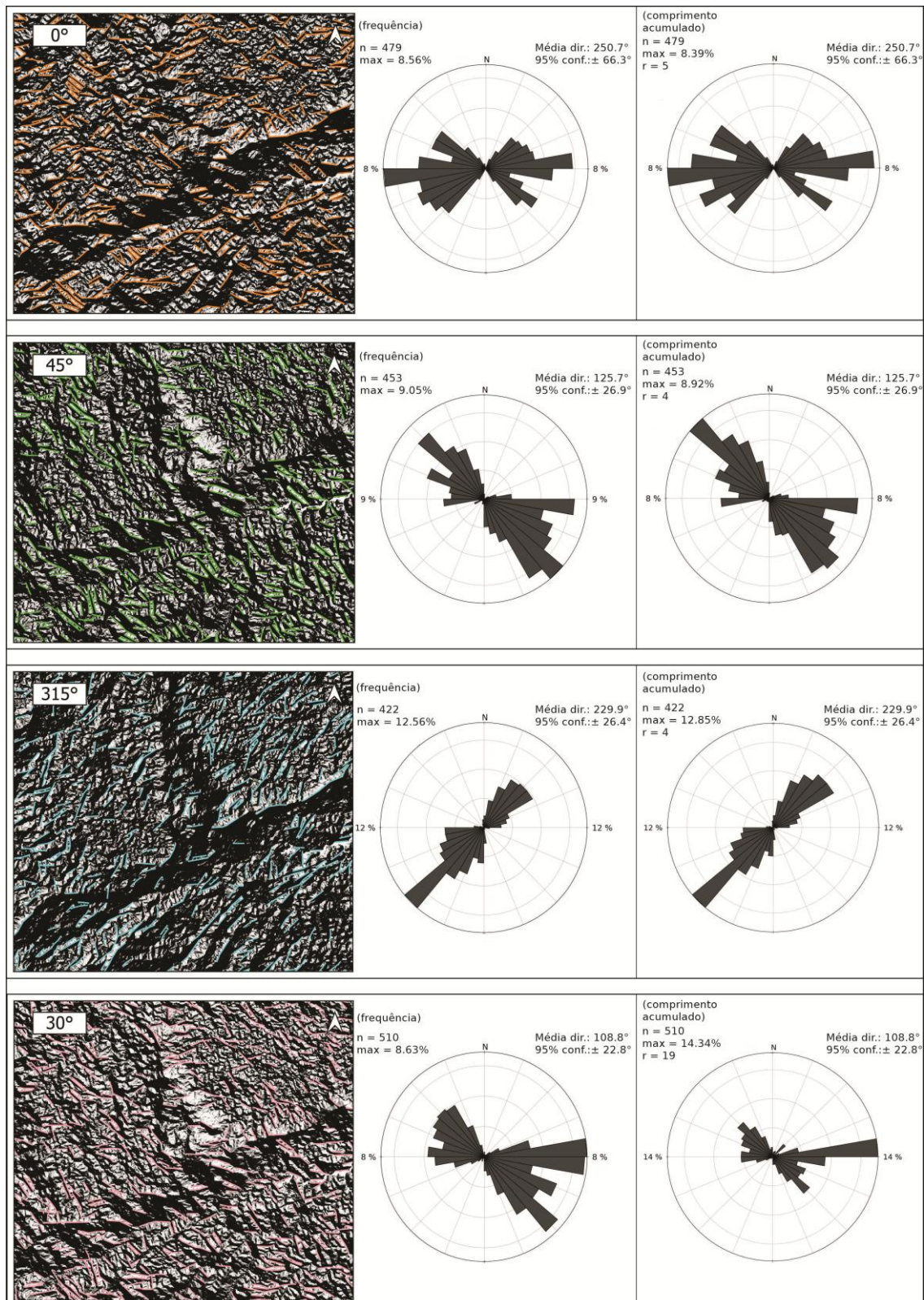
Classes de orientação se repetiram, ao todo foram 4 classes dominantes: E-W, N-S, NW-SE, NE-SW. Assim, numa escala de trabalho local, as direções obtidas podem indicar a influência de mais de um conjunto estrutural ou a influência de distintos eventos tectônicos.

Tabela 3- Número de lineamentos e direções obtidas de acordo com o modo angular da extração automática.

Ângulo de iluminação	Nº lineamentos extraídos	Direção média	Direção Predominante	Riedel
0°	479	250.7°	E-W	P
45°	453	125.7°	NW-SE	Y
315°	472	229.9°	NE-SW	-
30°	510	108.8°	E-W	-
90°	444	175.5°	N-S	X
180°	449	302.2°	E-W	-
270°	394	173.0°	N-S	-
210°	345	98.3°	NW-SE	-

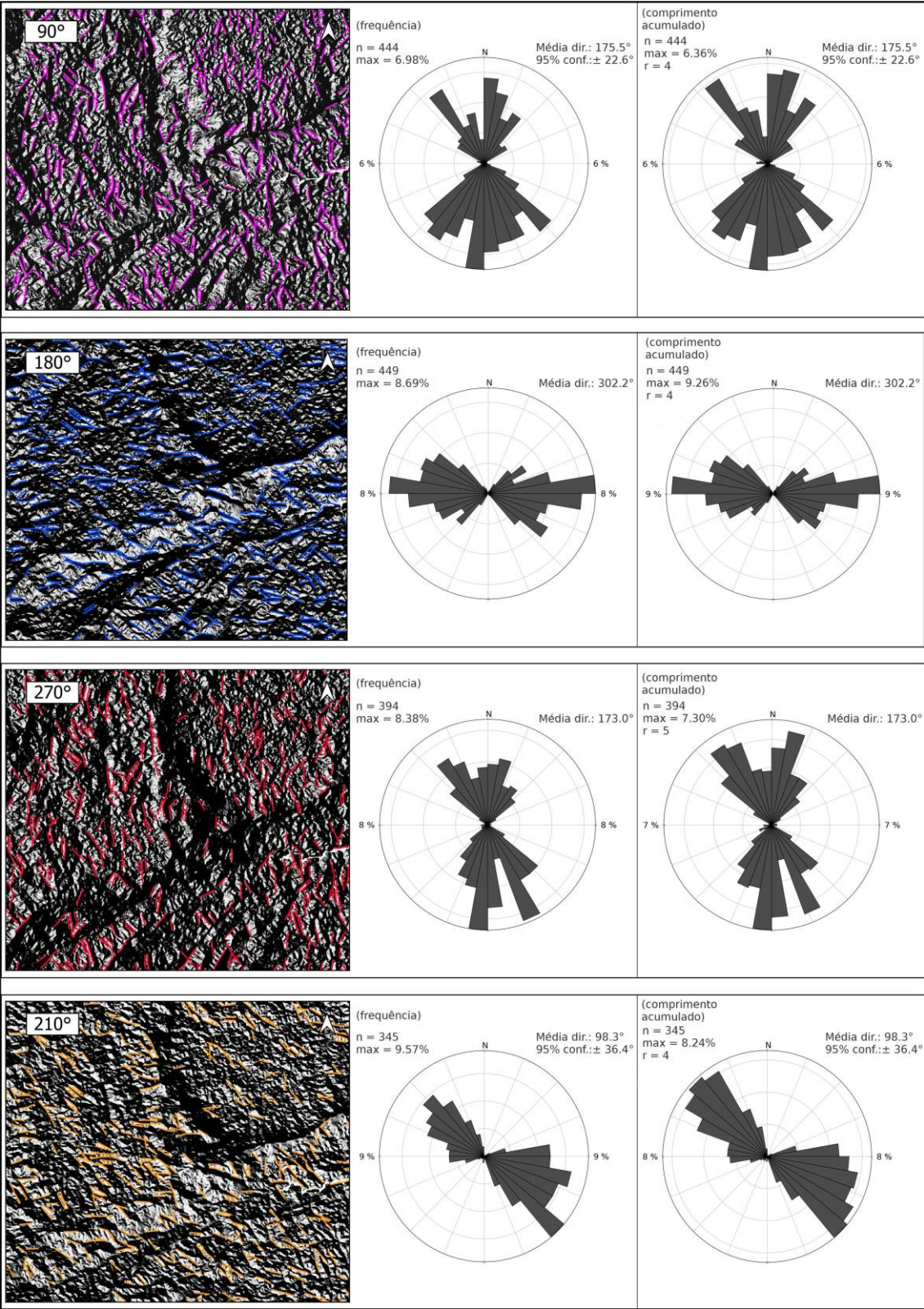
A predominância direcional em torno das direções N-S, E-W, são consistentes com os eventos compressoriais brasileiros I e II. Destaca-se a iluminação de 45° que ressaltou a direção NW-SE com a direção azimutal média de 125°.

Figura 17 - Lineamentos morfoestruturais extraídos automaticamente, com diagramas de roseta da frequência e do comprimento com o predomínio direcional, obtidos a partir do MDE nas direções de relevo positivos: 0, 30, 45, 315.



Fonte: Elaborado por S.E.P. Santos.

Figura 18 - Lineamentos morfoestruturais extraídos automaticamente, com diagramas de roseta da frequência e do comprimento com o predomínio direcional, obtidos a partir do MDE nas direções de relevo negativos: 90, 180, 210, 270.

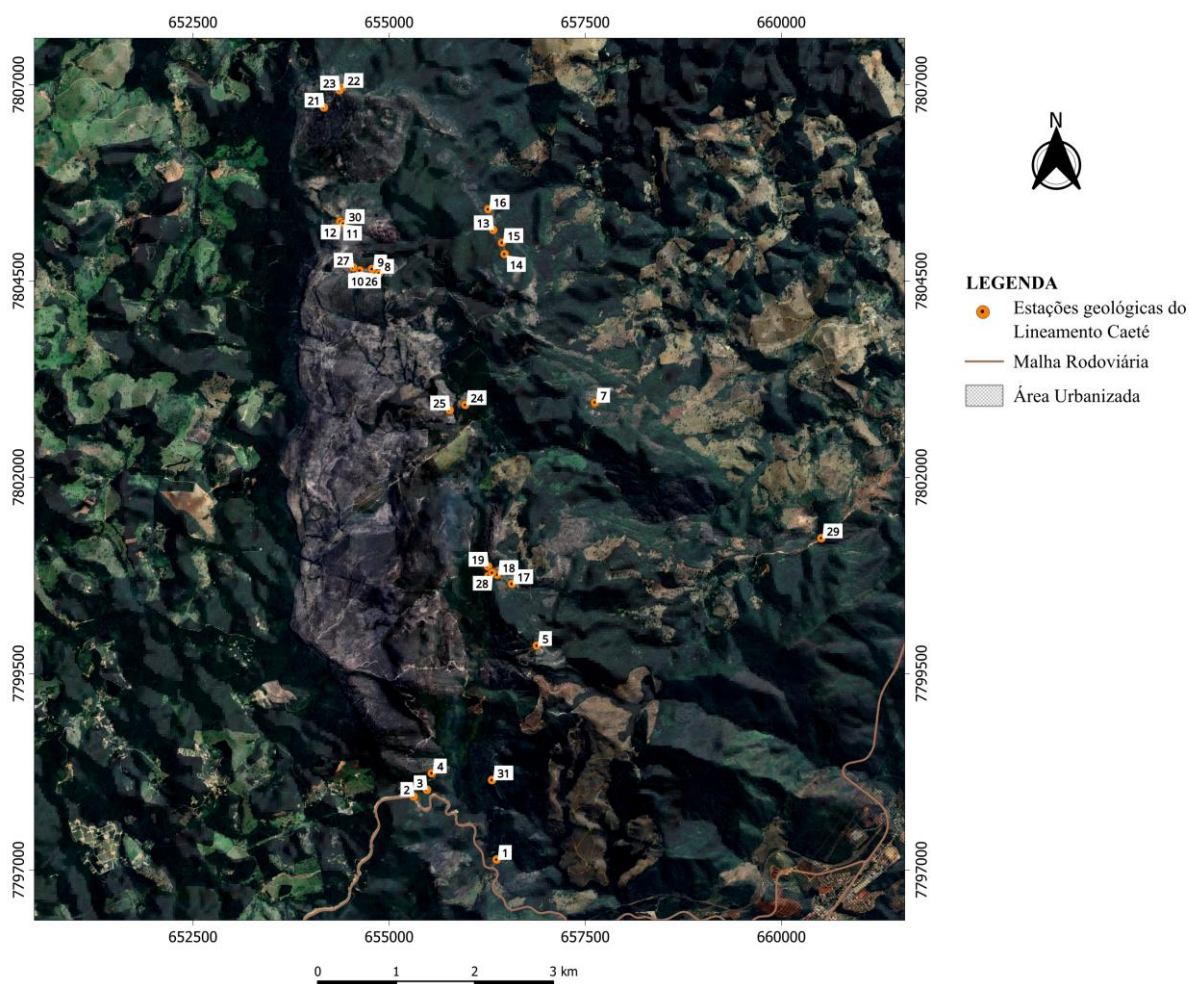


Fonte: Elaborado por S.E.P. Santos.

5.3 O LINEAMENTO CAETÉ NA SERRA DAS CAMBOTAS

A partir do trabalho de mapeamento geológico-estrutural, foram selecionados pontos representativos que evidenciam a expressão e a zona de dano do Lineamento Caeté, nas regiões da Serra das Cambotas e da Serra do Garimpo (FIG. 19). Na área de estudo, essa expressão estrutural é mais bem registrada nas rochas dos supergrupos Estrada Real e Espinhaço, assim como nas intrusões máficas. As principais estruturas observadas incluem sistemas de dobras, fraturas e veios de quartzo, falhas, zonas de cisalhamento e foliação de cisalhamento nos diques máficos.

