



Morfoestratigrafia do Quaternário como instrumento para a reconstrução ambiental no maciço estrutural Serra dos Cavalos - Pernambuco

Danielle Gomes da Silva Listo¹ - Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-9391-1211>

Larissa Furtado Lins dos Santos² - Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-4247-5317>

Rhaissa Francisca Tavares de Melo Balder³ - Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-8953-6009>

¹ Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, Brasil *

² Universidade Federal de Pernambuco, Recife/PE, Brasil **

³ Universidade Federal de Pernambuco, Recife/PE, Brasil ***

Artigo recebido em 31/10/2024 e aceito em 05/11/2024

RESUMO

Este trabalho tem como principal objetivo analisar a paisagem sob uma perspectiva sistêmica. Para isso, busca-se reconstruir a paisagem utilizando técnicas de mapeamento e análises laboratoriais, como micromorfologia de solos, sedimentologia e datação por luminescência opticamente estimulada (LOE). Estas técnicas, combinadas com a abordagem morfoestratigráfica, fundamentam a análise das formas do relevo, associando-as à temporalidade e às propriedades dos materiais que estruturam a paisagem. Considerando a influência climática ao longo do Quaternário, a pesquisa também explora a paleoclimatologia local, com foco na ciclicidade de eventos de alta magnitude e baixa recorrência, que injetam energia nos sistemas ambientais e geram depósitos coluviais nas áreas mais baixas da região de estudo. Assim, a investigação busca traçar o processo evolutivo do maciço estrutural Serra dos Cavalos, situado nos municípios de Caruaru, São Caetano, Agrestina, Altinho, São Joaquim do Monte e Camocim de São Félix. Os resultados de datação por LOE indicam a influência de eventos climáticos regionais, que atuaram como impulsos energéticos no transporte de sedimentos ao longo das encostas. As idades obtidas relacionam-se ao evento Paleo-ENOS, que sucedeu períodos de semiaridez interrompidos por episódios de intensa precipitação, os quais alteraram a estabilidade da paisagem.

Palavras-chave: paisagem; morfoestratigráfica; Quaternário; depósitos coluviais; paleoclimatologia.

* Professora Adjunta do Departamento de Ciências Geográficas e Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). E-mail: danielle.listo@ufpe.br

** Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). E-mail: larissa.furtado@ufpe.br

*** Doutora em Geografia, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). E-mail: rhaissatmelo@gmail.com

Quaternary morpho-stratigraphy as a tool for environmental reconstruction in the Serra dos Cavalos structural massif - Pernambuco

ABSTRACT

The main objective of this work is to analyze the landscape from a systemic perspective. To this end, it seeks to reconstruct the landscape using mapping techniques and laboratory analyses, such as soil micromorphology, sedimentology, and optically stimulated luminescence dating (OSL). These techniques, combined with a morpho-stratigraphic approach, provide the basis for analyzing landform structures, linking them to temporal dynamics and the intrinsic properties of the materials that shape the landscape. Considering the climatic influence throughout the Quaternary, this research also examines local paleoclimatology, focusing on the cyclicity of high-magnitude, low-frequency events that infuse energy into environmental systems and produce colluvial deposits in the lower areas of the study region. Thus, the study aims to trace the evolutionary process of the Serra dos Cavalos structural massif, located within the municipalities of Caruaru, São Caetano, Agrestina, Altinho, São Joaquim do Monte, and Camocim de São Félix. The OSL dating results indicate the influence of regional climatic events, acting as energy inputs that facilitated sediment transport along the slopes. The obtained ages are associated with the Paleo-ENSO event, following semi-arid periods that were interrupted by episodes of intense rainfall, which disrupted the landscape's stability.

Keywords: landscape; morpho-stratigraphic; Quaternary; colluvial deposits; paleoclimatology

Morfoestratigrafía del Cuaternario como instrumento para la reconstrucción ambiental en el macizo estructural Sierra de los Caballos - Pernambuco

RESUMEN

Este trabajo tiene como principal objetivo analizar el paisaje desde una perspectiva sistémica. Para ello, se busca reconstruir el paisaje utilizando técnicas de mapeo y análisis de laboratorio, como micromorfología de suelos, sedimentología y datación por luminiscencia ópticamente estimulada (LOE). Estas técnicas, combinadas con el enfoque morfoestratigráfico, fundamentan el análisis de las formas del relieve, asociándolas a la temporalidad y a las propiedades de los materiales que estructuran el paisaje. Considerando la influencia climática a lo largo del Cuaternario, la investigación también explora la paleoclimatología local, centrándose en la ciclicidad de eventos de alta magnitud y baja recurrencia, que inyectan energía en los sistemas ambientales y generan depósitos coluviales en las áreas más bajas de la región de estudio. Así, la investigación busca trazar el proceso evolutivo del macizo estructural Sierra de los Caballos, ubicado en los municipios de Caruaru, São Caetano, Agrestina, Altinho, São Joaquim do Monte y Camocim de São Félix. Los resultados de datación por LOE indican la influencia de eventos climáticos regionales, que actuaron como impulsos energéticos en el transporte de sedimentos a lo largo de las laderas. Las edades obtenidas están asociadas al evento Paleo-ENOS, que sucedió a períodos de semi-aridez interrumpidos por episodios de intensa precipitación, los cuales alteraron la estabilidad del paisaje.

Palabras clave: paisaje; morfoestratigráfica; Cuaternario; depósitos coluviales; paleoclimatología.

INTRODUÇÃO

Compreender a paisagem a partir da perspectiva sistêmica é tarefa fundamental para as ciências voltadas aos estudos ambientais. A análise baseada em algumas variáveis que se apresentam de modo conjunto deve levar em consideração a atuação de diversos fatores que se processam em diferentes escalas de tempo e espaço, mas que imprimem mudanças significativas na paisagem.

Tomando como pressuposto a paisagem geomorfológica e a sua evolução, a influência de eventos que rompem o patamar de estabilidade observado na estrutura superficial da paisagem é expressa através da reorganização do comportamento dos processos geomórficos.

