



ISSN: 2447-3359

REVISTA DE GEOCIÊNCIAS DO NORDESTE

Northeast Geosciences Journal

v. 10, nº 2 (2024)

<https://doi.org/10.21680/2447-3359.2024v10n2ID36637>



Dinâmica geomorfológica de depósitos colúviais do Planalto da Borborema (Nordeste do Brasil) através do emprego de microscopia eletrônica de varredura

Geomorphological dynamics of colluvial deposits in the Borborema Plateau (Northeast Brazil) through the use of scanning electron microscopy

Antonio Carlos de Barros Corrêa¹; José Danilo da Conceição Santos²; Drielly Naamma Fonsêca da Silva³; Daniel Rodrigues de Lira⁴; Telma Mendes da Silva⁵

¹ UFPE, Programa de Pós-graduação em Geografia, Recife/PE, Brasil. Email: antonio.correa@ufpe.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9578-7501>

² UFPE, Programa de Pós-graduação em Geografia, Recife/PE, Brasil. Email: jose.danilo@ufpe.br
ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-6830-5803>

³ Universidade Tecnológica Metropolitana, Departamento de Industria, UTEM, Santiago/Chile. Email: dfonseca@utem.cl
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1374-8697>

⁴ UFPE, Programa de Pós-graduação em Geografia, Recife/PE, Brasil. Email: daniel.rlira@ufpe.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9559-2480>

⁵ UFRJ, Programa Pós-graduação em Geografia, Rio de Janeiro/RJ, Brasil. Email: telmageo@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8295-6158>

Resumo: No Planalto da Borborema, Nordeste do Brasil, a definição dos tipos de processos superficiais envolvidos na deposição de sedimentos colúviais e aluvio-colúviais permanece elusiva. A maior parte das interpretações estão alicerçadas a partir das relações de campo e macrofábrica das seções estratigráficas. O presente estudo propõe uma avaliação das superfícies dos grãos de areia de quartzo e microclina, na fração 200-250µm, proveniente da matriz de cascalheiras datadas desde o último máximo glacial até o período histórico, por meio do emprego da análise micromorfológica dos grãos, assistida por microscópio eletrônico de varredura ambiental, no intuito de avaliar os processos subaéreos aos quais estiveram submetidos. As texturas superficiais encontradas nos grãos de areia foram agrupadas visualmente e quantificadas com base na metodologia adotada para depósitos quaternários com trajetórias erosivo/depositivas conhecidas. A história indicada pelas texturas de superfície aponta para a presença de controles climáticos (mecânicos e intempéricos), além do tempo de soterramento, sobre a fisionomia dos grãos, com maior incidência de feições mecânicas nos grãos provenientes de deposição recente e das áreas topograficamente mais baixas da base das encostas do Planalto sob climas semiáridos.

Palavras-chave: Micromorfologia; Depósitos de Encosta; Ambiente Semiárido;

Abstract: In the Borborema Highlands, Northeast Brazil, the definition of the types of surface processes involved in the deposition of colluvial and alluvial-colluvial sediments remains elusive. Most interpretations rely on field-based and macrofabric observation along stratigraphic sections. The present study proposes an evaluation of the surfaces of quartz and microcline sand grains in the 200-250µm fraction, originating from gravel matrices dating from the last glacial maximum to the historical period, through the use of micromorphological analysis, assisted by an environmental scanning electron microscope, to evaluate the subaerial processes to which they were subjected. The surface textures found in the sand grains were visually grouped and quantified based on the methodology adopted for Quaternary deposits with known erosion/depositional trajectories. The history indicated by the surface textures points to the presence of climatic controls (mechanical and weathering), in addition to burial time, on the aspect of the grains, with a greater incidence of mechanical features in those originating from recent deposition and topographically lower areas in the surroundings of Highland's escarpments under semi-arid climates.

Keywords: Micromorphology; Hillslope Deposits; Semi-arid Environment;

Recebido: 13/06/2024; Aceito: 29/07/2024; Publicado: 22/10/2024

1. Introdução

As características geomórficas e os depósitos de encostas do Planalto da Borborema são atribuídos à ocorrência de fluxos superficiais torrenciais controlados por mudanças na entrada de energia do sistema climático ao longo do pleistoceno final e holoceno (Corrêa, 2001; Corrêa e Monteiro, 2020; Listo *et al.*, 2023). No entanto, a definição dos tipos de processos superficiais envolvidos permanece elusiva, e interpretada a partir das relações de campo e macrofábrica das seções estratigráficas. Diante deste cenário, surge a necessidade de análises metodológicas que melhor esclareçam e expliquem esses tipos de processos superficiais.

A análise micromorfológica dos grãos, assistida por microscópio eletrônico de varredura ambiental (ESEM) consiste em uma técnica que permite a obtenção de micrografias de amostras *in natura* sem necessidade de metalização da superfície. Muitos autores avaliaram as características texturais de grãos de quartzo que evoluíram de vários ambientes deposicionais (Vos *et al.*, 2014; Armstrong-Altrin *et al.*, 2022; Hossain *et al.*, 2024), assim como em minerais pesados e granada, por exemplo (Velbel *et al.*, 2007; Bónová *et al.*, 2024). A principal premissa a nortear o estudo das feições superficiais do quartzo na fração areia de 200-250 μm , segundo Trewin (1995) parte da ideia de que se pode tirar conclusões a respeito dos ambientes de deposição e dos tipos de transporte a partir das feições superficiais deste mineral.

Destarte, a partir do agrupamento visual e quantificação das texturas superficiais dos grãos de areia, e fundamentado na metodologia adotada para a análise de depósitos quaternários com histórias sedimentares conhecidas, incluindo grãos de origem eluvial, coluvial e aluvial (Culver *et al.*, 1983; Goudie e Bull, 1984; Bull *et al.*, 1987), propomos uma avaliação dos grãos de areia de quartzo e microclina (devido sua abundância na área de estudo) de depósitos identificados como parte da matriz de cascalheiras litoestratigraficamente reconhecidas como derivadas de fluxos de detritos ou de lama por meio do emprego da análise de microscopia eletrônica de varredura, em um setor elevado da encosta ocidental do Planalto da Borborema.

2. Metodologia

A área de estudo corresponde à escarpa ocidental/meridional do Planalto da Borborema, estruturada sobre o maciço da Serra da Baixa Verde, no centro norte do Estado de Pernambuco a 400 km a oeste da cidade do Recife. Consiste em um batólito sienítico Neoproterozoico topograficamente proeminente que cortou complexos metamórficos Neo e Mesoproterozoicos menos resistentes (Corrêa e Monteiro, 2020). Compreendendo uma superfície total de aproximadamente 400 km². O maciço da Serra da Baixa Verde forma o divisor regional entre os estados de Pernambuco e Paraíba, separando as bacias hidrográficas do rio Piancó, ao norte, do rio Pajeú, ao sul. O estudo concentrou-se sobre alvéolos com preenchimento coluvial em cabeceiras de drenagem sobre a superfície de cimeira acima da cota de 1.000 metros, bem como em rampas coluviais no sopé da encosta entre 500 e 600 m de altitude (Figura 1).