Figura 19 - Localização das estações de trabalho, pontos de maior expressão do Lineamento Caeté nas serras



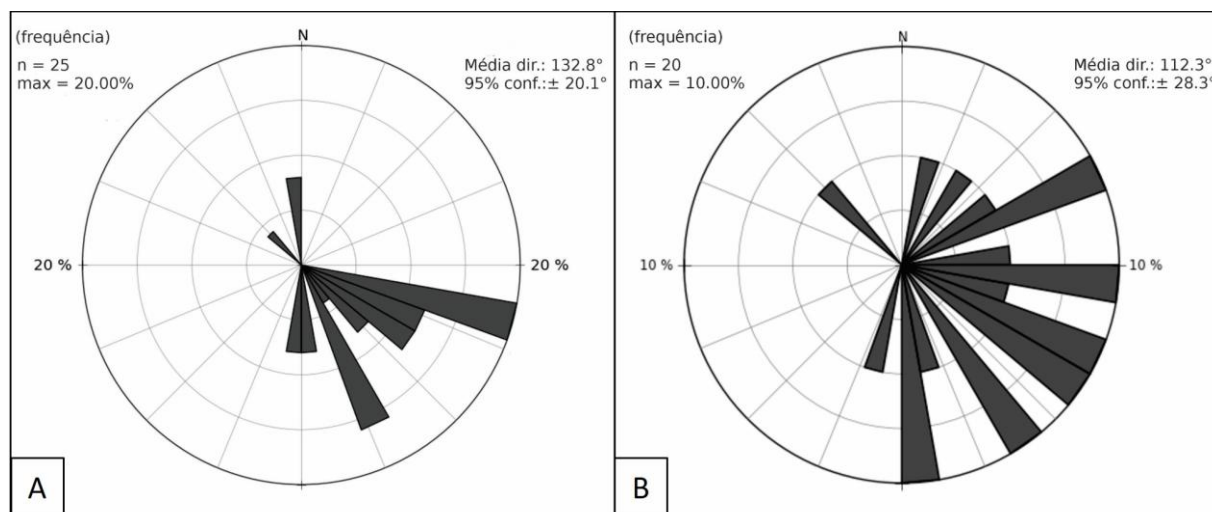
Fonte: Elaborado por S.E.P. Santos.

5.3.1 Estruturas dúcteis: dobras brasileiras, foliação, zonas de cisalhamento

Dobras brasileiras

Gomes (2017) cartografou a ocorrência de dobras em todo o domínio do Supergrupo Espinhaço na área de estudo, observando que a maioria possui eixos com caimento entre as direções ESE-WSW. Seu trabalho concluiu que a deformação pós-sedimentar foi predominantemente acomodada na forma de dobras, com possível reativação de falhas preexistentes. Esses dados foram incorporados ao mapa de Silveira *et al.* (2024) (FIG 21), e interpretados como estruturas relacionadas à tectônica brasileira. A FIG. 20a apresenta o diagrama de roseta da frequência dos eixos de dobras brasileiras nas serras extraídas de Gomes (2017), que também são descritos na TAB. 5 e a FIG. 20b, o diagrama dos eixos levantados neste trabalho de campo. As dobras cartografadas por este trabalho apresentam dimensões decamétricas a hectométricas, com amplitudes métricas a decamétricas. Seus eixos estão orientados nas direções N150–130E e N70–50E, com caimentos suaves a moderados para SE e NE, e simetria predominantemente ortorrômbica.

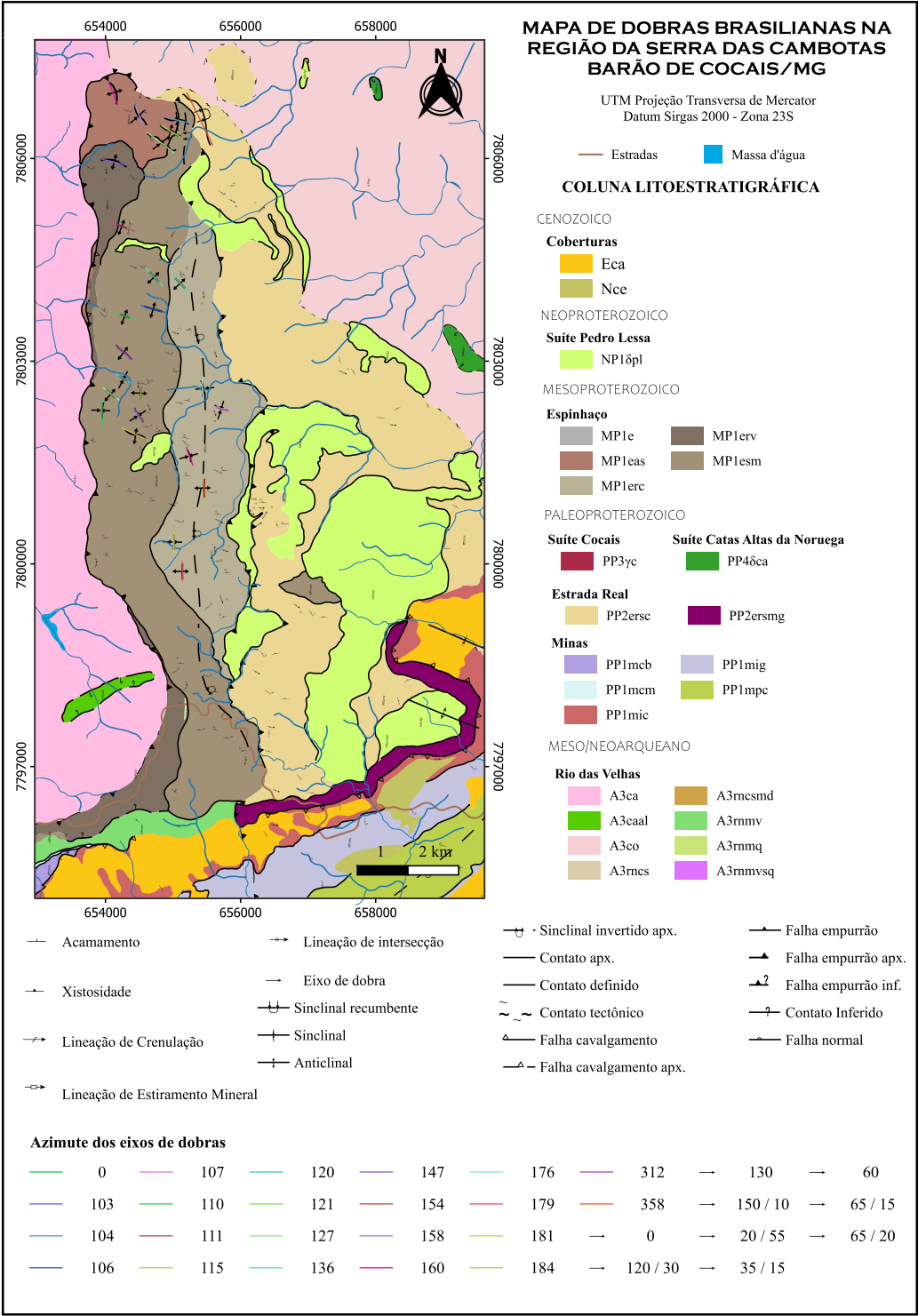
Figura 20- A) Diagrama de Rosa de frequência dos eixos de dobras brasileiras por Gomes (2017) B) Diagrama de Rosa de frequência dos eixos de dobras brasileiras levantados por Silveira *et al.* (2024)



Fonte: Elaborado por S.E.P. Santos

Figura 21 - Mapa de Eixo de dobras brasileiras levantadas por Simmons (1960), Gomes (2017), Silveira *et al.* (2024) nas serras das Cambotas, do Garimpo e Dois Irmãos. Unidades litológicas: A3ca – gnaisses e granitos foliados com biotita e hornblenda; A3caal – anfibolitos; A3co – gnaisses graníticos com biotita, hornblenda e migmatitos; A3rnsc – xistos clorita-sericita-quartzo com raras FFs; A3rnscmd – xistos clorita-sericita-quartzo com FFs eventuais; A3rnmq – metamargas, FFs carbonatadas, xistos e metassedimentos; A3rnmv – metabasaltos e FFs com rochas vulcanoclásticas e pelíticas; A3rnmvsq – metagrauvacas, xistos e FFs com metachert; MP1e – metarenitos; MP1eas – metaconglomerados e metarenitos; MP1erc – metarenitos com estratificação plano-paralela; MP1erv – metarenitos e metarcóseos intercalados; MP1esm – metarenitos finos a grossos com

estratificações diversas; NP1δpl – metadiabásios e metagabros; PP1mcb – filitos variados com quartzitos e mármores dolomíticos; PP1mcm – quartzitos, metaconglomerados e quartzo-mica xistos; PP1mic – itabiritos, hematitos, mármores e filitos ferruginosos; PP1mig – mármores e itabiritos, com brechas ferruginosas locais; PP1mpc – quartzitos ferruginosos, filitos e xistos sericiticos; PP2ersc – xistos, quartzitos e quartzitos ferruginosos detríticos; PP2ersmg – FFs, xistos cloríticos e filitos; PP3γc – metagranitoides; PP4δca – metamáficas; Coberturas: Eca – cobertura detrito-laterítica com concreções ferruginosas; e Nce – sedimentos de tálus e solos com fragmentos de rocha.



Fonte: Elaborado por S.E.P. Santos.

Tabela 4 - Índice dos eixos de dobras brasileiras na região da Serra das Cambotas, Barão de Cocais/MG

Id	X	Y	Azimute	Id	X	Y	Azimute
1	655397,21	7806587,81	154	18	654497,99	7802197,00	147
2	655074,21	7806567,55	104	19	654449,32	7801916,83	115
3	654963,59	7806408,26	121	20	655436,84	7802598,45	176
4	654813,95	7806241,43	127	21	655720,83	7802298,77	107
5	654490,14	7806665,3	158	22	655464,19	7801122,19	358
6	654111,63	7806973,83	160	23	655138,77	7799888,48	179
7	654125,7	7805947,69	103	24	655015,68	7800323,32	181
8	654240,95	7804997,97	111	25	655246,98	7801591,61	160
9	655107,00	7804153,65	136	26	655623,91	780000,00	0/5
10	654722,64	7804246,87	136	27	655869,00	779946,00	20/55
11	654706,15	7803774,02	106	28	655814,00	780072,00	60/0
12	654285,3	7803669,44	110	29	657635,00	780293,00	65/15
13	654273,53	7803131,43	312	30	656274,00	780539,00	130/0
14	654270,72	7802746,47	120	31	656272,00	780084,00	65/20
15	654080,85	7802517,19	127	32	656272,00	780084,00	35/15
16	654522,93	7802525,64	184	33	656254,00	780073,00	120/30
17	653949,32	7802244,06	0	34	656272,00	780084,00	150/10

Zonas de cisalhamento

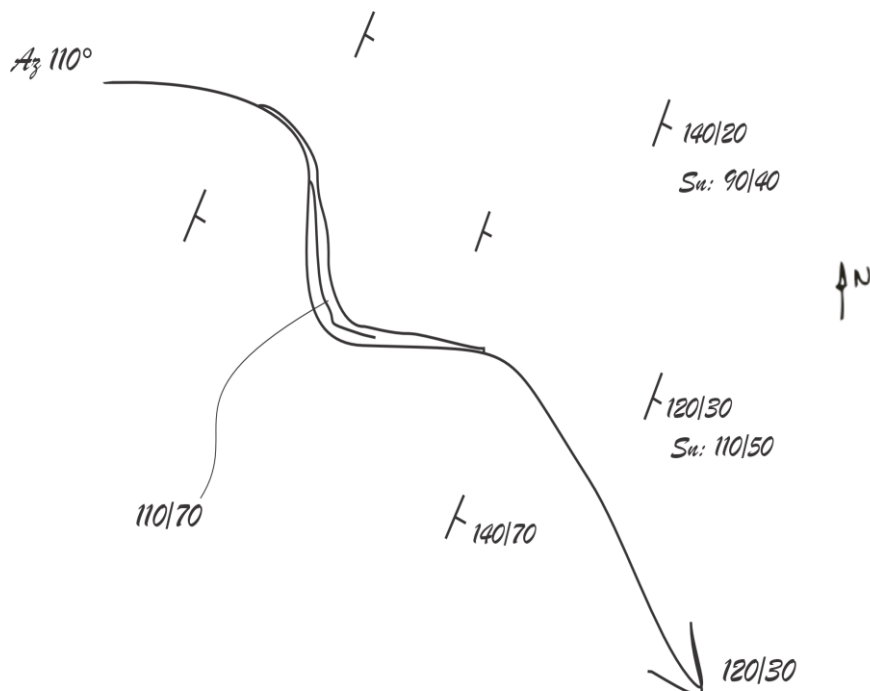
Na região do Pico da Bandeira, foram observadas zonas de cisalhamento rúpteis de dimensões métricas e direção N120 apresentando cinemática dextral (FIG. 22). Um veio de espessura métrica, dobrado em estilo “z”, compõe essa zona, com eixos orientados no rumo 110-120/30 (FIG. 23), apresentando foliação interna S/C indicando cinemática dextral.

Figura 22 – Estação 09: Zona de cisalhamento rúptil-dúctil direcional de orientação subvertical N120 com indicações de foliação S/C de cinemática dextral



Fonte: S.E.P. Santos

Figura 23 – Estação 09: Croqui de veio dobrado em "z" com atitude dos eixos, acamamento e xistosidade do afloramento do quartzito Espinhaço



Fonte: S.E.P. Santos.

Foliação nas rochas de protólito ígneo

A Suíte Pedro Lessa ocorre na porção centro-oriental da área de estudo, manifestando-se sob a forma de diques e sills, localmente deformados sob condições de metamorfismo de baixo grau. Essas rochas são encontradas principalmente como saprólitos, nos quais blocos e matações preservados ainda permitem o reconhecimento do protólito ígneo básico. Trata-se de uma rocha maciça, holocristalina e afanítica, com matriz escura que, quando alterada, adquire tonalidades vermelho-escuras a marrons, sendo classificadas como metadiabásios a metagabros. Pontualmente, os diques exibem orientações preferenciais nas direções N120 e N80–70E.

Na estação 08, o corpo de um dique, orientado em N120, exibe foliação S/C bem desenvolvida, de atitude subvertical (FIG. 24), marcada pela superimposição de cinemáticas dextral sobre o sinistral. Outrora, a influência da falha de cavalgamento regional é evidenciada por uma foliação de cisalhamento de borda 130/40 [135/60] (Estação 20), desenvolvida nos contatos do dique, evidenciando a interação entre regimes compressivos e transcorrentes.