Nesta concepção, eventos desestabilizadores atuam como importantes agentes geomorfológicos, imprimindo mudanças constantes nas formas. Funcionam, como importantes *inputs* que exercem influência nos processos superficiais, originando uma grande quantidade de resultados que se conectam na morfologia da paisagem de uma maneira complexa.

É importante destacar a energia de eventos cíclicos na estruturação dessa paisagem geomorfológica, sendo necessário mencionar os eventos de cunho climático. O período Quaternário se caracteriza como um intervalo de tempo dotado de intensas variações entre períodos glaciais e interglaciais, contando também com a influência de eventos de alta magnitude e baixa recorrência, envolvidos por uma grande quantidade de energia que se expressa na dinâmica geomórfica em um curto espaço de tempo, produzindo mudanças significativas.

Nessa perspectiva, os depósitos coluviais e aluviais são importantes marcadores da atividade geomorfológica pretérita, pois fornecem dados essenciais para a reconstrução dos cenários nos quais os eventos deposicionais se processaram. Conforme aponta Silva (2013), a litologia dos depósitos é capaz de fornecer a chave para a análise paleoambiental de determinadas áreas.

Sendo assim, análise estratigráfica de depósitos quaternários deve levar em conta os diferentes padrões de organização das paisagens, uma vez que esses depósitos se distribuem de forma irregular sobre diversas formas de relevo. Além disso, a estratigrafia não se limita à sucessão das camadas e às idades relativas, buscando também compreender a distribuição dos depósitos, a litologia presente, o conteúdo fossilífero e, fundamentalmente, interpretar todos esses aspectos para entender suas propriedades no ambiente e suas origens (Philipp e Machado, 2009; Ribeiro, 2002).

Além disso, os depósitos funcionam ainda como importantes marcadores da ciclicidade ligada aos eventos morfogenéticos, sobretudo aqueles ligados a dinâmica atmosférica. São ainda essenciais para a compreensão da maneira como os sistemas respondem à essas mudanças de patamares de

estabilidade, funcionando ainda para a compreensão de como se processa o fator resiliência na compreensão das dinâmicas observadas.

Para compreender as mudanças ambientais que ocorreram ao longo da evolução do tempo geológico, faz-se necessário recorrer a técnicas que auxiliem na construção de resultados importantes para a estruturação mais aproximada possível da dinâmica de superfície encontrada em tempos remotos. Essa reconstrução paleoambiental fornece dados comportamentais do sistema ambiental pretérito, funcionando como um importante instrumento para a elaboração de cenários futuros para a área de estudo.

O maciço estrutural Serra dos Cavalos se apresenta como uma área essencial para a construção dessa pesquisa, tendo em vista a sua localização, dentro da mesorregião Agreste de Pernambuco, caracterizando-se como um brejo de altitude. Essa condição proporciona a influência direta de eventos de precipitação, que definem a área de estudo como um ambiente dotado de condições climáticas mais amenas, diferenciando-se do seu entorno mais seco.

Dessa forma, a presente pesquisa busca elucidar as principais influências climáticas associadas ao período Quaternário, que proporcionaram mudanças significativas na paisagem do maciço estrutural Serra dos Cavalos. A partir dessa reconstrução paleoambiental, é possível compreender de que maneira o geossistema se comporta atualmente e de que forma ele tende a evoluir com o passar dos anos.

MATERIAIS E MÉTODOS

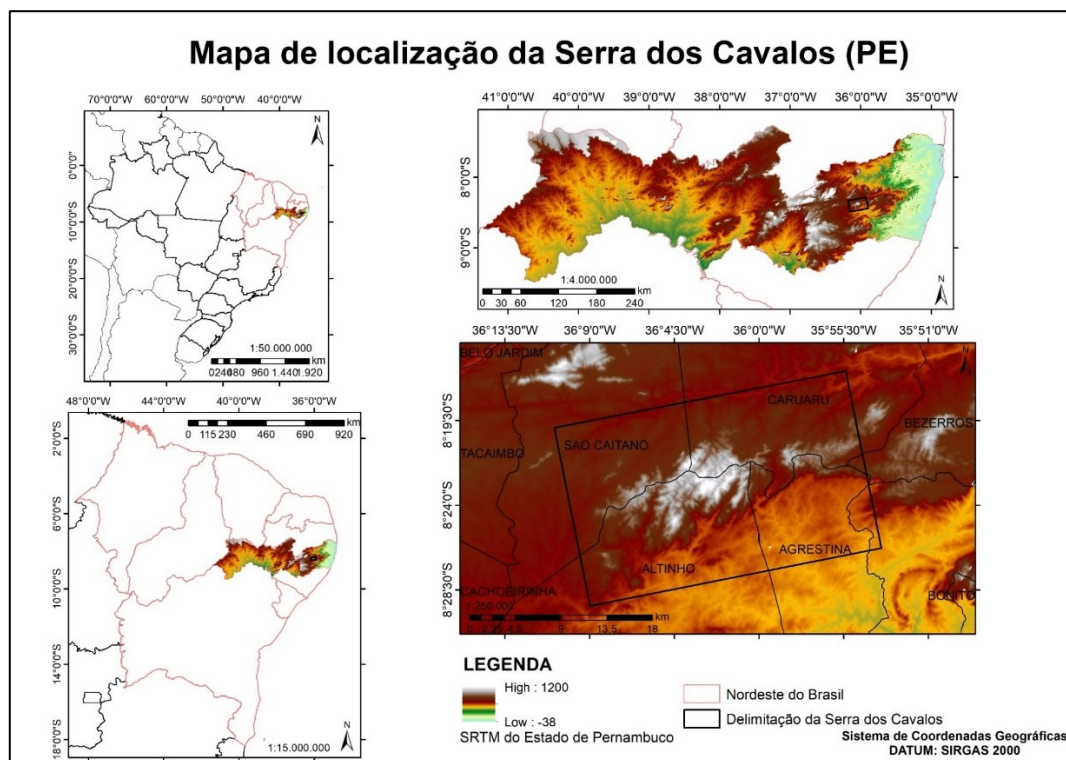
Área de Estudo

O maciço estrutural Serra dos Cavalos, localizado no centro-leste de Pernambuco, abrange os municípios de São Caetano, Caruaru, Bezerros, Altinho, Agrestina e São Joaquim do Monte (Figura 1). Situado no Planalto da Borborema, o maciço caracteriza-se como um brejo de altitude, com clima e precipitação distintos das áreas circundantes, funcionando como uma "ilha produtiva" ideal para a agricultura. Esse cenário, no entanto, gera conflito entre práticas agrícolas e a preservação da vegetação nativa. A altitude e a exposição aos ventos úmidos do Sudeste favorecem temperaturas amenas e um índice pluviométrico superior em comparação ao entorno, além de um número significativo de nascentes perenes, o que faz da região uma importante produtora de água.