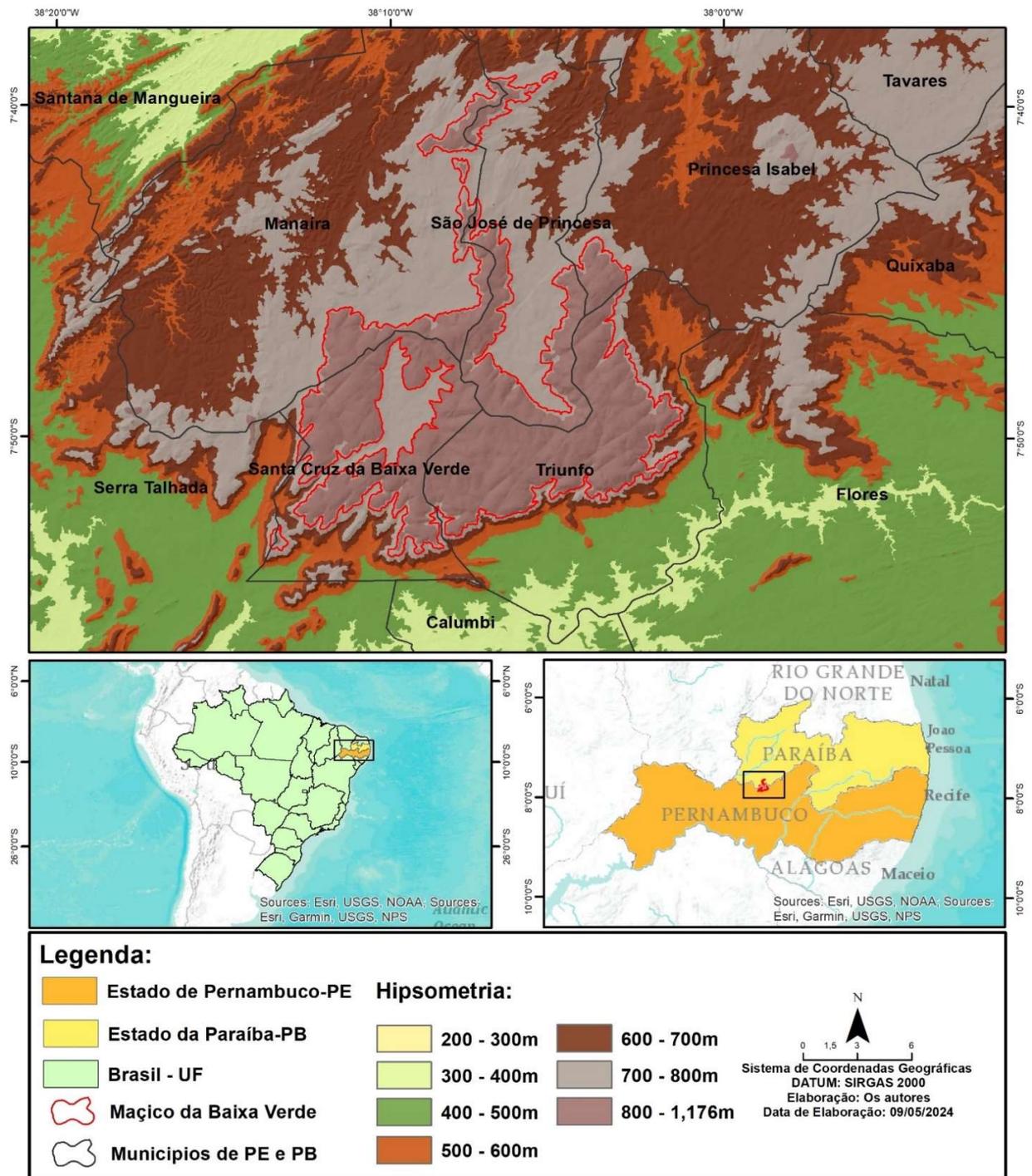


Figura 1 – Mapa Hipsométrico da escarpa ocidental do Planalto da Borborema (PE), com localização do maçico da Serra da Baixa Verde e seu entorno.
Fonte: Autores (2024).

A ocorrência de alvéolos em cabeceiras não canalizadas e outras formas de deposição coluvial foram utilizadas como diretrizes para a escolha das áreas de amostragem. O estabelecimento da morfoestratigrafia da área, associada à datação absoluta dos sedimentos por Luminescência Opticamente Estimulada (LOE) em trabalhos prévios (Corrêa, 2001; Corrêa e Monteiro, 2020), permitiu elucidar a gênese dos depósitos através da correlação entre as estruturas deposicionais, a macrofábrica dos sedimentos e os processos morfogenéticos associados, atuando dentro de uma determinada escala temporal. Uma unidade morfoestratigráfica mapeável pode ser definida como um corpo rochoso – e por extensão coberturas superficiais incoesas - identificado primariamente pela forma superficial que exhibe (Lowe e Walker, 2015).

Após a seleção das áreas amostrais, foram elaborados mapas morfoestratigráficos que indicam a relação entre as formas do relevo e a geologia de superfície (Hughes, 2010; Böse, 2014; Catuneanu e Zecchin). Para tanto optou-se que os mapas oferecessem uma visão abrangente das áreas de coleta acompanhadas de seções estratigráficas ilustrativas das sequências de coberturas superficiais que estruturam as paisagens (Corrêa, 2001).

Os procedimentos de amostragem para análise micromorfológica por Microscopia Eletrônica de Scanner (MEV) de grãos na fração 200 - 250 μm foram guiados pelos níveis estratigráficos datados por LOE (Corrêa, 2001; Corrêa e Monteiro, 2020). Os sedimentos foram coletados nos mesmos níveis das seções verticais com o intuito de refinar as análises acerca da história de transporte e sedimentação associada à deposição dos colúvios e suas possíveis implicações ambientais, atuais e pretéritas.

Foram coletadas treze amostras provenientes de quatro áreas de coleta, sendo duas localizadas na cimeira do maciço entre 850 e 1100 m de altitude, em ambiente subúmido com 1.300 mm de precipitação anual, e duas na encosta meridional, entre 550 e 600 m, no domínio semiárido com totais anuais inferiores a 600 mm (Corrêa *et al.*, 2019) (Figura 2).

As amostras foram submetidas à análise em microscópio eletrônico ambiental na Universidade Federal de Pernambuco, Recife. O aparelho utilizado foi o modelo Electroscan 2020, que permite a análise de amostras não metalizadas e, portanto, favorece o estudo das feições superficiais dos grãos de quartzo ou microclina, sem a exigência de nenhum tipo de tratamento prévio que pudesse mascarar ou alterar as feições adquiridas pelo tipo de transporte ou intemperismo sofrido no ambiente de encosta.

A metodologia aplicada foi a de Goudie e Bull (1984) e a preocupação básica foi o diagnóstico de feições de transporte sobrepostas às feições primárias e de intemperismo químico. As amostras foram separadas em porções de 10g e tratadas com um agente desfloculante (hexametáfosfato de cálcio) para a limpeza das partículas de argila agregadas à superfície.

Os grãos de areia na fração entre 200 – 250 μm foram selecionados aleatoriamente e montados em stubs sobre uma base aderente inerte de resina. A escolha desta fração granulométrica, em particular, deve-se à premissa investigada por Krinsley e Doornkamp (1973), de que esta fração representa o ponto de ruptura entre o predomínio do transporte por suspensão (grãos < 200 μm) e por tração (grãos > 400 μm). Os primeiros teriam, portanto, um predomínio de feições herdadas do intemperismo químico, enquanto os últimos teriam suas feições superficiais muito influenciadas pela abrasão. No entanto há ainda que se considerar as características morfológicas próprias de cada grão, herdadas da mineralogia, cristalografia e proveniência litológica primária (Mahaney, 2002).

Foram analisados 100 grãos por amostra, e procurou-se dar um caráter qualitativo detalhado ao estudo, com a produção de diversas imagens, em várias escalas de ampliação, para cada grão. Em seguida, Os resultados oferecem um panorama das morfologias de intemperismo e desgaste mecânico impostas pelos ambientes de encosta da cimeira e entorno do maciço da Serra da Baixa Verde às superfícies dos grãos de areia na fração 200-250 μm de quartzo e microclina. Tendo em vista que esses foram os dois minerais presentes na área capazes de guardar em suas superfícies as marcas dos processos de alteração alvo desse estudo.

Foram selecionadas 32 categorias de feições superficiais a partir da combinação daquelas propostas por Goudie e Bull (1984) e Trewin (1995). Estas foram agrupadas em características de origens mecânicas, morfológicas e químicas, e numeradas de 1 a 32 (Tabela 1). Essa numeração foi utilizada para a construção dos quadros-síntese de ocorrência de tipos de feições superficiais para cada uma das 13 amostras estudadas. As amostras foram identificadas pelo prefixo SBV, indicando “sedimento do maciço da Serra da Baixa Verde”, seguida da numeração do ponto de amostragem sobre as seções verticais (ex: SBV11; SBV12; SBV21 etc.).

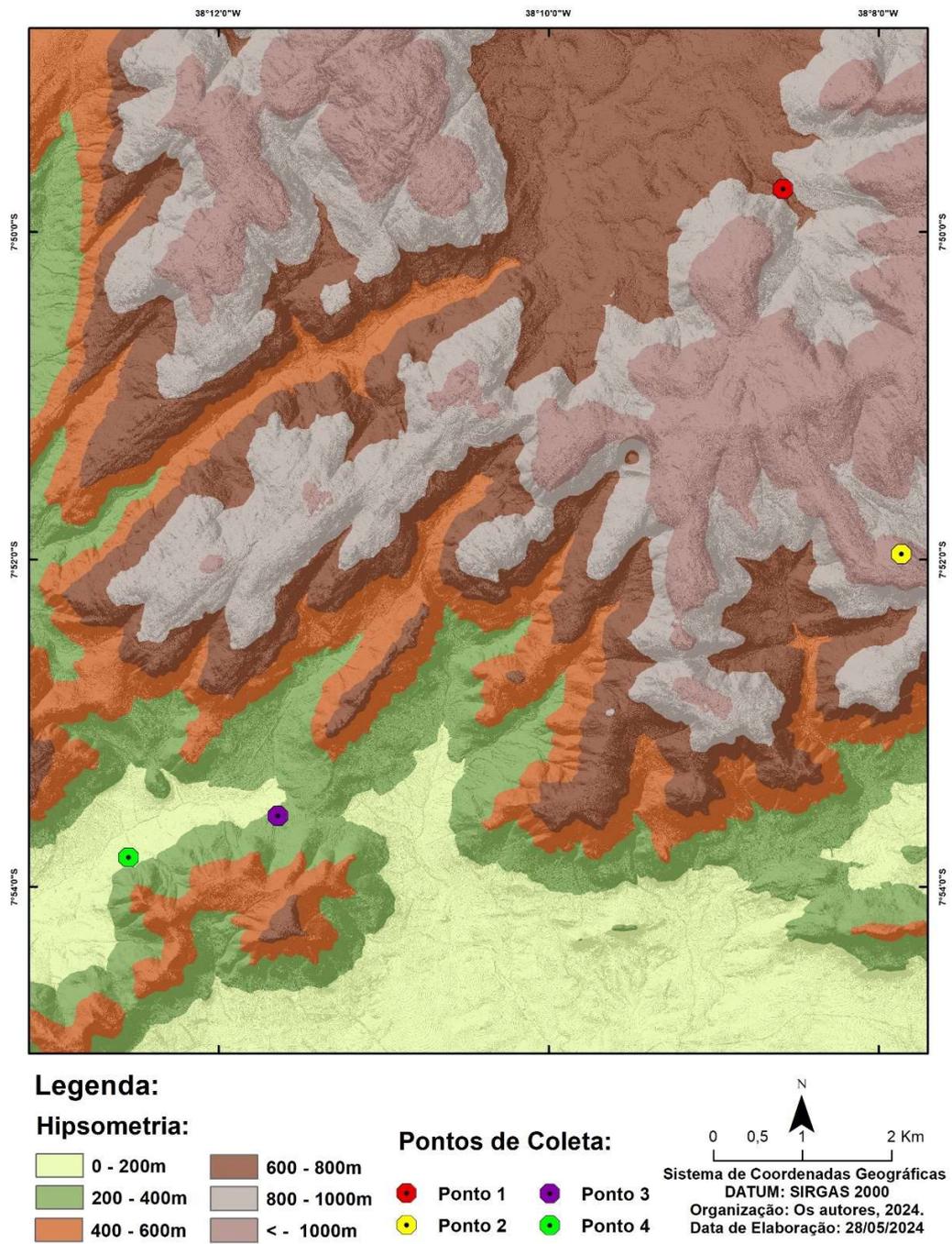


Figura 2 – Mapa Hipsométrico das encostas meridionais e cimeira do maciço da Serra da Baixa Verde com distribuição dos pontos de coleta de sedimentos para análise micromorfológica por MEV.
Fonte: Autores (2024).