Figura 24 – Estação 08: Intrusão máfica de direção N120 com foliação de cisalhamento S[c]



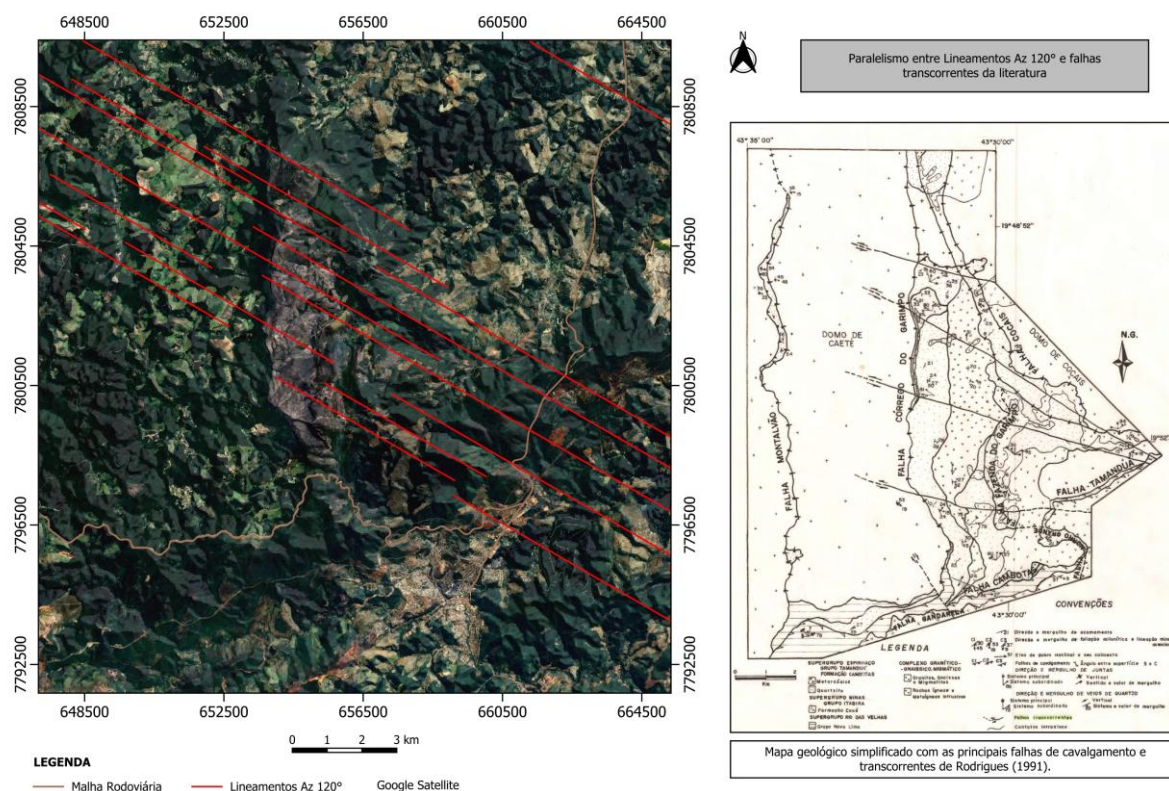
Fonte: S.E.P. Santos.

5.3.2 Estruturas rúpteis: falhas transcorrentes, fraturas, veios

Falhas transcorrentes

Falhas subverticais de extensão quilométrica, com direção N120 e cinemática sinistral, seccionam as serras do Garimpo e de Cambotas. Tratam-se de feições estruturais proeminentes na área, claramente reconhecíveis em fotografias aéreas, e anteriormente descritas por Rodrigues (1991) como falhas transcorrentes. A partir da extração manual, obteve-se uma extensão mediana de 9.097 metros para esses lineamentos (FIG. 25). Em campo, a zona de influência dessas falhas é caracterizada pela presença de fraturas do sistema Riedel, estruturas rúpteis que serão descritas a seguir.

Figura 25 – Feixe de lineamentos Az 120 na Serra das Cambotas e o mapa geológico simplificado com as principais falhas de cavalgamento e transcorrentes de Rodrigues (1991).



Fonte: S.E.P. Santos.

Fraturas

A região é caracterizada por um sistema complexo de fraturas, com múltiplas orientações e subpadrões locais. Os sistemas de fraturas apresentam sobreposição cinemática, sugerindo sucessivas reativações sob diferentes regimes tectônicos. Além disso, exercem

controle geomorfológico, influenciando diretamente a estabilidade dos paredões de quartzito. O conjunto de fraturas observadas compõe uma rede conjugada que acompanha as principais zonas de cisalhamento do Lineamento Caeté, com direções Y (N120), R (N145–150E), P (E–W) e X (N30–45E), definindo um sistema Riedel completo e reativado sob transpressão brasileira.

Devido à alta frequência das fraturas, os padrões registrados em campo foram sistematizados na TAB. 5 a seguir.

A sistematização dos dados destaca o domínio de fraturas atribuídas a classe P de Riedel, de orientação E-W, registradas com alta frequência em diferentes estações (E02 (FIG. 26), E32, E05, E11, E27, E28) e em ambas as unidades estratigráficas principais (Espinhaço e Estrada Real). Em menor frequência, ocorrem fraturas N–S e NW–SE a NNW–SSE (R), compondo um arranjo compatível com um campo de esforços transpressivo dextral.

Figura 26- Estação 02: Afloramento de quartzito intensamente fraturado localizado na estrada da Rota do Ferro. Barão de Cocais.



Fonte: S.E.P. Santos

Tabela 5 - Padrão do sistema de fraturas nas rochas quartzíticas dos supergrupos Estrada Real e Espinhaço.

Estação	Und. Estratigráfica	Nº medidas	Principais Medidas	Orientações	Riedel
E02	SG Espinhaço	+40 unid.	N80E, N85E, 150/40, N90E, 270/45, 300/60, 300/50, 290/50	E-W, NNW-SSE, NW-SE, WNW-ESE	E-W – P
E32	SG Estrada Real	+50 unid.	N85E	E-W	P
E03	SG Espinhaço	3 (veio)	N30E, N45E, N50E		X
E05	SG Espinhaço	+10 unid.	N80E, N85E, N70E	E-W	P
E06	SG Espinhaço	+50 unid.	N60E	ENE-WSW	-

Estação	Und. Estratigráfica	Nº medidas	Principais Medidas	Orientações	Riedel
E30	SG Estrada Real	6 unid./m	N60E, N160, N155, 330/50	ENE-WSW, NNW-SSE	-
E31	SG Espinhaço	7 unid./m	N90°; N100°	E-W	P
E11	SG Espinhaço	40 unid./m	N80-N100	E-W	P
E12	SG Espinhaço	Fraturas N100°; 20 unid./m	N100°; 185/61; 186/70; 183/64	E-W, N-S	E-W – P
		N120° 5 unid./m	Fraturas Az 120° 215/84	NW-SE, NE-SW	Az 120° – Y
E22	SG Espinhaço	-	Az160°; 245/74	NNW-SSE,	-
E27	SG Espinhaço	+10 unid.	N80-N90	E-W	P
E28	SG Espinhaço	12 unid./m	Az80°-90°	E-W	P
E13	SG Estrada Real	8 unid./m	N145	NW-SE	R
E15	SG Estrada Real	-	N150	NNW-SSE	R
E17	SG Estrada Real	-	N50, N60, N70, N90	NE-SW, ENE-WSW, E-W	N90 – P N50 – X
E18	SG Estrada Real	-	N75, N50, N/S	N-S, NE-SW, ENE-WSW	-
P117	SG Estrada Real	-	N/S	N-S	-

Na porção sul da área investigada, onde a Serra do Espinhaço se conecta ao Sinclinal Gandarela, observa-se um padrão recorrente de fraturamento que se estende por toda a região. Um afloramento de direção E-W localizado na estrada Rota do Ferro – Estação 02, é composto por quartzito fino, branco, com estratificação plano-paralela, essencialmente constituído por quartzo e sericita, com zonas ferríferas pertencente ao Supergrupo Espinhaço. Tem-se exposto neste afloramento fraturas subverticais com orientações variando entre N80E e N90E, e atitudes entre 270/45° e 300/60° (FIG. 26 e 27).

Figura 27 - Estação 02: Afloramento de quartzito intensamente fraturado localizado na estrada da Rota do Ferro. Barão de Cocais.



Fonte: S. E. P. Santos

Esse mesmo padrão repete-se em escala regional, com a serra sendo integralmente seccionada por um sistema de fraturas nas direções N40–50E e N80–100E, que exibem cinemáticas superpostas, com reativações dextrais sobre estruturas sinistrais preexistentes. Essa característica é uma herança das reativações dos eventos brasileiros I e II. Essas fraturas sustentam os paredões quartzíticos nos domínios do Supergrupo Minas e do Supergrupo Espinhaço. Esse padrão é bem exemplificado pelas Estações 11 e 12, localizadas no extremo norte das serras, que se encontram sob influência da falha transcorrente Az 120° e apresentam uma alta densidade de fraturas de direções E-W no quartzito do Supergrupo Espinhaço (FIG. 28). No segmento leste da serra, na região da estação 13, fraturas de direção N145 alinham-se ao *trend* estrutural predominante desse setor. Essas fraturas são métricas, contínuas e atingem uma densidade de aproximadamente 8 fraturas por metro linear, evidenciando reativação dextral sobre estruturas sinistrais da primeira geração (FIG. 29).

Figura 28 – Estação 11 e 12: A), B), C) e D) Alta densidade de fraturas subverticais de direção E-W nos quartzitos do Supergrupo Espinhaço.



Fonte: S.E.P. Santos.

Figura 29- Estação 13: Conjunto de fraturas subverticais de orientação N-S identificados nas rochas quartzíticas do Supergrupo Estrada Real, na região de Cocais

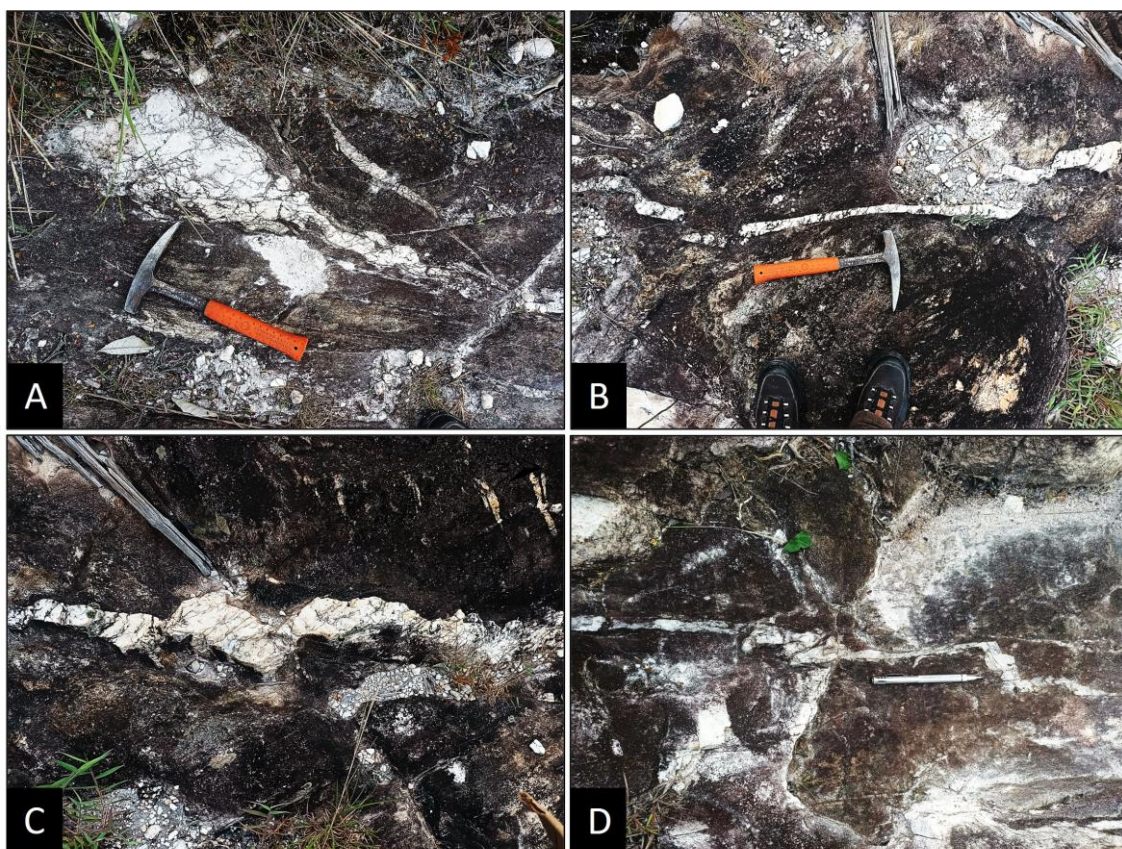


Fonte: S.E.P. Santos.

Veios

A estruturação dos veios na serra evidencia controles tectônicos multifásicos, expressos pela diversidade de orientações e pelas distintas cinemáticas. Observa-se a presença de minerais hidrotermais e de dobramentos que atestam a interação entre fluidos e deformação. Esses veios apresentam escalas variadas e geometrias complexas, como formas lenticulares, tabulares e estruturas do tipo pull-apart e, por vezes, são interseccionados por fraturas que corroboram a atuação polifásica do lineamento de azimute 120° . Veios com orientação predominante N/S são amplamente distribuídos em toda a área de estudo. Na Estação 15, localizada na região do Alto de Cocais, esses veios apresentam-se dobrados em um padrão "S" sinistral, indicando deformação cisalhante com movimento lateral esquerdo através dos grãos foliados (FIG. 30).

Figura 30 - Estação 15: Veios N/S dobrados em um padrão "S" sinistral com orientação preferencial de grãos foliados

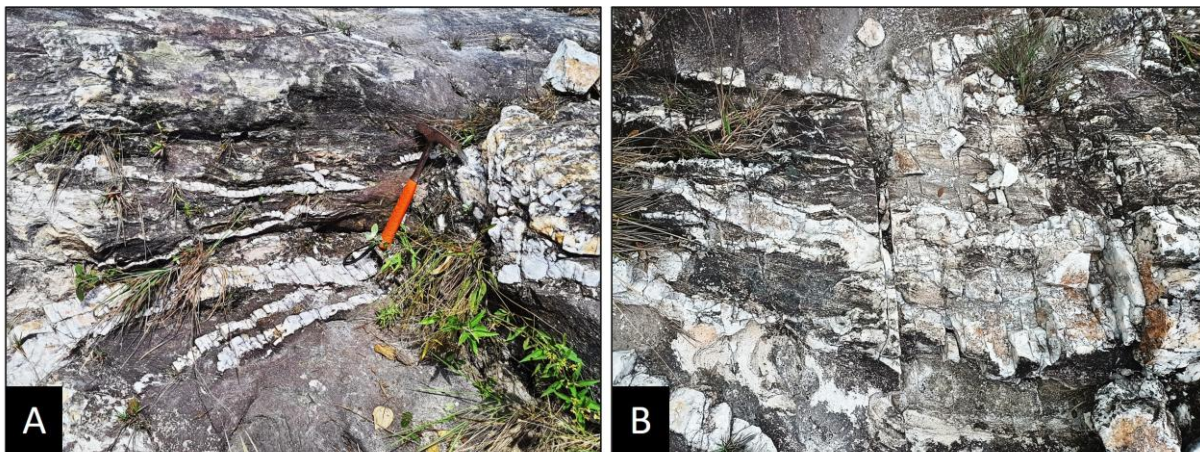


Fonte: S.E.P. Santos.