Para proteger essa área, foi criado em 1983 o Parque João Vasconcelos Sobrinho, com 359 hectares, que preserva remanescentes de Mata Atlântica e fontes hídricas cruciais para o

abastecimento de Caruaru e municípios vizinhos. A demanda por água para consumo, irrigação e dessedentação animal é alta, especialmente em períodos secos, o que, junto à exploração agrícola e de argila para a indústria cerâmica, ameaça a cobertura vegetal original e aumenta a sedimentação nos cursos d'água. Até o momento, os estudos na área se concentram na identificação fitológica da vegetação, com pouca atenção dada à estrutura superficial da paisagem.

Figura 1 – Mapa de Localização do maciço estrutural Serra dos Cavalos (PE)



Fonte: ZAPE (2016) e ALOS PALSAR (2020)

A Serra dos Cavalos, situada na Província Borborema, Nordeste do Brasil, caracteriza-se pela alternância de blocos de embasamento cristalino e faixas móveis, influenciados pelo Ciclo Brasileiro/Pan-Africano (750-450 M.a.). A área apresenta feições geológicas complexas, como zonas de cisalhamento e plutonismos granitóides, influências que justificam a ocorrência de tremores de terra leves na região de Caruaru, localizada entre os lineamentos Pernambuco e Patos. Esse contexto geológico revela uma história de eventos tectônicos, incluindo episódios de acreção, subducção e colisão, que contribuíram para a estrutura atual da área e o surgimento de nascentes fluviais.

O maciço Serra dos Cavalos é constituído por materiais intrusivos com encostas abruptas que sofrem intemperismo físico e químico, variando conforme a umidade. Essa estrutura exhibe vales profundos e cristas alinhadas em direção NE-SW, evidenciando controle estrutural e atividade

tectônica recente, possivelmente neocenozoica. Entre as principais unidades geológicas destacam-se a Suíte Intrusiva Itaporanga, composta por rochas graníticas porfíricas, e o batólito Caruaru–Arcoverde, considerado um dos maiores corpos intrusivos da Província Borborema, consistindo de anfibóliobiotita-granitos e dioritos (Neves e Mariano, 1999; Neves et al., 2000).

Outras unidades importantes incluem o Complexo Belém de São Francisco, com migmatitos e ortognaisses, e a Suíte Intrusiva Serra Taquaritinga, caracterizada pela presença de biotita sienogranito. Essas formações geológicas apresentam composições e características variadas, influenciadas por eventos transpressivos e contatos com diferentes tipos de rochas, como sienitos e supracrustais. Esses elementos contribuem para a diversidade estrutural da Serra dos Cavalos e revelam a complexidade geológica da região.

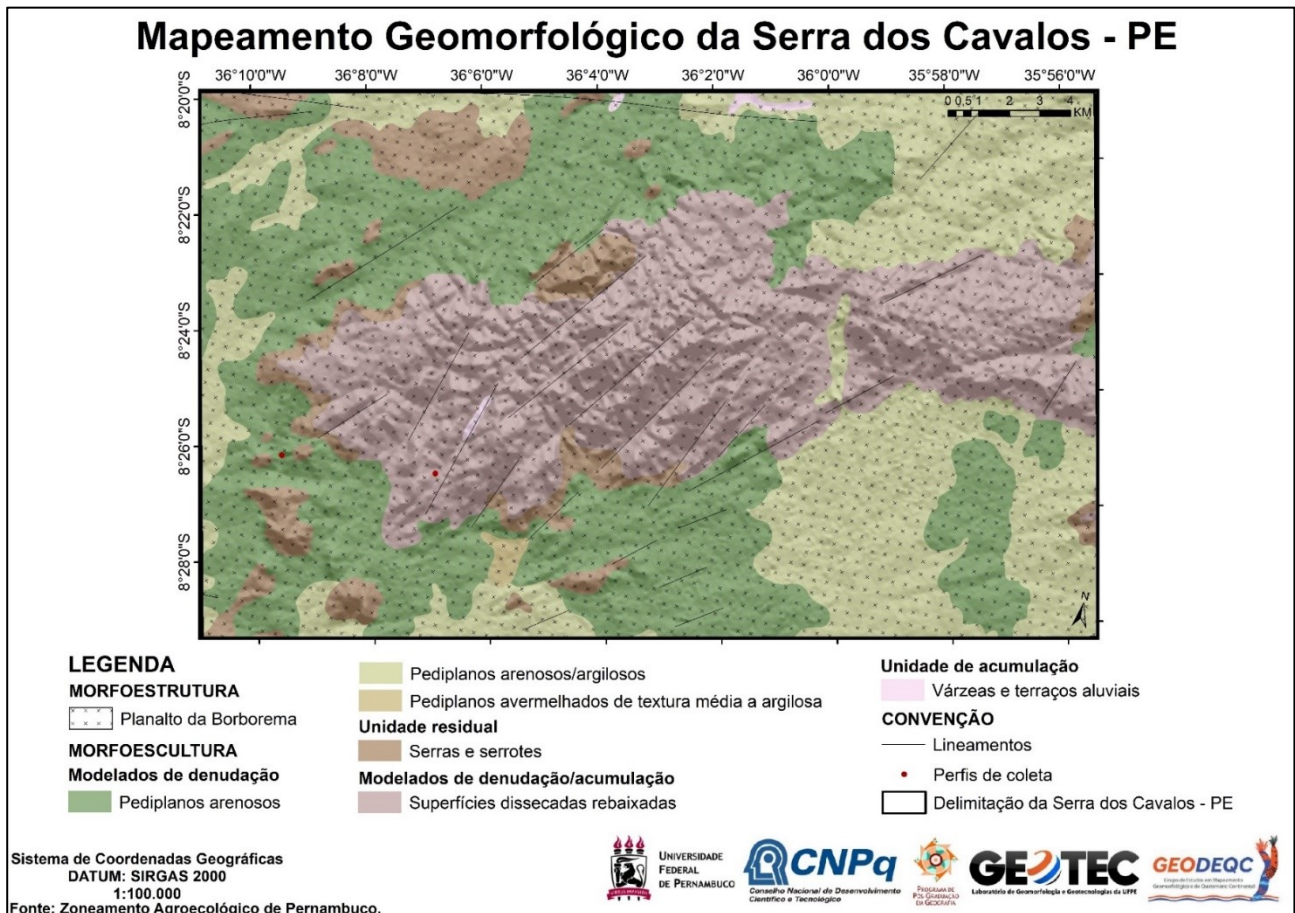
A morfologia da região Nordeste reflete o controle das zonas de cisalhamento, que influenciam maciços, cristas e vales profundos, orientando os relevos de acordo com as direções estruturais. Modelos de aplainamento, como o da pediplanação, explicam a regressão das encostas sem alterar significativamente os divisores de drenagem. Estudos de geomorfologia regional destacaram inicialmente os fatores climáticos e erosivos, enquanto pesquisas recentes sugerem que fatores endógenos, especialmente tectônicos, têm papel fundamental na morfogênese do Planalto da Borborema. Esse planalto, delimitado ao leste por um gradiente abrupto até o litoral e ao oeste pela depressão sertaneja semiárida, revela uma complexa configuração estruturada em diversos litotipos cristalinos.