Tabela 1 – Tipos de feições superficiais analisadas nos grãos de quartzo e microclina da área de estudo, a partir de seu agrupamento em feições de origem mecânica, morfológica e química.

TIPOS DE FEIÇÃO SUPERFICIAL		
FEIÇÃO MECÂNICA	FEIÇÃO MORFOLÓGICA	FEIÇÃO QUÍMICA
1. Rachaduras		
2. Abrasão das arestas		
3. Blocos fraturados (< 10 μ)		1. Cavidades de dissolução orientadas
4. Blocos fraturados (>10 μ)		2. Anastomose
5. Fraturas conchoidais (< 10 μ)	1. Arredondado	3. Superfície fosca
6. Fraturas conchoidais (>10 μ)	2. Subarredondados	4. Cavidades de dissolução
7. Degraus retos	3. Subanguloso	5. Fraturas de dissolução
8. Degraus arcuados	4. Anguloso	6. Escamação
9. Estrias paralelas	5. Baixo relevo	7. Carapaça
10. Indentações imbrincadas	6. Relevo médio	8. Cavidade amorfa
11. Placas fraturadas	7. Alto relevo	9. Sílica euhedral
12. Cristas meandrantes		
13. Ranhuras retilíneas		
14. Ranhuras curvas		
15. Cavidades mecânicas em “V”		
16. Concavidades discoidais		

Fonte: Autores (2024).

Os resultados foram agrupados em tabelas, por percentagens de ocorrência das feições superficiais analisadas. O critério de avaliação é visual e, portanto, sujeito a um grau de subjetividade inerente à própria técnica.

O mapeamento geomorfológico de detalhe das áreas de coleta visou o estabelecimento das unidades geomórficas, em ambiente SIG, por meio do software QGIS 3.3.4 tendo como base o Modelo Digital de Terreno – MDT da base de dados do Pernambuco Tridimensional - PE3D com resolução espacial de 1 metro e a Ortofoto em escala de 1:5.000, no qual foi gerado relevos sombreados com azimutes de insolação de 315° e 65° de elevação para melhor destacar as feições de cristas e escarpas, separando-as das feições deposicionais planas de fundo de vale. A classificação das formas seguiu a proposta de Corrêa (2001) e Corrêa e Monteiro (2020): Cimeiras e encostas rochosas e eluviais (CER e CE), encostas coluviais (EC), rampas de colúvio-alúvio (RCA); terraços indiferenciados (TI), terraço em leque aluvial (TLA) e planície aluvial (PA).

A interpretação das imagens do MDT aliada ao trabalho de campo possibilitou a identificação *in loco* das feições deposicionais e a validação das unidades mapeadas em gabinete. Inicialmente as encostas foram separadas das rampas de

pedimentos pela declividade e extensão, estando estas últimas restritas ao entorno semiárido do maciço sob declividades inferiores a 7° e extensões contínuas superiores a 100 metros. Em seguida, as encostas foram subdivididas pela presença ou ausência de cobertura coluvial.

Em campo, essa distinção ocorre pela ocorrência de *knickpoints* topográficos bem marcados entre as rampas de acumulação e os setores íngremes à montante estruturado em rocha ou elúvio *in situ*. A essa evidência morfológica, foi somada as características dos sedimentos contendo estruturas típicas dos depósitos de encostas (ex: alternância entre cascalheiras e depósitos lamosos, linhas de pedra, imbricação dos clastos maiores no sentido do sopé da encosta etc.) O mesmo critério foi adotado para as superfícies de cimeira contíguas aos setores rochosos-eluviais das encostas, sendo esses também diferenciados por apresentarem cobertura eluvial contínua, o que resultou na unidade “cimeira eluvial”.

Por fim, o domínio fluvial teve suas unidades morfoestratigráficas separadas em função da morfologia, materiais formadores e contemporaneidade das formas. Assim, distinguiu-se as planícies aluviais ativas com acumulação atual, adjacente aos canais, dos setores mais elevados para além das margens formando níveis de terraços, os quais não puderam ser individualizados por critério altimétrico nas áreas de sua ocorrência.

A continuidade topográfica dos terraços com as baixas encostas por vezes ocorre sem perda de continuidade lateral da primeira forma, que se eleva com rampa colúvio-aluvial colmatando antigos alvéolos erosivos pela interdigitação da sedimentação de encosta com os fluxos laminares da planície durante as enchentes. Em pontos isolados da junção entre as planícies e as encostas, encontram-se antigos leques aluviais que foram reafeiçoados e incorporados ao topo dos terraços, dos quais resta na paisagem uma morfologia lobada com ápice voltado para a encosta (Figura 3).



Figura 3 – Formas de acumulação e erosão em planície aluvial do Maciço da Serra da Baixa Verde, PE. PA (Planície Aluvial), TLA (Terraço em leque aluvial reafeiçoado), Linha amarela (morfologia lobada das frentes dos leques).
Fonte: Autores (2024).

3. Resultados e discussão

Uma avaliação das feições superficiais por tipo de categoria foi efetivada pelo total percentual de ocorrência dos grãos, provenientes de cada uma das 13 amostras analisadas, e o resultado organizado em forma de tabela (Tabela 2). Entre

parênteses encontra-se o percentual de grãos com ocorrência dominante de cada tipo de feição, equivalente a mais que 75% das feições identificadas em superfície. Assim, por exemplo, para a amostra SBV11 46% dos grãos analisados exibiram feições de desgaste mecânico, sendo que em 38% desses as feições mecânicas foram dominantes.

Os resultados por amostra estão nos tabela 2 a 6. Cada amostra é composta por 100 grãos de areia na fração 200-250 μ m contendo quartzo e/ou microclina. As representações dos dados exprimem a média da percentagem de ocorrência de cada propriedade diagnosticada por grão, sendo representados no quadro pelos símbolos correspondentes às feições de ocorrência abundante (valor 4), comuns (valor 3), esparsas (valor 2) e raras (valor 1). A partir desses valores, foi possível estabelecer a média relativa à frequência das feições superficiais para os 100 grãos de cada amostra, que fundamentado no trabalho de Trewin (1995), permitiu estabelecer uma interpretação qualitativa para a ocorrência percentual das feições diagnósticas nas superfícies dos grãos representada pela seguinte legenda: > 75% (abundante); 25 -75% (comum); 5-25% (esparso); e <5% (raro).

Tabela 2 – Percentagem de ocorrência de feições mecânicas, morfológicas e químicas por amostra (100 grãos), e percentagem de grãos com ocorrência de feições superficiais dominantes (>75%) por categoria. A cor verde indica amostras do ambiente subúmido (cimeiras e altas encostas), e a cinza o ambiente semiárido (baixas encostas).

Amostra	% do total de categorias de feição mecânica	% do total de categorias de feição morfológica	% do total de categorias de feição química
SBV11	46 (38)	40 (12)	35 (16)
SBV12	47 (36)	28 (50)	33 (43)
SBV21 (regolito)	32 (28)	28 (100)	34 (36)
SBV22	39 (31)	33 (83)	57 (55)
SBV23	47 (33)	28 (30)	45 (29)
SBV41	68 (26)	28 (25)	58 (52)
SBV42	64 (24)	28 (60)	60 (42)
SBV51	73 (28)	28 (57)	57 (53)
SBV52	62 (56)	31 (47)	65 (39)
SBV53	76 (41)	28 (71)	63 (20)
SBV61	69 (27)	28 (75)	65 (49)
SBV62	70 (28)	28 (75)	52 (39)
SBV63	70 (70)	28 (83)	52 (28)

Fonte: Autores (2024).

3.1 Área de Amostragem 1

A primeira área de amostragem situa-se numa rampa coluvial ao norte do núcleo urbano de Santa Cruz da Baixa Verde, no Engenho Boa Esperança. A rampa de colúvio está localizada na base de uma elevação circular com topo a 1.014 metros. O ponto de coleta encontra-se a 840 metros de altitude, em uma ravina situada no setor médio-inferior da encosta coluvial de morfologia convexa (Figura 4A e Figura 4C)

Da base ao topo, o perfil descrito (Figura 4B) possui aproximadamente 2,05 metros, compreendendo 50 cm de conglomerado basal e 155 cm de colúvio vermelho fino. O contato entre o embasamento sienítico e o conglomerado basal não foi observado no perfil estudado, contudo ele aflora em outros pontos ao longo do fundo da ravina nas proximidades do transecto estudado.