Ao norte da Serra das Cambotas (Estações 11 e 12), predominam sistemas de veios de quartzo subverticais com direção N30E, caracterizados por foliação interna de cisalhamento com componente dextral. Esses veios são seccionados por fraturas orientadas entre N80E e

N100E, em um sistema de alta densidade (de cerca 40 fraturas por metro), que os deslocam com cinemática sinistral (FIG. 31).

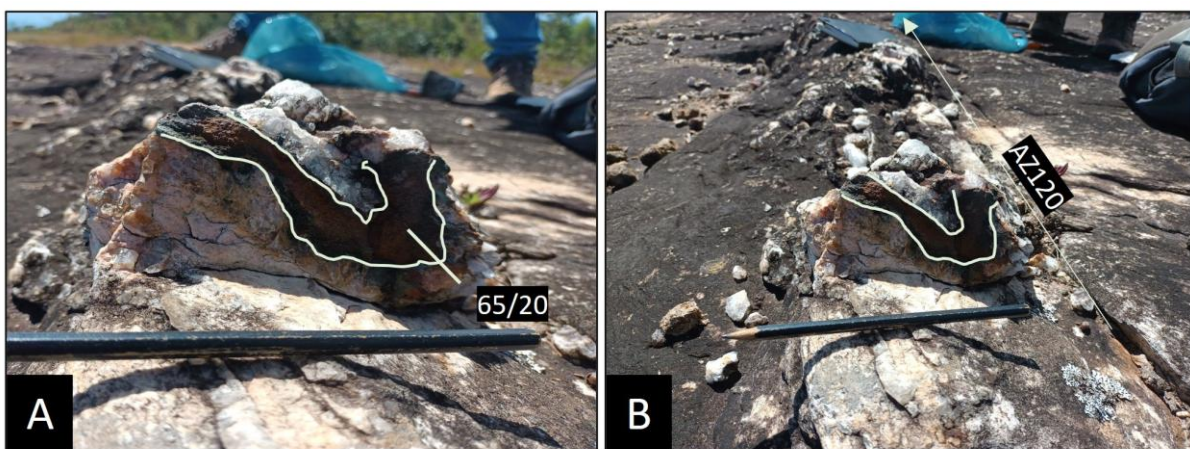
Figura 31 – Estação 11: Sistema de veios de quartzo subverticais N30E seccionado por fraturas N80-100E nos metaquartzoarenitos do Supergrupo Espinhaço.



Fonte: S.E.P. Santos.

Na região de contato entre os quartzitos do Supergrupo Espinhaço e a Falha Fazenda do Garimpo, veios de quartzo com alteração hidrotermal (contendo clorita e/ou serpentina) são abundantes. Essa alteração hidrotermal indica a percolação de fluidos mineralizantes canalizados por fraturas, funcionando como condutos estruturais. Já na região da Estação 19, nos quartzitos do Supergrupo Estrada Real, foram identificados sete veios com direção N150E e cinemática sinistral, além de um veio com direção aproximada de Az120-130, contendo mineral máfico de coloração verde, dobrado com eixo $\beta = 65/20$ (FIG. 32).

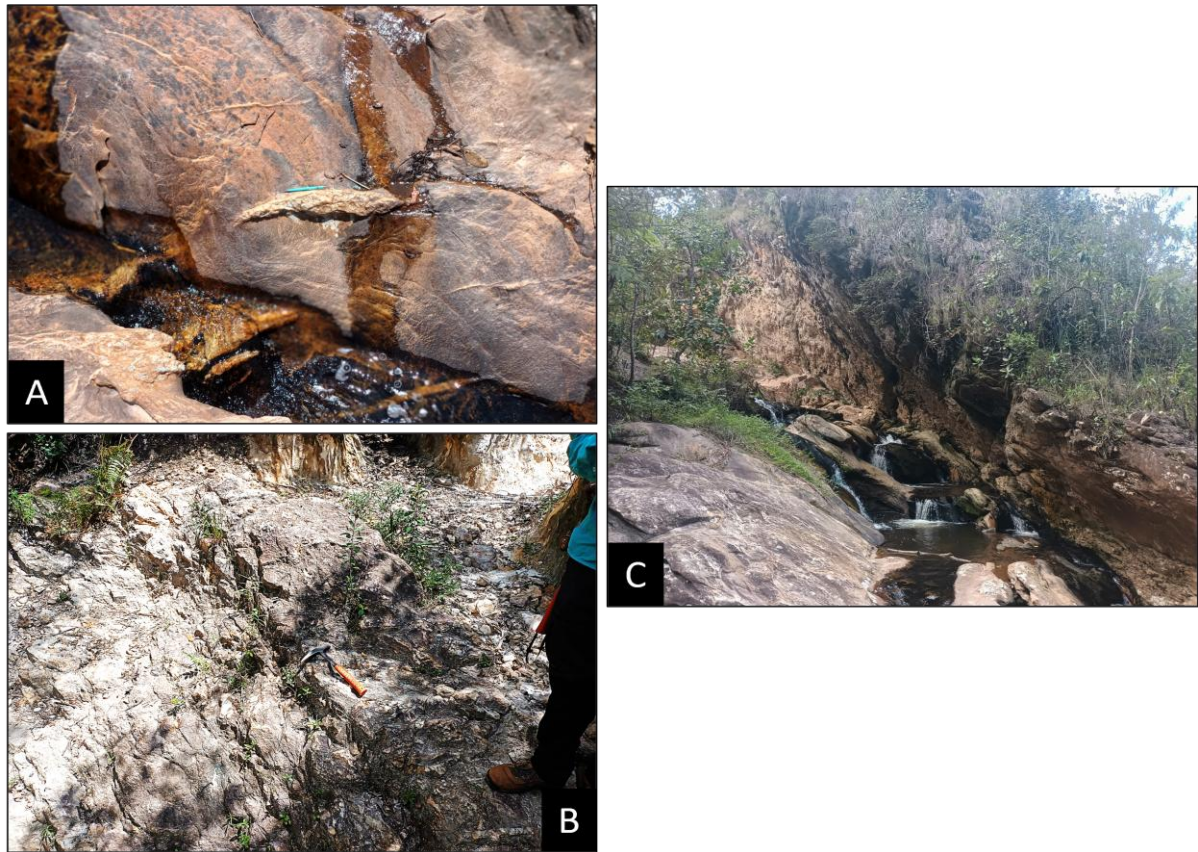
Figura 32 – Estação 19: Veio dobrado com direção aproximada de Az120-130 nos quartzitos do Supergrupo Estrada Real.



Fonte: S.E.P. Santos.

Ao sul, destacam-se sistemas de veios de quartzo com direções N30-35E e N40-45E e cinemática sinistral. Apresentam geometrias variadas, principalmente do tipo lenticular, como identificado na Cachoeira da Cambota (FIG. 33a,c), tabulares na Estação 02, e de espessura métrica na Estação 03 (FIG. 33b).

Figura 33 - A) Veios na Cachoeira da Cambota, B) Veio com espessura de 3 metros na região sul da área e, C) Cachoeira da Cambota.



Fonte: S. E. P. Santos

A TAB. 6 reúne as principais ocorrências de veios na zona do Lineamento Caeté. Os dados destacam a predominância de veios N30–45E, os quais exibem em campo uma variação cinemática. Isso reforça o papel dilatante dessa anisotropia crustal que foi sucessivamente aproveitada e reativada dentro do campo de cisalhamento Az 120°.

Tabela 6 - Atitudes de veios de quartzo nas serras das Cambotas e Garimpo.

Ponto	Und. Estratigráfica	Estrutura	Direções	Riedel
E01	SG Estrada Real	Veio de quartzo	N40E, N45E, N35E, N30E, N35E, N40E	X
E02	SG Espinhaço	Veio de quartzo	N40E, N45E, N38E, N30E	X
E03	SG Espinhaço	Veio de quartzo	N50E	-
E04	SG Espinhaço	Veio de quartzo	N45E, N30E	X
E05	SG Espinhaço	Veio de quartzo	N30E, N25E	R'

Ponto	Und. Estratigráfica	Estrutura	Direções	Riedel
EE10	SG Espinhaço	Veio de quartzo dobrado em “Z”	Eixo E-W: Az 110°; Eixo N-S: 100/70; Eixo E-W: 120/30	100/70 – P 120/30 – Y
E11	SG Espinhaço	Veio de quartzo	N30E	X
E16	SG Estrada Real	Veio de quartzo	N20, N30, N10	N10-20E – R’ N30E – X
E19	SG Estrada Real	Veio de quartzo	Veios: N150 - 7 unid; 50/45; 60/36 Veio quartzo ígneo: 120/30	N150 – R 120/30 – Y

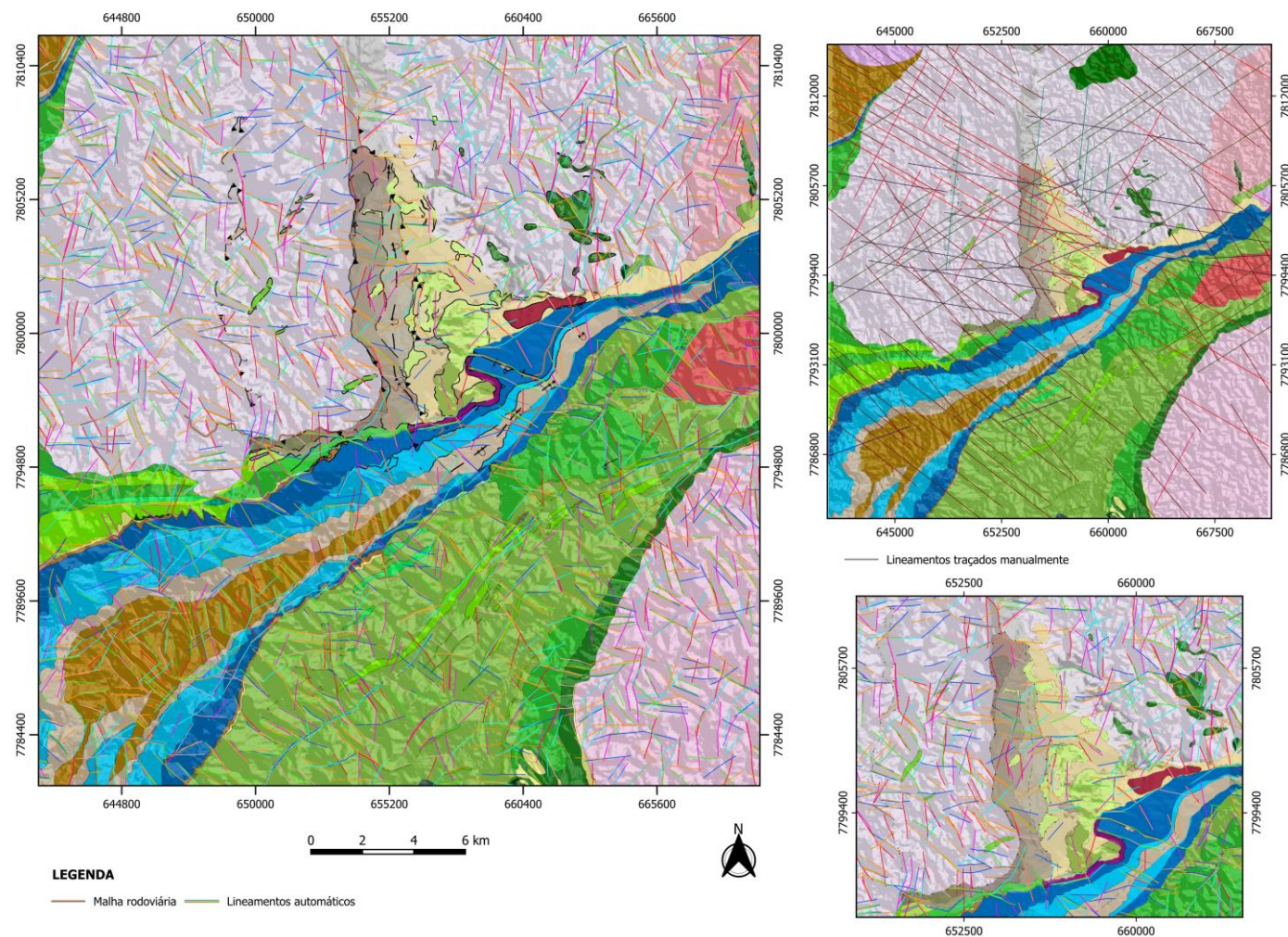
5.4 DISCUSSÃO

Extração automática

Com o método da extração automática é possível caracterizar uma área de forma rápida, extraindo um elevado número de linhas com significativa precisão, livre de erros interpretação. Por outro lado, bons resultados dependem da fonte e resolução das imagens escolhidas para trabalhar. Tanto a resolução espacial quanto a precisão vertical do Modelo Digital de Elevação (MDE) influenciam diretamente a quantidade, o comprimento e a densidade dos lineamentos extraídos, sendo estas variáveis proporcionalmente maiores em MDEs de maior resolução e precisão (Soliman & Han, 2019). Neste contexto, mesmo com a variação dos parâmetros de entrada do algoritmo, a utilização de uma única fonte e resolução de imagem (no caso, o MDE SRTM de 90 m) mostrou-se um fator limitante para uma caracterização estrutural mais acurada. Ao aplicar uma MDE de resolução moderada, houve uma tendência do método automático, em gerar uma densa rede de lineamentos curtos, privilegiando feições locais em detrimento de estruturas regionais de maior significado tectônico. O mapa da FIG. 34 sobrepõe lineamentos extraídos automaticamente ao mapa geológico.

A área representada caracteriza-se por um forte contraste litológico, o que se refletiu diretamente nos resultados da extração automática. O embasamento granito-gnáissico, que circunda a Serra dos dois lados, é em grande parte recoberto por solos avermelhados espessos. Esta unidade exibe formas de relevo suavizadas e lineamentos difusos, frequentemente associados à rede de drenagem. Em oposição, as serras quartzíticas se destacam como as feições mais proeminentes, com lineamentos longos e retilíneos, possivelmente associados a estruturas tectônicas regionais. Nestas áreas se registrou um número menor de lineamentos, o que pode ser atribuído à maior continuidade lateral dos planos de falha ou fraturas. Por fim, as formações ferríferas sustentam topos elevados com relevo intensamente dissecado. Nestas, a rede de lineamentos extraídos pode derivar tanto do controle estrutural quanto da erosão diferencial.