Desta forma, o maciço estrutural Serra dos Cavalos, localizado na mesorregião do Agreste Pernambucano e integrado à unidade da Cimeira Estrutural Pernambuco-Alagoas, apresenta relevos residuais e cristas, destacando-se como uma área homogênea e representativa dos processos geomorfológicos locais.

De acordo com o Zoneamento Agroecológico de Pernambuco - ZAPE (2016), o maciço foi subdividido em quatro principais unidades (Figura 2): os **pediplanos**, áreas extensas e planas, comuns em condições semiáridas, com leve cobertura sedimentar e variação de textura arenosa a argilosa, concentrando-se ao redor das áreas mais elevadas; as **serras e serrotes**, por outro lado, apresentam contrastes com encostas íngremes e altitudes mais elevadas, compostas por rochas cristalinas que se alinham às estruturas tectônicas, incluindo inselbergs e matacões. A unidade de **superfícies dissecadas e rebaixadas** ocupa a região central e exibe altos relevos em crista, com vales encaixados característicos de processos de denudação e acumulação. Por fim, **as várzeas e terraços aluviais**,

áreas planas e férteis, correspondem a cursos d'água e antigas planícies de inundação, mas ocupam uma área relativamente pequena no maciço.

Figura 2 – Mapa geomorfológico do maciço estrutural Serra dos Cavalos (PE)



Fonte: ZAPE (2016)

Climaticamente, o maciço compreende uma área de exceção, que reitera a diferenciação nas suas condições de temperatura e precipitação, caracterizando-se como um brejo de altitude. A existência dessas áreas de exceção está associada à ocorrência do Planalto da Borborema com altitudes que variam de 500 a mais de 1000 metros. Dessa maneira, mesmo estando localizada no agreste central, a área de estudo possui aspectos físicos diferenciados, que evidenciam sua posição privilegiada na paisagem, no tocante à umidade do ar e do solo, temperatura e cobertura vegetal.

A dinâmica climática do Nordeste do Brasil (NEB) é influenciada por diversos sistemas atmosféricos de escala global e regional, que afetam a distribuição de chuvas e a circulação de ventos. A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) é o principal sistema global responsável pelas chuvas

no NEB, deslocando-se sazonalmente conforme a temperatura do mar. Outros fenômenos importantes incluem os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN), que ocorrem de dezembro a fevereiro e podem alterar a ZCIT, gerando chuvas na periferia do sistema e céu limpo no centro.

O Dipolo do Atlântico e o El Niño Oscilação Sul (ENOS) também desempenham papéis críticos. O Dipolo do Atlântico envolve variações de temperatura entre as águas do Atlântico Norte e Sul, afetando a posição da ZCIT e, conseqüentemente, os totais pluviométricos do NEB. O ENOS, caracterizado pelo aquecimento das águas do Pacífico, interfere na circulação dos ventos alísios e reduz a umidade trazida para o NEB, aumentando a ocorrência de secas; o fenômeno oposto, La Niña, resfria essas águas e intensifica a umidade, resultando em mais chuvas no semiárido nordestino.

A análise dos dados de temperatura e precipitação de 1990 a 2018 para a área próxima à Serra dos Cavalos, em Caruaru, evidencia o impacto destas dinâmicas sobre a precipitação e temperatura locais. Em 2012, mesmo sob um evento moderado de La Niña, a região registrou uma precipitação anormalmente baixa devido ao resfriamento do Pacífico Equatorial e à alta pressão subtropical do Atlântico, que suprimiram as chuvas esperadas. Por outro lado, em 2011, um evento La Niña sem interferências adicionais resultou em chuvas acima da média, com uma distribuição concentrada entre janeiro e julho e temperaturas variando de 21,5 °C a 26,6 °C. Já em 2016, sob a influência do fenômeno ENOS, a precipitação foi reduzida ao longo do ano, com um pico em março de apenas 72 mm, enquanto as temperaturas oscilaram entre 22,6 °C e 26 °C, reforçando o efeito dos eventos climáticos globais na configuração climática e ambiental da região.