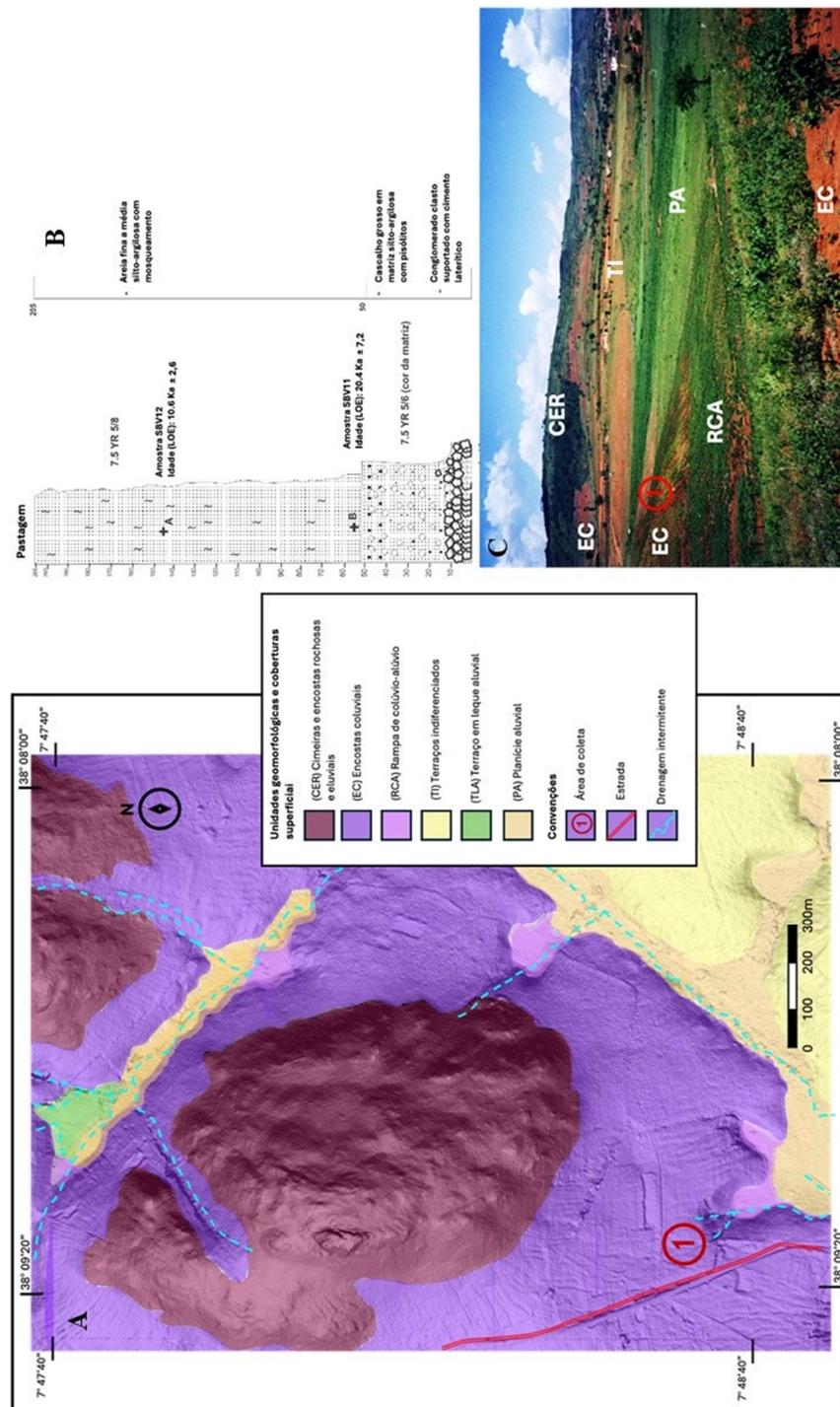


Figura 4 – Unidades geomorfológicas e estratigráficas da área de amostragem 1. Fonte: Autores (2024).

Duas amostras foram coletadas e datadas pelo método da LOE na camada de colúvio fino, a 55 e 145 cm da base do perfil, resultando nas idades médias de 20,4 Ka ± 7,2 e 10,6 Ka ± 2,6, respectivamente (Corrêa e Monteiro, 2020). As

amostras submetidas à análise de feições superficiais dos grãos de areia por MEV foram coletadas no mesmo nível estratigráfico da datação (tabela 3). Para fins de ilustração das fisionomias identificadas foram escolhidos grãos representativos dos níveis estratigráficos amostrados (Figura 4B).

Na área 1 foram escolhidos os grãos SBV11b e SBV12a como representativos dos tipos de feições superficiais predominantes em cada nível. A superfície do grão SBV11b exibe abrasão de aresta com ocorrência de nova fase de formação de cavidades de dissolução, enquanto o SBV12a corresponde a um grão com relevo alto, arestas suavizadas – possivelmente pelo transporte – e cavidades de dissolução (Figura 5).

Tabela 3 – Síntese das feições superficiais identificadas nos 100 grãos analisados de cada ponto de amostragem da área 1, SBV11 e SBV12.

	Mecânica																Morfológica						Química									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
SBV11	□	■	■	■	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	■	■	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
SBV12	□	■	□	□	■	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	■	□	■	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□

< 5% - raro
 5 a 25% - esparsos
 25 a 75% - comuns
 > 75% - abundantes

Fonte: Autores (2024).

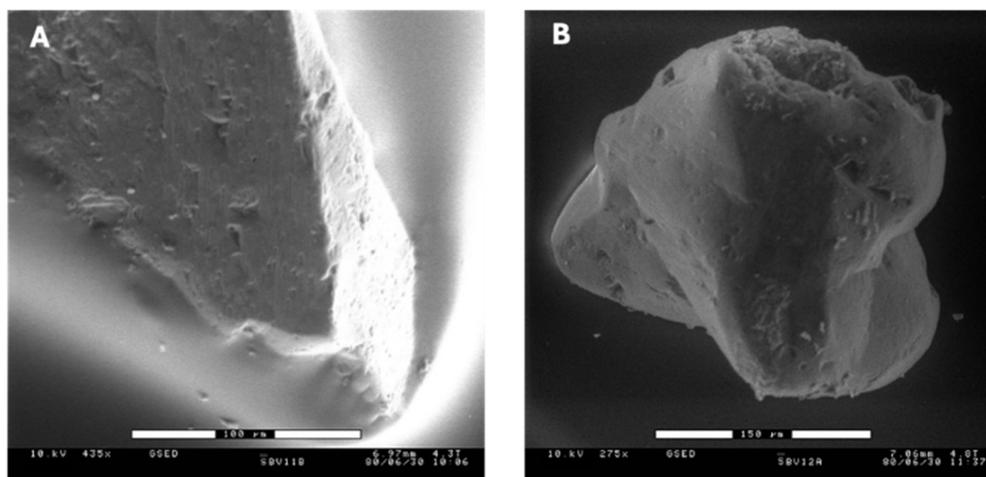


Figura 5 – Fotomicrografia de feições superficiais dos grãos analisados da área de amostragem 1. A (SBV11b) – aumento de 425x, B (SBV12a) – aumento de 275x.

Fonte: Autores (2024).

3.2 Área de Amostragem 2

A segunda área de amostragem está situada no Sítio São José dos Pilotos, município de Triunfo, a 890 metros de altitude, em uma voçoroca na seção média inferior de uma encosta convexa (Figura 6A).

A incisão erosiva faz parte de um sistema de voçorocas radiais que ocupa a média e a baixa encosta de um alvéolo de morfologia geral côncava (Figura 6C). A encosta coluvial estende-se desde a média encosta até a confluência com o canal de 1ª ordem, e exibe uma morfologia suavemente convexa com uma frente lobada correspondente ao setor distal de um fluxo de lama. O material coluvial apresenta espessamento em direção ao eixo do *hollow*. O *hollow* é uma cabeceira de zero ordem, não canalizada.

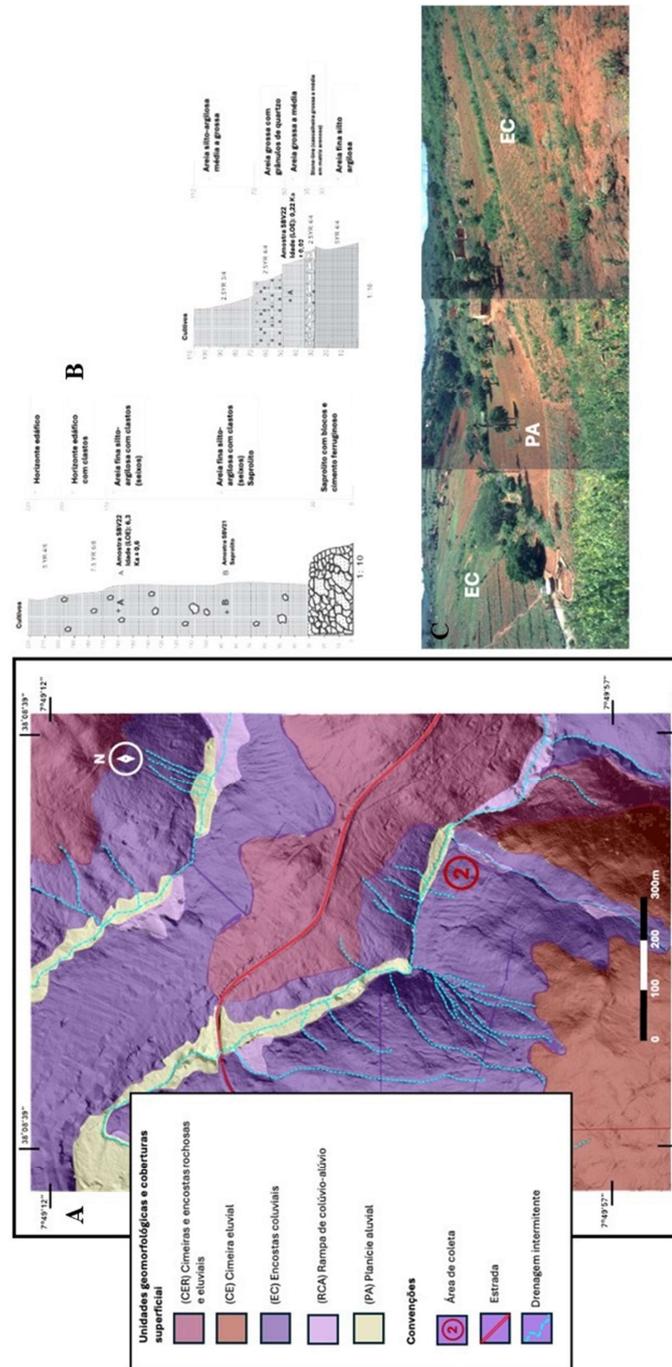


Figura 6 – Unidades geomorfológicas e estratigráficas da área de amostragem 2. Fonte: Autores (2024).