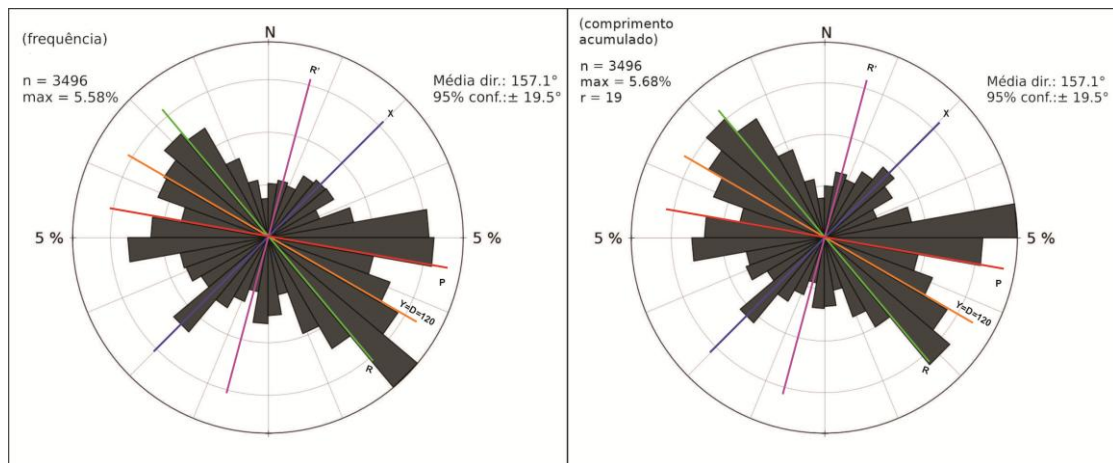
Figura 34 - Lineamentos automáticos e manuais sobre o mapa geológico da região da Folha Barão de Cocais com a atualização de Silveira *et al.* (2024) e Silveira (2026, em preparação).



Fonte: Elaborado por S.E.P. Santos

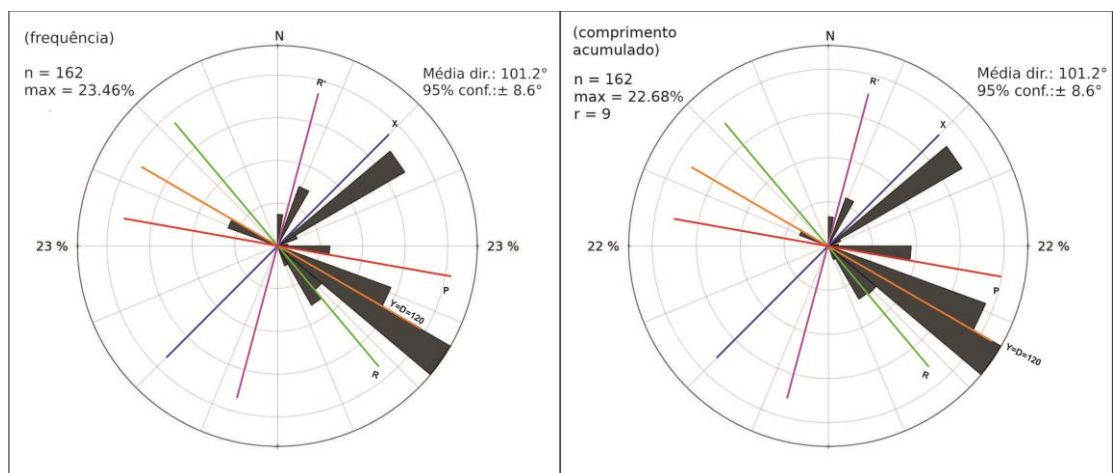
Cabe ressaltar o ensaio obtido no ângulo de iluminação de 45°, cuja direção azimutal média foi de 125,7° (NW-SE), evidenciando cristas e drenagens alinhadas nessa orientação. Tal direção mostra-se particularmente significativa na estruturação regional do Lineamento Caeté, ainda que figure como família secundária nos diagramas de roseta da FIG. 35 (os quais revelam dominância de direções próximas de 150°–160°, tanto em frequência quanto em comprimento acumulado). Para fins de validação dos resultados da extração automática, realizou-se uma correlação entre os lineamentos extraídos automaticamente e manualmente (FIG. 36). As rosetas abaixo proporcionam essa análise com as principais direções de Riedel. É interessante notar que essa família secundária se correlaciona bem com a direção secundária dominante Az 120° dos lineamentos manuais, caracterizados por falhas transcorrentes.

Figura 35– Diagrama de rosetas da extração automática: frequência e comprimento acumulado



Fonte: S.E.P. Santos.

Figura 36 – Diagrama de rosetas da extração manual: frequência, comprimento acumulado e Riedel



Fonte: S.E.P. Santos

A sobreposição dos eventos fica evidente a partir da cinemática impressa nas rochas dali vide as observações dextrais sob sinistrais em campo, de fraturas, dobramentos. E como mostrou o mapa geológico, os lineamentos na direção N-S correspondem à principal direção estrutural da serra. Essa direção está associada a feições como as falhas de empurrão do Córrego do Garimpo, localizadas no lado oeste da serra, e da Fazenda do Garimpo, no lado leste, além do eixo do Sinclinal Cambotas e outros eixos de dobras locais. Todas essas estruturas estão relacionadas à primeira fase do evento Brasileiro. Assim, os resultados das análises de lineamento são consistentes com as reativações brasileiras.

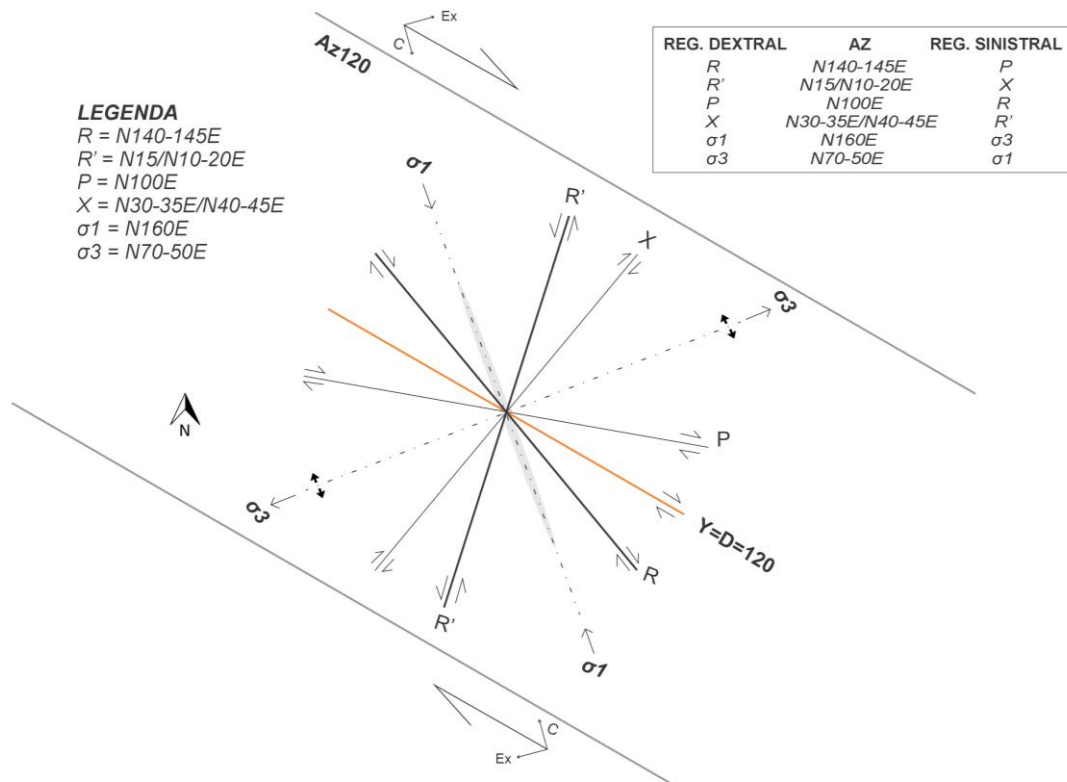
Modelo de Riedel

O Lineamento Caeté corresponde a uma zona de cisalhamento de direção azimutal 120°, definida a partir da associação de estruturas rúpteis e dúcteis identificadas na região: dobras assimétricas (dobras em z), bandas de cisalhamento (foliação s/c), fraturas e veios com cinemática definida. Tais feições indicam um regime progressivo de deformação. O modelo de Riedel é o modelo que configura esse arranjo no espaço e pode ser utilizado como evidência para a reativação do Lineamento em questão, uma vez que descreve um modelo sequenciado de estruturas associadas à aplicação de tensões cisalhantes. Nesse contexto, à medida que a deformação progride, os pares de estruturas desenvolvem-se a partir de zonas preferenciais de fragilidade. Fraturas pré-existentes podem sofrer rotação devido à continuidade do cisalhamento.

O conjunto de estruturas identificado nas regiões das serras das Cambotas e do Garimpo é compatível com a atuação de um sistema de cisalhamento não-coaxial do tipo Riedel, com plano de fluxo (D ou Y) ancorado no Lineamento Caeté, orientado segundo a direção N120. As análises estruturais indicam a sobreposição de dois regimes cinemáticos, sendo o movimento sinistral da fase F1 predominante sobre o movimento dextral da fase F2. O Lineamento Caeté representa a principal direção de deformação na área, funcionando como uma zona de cisalhamento frágil a frágil-dúctil, de caráter transcorrente sinistral predominante (FIG. 37).

Figura 37- Esquema interpretativo do sistema de cisalhamento não-coaxial do tipo Riedel associado ao Lineamento Caeté, na região das Serras das Cambotas e do Garimpo. O plano de fluxo principal (Y ou D) está orientado segundo o azimute N120 de atitude subvertical, ancorado no embasamento cristalino, com o desenvolvimento de fraturas típicas do sistema Riedel (R, R', P, X e T), indicando um regime transcorrente com cinemática composta. Predomina o deslocamento sinistral da fase F1, sobreposto por um regime dextral subordinado, associado à fase F2; ambas as fases correspondem a reativações relacionadas à tectônica Brasileira. A zona de cisalhamento exibe características que variam do comportamento rúptil ao rúptil -dúctil, refletindo diferentes condições de deformação

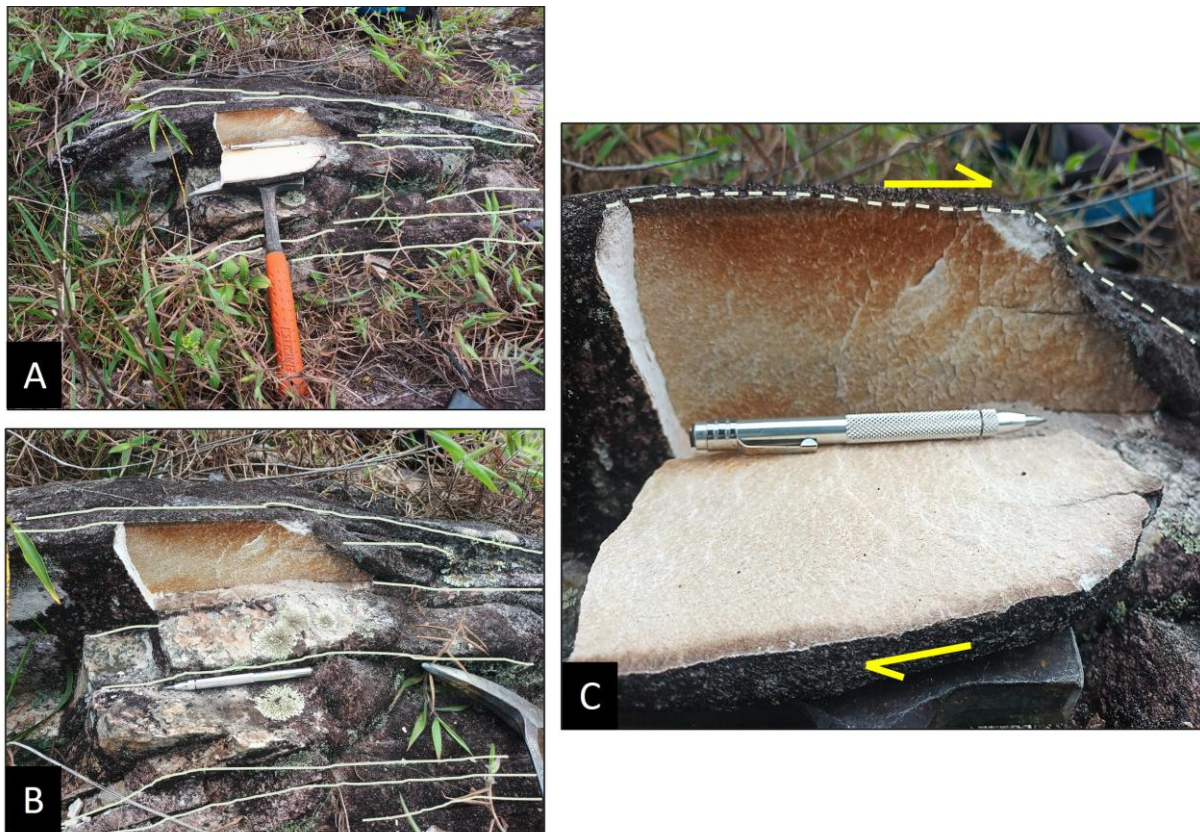
em distintos níveis crustais e unidades litológicas (e.g. Tchalenko, 1970, Petit, 1987).



Fonte: S.E.P. Santos.

O sequenciamento das estruturas associadas ao modelo de Riedel inicia-se com o desenvolvimento da zona de cisalhamento principal **Y** (Az 120°), a partir de uma antiga zona de fragilidade crustal. Em campo também foram mapeadas estruturas diversas no *trend* 120 (falhas, fraturas, zona de cisalhamento, direção de veio, foliação). Ainda no primeiro estágio formam-se os pares conjugados **R** (fraturas dextrais) e **R'** (fraturas sinistrais), orientados obliquamente à direção do cisalhamento principal. No segmento leste da serra, fraturas **R** de direção **N145** (FIG. 38) apresentam cinemática e coincidem com o *trend* do segmento, refletindo o movimento dextral dominante. **X** surge como estruturas conjugadas, corresponde aos veios **N30-45E/N40-N45E** acomodando a componente sinistral. No segundo estágio deformacional, desenvolvem-se as fraturas **P**, antitéticas ao sistema principal, caracterizadas por fraturas de direção **N80-100E** com componente sinistral. Em campo estas fraturas **P** seccionam veios **N30-35E**, e caracterizam boa parte da Serra das Cambotas.

Figura 38 - Afloramento de quartzito do SG Estrada Real na região do alto de Cocais com a representação da cinemática de reativação dextral sobre a sinistral.



Fonte: S.E.P. Santos.