Trabalhos de Campo

A área da Serra dos Cavalos foi inicialmente explorada virtualmente com o auxílio do Google Earth Pro, onde foram marcados pontos importantes para orientar o trajeto de campo. O primeiro trabalho de campo ocorreu de 07/05/2018 a 09/05/2018, com o objetivo de reconhecimento da área, observando-se características gerais, possíveis locais de coleta e usos da terra. O segundo trabalho, realizado de 20/07/2018 a 22/07/2018, teve o propósito de realizar as coletas dos sedimentos em dois perfis, denominados Garrote Velho (08° 25' 52.39" S / 36° 8' 13.78" O) e Cabeleira (08° 25' 40.41" S / 36° 5' 30.57" O).

A análise morfoestratigráfica foi conduzida com base nas propriedades sedimentológicas e pedológicas identificadas durante o mapeamento dos depósitos coluviais, conforme proposto por Frye & Wilman (1962) e Hughes (2010). Nas áreas de coleta, foram realizadas análises como descrição de

perfis estratigráficos, estudo da macrofábrica sedimentar, coleta de amostras para caracterização das propriedades sedimentológicas e datação dos sedimentos por luminescência opticamente estimulada.

Cada perfil mediu 100 cm, e devido à homogeneidade observada no pacote sedimentar, foram coletadas duas amostras em cada perfil denominados Garrote Velho (GV) e Cabeleira (CB), sendo elas: GV 10 e GV 50, e CB 10 e CB 50. Em nenhum dos perfis foi possível observar o embasamento cristalino, e ambos estão situados em uma encosta com cobertura coluvial em um corte de estrada de terra na zona rural de Altinho. Os locais escolhidos oferecem bom acesso, e há apenas um fluxo ocasional de pessoas e veículos na estrada próxima, sem propriedades nas redondezas.

Nos dois perfis observou-se predominância de material areno-argiloso. No perfil Garrote Velho, foi identificado um mosqueamento de ferro na porção inferior direita (Figura 3). O perfil Cabeleira, por sua vez, apresentou-se totalmente homogêneo, sem descontinuidades (Figura 4).

Análise Sedimentológica

Esta análise teve por finalidade a caracterização granulométrica dos sedimentos. A obtenção de dados numéricos para tal estudo foi adquirida, no método de Gale & Hoare (1991).

Para a separação dos sedimentos finos e grossos, 100g de cada amostra foi lavada em solução de hexametáfosfato de sódio e levadas para secar em estufa. Posteriormente, as amostras são novamente pesadas e peneiradas em jogo de peneiras com intervalos sucessivos de 1 *phi* (Φ) para a determinação de areia muito fina, areia fina, areia, areia média, areia grossa, cascalho.

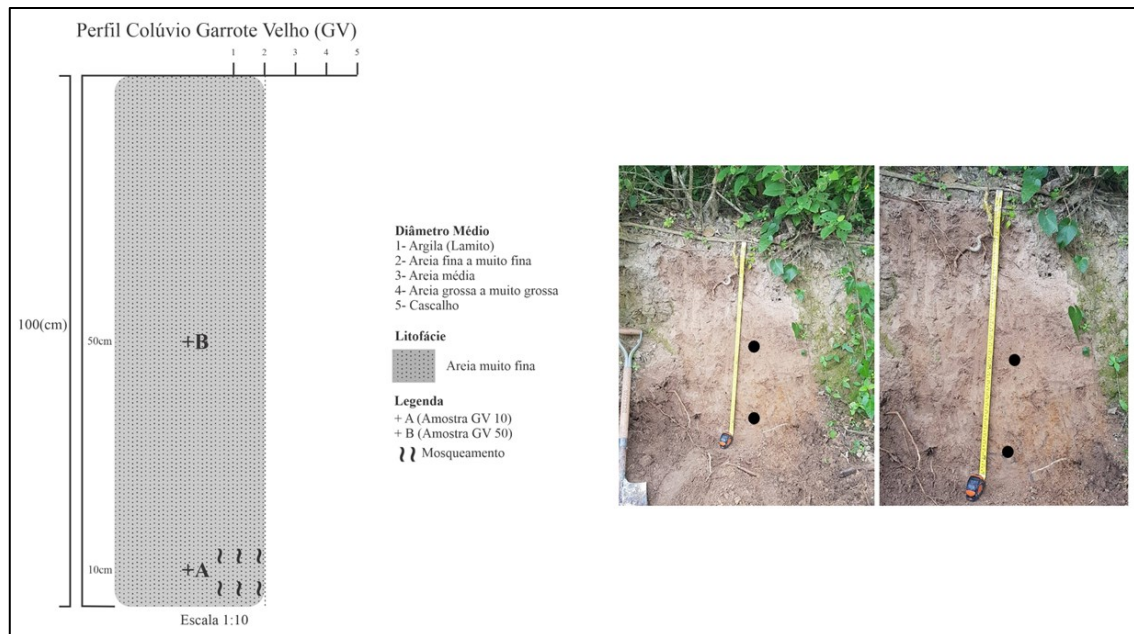
Em seguida, procedeu-se a separação das frações silte e argila conforme as recomendações do trabalho de Gale & Hoare (1991), que consiste na obtenção de 20g de amostra representativa pelo método de quarteação. Utilizando a peneira de 62 μ m o material foi lavado em solução de 0,5% de Hexametáfosfato de sódio para 1000cm³ de água destilada. Seguindo a tabela de tempo e profundidade em relação à temperatura em que as amostras devem ser coletadas, o material contendo diferentes tamanhos de partículas foi pipetado e depositado em beakers previamente pesados e numerados.

Após as coletas, o material foi transferido para estufa e secado a temperatura de 105°C. Após secagem, os beakers foram pesados para averiguação da quantidade de material coletado.

Os valores obtidos em gramas para cada fração granulométrica foram submetidos a tratamento seguindo os parâmetros estatísticos de Folk & Ward (1957), tendo sido calculados o diâmetro médio, o grau de seleção, o grau de assimetria e curtose.