A cobertura coluvial compreende três unidades estratigráficas distintas: uma unidade conglomerática basal com cimento laterítico e um colúvio, mais fino, com matriz siltosa contendo alguns fenoclastos, ambos ocorrem na média encosta com uma espessura total da base ao topo de 2,2 m (Figura 6B). A unidade basal (SBV21) corresponde ao regolito

in situ desenvolvido sobre o sienito peralcalino da Serra da Baixa Verde, enquanto o colúvio fino (SBV22) que a recobre resultou na idade média por LOE de $6,3 \text{ Ka} \pm 0,6$ (Corrêa e Monteiro, 2020).

Sobre a baixa encosta ocorre uma terceira unidade (SBV23) com estrutura levemente acanalada, que intercala camadas cascalhentas e de areias grossas com camadas de areia mais fina com maior teor de argila. A morfologia lobada desta unidade sugere a ocorrência de fluxos de lama, retrabalhados do material à montante. O perfil amostrado tem uma espessura de 1,1 m. O nível estratigráfico datado por LOE resultou na idade de $0,23 \text{ Ka} \pm 0,02$. O material foi amostrado para a técnica do MEV e identificação da morfologia superficial dos grãos (Tabela 4, Figura 7).

As amostras correspondentes aos níveis datados foram analisadas por MEV para descrição das feições superficiais dos grãos. Os grãos SBV21q e SBV21i, provenientes do regolito subjacente do colúvio fino holocênico apresentam arestas vivas e serrilhadas e fraturas conchoidais. Por sua vez, os grãos SBV 22h e SBV 23g, oriundos dos colúvio fino holocênico da meia encosta e do colúvio grosseiramente estratificado, subatual, da baixa encosta, apresentam morfologia arredondada com blocos fraturados e fraturas conchoidais com suavização das arestas e polimento das faces. Todas essas fisionomias indicam ação do transporte em condições subaquosas (Goudie e Bull, 1984), como as corridas de lama (Figura 7).

Tabela 4 – Síntese das feições superficiais identificadas nos 100 grãos analisados de cada ponto de amostragem da área 2, SBV21, SBV22 e SBV23.

	Mecânica																Morfológica						Química									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
SBV21	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
SBV22	□	■	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
SBV23	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□

< 5% - raro
 5 a 25% - esparsos
 25 a 75% - comuns
 > 75% - abundantes

Fonte: Autores (2024).

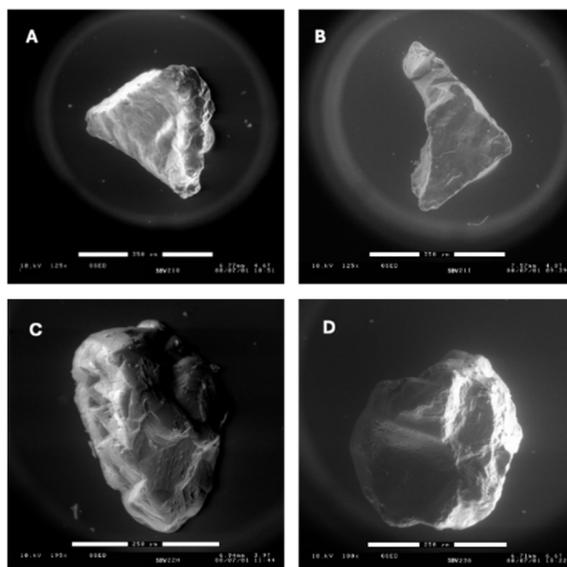


Figura 7 – Fotomicrografia de feições superficiais dos grãos da área de amostragem 2. A (SBV21q) – aumento de 125x, B (SBV21i) – aumento de 1255x, C (SBV22h) – aumento de 195x e D (SBV23g) – aumento 180x.

Fonte: Autores (2024).

3.3 Área de Amostragem 3

A terceira área de coleta de amostras está situada em uma rampa coluvial nas proximidades da escarpa meridional do maciço da Serra da Baixa Verde a 570 metros de altitude (Figura 8A). A rampa coluvial cortada por voçorocas ocorre nas

proximidades do povoado de Jatiúca, entre os municípios de Santa Cruz da Baixa Verde e Serra Talhada. Ao total, seis pontos foram amostrados nesta área que apresentou a estratigrafia mais diversificada dentre as encostas coluviais estudadas no maciço.

As médias e baixas encostas na área de coleta são recobertas por sequências sobrepostas de rampas de colúvio, com um gradiente médio entre 10° e 11° na superfície. A estratigrafia compreende um conglomerado basal e pelo menos duas sequências superiores de colúvios mais finos. As unidades mais finas são separadas uma das outras por cascalheiras e linhas de seixos descontínuas (*stone-lines*) (Figura 8B).

Amostras para diversas análises foram coletadas em dois pontos, um na base e outro na média encosta. O primeiro ponto amostrado corresponde ao topo de uma camada conglomerática basal ao longo das margens de uma trincheira escavada por uma linha de drenagem subsequente à base das rampas de colúvio. O material coletado trata-se de uma cascalheira matriz suportada, no nível superior da unidade conglomerática basal. O nível inferior desta unidade é um conglomerado clasto suportado; exibindo imbricação dos clastos maiores paralela ao gradiente da encosta. As camadas de cascalheira mostraram uma constante granodrecrescência ascendente e idades correspondendo ao holoceno médio variando de 7,1 Ka ± 2,5 a 7,2 Ka ± 0,3 (Corrêa e Monteiro, 2020) (Figura 8B).

No segundo ponto de coleta, as amostras foram retiradas a 60, 105 e 160 cm da superfície, ao longo de uma exposição na meia encosta, onde uma linha de drenagem secciona longitudinalmente o depósito coluvial. O primeiro nível amostrado corresponde ao meio da unidade coluvial superior, um colúvio avermelhado fino; o segundo nível datado refere-se ao topo de uma cascalheira, no mesmo nível de ocorrência dos fragmentos de carvão vegetal, e o terceiro nível refere-se ao topo do colúvio fino inferior situado abaixo da cascalheira. Neste perfil, as idades variaram desde o holoceno inferior (8,9 Ka ± 0,5 e 8,5 Ka ± 2,6) ao holoceno médio (4,7 Ka ± 0,3).