O Lineamento Caeté

A análise integrada de dados de campo, mapeamento estrutural e extração de lineamentos demonstra que a expressão do Lineamento Caeté não corresponde a um traço único e contínuo, mas sim a um feixe de lineamentos de segunda ordem paralelos de direção aproximada N120°. Esse feixe se concentra na porção mediana da Serra das Cambotas, constituindo um corredor de deformação de largura quilométrica, no qual se agrupam falhas transcorrentes, fraturas subverticais e veios de quartzo dobrados.

O padrão em feixe reflete a complexidade da deformação e a superposição de fases tectônicas. A presença de estruturas rúpteis e rúptil-dúcteis (dobras assimétricas, foliações de cisalhamento S-C, zonas de fraturamento intenso e veios cisalhados) indica que a deformação foi distribuída em múltiplas discontinuidades, ao invés de se concentrar em uma única zona de cisalhamento principal.

No campo, a assinatura do feixe é marcada por:

- Fraturas e falhas subverticais com orientação dominante N120°, muitas vezes conjugadas a direções secundárias (N-S e NE-SW), configurando fraturas do sistema Riedel (R, R', X, Y, P).
- Dobras em “Z” e “S” em veios de quartzo e camadas quartzíticas, evidenciando sobreposição de cisalhamento sinistral (fase inicial) seguida de reativação dextral (fase subordinada).
- Foliação de cisalhamento S–C registrada em intrusões máficas e nos metassedimentos, compatível com regimes não coaxiais de deformação.

O reconhecimento do Lineamento Caeté como feixe de estruturas paralelas amplia sua interpretação: em vez de um simples lineamento geomorfológico, ele se comporta como uma zona de cisalhamento composta, ancorada em discontinuidades profundas e sucessivamente reativada ao longo do tempo geológico. Tal configuração sugere que sua função principal foi a de corredor tectônico, redistribuindo tensões regionais e funcionando como canal preferencial para circulação de fluidos hidrotermais durante a tectônica brasileira.

Assim, o Lineamento Caeté deve ser entendido não como uma linha isolada, mas como um conjunto integrado de estruturas que, em associação, definem um feixe transpressivo de orientação N120° na Serra das Cambotas, constituindo um dos elementos chave para a compreensão do arcabouço estrutural e da evolução metalogenética do Quadrilátero Ferrífero.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

O presente estudo permitiu redefinir a natureza do Lineamento Caeté na região da Serra das Cambotas, tradicionalmente representado como uma linha única, mas que, na realidade, corresponde a um feixe de lineamentos paralelos de direção N120°, concentrados principalmente na porção mediana da Serra das Cambotas. Esta nova interpretação amplia a compreensão da sua geometria e da sua função tectônica no contexto do Quadrilátero Ferrífero (QFe).

1. Feição em feixe estrutural

- O Lineamento Caeté deve ser entendido como uma zona de cisalhamento composta, marcada por múltiplas falhas, fraturas e veios subverticais, distribuídos em um corredor de deformação de largura variável, da ordem de quilômetros, cuja expressão é bem distinta no Complexo Caeté.
- Essa configuração evidencia que a deformação não se concentrou em uma única zona principal, mas foi distribuída em várias descontinuidades paralelas, refletindo a complexidade do regime tectônico regional.

2. Associação de estruturas dúcteis e rúpteis

- O feixe integra feições dúcteis (dobras assimétricas, foliações regionais, estruturas S–C) e rúpteis (falhas transcorrentes, fraturas conjugadas, veios de quartzo dobrados), revelando comportamento rúptil–dúctil condicionado por litologia e profundidade.
- A coexistência dessas feições indica a atuação de um regime transpressivo progressivo, registrado nas fases tardi evento Brasiliano.

3. Cinemática polifásica e modelo de Riedel

- O estudo das serras das Cambotas e do Garimpo revela a presença de um sistema Riedel com plano de fluxo orientado N120°, caracterizado por cinemáticas superpostas, onde o cisalhamento dextral sobrepõe-se ao sinistral.
- Essa configuração resulta das compressões E–W e S–N durante as orogenias brasileiras, que provocaram movimentação de blocos crustais e a formação de fraturas do sistema Riedel (R, R', X, P, Y) preenchidas ou não por veios de quartzo, representando duas fases de deformação.
- O reconhecimento dessas estruturas reforça a interpretação de que o Lineamento Caeté registra a sobreposição de múltiplas fases deformacionais ao longo da evolução tectônica do QFe.
- Ambas as fases sinistral e dextral estão ancoradas num mesmo plano de fluxo do sistema Riedel (Y = N120) indo constituir o Lineamento Caeté.

4. Comportamento mecânico e condicionantes litológicos

- O regime deformacional variou entre rúptil e rúptil–dúctil, condicionado por contrastes de competência entre quartzitos, formações ferríferas e rochas máficas da Suíte Pedro Lessa.
- O Sinclinal Cambotas e falhas de empurrão adjacentes (como Fazenda do Garimpo e Córrego do Garimpo) exerceram papel complementar na acomodação da deformação.

5. Validação metodológica e extração de lineamentos

- O método de extração automática possibilitou rápida obtenção de grande número de lineamentos, mas apresentou redundâncias associadas à iluminação direcional, que pode realçar ou mascarar planos estruturais.
- Na área estudada, o contraste do relevo reflete a competência litológica: serras quartzíticas e formações ferríferas sustentam lineamentos contínuos ou dissecados, enquanto o embasamento intemperizado gera traços difusos.
- A correlação entre extração manual e automática mostrou-se eficaz para refinar e validar os resultados, indicando que a combinação de diferentes fontes de

imagem, poucos ângulos de iluminação e parâmetros ajustados do algoritmo aumenta a precisão na detecção de lineamentos estruturais.

6. Importância regional e metalogenética

- O Lineamento Caeté integra o sistema de descontinuidades Az120°, associado ao Enxame de Diques Pará de Minas, compondo a arquitetura em megakink do setor meridional do Cráton São Francisco.
- Sua reativação repetida sugere papel de corredor tectônico de alta permeabilidade, favorecendo a circulação de fluidos hidrotermais e influenciando a metalogênese do QFe, especialmente na formação de depósitos de Fe e Au.

Síntese Final

O Lineamento Caeté não deve ser interpretado como uma linha isolada, mas sim como um feixe de estruturas paralelas de direção 120°, cuja organização registra a complexa história de reativações brasileiras sobre estruturas paleoproterozoicas. Essa reinterpretação destaca a relevância das zonas de cisalhamento compostas no entendimento do arcabouço estrutural e metalogenético do Quadrilátero Ferrífero, além de demonstrar o valor da integração entre geologia estrutural de campo, sensoriamento remoto e análise automatizada de lineamentos para decifrar sistemas de deformação em múltiplas escalas.

CAPÍTULO 7

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL KHATIEB, S. O.; NORMAN, J. W. **A possibly extensive crustal failure system of economic interest.** Journal of Petroleum Geology, [s. l.], vol. 4, nº 3, p. 319–327, 1982.

ALMEIDA, L. G. **Evolução Tectônica da porção central do sinclinal Dom Bosco, Quadrilátero Ferrífero - Minas Gerais.** 2004. 110 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2004.

ALMEIDA, F. F. M. **Ilhas oceânicas brasileiras e suas relações com a tectônica atlântica.** Terrae Didatica, [s. l.], vol. 2, nº 1, p. 3–18, 2006.

ALMEIDA, F. F. M. **O Cráton do São Francisco.** Revista Brasileira de Geociências, [s. l.], vol. 7, p. 349, 1977.

ALMEIDA, L. G. *et al.* **O Grupo Sabará no sinclinal Dom Bosco, Quadrilátero Ferrífero: uma revisão estratigráfica.** Revista Brasileira de Geociências, [s. l.], vol. 35, nº 2, p. 177–186, 2005. Disponível em: <http://ppegeo.igc.usp.br/index.php/rbg/article/view/9446/8822>. Acesso em: 5 set. 2025.

BALTAZAR, O. F.; ZUCCHETTI, M. **Lithofacies associations and structural evolution of the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero, Brazil: a review of the setting of gold deposits.** Ore Geology Reviews, v. 32, n. 3–4, p. 471–499, 2007.

BARDET, M. G. **Geologie du diamant.** Paris: [s. d.], 1977. vol. 3

BOUIFLANE, M. *et al.* **Mapping and characterization from aeromagnetic data of the Fom Zguid dolerite Dyke (Anti-Atlas, Morocco) a member of the Central Atlantic Magmatic Province (CAMP).** Tectonophysics, [s. l.], vol. 708, p. 15–27, 2017.

CAXITO, F. A. *et al.* **A magmatic barcode for the São Francisco Craton: Contextual in-situ SHRIMP U Pb baddeleyite and zircon dating of the Lavras, Pará de Minas and Formiga dyke swarms and implications for Columbia and Rodinia reconstructions.** Lithos, [s. l.], vol. 374–375, p. 105708, 2020.

CEDERBERG, J. *et al.* **U-Pb baddeleyite dating of the Proterozoic Pará de Minas dyke swarm in the São Francisco craton (Brazil) – implications for tectonic correlation with the Siberian, Congo and North China cratons.** GFF, [s. l.], vol. 138, nº 1, p. 219–240, 2016.

CHAVES, A. O. **Enxames de diques máficos de Minas Gerais – o estado da arte.** Geonomos, [s. l.], vol. 21, nº 1, p. 29–33, 2013. Disponível em: <https://periodicos.ufmg.br/index.php/revistageonomos/article/view/11749>. Acesso em: 5 set. 2025.

CHAVES, A. O. **Enxames de diques máficos do setor sul do Cráton do São Francisco – MG.** 2001. Tese (Doutorado em Geologia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001

CHAVES, A. O. **O enxame de diques de anfibolito do Cráton São Francisco meridional.** 2011. Tese (Livre-docência) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

CHAVES, A. O.; NEVES, J. M. C. **Radiometric ages, aeromagnetic expression, and general geology of mafic dykes from southeastern Brazil and implications for African-South American correlations.** Journal of South American Earth Sciences, [s. l.], vol. 19, nº 3, p. 387–397, 2005.

CHAVES, A. O; PIRES, A. C. C.; BRASIL, Mateus Filipe Andrade. **New Knowledge Update on Mafic Dyke Swarms of Minas Gerais (Brazil): Fragments of Ancient Large Igneous Provinces Highlighted by Aeromagnetometry.** Brazilian Journal of Geophysics, [s. l.], vol. 39, n° 2, p. 227, 2021. Disponível em: <https://www.sbgf.org.br/revista/index.php/rbgf/article/view/2096>. Acesso em: 5 set. 2025.

DADALTO, R. D. **Estudo estrutural, textural e geoquímico dos hematítitos da Mina do Pico e arredores, Itabirito - Quadrilátero Ferrífero - MG.** 2022. 146 f. - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2022.

DEMARCO, P. N. *et al.* **Aeromagnetic patterns in Southern Uruguay: Precambrian-Mesozoic dyke swarms and Mesozoic rifting structural and tectonic evolution.** Tectonophysics, [s. l.], vol. 789, p. 228373, 2020. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0040195120300561>.

DENG, Y.; XU, Y. G.; CHEN, Y. **Formation mechanism of the North–South Gravity Lineament in eastern China.** Tectonophysics, [s. l.], vol. 818, 2021.

DORR, J. V. N. II. **Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil.** US Geological Survey Professional Paper, [s. l.], 1969.

ENDO, I. *et al.* **Arquitetura da Litosfera do Quadrilátero Ferrífero e Regiões Adjacentes: Implicações ao Sistema Mineral.** 2024a, Ouro Preto. XI BRAZILIAN SYMPOSIUM ON MINERAL EXPLORATION. Ouro Preto: [s. d.], 2024. Disponível em: Acesso em: 12 dez. 2024.

ENDO, I. *et al.* **Estratigrafia e Evolução Estrutural do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais.** In: CASTRO, Paulo de Tarso Amorim; ENDO, Issamu; GANDINI, Antônio Luciano

(orgs.). **O Quadrilátero Ferrífero: Avanços do conhecimento nos últimos 50 anos.** Belo Horizonte: 3i Editora, 2020. p. 70–113.

ENDO, I. *et al.* **Estrutura litosférica do Cráton São Francisco meridional e Quadrilátero Ferrífero: implicações ao sistema mineral.** In: 51º Congresso Brasileiro de Geologia, 2024b, Belo Horizonte. Anais [...]. Belo Horizonte: [s.n.], 2024.

ENDO, I. *et al.* **Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. Escala 1:150.000: uma celebração do cinquentenário da obra de Dorr (1969).** [S.l.], 2019. Disponível em: <www.qfe2050.ufop.br>. Acesso em: 28 jul. 2023.

ENDO, I. *et al.* **Nappe Curral: uma megaestrutura alóctone do Quadrilátero Ferrífero e controle da mineralização.** Curitiba: [s. d.], 2005. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/001450523>. Acesso em: 7 dez. 2023.

FARINA, F.; ALBERT, C.; LANA, C. **The Neoarchean transition between medium- and high-K granitoids: Clues from the Southern São Francisco Craton (Brazil).** *Precambrian Research*, [s. l.], vol. 266, p. 375–394, 2015.

GABRIELSEN, R. H.; BRAATHEN, A. **Models of fracture lineaments — Joint swarms, fracture corridors and faults in crystalline rocks, and their genetic relations.** *Tectonophysics*, [s. l.], vol. 628, p. 26–44, 2014.

GABRIELSEN, R. H.; OLESEN, O. **The Concept of Lineaments in Geological Structural Analysis; Principles and Methods: A Review Based on Examples from Norway.** *Geomatics*, [s. l.], vol. 4, nº 2, p. 189–212, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2673-7418/4/2/11>.

GIRARDI, V. A. V. *et al.* **Mafic Dykes: Petrogenesis and Tectonic Inferences.** *In:* HEILBRON, Monica; CORDANI, Umberto G.; ALKMIM, Fernando F. (orgs.). São Francisco Craton, Eastern Brazil. 1. ed. [S. l.]: Springer Cham, 2017. p. 145–169. Disponível em: http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-01715-0_8.

GOMES, A. C. B. **Arcabouço estratigráfico e estrutural do Grupo Tamanduá na Serra das Cambotas, municípios de Barão de Cocais e Caeté, MG.** [S. l.], 2017.

GONZAGA, G. M.; TOMPKINS, L. A. **Principais Depósitos Minerais do Brasil.** *In:* *Geologia do diamante.* Aed. [S. l.]: DNPM-CPRM, 1991. vol. 4, p. 53–116.

GOULART, C. V.; SLUTER, C. R.; MENDES, C. W. **Evaluation of automatic extraction methods for morphostructural and magnetic lineaments from remote sensor images and aerogeophysical data.** *Geologia USP - Serie Cientifica*, [S. l.], vol. 22, nº 2, p. 87–108, 2022.