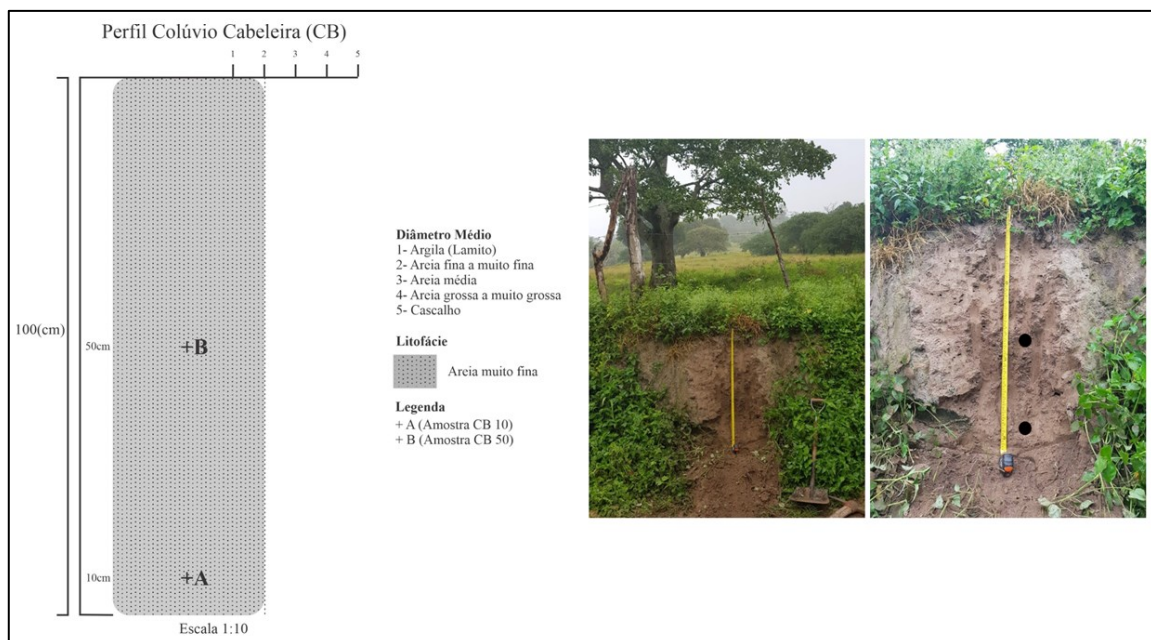
Camargo Filho e Bigarella (1998) destacam que o coeficiente de seleção reflete variações nas condições do fluido transportador, indicando que a seleção granulométrica é consequência direta do processo de sedimentação que atua sobre o material. Assim, depósitos com uma distribuição granulométrica mais heterogênea tendem a ser pobremente selecionados.

Figura 3 – Perfil Estratigráfico Garrote Velho (GV).



Fonte: Autoras (2020)

Figura 4 - Perfil Estratigráfico Cabeleira (CB)



Fonte: Autoras (2020)

A assimetria, por sua vez, revela a natureza do fluxo transportador dos sedimentos: uma assimetria positiva sugere um fluxo unidirecional, enquanto uma assimetria negativa indica um fluxo bidirecional. Valores de assimetria fortemente positivos estão associados a fácies areno-argilosas, enquanto valores fortemente negativos correspondem a fácies argilo-arenosas e argilo-sílticas.

A curtose gráfica indica o grau de achatamento da distribuição granulométrica em relação à curva normal em forma de sino. Conforme MacManus (1988), sedimentos pobremente selecionados ou com distribuições polimodais apresentam curvas platicúrticas, caracterizadas por um perfil mais achatado. Em contrapartida, amostras extremamente bem selecionadas, especialmente nos setores centrais da distribuição, resultam em curvas leptocúrticas, com maior acentuamento.

Para a classificação dos sedimentos foi usado o diagrama de Shepard, Pejrup e Folk utilizando o programa SysGran 3.0.

Datação por Luminescência Ópticamente Estimulada

As datações de sedimentos por luminescência opticamente estimulada (LOE) desta pesquisa foram realizadas no Laboratório Datação, Comércio e Prestação de Serviços LTDA.

Deste modo, os tubos de PVC foram abertos na extremidade interna de inserção indicado no ato da coleta, em ambiente de luz vermelha. Posteriormente, os sedimentos passaram por um tratamento químico com H₂O₂ (20%), HF (20%) e finalmente HCl (10%), sendo as lavagens intermediárias efetuadas com água destilada.

Após tratamento químico, as amostras foram secas e peneiradas, separando a fração granulométrica na faixa de 100-160 µm (100-60 Tyler), obtendo assim material natural (quartzo/feldspato) isentos de materiais orgânicos e/ou metais pesados, e com granulometria bem homogênea.

A partir da amostra de material natural, uma porção foi separada e submetida à radiação solar por um período de aproximadamente 20 dias para decaimento residual (TL / OSL). Desta porção foram separadas várias amostras que são irradiadas (fonte de ⁶⁰Co (455Ci)) em várias doses pré-definidas (Gy), que devem estar próximas a dose acumulada natural para montagem da curva de calibração.

O protocolo utilizado para a datação foi o SAR. Este protocolo é seguido para a determinação de uma idade média dentre pelo menos 10 a 20 alíquotas, ou seja, são construídas de 10 a 20 curvas

de calibração, onde são encontradas de 10 a 20 idades, sendo possível a construção de um histograma de idades e interpretação da variação de idades em cada amostragem.

No protocolo SAR apenas uma alíquota (~7mg) é utilizada para a determinação de cada Paleodose (P). Dessa forma, a alíquota usada na medida do sinal natural de LOE, será a mesma utilizada nas diversas etapas de irradiação para a construção da curva de calibração (Wallinga et. al., 2000). No protocolo SAR, se utilizado sempre as mesmas 20 alíquotas, será obtido no final 20 valores de P e, conseqüentemente, 20 idades diferentes para uma mesma amostra.

Embora o protocolo SAR elimine os problemas dos procedimentos de datação, existe uma série de fatores que, se não forem observadas e corrigidas, podem torná-lo tão propensos a erros como os demais protocolos. Wallinga et. al. (2000) chamam a atenção para o fato de que, repetidas etapas de irradiações podem ocasionar uma queda ou aumento na sensibilidade dos grãos que formam uma alíquota, gerando uma variação na resposta da LOE em função da dose aplicada.