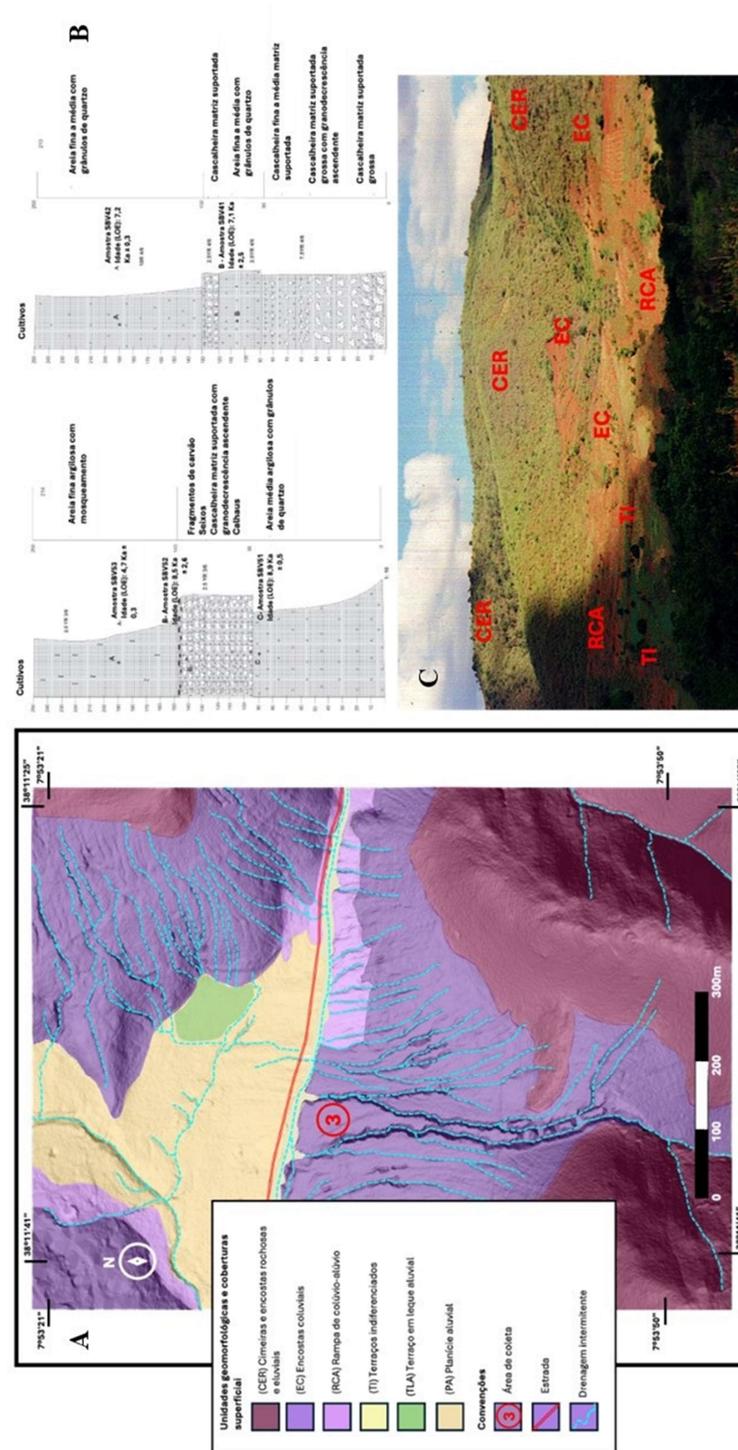


Figura 8 – Unidades geomorfológicas e estratigráficas da área de amostragem 3. Fonte: Autores (2024).

As superfícies dos grãos da amostra SBV41, correspondente a um fluxo de detritos, apresentam tanto feições mecânicas quanto de dissolução química bem desenvolvidas (Tabela 5). Os grãos SBV41E e SBV41F apresentam morfologia arredondada, de baixo relevo, sem arestas, além de escamas e cavidades superficiais de dissolução geoquímica (etching e pitting). O detalhe da borda superior do grão SBV41F apresenta evidências de abrasão mecânica associadas ao fluxo de detritos (Figura 9A e 9B).

O grão de microclina SBV41H, ao ser observado em duas intensidades de aproximação (190 e 650x) apresenta morfologia subarredondada com fraturas em degraus sobrepostas à dissolução química em escamas (topo de fluxo de detritos). É possível observar em detalhe as fraturas em degraus subordinadas à clivagem do mineral, sobrepostas à superfície com marcas de intensa dissolução química (Figura 9C e 9D).

Tabela 5 – Síntese das feições superficiais identificadas nos 100 grãos analisados de cada ponto de amostragem da área 3, SBV41, SBV42, SBV51, SBV52 e SBV53.

	Mecânica																Morfológica						Química										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	
SBV41	□	■	□	□	□	■	■	■	■	■	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	■	□	■	■	■	■	□	■	□
SBV42	□	■	□	□	■	■	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	■	□	■	■	□	□	■	□
SBV51	□	■	■	■	■	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	■	□	□	□	□	□	□	□	□	■	□	■	■	□	□	■	□
SBV52	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	□	□	□	□	□	□	■	■	■	■	■	■	□	□	□	■	■	■	■	□	□	■	□
SBV53	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	□	□	□	□	□	□	■	■	■	■	■	■	□	□	□	■	■	■	■	□	□	■	□

□ < 5% - raro □ 5 a 25% - esparsos ■ 25 a 75% - comuns ■ > 75% - abundantes

Fonte: Autores (2024).

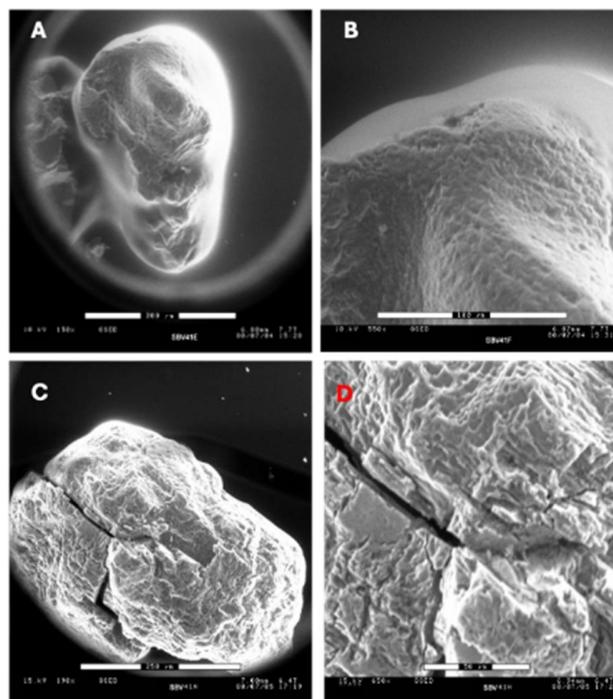


Figura 9 – Fotomicrografia de feições superficiais dos grãos da área de amostragem de 3. A (SBV41E) – aumento de 150x, B (SBV41F) – aumento de 550x, C (SBV41H) – aumento de 190x e D (SBV41H) – aumento de 650x.

Fonte: Autores (2024).

Na amostra SBV42, coletada no topo de um fluxo de detritos, o grão SBV42 C apresenta morfologia subarredondada com fraturas arcuadas na borda (Figura 10A). Com um aumento de 490x é possível observar detalhe das concavidades discoides e fraturas conchoidais suavizadas em sua superfície. As feições atestam o desgaste mecânico ao qual o grão esteve submetido durante o transporte por fluxo de detritos e no ambiente de encosta (De Haas *et al.*, 2020) (Figura 10B).

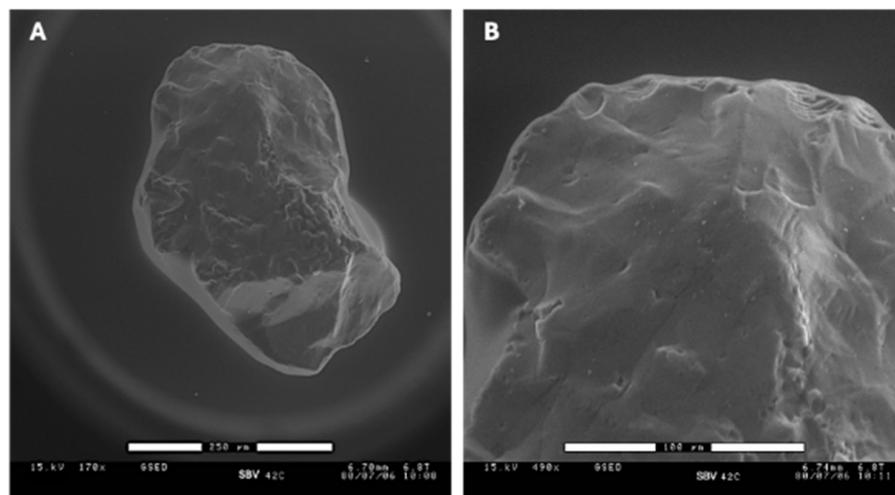


Figura 10 – Fotomicrografia de feições superficiais dos grãos da área de amostragem 3. A (SBV42C) – aumento de 170x, B (SBV42C) – aumento de 490x.

Fonte: Autores (2024).

No outro ponto de coleta da área de amostragem 03, à meia encosta, em uma rampa de colúvio, a amostra SBV51, representada pelo grão SBV51J, corresponde a um depósito de fluxo de lama. O grão apresenta morfologia arredondada com múltiplas concavidades discoides, com faces e arestas polidas. O detalhe da face superior com pouco desgaste químico das superfícies corrobora a ideia da ocorrência de um período de intemperismo curto anterior ao transporte (Figura 11A e 11B).

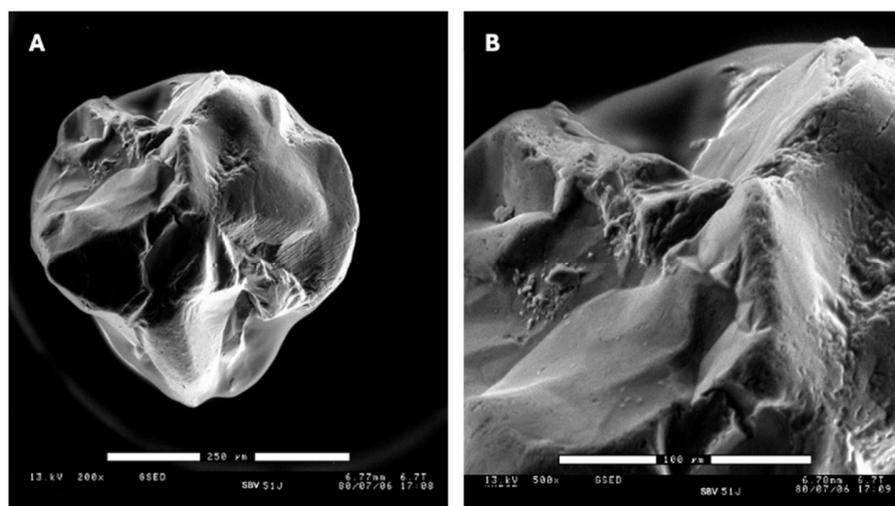


Figura 11 – Fotomicrografia de feições superficiais dos grãos da área de amostragem 3. A (SBV51J) – aumento de 200x, B (SBV51J) – aumento de 500x.

Fonte: Autores (2024).