HALL, J. **Geophysical lineaments and deep continental structure.** *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, [S. l.], vol. 317, nº 1539, p. 33–44, 1986.

HAMANN, J. S. *et al.* **Digital topographic analysis and lineament interpretation south of the Lena Delta, North Siberia: Landscape expression of its tectonic activity.** *Geomorphology*, [S. l.], vol. 457, 2024.

HERZ, N. **Metamorphic rocks of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil.** [S. l.]: [S. d.], 1978.

HOBBS, W. H. **Earth features and their meaning: an introduction to geology for the student and the general reader.** [S. l.]: MACMILLAN, 1912.

HOBBS, W. H. **Lineaments of the Atlantic Border region**. Bulletin of the Geological Society of America, [s. l.], vol. 15, p. 483–506, 1904.

JAVHAR, A. *et al.* **Comparison of multi-resolution optical Landsat-8, Sentinel-2 and radar Sentinel-1 data for automatic lineament extraction: A case study of Alichur area, SE Pamir**. Remote Sensing, [s. l.], vol. 11, n° 7, 2019.

JONATHAN, M. *et al.* **A geospatial approach to delineate lineaments on the granite gneissic terrain of Mpwapwa district, Dodoma, central Tanzania**. Heliyon, [s. l.], vol. 10, n° 19, p. e38346, 2024. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2405844024143770>.

JUNQUEIRA-BROD, T. C. *et al.* **A província alcalina de goiás e a extensão do seu vulcanismo kamafugítico**. Revista Brasileira de Geociências, [s. l.], vol. 32, n° 4, p. 559–566, 2002.

LANA, C. *et al.* **The ancestry and magmatic evolution of Archaean TTG rocks of the Quadrilátero Ferrífero province, southeast Brazil**. Precambrian Research, [s. l.], vol. 231, p. 157–173, 2013.

LOBATO, L. M.; RIBEIRO-RODRIGUES, L. C.; VIEIRA, F. W. R. **Brazil's premier gold province. Part II: geology and genesis of gold deposits in the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero**. Mineralium Deposita, [s. l.], vol. 36, n° 3, p. 249–277, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s001260100180>.

MCCUAIG, T. C.; HRONSKY, J. **The mineral systems concept: the key to exploration targeting**. Applied Earth Science, [s. l.], vol. 126, n° 2, p. 77–78, 2017.

MEDEIROS DA SILVEIRA, L. **A evolução tectono-estrutural entre a Serra das Cambotas e a Sinclinal Gandarela - Quadrilátero Ferrífero.** [S. l.]: [s. d.], 2026.

MONTSION, R. M. *et al.* **Mapping structural complexity using geophysics: A new geostatistical approach applied to greenstone belts of the southern Superior Province, Canada.** Tectonophysics, [s. l.], vol. 812, 2021.

MORAES, L. G. *et al.* **Investigação magnetométrica do lineamento Azimute 125°.** Brasília: [s. d.], 2021. Disponível em: www.cprm.gov.br.

NUR, A. **The origin of tensile fracture lineaments.** Journal of Structural Geology. [S. l.]: [s. d.], 1982.

O'LEARY, D. W.; FRIEDMAN, J. D.; POHN, H. A. **Lineament, linear, lineation: Some proposed new standards for old terms.** Geological Society of America, [s. l.], 1976.

PETIT, J. P. **Criteria for the sense of movement on fault surfaces in brittle rocks.** Journal of Structural Geology, [s. l.], vol. 9, n° 5–6, p. 597–608, 1987. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0191814187901453>. Acesso em: 14 ago. 2025.

POHL, C.; VAN GENDEREN, J. L. **Review article Multisensor image fusion in remote sensing: Concepts, methods and applications.** International Journal of Remote Sensing, [s. l.], vol. 19, n° 5, p. 823–854, 1998.

QUEIROZ, A. G. *et al.* **Caracterização do sistema de lineamentos Azimute 120°: implicações ao sistema mineral do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais.** 2024, Belo Horizonte - MG. 51º Congresso Brasileiro de Geologia – 2024. Belo Horizonte - MG: [s. d.], 2024.

RAGHAVAN, V.; WADATSUMI, K.; MASUMOTO, S. **Automatic extraction of lineament information from satellite images using digital elevation data**. *Nonrenewable Resources*, [s. l.], vol. 2, n° 2, p. 148–155, 1993.

RENGER, F. E. *et al.* **Evolução sedimentar do Supergrupo Minas: 500 ma. de registro geológico no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil**. *GEONOMOS*, [s. l.], vol. 2, n° 1, p. 1–11, 1994.

RICHARDS, J. P. **Lineaments Revisited**. *SEG Discovery*, [s. l.], n° 42, p. 1–20, 2000.

ROCHA, L. G. M. **Caracterização magnética da porção central do lineamento azimuth 125°**. 2013. - Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

ROCHA, L. G. M. *et al.* **Geophysical characterization of the Azimuth 125° lineament with aeromagnetic data: Contributions to the geology of central Brazil**. *Precambrian Research*, [s. l.], v. 249, p. 273–287, 2014. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301926814001624>.

RODRIGUES, F. A. C. **Sistemas de cavalgamento e geologia estrutural da Serra das Cambotas, Quadrilátero Ferrífero (MG)**. [S. l.]: [s. d.], 1991.

ROMANO, R. *et al.* **Stabilization of the southern portion of the São Francisco craton, SE Brazil, through a long-lived period of potassic magmatism**. *Precambrian Research*, [s. l.], vol. 224, p. 143–159, 2013.

SANTOS, A. R. **Estudos sobre a tectônica de fraturamento na região do quadrilátero ferrífero e em partes do complexo migmatito-granulítico de minas gerais, com base em sensoriamento remoto**. [S. l.]: [s. d.], 1986.

SILVA, A. M. *et al.* **Mafic dike swarms of Quadrilátero Ferrífero and Southern Espinhaço, Minas Gerais, Brazil.** Revista Brasileira de Geociências, [s. l.], vol. 25, nº 2, p. 124–137, 1995. Disponível em: <http://bjg.siteoficial.ws/1995/n.2/6.pdf>.

SILVEIRA, L. M.; SANTOS, S. E. P.; ENDO, I. **Arcabouço lito-estrutural da Serra das Cambotas e região da Pedra Pintada, Quadrilátero Ferrífero - Barão de Cocais e Caeté, Minas Gerais: revisitado. 2024, Belo Horizonte - MG.** 51º Congresso Brasileiro de Geologia – 2024. Belo Horizonte - MG: [s. d.], 2024.

SIMMONS, G. C. **Geology and mineral resources of the Barao de Cocais area, Minas Gerais, Brazil.** [S. l.]: [s. d.], 1960.

SOLIMAN, A.; HAN, L. **Effects of vertical accuracy of digital elevation model (DEM) data on automatic lineaments extraction from shaded DEM.** Advances in Space Research, [s. l.], vol. 64, nº 3, p. 603–622, 2019.

SOUQUE, C. *et al.* **Fracture corridors and fault reactivation: Example from the Chalk, Isle of Thanet, Kent, England.** Journal of Structural Geology, [s. l.], vol. 122, p. 11–26, 2019.

TCHALENKO, J. S. **Similarities between Shear Zones of Different Magnitudes.** Geological Society of America, [s. l.], vol. 81, nº 6, p. 1625–1640, 1970.

ZUCCHETTI, M.; BALTAZAR, O. F. **Projeto Rio das Velhas; texto explicativo do mapa geológico integrado - escala 1:100.000.** Belo Horizonte, p. 116p, 1998.

APÊNDICE A – Tabela acervo de pontos do Lineamento Caeté na Serra das Cambotas

ID	X	Y	Altitude	Descrição	Estrutural	Estruturas do Lineamento Caeté
1	656382	7797112	982	Cachoeira da Cambota. Quartzito fino, branco, com níveis conglomeráticos de formação ferrífera paralelizados com a xistosidade. Domínio Quadrilátero Ferrífero.	S0: 120/35 Sn: 100/45 Li: 98/32 Lm: 90/40	Dobras abertas N-S geradas no Brasileiro Steps de falha 80/40 Sistema de veios de quartzo N40-N30E (6 unid)
2	655324	7797915	1148	Paredão fraturado em corte de estrada. Quartzito fino, branco, com estratificação PP, de composição essencialmente quartzo + sericita. Faz contato transicional com um xisto de fração pelítica, de composição quartzosa com muita sericita. Domínio Espinhaço.	Quartzito S0: 70/18, 55/48, 70/40 Sn: 50/55, 60/50, 75/90 Lest: 80/42, 96/38, 90/25, 75/19 Xisto Sc: 80/45 Ss: 75/50 Lm: 80/44 Sc: 80/45 Ss: 90/50 Li: 350/05	Veios de quartzo: N40E, N45E, N38E, N30E Fraturas: N80E, 270/45, N85E, 300/60, 150/40, 300/50, N90E, 290/50
3	655492	7798000	1129	Trilha. Veio de quartzo de aproximadamente 3 metros com fraturas de cisalhamento sinistral, hospedado no saprolito. Domínio Espinhaço.	Sc: 320/80 Ss: 340/85	Veio de quartzo N50E com foliação S/C
4	655554	7798213	1169	Trilha. Quartzito fino, branco, sericítico. Domínio Espinhaço. Ponto com visada para morro de quartzito da Serra de Cambotas, no domínio do Qfe, com predominância de fraturas num mesmo padrão, > 50 fraturas N85E.	S0: 115/60; 105/62 Sb: 110/60 Sn: 98/35 S0: 110/35 Sn: 78/20 S0: 105/48 Sn: 88/25 S0: 110/40 Sn: 75/23 S0: 115/65 Sn: 60/35	Veio de quartzo N45E-N30E

ID	X	Y	Altitude	Descrição	Estrutural	Estruturas do Lineamento Caeté
5	656894	7799837	1384	Serra das Cambotas. Meta-quartzo-arenito com estratificações cruzadas acanaladas de grande porte. Domínio Espinhaço.	Li: 220/22, 290/20, 280/15, 290/16, 285/16, 290/40, 285/40	O paredão é condicionado por fraturas N85E/N70E (10 unid) Veios de quartzo N30E, N25E
6	655790	77999471	1279	Quartzito fino, branco, com laminação paralela a foliação e estratificação PP. Domínio Espinhaço.	S0//Sn Sl: 100/50	Ponto com visada para o morro de quartzito da serra da Torre, no domínio do SG Minas, com predominância de fraturas num mesmo padrão, > 50 fraturas N60E
7	657635	7802935	1079	Quartzito fino, branco, laminado. Domínio Quadrilátero Ferrífero.	S0: 90/30, 95/28Sn: 70/30, 65/32Li: 95/28	Dobra local da reativação do lineamento Az 120º. Eixo: 65/15Flanco NW: 350/15Flanco SE: 150/55
8	654881	7804578	1212	Rocha máfica intemperizada de coloração avermelhada com foliação sub vertical Az 125.	Fs[c] Az 140 [Az 125]	Dique foliado Az 125
9	654793	7804635	1232	Meta-quartzo-arenito médio, de composição quartzo + sericita, com argilominerais, óxidos e textura granolepidoblástica. Domínio Espinhaço.	S0: 140/25, 140/30 Sf: 200/64, 180/45, 190/55, 185/66	Zona de cisalhamento vertical de rumo 120 de componente dextral
10	654635	7804616	1247	Meta-quartzo-arenito médio, de composição quartzo + sericita, com argilominerais, óxidos e textura granolepidoblástica. Domínio Espinhaço.	S0: 120/25, 128/31, 110/30, 90/30 Sn: 125/38	Fraturas N80-N90 (12 unid) Veio de quartzo dobrado em padrão Z com foliação interna dextral Eixo E-W: Az 110º; S0: 140/20 Sn: 90/40 Eixo N-S: 100/70; S0: 120/30 Sn: 110/50 Eixo E-W: 120/30; S0: 140/30

ID	X	Y	Altitude	Descrição	Estrutural	Estruturas do Lineamento Caeté
11	654393	7805224	1247	Meta-quartzo-arenito branco, fino, equigranular com textura granolepidoblástica e estratificação PP. Domínio Espinhaço.	-	Veio de quartzo N30E de espessura métrica com foliação interna dextral, seccionado por fraturas N80-N100 (40 unid/m) que deslocam o veio em direção sinistral
12	654387	7805239	1240	Meta-quartzo-arenito branco, fino, equigranular com textura granolepidoblástica e estratificação PP. Domínio Espinhaço.	-	Conjunto de fraturas N100-N120
13	656338	7805133	1049	Quartzito arcoseano, fino a médio, com xistosidade e textura granolepidoblástica. Afloramento com indicação de dois movimentos: dextral para sinistral. Domínio Quadrilátero Ferrífero.	-	Fraturas N145 (8 unid/m)
14	656482	7804825	1087	Quartzito arcoseano, fino a médio, com foliação S/C subvertical. Domínio Quadrilátero Ferrífero.	Sc: 230/79	Veios N-S
15	656450	7804970	1065	Quartzito branco, fino a médio, com xistosidade e textura granolepidoblástica. Domínio Quadrilátero Ferrífero.	-	Veios dobrados em z sinistral, veio de espessura métrica com estrutura pull apart Fraturas N150
16	656274	7805396	1016	Quartzito branco, fino, com xistosidade perpendicular ao acamamento e estratificação PP. Domínio Quadrilátero Ferrífero.	S0: 230/50, 205/35, 200/25Sn: 70/50Li: 130/18	Veios de quartzo N20, N30, N10 e dobra eixo 130