A fim de corrigir este possível problema, entre as doses de radiação ionizante e após a medição do sinal natural, Wallinga et. al. (2000) sugerem que sejam aplicadas e medidas as doses de teste (D_T) constante e que esta seja determinada, com base no valor estimado para P, em torno de 10% P. Os autores afirmam que este teste é necessário para eficácia do protocolo SAR.

Para efetuar o protocolo SAR, foram seguidas as seguintes etapas:

1. Separação de 20-50 grãos (100-300 μ m) ou alíquotas (7mg) de cada amostra a ser datada;
2. Medida da LOE natural, L_n ;
3. Irradiação (fonte radioativa) com dose teste (D_T);
4. Tratamento térmico de 220°C;
5. Medida da LOE teste, T_n ;
6. Irradiação com dose regenerativa;
7. Tratamento térmico de 220°C;
8. Medida da LOE regenerativa, L_i ;
9. Irradiação com dose teste;
10. Tratamento térmico de 220°C;
11. Medida da LOE teste, T_i ;

12. Repetição do ciclo, começando a partir do item 7 até a 4 dose regenerativa.

Terminado a confecção da curva de calibração individual de cada grão/alíquota, foi feito um gráfico de calibração L_i/T_i versus a D_i . Como são usados os mesmos grãos para todo o ciclo, eles podem sofrer variações (alteração) na resposta da LOE. Essas variações são corrigidas através da leitura da dose teste, que será sempre constante em cada ciclo (geralmente em torno de 10% do valor da dose acumulada).

Com o gráfico da calibração pronto, inseriu-se o valor da taxa L_n/T_n (a luminescência natural contida na amostra pela luminescência teste), para encontrar o valor da dose acumulada natural no cristal.

Para se encontrar os valores de D_e , foram usados o modelo de cálculo pela média ponderada dos D_e , ou utiliza-se apenas os valores mais baixos de D_e , considerando que os valores altos estavam com sinal de LOE residuais.

O Protocolo SAR é composto por mais três testes:

1. Reciclagem – correção na sensibilidade da resposta ($0,9 < (L_i/T_i)/(L_1/T_1) < 1,1$, onde i = última dose igual a D_1);
2. Recuperação do sinal devido à irradiação, estimulação ou tratamentos térmicos prévios ($(L_0/L_{nat}) < 5\%$, onde L_0 = emissão devido à dose zero);
3. Recuperação de dose: determinação da dose, previamente estabelecida, usando o SAR, com os mesmos parâmetros usados para determinar a D_e da amostra.

A idade (I) é calculada dividindo D_e por T . Este é encontrada através dos valores de concentração dos isótopos radioativos do U, Th e K, além da contribuição da radiação cósmica.

Esses valores são determinados através de espectroscopia gama.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Ao analisar a classe granulométrica, constatou-se que as amostras do perfil Garrote Velho (GV) foram classificadas como silte grosso, enquanto as do perfil Cabeleira (CB) enquadram-se na categoria de areia muito fina. Essa classificação é um indicador relevante da área fonte desses sedimentos. Os resultados sugerem que os sedimentos se originaram em ambientes de regime climático úmido, submetidos intensamente ao intemperismo químico.

Presume-se, portanto, que eventos climáticos de médio a longo prazo contribuíram para o aumento de sedimentos mais finos, decorrentes de uma intensificação na atividade pedogenética. Essa variável reforça a classificação do maciço estrutural Serra dos Cavalos como um ambiente de brejo de altitude, caracterizado por condições de precipitação e temperatura distintas em relação ao entorno semiárido.

Conforme os resultados da dispersão das porcentagens granulométricas segundo Folk e Ward (1957), os sedimentos das amostras coletadas mostram-se muito pobremente selecionados. Esse fato sugere uma sedimentação rápida, reforçando a baixa capacidade de seleção dos agentes geológicos atuantes nas duas áreas de coleta.

O grau de assimetria possui grande relevância sedimentológica, pois fornece informações sobre a natureza do fluxo transportador. As amostras coletadas nos dois perfis indicaram um fluxo unidirecional, refletindo a composição areno-argilosa e de silte grosso desse material. A combinação dos resultados de seleção e assimetria, junto à análise de campo e aos mapeamentos realizados, sugere uma tendência de que os sedimentos do perfil Garrote Velho (GV) tenham se originado, em parte, de processos fluviais, conforme apontado nos estudos de Friedman (1961), Martins (1965) e Hajek et al. (2010).