O topo do fluxo de detritos do holoceno inferior representado pela amostra SBV52, e o fluxo de lama correspondente à amostra SBV53 apresentaram características semelhantes na superfície dos grãos, como evidenciados pelos exemplos SBV52F e SBV53I. No caso de SBV52F (Figura 12A e 12B), o grão traz evidência de arredondamento das faces por desgaste químico, com formação de escamas e cavidades de dissolução, às quais se sobrepõem fraturas conchoidais truncando as arestas que guardam evidências de uma fase anterior de dissolução química mais intensa.

Por seu turno, o grão SBV53I apresenta alto relevo e arestas suavizadas por desgaste químico. Diversas fraturas truncam a superfície fortemente alterada, talvez indicando a permanência de condições mais úmidas desde o holoceno inferior. Em detalhe (aumento de 500x) observa-se a diferença textural entre uma zona fraturada, relativamente fresca, e a superfície escamada extensivamente por dissolução (Figura 12C e 12D).

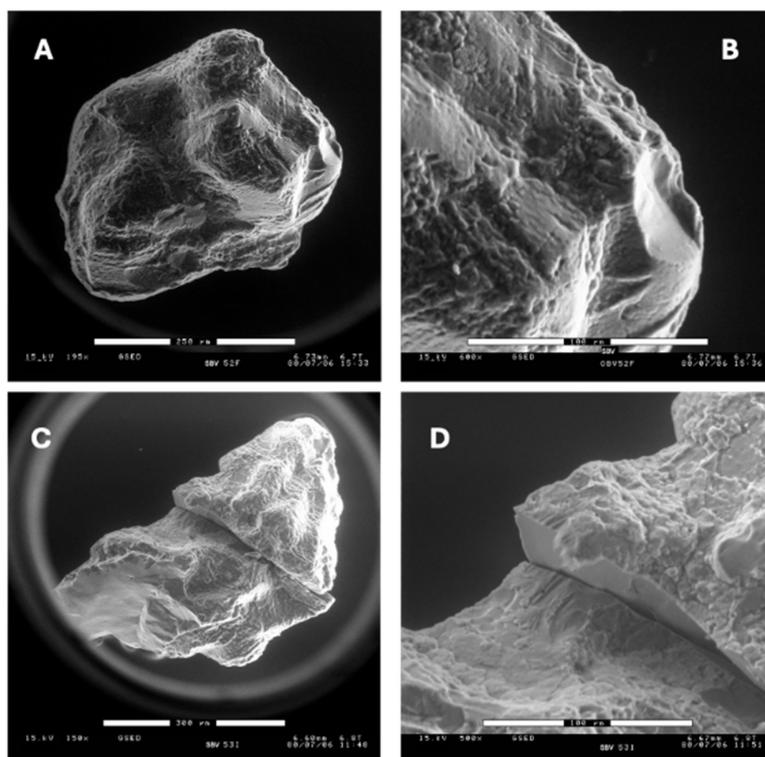


Figura 12 – Fotomicrografia de feições superficiais dos grãos da área de amostragem 3. A (SBV52F) – aumento de 195x, B (SBV52F) – aumento de 600x, C (SBV53I) – aumento de 150x, D (SBV53I) – aumento de 500x.

Fonte: Autores (2024).

3.4 Área de Amostragem 4

A quarta área de amostragem consiste em uma rampa de colúvio com 9,5° de inclinação delimitada a montante por um *knick* topográfico com uma encosta rochosa com declividade > 25° e a jusante por uma feição pedimentar com cobertura detrítica (Figura 13C). Para fins de distinção em relação às encostas, as rampas de pedimento foram caracterizadas pela sua declividade < do que 7° e extensão superior a 100 metros. Essas podem estar estruturadas na própria rocha mãe, com ou sem elúvio, ou apresentar cobertura detrítica coluvial, geralmente associada à ação do fluxo laminar (*sheet-flow*) (Pelletier, 2010). A área de coleta situa-se a 570m de altitude, em um esporão topográfico associado à escarpa meridional do maciço da Serra da Baixa Verde, município de Serra Talhada (Figura 13A).

A rampa de colúvio exibe diversas exposições do depósito, em forma de bancadas, que permitiram a observação de três unidades estratigráficas distintas: um colúvio fino, avermelhado, maciço, um conglomerado basal, que preenche paleodepressões e eixo de canais, e uma terceira unidade, finamente estratificada situada na média encosta sobre o

conglomerado basal, mas sem contato direto com o colúvio fino avermelhado (Figura 13B). O topo da camada conglomerática apresenta níveis cimentados por concreções lateríticas.

As amostras para a análise por MEV foram coletadas dos mesmos níveis submetidos à datação por LOE (Tabela 6 e Figura 14). O colúvio avermelhado maciço, com idade LOE de $6.9 \text{ ka} \pm 1,1$ (Corrêa e Monteiro, 2020) dá lugar a um colúvio laminado, subatual (ca. 110 anos), encosta abaixo, o que confirma que os processos que operaram na encosta sofreram mudanças ao longo do tempo, de fluxos gravitacionais a fluxos laminares não canalizados.

Tabela 6 – Síntese das feições superficiais identificadas nos 100 grãos analisados de cada ponto de amostragem da área 4, SBV61, SBV62 e SBV63.

	Mecânica																Morfológica						Química									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
SBV61	□	■	■	■	■	■	■	■	□	□	□	□	□	□	□	■	□	□	□	□	■	□	□	□	■	■	■	■	□	■	□	
SBV62	■	■	■	■	■	■	□	□	□	□	□	■	■	□	□	■	□	□	□	□	■	□	□	■	□	■	■	■	■	□	■	□
SBV63	□	■	■	■	■	■	■	■	□	□	□	□	□	□	■	■	□	□	□	□	□	■	□	□	□	■	■	□	□	■	□	

< 5% - raro
 5 a 25% - esparso
 25 a 75% - comum
 > 75% - abundante

Fonte: Autores (2024).

O conglomerado basal, com idade LOE de $8,4 \text{ Ka} \pm 0,3$ (Corrêa e Monteiro, 2020), apresentou uma granodecrescência ascendente, variando de um material clasto suportado na fração calhau na base, a camadas de laminação irregular de seixos de quartzo no topo da sequência. O depósito preenche paleo-depressões e possivelmente um antigo canal ao centro da encosta, constituindo assim uma discreta inversão local do relevo e passando a ocupar um segmento dispersor d'água e não mais de convergência de água e material.

Tomando por exemplo o grão SBV61G, oriundo do colúvio fino avermelhado do holoceno médio, observa-se grão arredondado por intemperismo químico com diversas cavidades de dissolução, vistas em detalhe com aumento de 340x (Figura 14). Postula-se que a maior presença de feições de dissolução nos grãos desse depósito deva-se à sua posição na encosta, em plano sub-horizontal, com drenagem livre.

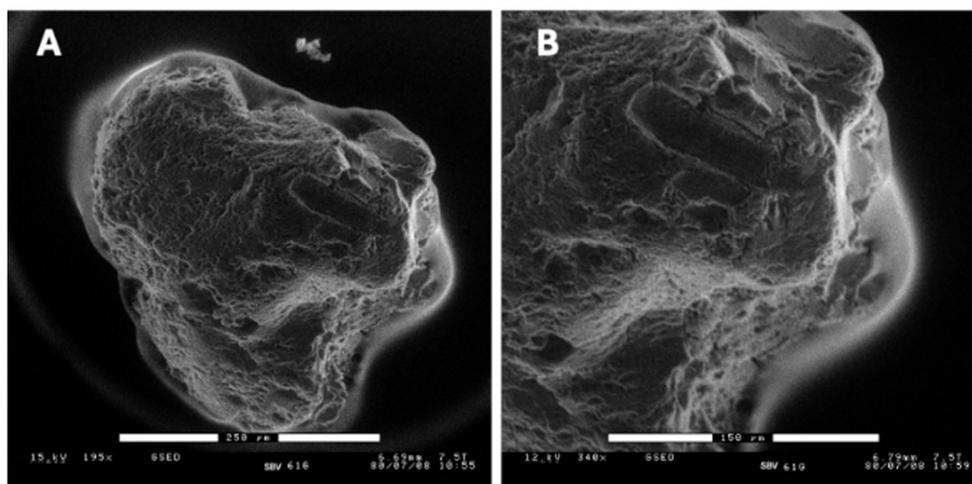


Figura 14 – Fotomicrografia de feições superficiais dos grãos da área de amostragem 4. A (SBV61G) – aumento de 195x, B (SBV61G) – aumento de 340x.

Fonte: Autores (2024).

Os sedimentos da amostra SBV62, topo do conglomerado que preenche as paleo-depressões na encosta coluvial, apresentam feições conspícuas de desgaste mecânico. O grão SBV62F, por exemplo, exibe morfologia subangulosa com diversas fraturas conchoidais. Com um aumento de 500x é possível observar um detalhe da aresta superior com diversas fraturas e concavidades de origem mecânica além de arestas com bordas truncadas (Figura 15).