ID	X	Y	Altitude	Descrição	Estrutural	Estruturas do Lineamento Caeté
17	656576	7800624	1349	Quartzito fino, branco, laminado, com xistosidade e estratificação PP. Camadas sub horizontais. Domínio Quadrilátero Ferrífero.	S0: 10/15 Sn: 20/35 Li: 120/08 S0: 250/30, 270/10 Sn: 340/20 Li: 280/12, 285/10	Fraturas N50-N90 (4 unid)
18	656387	7800741	1351	Quartzito fino, branco, laminado, com xistosidade e estratificação PP. Camadas sub horizontais. Domínio Quadrilátero Ferrífero.	S0: 125/14 Sn: 70/20 Li: 108/16 S0: 115/20, Sn: 70/18 Li: 102/14 S0: 122/15, Sn: 70/20 Li: 090/15	Conjunto de fraturas N50-N75 Fraturas N-S
19	656272	7800846	1351	Quartzito fino, branco, laminado, com xistosidade e estratificação PP. Domínio Quadrilátero Ferrífero.	S0: 150/20 Li: 104/11	Dobras em Z abertas. Eixo da dobra: 150/10 Veios de quartzo N150 cisalhados (7 unid), com componente sinistral Veio de quartzo 120/30 com mineral ígneo (verde) dobrado. Eixo dobra no veio: N65/20 Outros veios: 50/45; 60/36
20	656277	7800723	1331	Saprólito de rocha máfica de coloração avermelhada, uma intrusão N70E, com foliação de cisalhamento.	S[C] 130/40 [135/60]	-
21	660531	7801204	946	Quartzito fino, branco, laminado, com xistosidade. Domínio Quadrilátero Ferrífero.	S0: 170/65; 170/60; 165/58 li: 105/20; 95/28 Sn: 110; 155/45	Fraturas N160 - 6 unid, N155 - 2 unid, 330/50 - 6 unid
22	654180	7806694	1265	Metaquartzoarenito branco com veio de quartzo Az 40° cisalhado em componente sinistral. Conjunto de fraturas Az 160°.	-	Fraturas Az 160°; 245/74 Veio de quartzo sinistral Az 40°
23	654411	7806946	1299	Metaquartzoarenito branco com estratificações plano-paralelas, granulometria média. Flanco normal sinclinal Cambotas. SGr. Espinhaço.	S0: 115/24 Sn: [105/44] Li: 195/06	-

ID	X	Y	Altitude	Descrição	Estrutural	Estruturas do Lineamento Caeté
24	654378	7806913	1282	Metaquartzarenito branco com estratificações plano-paralelas, granulometria média-grossa. Flanco normal sinclinal Cambotas. SGr. Espinhaço.	S0: 185/16 Sn: 125/18Li: 185/14	-
25	655981	7802905	1151	Serra das Cambotas. Quartzito branco laminado granulação fina. Vorticidade antihorária interpretada como possível dobra interna. Quadrilátero Ferrífero.	-	-
26	655782	7802838	1136	Serra das Cambotas, trilha serra do Garimpo. Quartzito sericítico branco com estratificação plano paralela. Veio de quartzo. Vorticidade anti-horária interpretada como estrutura da falha reversa de inversão da bacia. SGr. Espinhaço.	-	-
27	654635	7804616	1227	Metaquartzarenito branco com estratificações plano-paralelas, granulometria média-grossa. Flanco normal do sinclinal Cambotas. SGr. Espinhaço.	S0: 120/25; 128/31; 110/30; 90/30; 140/30; 120/30; 140/20 Sn: 125/38; 110/50; 90/40	Conjunto de fraturas N80-N90 Veio dobrado em "S". Atitude dos eixos: Eixo E-O: 120/30 Eixo N-S: 100/70 Eixo E-O: 110
28	654553	7804656	1255	Metaquartzarenito branco com estratificações plano-paralelas, granulometria fina. Flanco normal do sinclinal Cambotas. SGr. Espinhaço.	-	Fraturas Az 80° - 90° (12 unid/m)
29	656325	7800766	1354	Quartzito fino, branco, com estratificação PP. Domínio Quadrilátero Ferrífero.	S0: 135/28 Li: 88/21	Fraturas N-S
30	660521	7801207	946	Quartzito fino, branco, laminado. Domínio Quadrilátero Ferrífero.	S0: 170/65; 170/60; 165/58 Sn: 155/45; 110/25; 95/28; 105/20 Li: 105/20;	Fraturas N60E, N160, N155, 330/50

ID	X	Y	Altitude	Descrição	Estrutural	Estruturas do Lineamento Caeté
31	654427	7805212	1252	Metaquartzarenito branco com estratificações plano-paralelas, granulometria fina. SGr. Espinhaço.	S0: 155/32 Sn: 130/33 Li: 110/30	Faturas AZ 90° Faturas AZ 100° (7unid/m)
32	656323	7798125	1158	Quartzito fino, branco, com estratificação PP. Domínio Quadrilátero Ferrífero.	S0: 120/40; 120/35 Sn: 90/40	Faturas N85, > 50 faturas neste padrão

APÊNDICE B – Cruzamento de dados dos lineamentos morfoestruturais traçados manualmente

ID	Ordem	Coordenada E	Coordenada N	Und. Estratigráficas e Litodêmicas	Azimute	Extensão(m)
1	NW-SE	665952	7812110	Complexo Caeté	128	12.027
2	NE-SW	659334	7810073	Complexo Caeté	56	8.307
3	NE-SW	662703	7810915	Complexo Caeté	55	18.561
4	NE-SW	655730	7808936	Complexo Caeté	58	4.331
5	NW-SE	649613	7801217	Complexo Caeté	127	11.846
6	NW-SE	645598	7813949	SG Estrada Real	127	7.413
7	NE-SW	644226	7800602	Complexo Caeté	57	12.810
8	NW-SE	643611	7807811	Complexo Caeté	119	11.327
9	NW-SE	649791	7806372	Complexo Caeté	119	20.488
10	NW-SE	652893	7807819	Complexo Caeté	119	11.382
11	NW-SE	644833	7813628	SG Estrada Real	127	11.396
12	NW-SE	647877	7813909	Complexo Caeté	127	10317
13	NW-SE	646291	7809172	Complexo Caeté	300	9.670
14	NW-SE	645144	7811665	Complexo Caeté	300	4.766
15	NW-SE	643448	7801673	Complexo Caeté	127	11.847
16	NE-SW	643147	7801691	Complexo Caeté	57	10.129
29	NW-SE	642679	7789824	SG Minas	127	8.767
30	NW-SE	645741	7794257	SG Rio das Velhas	127	4.455
31	NW-SE	654772	7790142	SG Rio das Velhas	127	6.075
32	NW-SE	649071	7793689	SG Rio das Velhas	127	4.455
33	NW-SE	651146	7794557	SG Rio das Velhas	127	5.512
34	NW-SE	653845	7794995	SG Minas	127	12.509
35	NE-SW	651413	7799314	Complexo Caeté	57	11.981
36	NNE-SSW	640555	7805400	SG Rio das Velhas	27	7.782
37	NNE-SSW	650518	7801501	Complexo Caeté	27	5.886
38	NNE-SSW	646706	7803171	Complexo Caeté	27	6.886
39	N-S	649142	7805188	Complexo Caeté	5	10.970
40	NNE-SSW	642771	7803456	Complexo Caeté	27	6.831
41	NNE-SSW	645653	7804594	Complexo Caeté	27	4.988
42	NE-SW	642752	7809554	Complexo Caeté	57	9.643
43	NW-SE	653825	7812749	Complexo Caeté	300	3.844
44	NW-SE	648762	7814354	Complexo Caeté	127	9.991
45	NW-SE	640252	7814176	SG Estrada Real	300	3.844
46	NW-SE	640911	7814987	SG Estrada Real	301	5.384
47	NW-SE	651335	7815262	Complexo Caeté	127	5.321
48	NE-SW	655314	7810414	Complexo Caeté	58	2.493
49	NE-SW	656978	7814204	Complexo Caeté	58	4.616
50	NE-SW	658423	7816465	Complexo Caeté	58	3.431
51	NW-SE	667500	7805595	Complexo Guanhanês	128	12.027
52	NE-SW	660510	7807222	Complexo Caeté	58	8.212
53	NE-SW	662726	7805714	Complexo Caeté	58	3.456
54	NE-SW	660377	7805718	Complexo Caeté	58	5.992
55	NW-SE	666543	7814519	Complexo Caeté	128	4.064
56	NE-SW	665323	7815109	Complexo Caeté	58	4.615
57	NW-SE	661579	7813655	Suíte Pedro Lessa	128	5.701
58	NW-SE	657423	7814280	Complexo Caeté	128	5.701

ID	Ordem	Coordenada E	Coordenada N	Und. Estratigráficas e Litodêmicas	Azimute	Extensão(m)
59	NE-SW	663784	7812523	Complexo Caeté	56	12.819
60	NW-SE	645580	7804018	Complexo Caeté	147	7.782
61	NW-SE	667656	7800496	SG Rio das Velhas	147	7.781
62	NW-SE	668435	7802406	SG Minas	147	9.870
63	NW-SE	671042	7801178	SG Rio das Velhas	147	5.166
64	NW-SE	662093	7805062	Suíte Catas Altas da Noruega	147	5.166
65	NW-SE	657738	7805381	Suíte Catas Altas da Noruega	147	5.166
66	NW-SE	653865	7799941	SG Espinhaço	147	5.166
67	NW-SE	665762	7796592	SG Rio das Velhas	147	7.672
68	NNE-SSW	644759	7809796	Complexo Caeté	27	11.103
69	N-S	654907	7807282	SG Espinhaço	5	10.969
70	N-S	658175	7809051	Complexo Caeté	5	8.262
71	N-S	658376	7806763	Complexo Caeté	5	4.884
72	N-S	658759	7805355	Complexo Caeté	5	3.550
73	N-S	659953	7806253	Complexo Caeté	5	3.550
74	NNE-SSW	662022	7807683	Complexo Caeté	27	7.967
75	NE-SW	663960	7803231	Complexo Caeté	58	6.695
76	NW-SE	659675	7789337	SG Rio das Velhas	127	10.147
77	NE-SW	669498	7797002	SG Rio das Velhas	57	7.781
78	NE-SW	669597	7794645	Complexo Santa Bárbara	57	7.781
79	NE-SW	666040	7795554	SG Rio das Velhas	57	5.977
80	NE-SW	651518	7790846	SG Estrada Real	57	5.977
81	NNE-SSW	665190	7791865	Suíte Santa Rita	27	5.886
82	NNE-SSW	664631	7785747	Complexo Santa Bárbara	27	5.886
83	NW-SE	671007	7791805	Complexo Santa Bárbara	147	6.421
84	NW-SE	670602	7787195	Complexo Santa Bárbara	147	7.377
85	NW-SE	650633	7784593	SG Rio das Velhas	127	5.195
86	NW-SE	647629	7784928	SG Minas	127	12.185
87	NW-SE	647682	7813074	Complexo Caeté	127	3.970
88	NW-SE	646416	7811879	Complexo Caeté	300	3.295
89	NW-SE	642066	7813929	SG Estrada Real	300	3.296
90	NW-SE	640060	7812750	SG Estrada Real	300	3.296
91	NW-SE	649907	7809114	Complexo Caeté	300	3.295
92	NW-SE	643337	7809063	Complexo Caeté	300	3.798
93	NW-SE	656536	7796564	Suíte Catas Altas da Noruega	147	7.781
94	NE-SW	669066	7799028	Suíte Borrachudos	57	7.995
95	E-W	650144	7799846	Complexo Caeté	87	7.781
96	E-W	669666	7800739	Suíte Borrachudos	87	5.730
97	NW-SE	663276	7811096	Complexo Caeté	128	10.045
98	NE-SW	669217	7813143	Complexo Guanhões	58	4.331
99	NW-SE	651573	7813312	Complexo Caeté	127	11.070
100	NNE-SSW	648200	7811911	Complexo Caeté	27	5.064
101	NNE-SSW	649524	7815575	Complexo Caeté	27	2.184
102	NW-SE	649080	7814800	Complexo Caeté	147	6.166
103	NE-SW	669104	7808820	Complexo Guanhões	58	8.122
104	NW-SE	665572	7800546	SG Rio das Velhas	147	7.672
105	NE-SW	648621	7802160	Complexo Caeté	57	18.120
106	NW-SE	641945	7793342	SG Rio das Velhas	127	7.083

ID	Ordem	Coordenada E	Coordenada N	Und. Estratigráficas e Litodêmicas	Azimute	Extensão(m)
107	NW-SE	641651	7795390	SG Rio das Velhas	127	7.083
108	NW-SE	653171	7796903	Complexo Caeté	127	7.083
109	E-W	646961	7797667	Complexo Caeté	99	12.686
110	E-W	650650	7800484	Complexo Caeté	99	16.368
111	E-W	650132	7799284	Complexo Caeté	99	14.196
112	E-W	664762	7800524	SG Rio das Velhas	99	16.367
113	E-W	653666	7802973	Complexo Caeté	99	10.568
114	E-W	643615	7806131	Complexo Caeté	99	10.264
115	E-W	651166	7806412	Complexo Caeté	99	10.568
116	E-W	663779	7804590	Complexo Caeté	99	11.194
117	E-W	665811	7802621	Complexo Caeté	99	11.194
118	E-W	660540	7809609	Complexo Caeté	99	12.727
119	NW-SE	645545	7797026	Complexo Caeté	140	8.061
120	NW-SE	648566	7797168	Complexo Caeté	140	8.061
121	NW-SE	649942	7797476	Complexo Caeté	140	8.061
122	NW-SE	643095	7791052	SG Minas	140	8.061
123	NW-SE	648049	7791285	SG Minas	140	8.061
124	NW-SE	655319	7788009	SG Rio das Velhas	140	8.061
125	NW-SE	664318	7787124	Complexo Santa Bárbara	140	8.060
126	NW-SE	661918	7783995	SG Rio das Velhas	140	6.630
127	NW-SE	663332	7792183	SG Rio das Velhas	140	9.911
128	NW-SE	664485	7783770	Complexo Santa Bárbara	140	5.533
129	NW-SE	669351	7811337	Complexo Guanhões	140	8.060
130	NNW-SSE	645292	7791263	SG Minas	160	8.522
131	ENE-WSW	642815	7787597	SG Estrada Real	69	6.993
132	NNW-SSE	655659	7806222	SG Espinheiro	160	5.829
133	ENE-WSW	654984	7789976	SG Rio das Velhas	69	5.143
134	ENE-WSW	656971	7800829	Suíte Catas Altas da Noruega	69	5.143
135	NNW-SSE	653309	7814580	Complexo Caeté	160	2.396
136	NNW-SSE	655505	7794954	SG Minas	160	4.039
137	ENE-WSW	656249	7805506	SG Espinheiro	69	3.851
138	NNE-SSW	655549	7803448	SG Espinheiro	27	4.338
139	NE-SW	656600	7816222	Complexo Caeté	58	4.616
140	NW-SE	652133	7816363	Complexo Caeté	127	3.254
141	NW-SE	653928	7816244	SG Espinheiro	127	3.254
142	NW-SE	639867	7810799	SG Estrada Real	300	2.696
143	SE	648304	7808773	Complexo Caeté	120	19.199
144	SE	648335	7804693	Complexo Caeté	120	9.985
145	SE	644546	7807271	Complexo Caeté	119	11.325
146	SE	649791	7806372	Complexo Caeté	119	20.486
147	SE	650679	7807814	Complexo Caeté	120	5.860
148	SE	652893	7807819	Complexo Caeté	119	11.381
149	SE	655444	7805328	SG Espinheiro	120	8.077