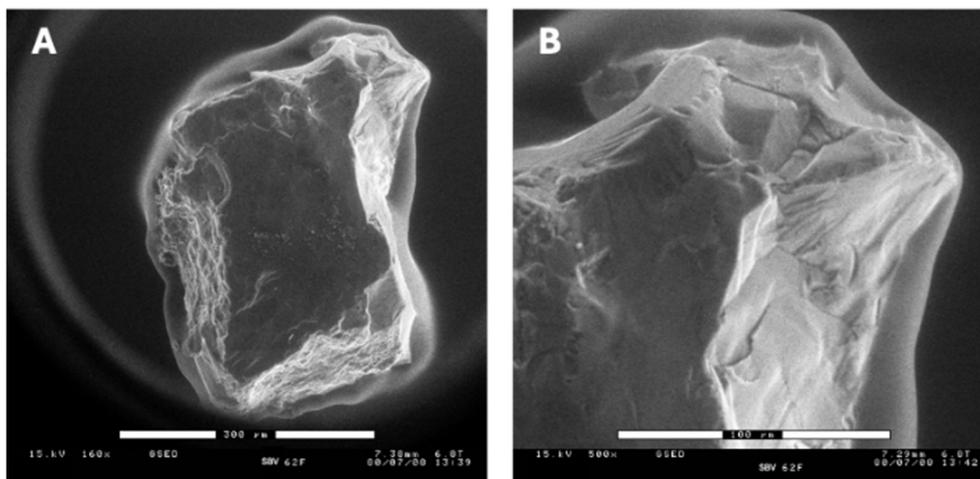


Figura 15 – Fotomicrografia de feições superficiais ilustrativas da área de amostragem 04. A (SBV62F) – aumento de 160x, B (SBV62F) – aumento de 500x.

Fonte: Autores (2024).

O grão SBV 63G proveniente do colúvio laminado subatual apresenta morfologia angulosa com alto relevo e fraturas de blocos em degraus, além de fratura conchoidal truncada. O detalhe da face superior com aumento de 345x revela sobreposição das feições de origem mecânica (fratura conchoidal e em blocos) à superfície com marcas de dissolução química (Figura 16).

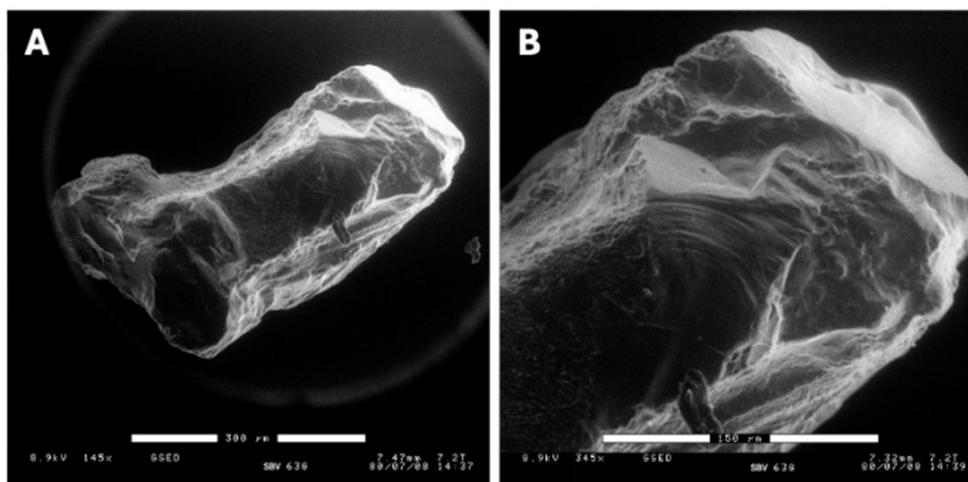


Figura 16 – Fotomicrografia de feições superficiais ilustrativas da área de amostragem 4. A (SBV63G) – aumento de 145x, B (SBV63G) – aumento de 345x.

Fonte: Autores (2024).

As amostras exibiram padrões micromorfológicos similares, com predomínio de feições mecânicas, notáveis ou discretas, sobrepostas a feições de ordem química, o que sugere a ocorrência de fases de retrabalhamento erosivo truncando evidências do desgaste químico. No entanto, as feições mecânicas são mais numerosas nas amostras mais recentes e naquelas provenientes do setor semiárido do maciço, enquanto no domínio do clima subúmido as feições, tanto químicas quanto mecânicas, ocorrem em número menor. Possivelmente, o clima tenha contribuído para a melhor preservação das feições, sobretudo as mecânicas, das amostras do semiárido. As feições de ordem morfológica ocorrem em proporção

quase que constante, o que indica um padrão repetitivo, possivelmente relacionado ao tipo de desgaste sofrido pelos grãos e sua origem litológica comum.

Goudie e Bull (1984) identificaram a abrasão das arestas como a principal evidência para a ocorrência de transporte a curta distância da área fonte, típico dos depósitos de encosta, com predomínio de fluxos hiperconcentrados com grande quantidade de areia. Este tipo de abrasão está muito relacionado à rugosidade do ambiente de transporte, ou seja, à ocorrência de depósitos rudáceos e fenoclastos misturados ao material transportado.

Em praticamente todas as amostras analisadas foram encontradas evidências de abrasão mecânica das arestas, muitas vezes sobrepostas a um arredondamento por dissolução química, ou gerando planos de quebra que truncam as extremidades das arestas. Os grãos provenientes da amostra de regolito – SBV21 – apresentaram a menor porcentagem de ocorrência de feições de ordem mecânica, dentre todas as amostras. Em geral, as extremidades dos grãos desta amostra não exibem arestas bem marcadas, sem sinal de desgaste mecânico, por outro lado as feições morfológicas são notavelmente angulosas, possivelmente herdadas das estruturas primárias da rocha matriz, ainda que o ataque do intemperismo tenha impresso à sua superfície formas características de dissolução.

4. Considerações finais

A análise de grãos de quartzo e microclina na fração 200-250 μ m mostra que suas superfícies carecem de texturas que atestem unicamente o desgaste mecânico. De fato, as texturas superficiais presentes indicam uma história complexa de intemperismo a partir da rocha matriz, transporte, retrabalhamento e novas fases superimpostas de intemperismo.

As superfícies de grãos intemperizados de maneira não uniforme apontam para intemperismo químico original da rocha matriz, o sienito do maciço da Serra da Baixa Verde. Este fato também é suportado pela ocorrência de intemperismo de outros minerais na fração arenosa como a microclina, bem como na ocorrência de mantos eluviais *in situ* com formação de minerais do ciclo supérgeno, sobretudo montmorilonita, caulinita e óxido- hidróxidos de Fe e Al (Corrêa, 2001).

A estreita correspondência nas frequências da textura superficial com aquela apontada para o transporte por fluxos hiperconcentrados e laminares indica um componente coluvial e aluvial na história dos grãos. A recorrência das feições de abrasão nos grãos coluviais e a macrofábrica das seções estratigráficas sugerem uma origem coluvial para os depósitos, como componentes aluviais nos setores de menor declividade das rampas, como no caso da área de coleta 04 sobre um pedimento com cobertura detritica.

A história indicada pelas texturas da superfície aponta também para a presença de controles climáticos (mecânicos e intempéricos), além do tempo de soterramento, sobre a fisionomia dos grãos, com maior incidência de feições mecânicas nos grãos provenientes de deposição recente e nas áreas mais baixas dos arredores do maciço sob climas semiáridos.

Por fim, esta avaliação das características geomórficas recuperadas a partir da microscopia eletrônica dos grãos de areia aponta para a prevalência de condições climáticas variando do semiárido ao subúmido, nos arredores e cimeira do maciço respectivamente, pelo menos desde o último máximo glacial, ainda que sob a influência de eventos de maior torrencialidade capazes de gerar fluxos de detritos.

Referências

- Bull, P. A., Goudie, A. S., Williams, D. P., Watson, A. Colluvium: A scanning electron microscope analysis of a neglected sediment type. In: Marshall, J. R. (ed.) *Clastic Particles: Scanning Electron Microscopy and Shape. Analysis of Sedimentary and Volcanic Clasts*. New York: Van Nostrand Reinhold. 1987. p. 16-35.
- Corrêa, A. C. B. *Dinâmica geomorfológica dos compartimentos elevados do Planalto da Borborema, Nordeste do Brasil*. 2001. 386 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, SP, 2001.
- Corrêa, A.C.B., Monteiro, K.A. Geomorphological dynamics of the elevated geosystems of the Borborema Highlands, Northeast of Brazil, from optically stimulated luminescence dating of hillslope sediments. *William Morris Davis - Revista de Geomorfologia*. 1(1): 162-185, 2020.
- De Haas, N.S., De Lange, S.I., Pudasaini, S.P. Similarities and contrasts between the subaerial and subaqueous deposits of subaerially triggered debris flows: An analogue experimental study. *Journal of Sedimentary Research*. 90 (9): 1128–1138, 2020.

-
- Culver, S. J., Bull, P. A., Campbell, S., Shakesby, R. A., Whalley, W. B. Environmental discrimination based on quartz grain surface textures: A statistical investigation. *Sedimentology*. 30: 129–136, 1983.
- Goudie, A. S., Bull, P. A. Slope process change and colluvium deposition in Swaziland: An SEM analysis. *Earth Surface Processes and Landforms*. 9: 289–299, 1984.
- Krinsley, D. H., Doornkamp, J. C. *Atlas of quartz sand surface textures*. Cambridge: Cambridge University Press, 2011.
- Listo, D. G. S., Balder, R.F.T.M., Corrêa, A.C.B., Ramos, D.A.M.C., Calegari, M. R. Weathering pits as a geochronometer of environmental changes in the State of Pernambuco, Northeastern Brazil. *Quaternary International*. 649: 58-71, 2023.
- Lowe, J.J., Walker, M.C.J. *Reconstructing Quaternary environments*. New York: John Wiley & Sons. 1984
- Pelletier, J. D. How do pediments form? A numerical modeling investigation with comparison to pediments in southern Arizona, USA. *GSA Bulletin*. 122 (11-12): 1815–1829, 2010.
- Trewin, N. H. Use of the scanning electron microscope in sedimentology. In: Tucker, M. *Techniques in Sedimentology*. London: Blackwell, 1995, p. 229 -273.