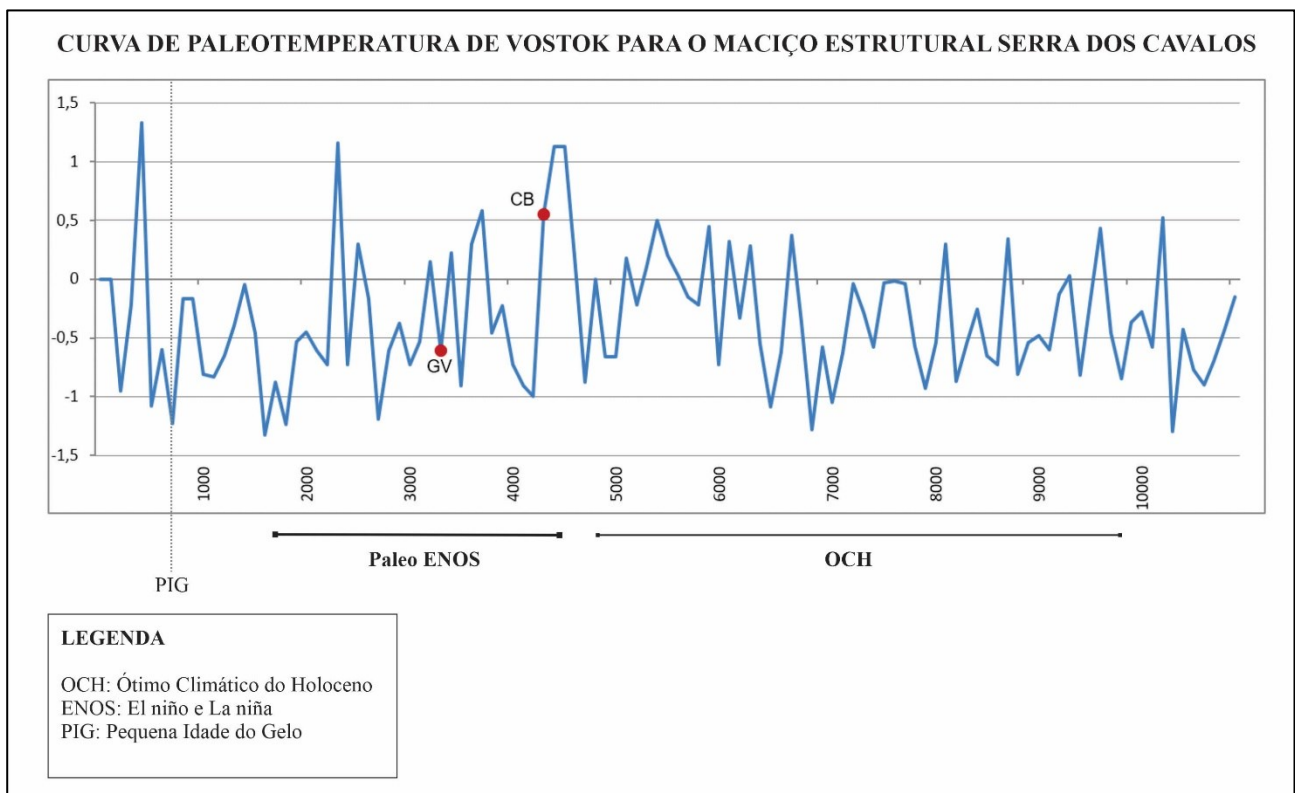
Ao analisar a estratigrafia dos depósitos estudados em uma escala temporal, foi possível reconstruir qualitativamente os cenários de deposição sedimentar. Observou-se que alguns eventos estão associados a padrões climáticos já identificados no Nordeste do Brasil para o Holoceno.

As amostras datadas encontram-se a uma profundidade de 10 cm (base), com fração granulométrica correspondente à areia muito fina. As idades de 3.255 ± 150 anos (ponto de coleta Garrote Velho) e 4.290 ± 360 anos (ponto de coleta Cabeleira) indicam um evento de queda de temperatura no Holoceno Superior, resultando em uma rápida transição para condições de semiaridez intensa (Adams et al., 1999; Petit et al., 1999). A textura dos pacotes sedimentares sugere que o coluvionamento foi desencadeado por um evento de precipitação de grande magnitude, capaz de gerar deslizamentos translacionais de baixa energia.

Considerando os eventos climáticos em escala local e regional, é possível afirmar que as idades determinadas para esses depósitos estão associadas ao evento Paleo-ENOS, ocorrido entre 4.700 e 1.700 anos AP. Segundo Melo (2019), esse período marca o início da ciclicidade do evento, especialmente em sua fase quente. A divisão da Célula de Walker cria um ramo descendente sobre a região Nordeste do Brasil, promovendo uma alteração na circulação climática global que começa a se assemelhar ao padrão observado atualmente.

A coleta GV é a mais antiga e está associada a um período de transição, onde a temperatura atinge seu ponto mais baixo, abaixo de $-0,5^{\circ}\text{C}$, e começa a subir (Figura 5). Essa transição reforça a afirmação de Knox (1972): “o momento máximo de atuação dos processos geomórficos ocorre na transição entre duas situações climáticas”. A coleta CB, por sua vez, encontra-se acima da linha de $0,5^{\circ}\text{C}$, em um período de aumento da temperatura. A remobilização dos sedimentos nessas condições está relacionada a eventos de precipitação de alta magnitude e baixa frequência.

Figura 5 - Curva de Paleotemperatura de Vostok e eventos paleoclimáticos correspondentes.



Fonte: Modificado pelas autoras a partir de Pettit et al. (1999), Adams et al. (1999) e Sousa (2024).

Embora estudos realizados por Amorim (2015), Moy et al. (2002) e Staines-Urías et al. (2015), conforme citado por Melo (2019), indiquem que o período entre 4.701 e 2.300 anos não registra a ocorrência de processos geomorfológicos capazes de formar depósitos de encosta no Planalto da Borborema, as datas obtidas neste trabalho e por Silva (2013) em Brejo da Madre de Deus e Fazenda Nova revelam uma dinâmica geomorfológica que remobilizou sedimentos de encostas em um período de semi-aridez extrema. Esse momento, anteriormente classificado como de ausência de umidade ou de estabilidade climática, é agora associado à fase quente do evento Paleo-ENOS.

Lima (2015) identificou apenas uma idade para o Holoceno superior (3.200 anos AP) na Chapada do Araripe. De acordo com a autora, é provável que a área não tenha sofrido uma remobilização significativa da cobertura superficial por movimentos de massa de alta energia, indicando uma estabilização das encostas promovida pela cobertura vegetal. A idade registrada foi obtida na margem de um canal que entalha uma camada basal de cascalho. Assim, supõe-se que tenha ocorrido um aumento do deflúvio e da energia ao longo do início do Ótimo Climático, com continuidade do entalhe ao longo do Holoceno superior, reforçando a hipótese de aumento de umidade nesse período.

Melo (2019) identificou nove idades relacionadas ao Paleo-ENOS distribuídas ao longo do Maciço Estrutural de Água Branca (AL). Destas, cinco coincidem na curva de paleotemperatura com momentos de variação significativa de temperatura, indicando uma mudança de fase do evento analisado. Essas evidências apoiam a hipótese de chuvas torrenciais isoladas associadas ao Paleo-ENOS no Nordeste do Brasil, especialmente no Planalto da Borborema, que se encontrava sob um clima semiárido severo. Assim, refuta-se a ideia de estabilidade climática para o período entre 4.701 e 2.300 anos, como sugerido por Amorim (2015), Moy et al. (2002) e Staines-Urías et al. (2015).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As conclusões sobre a evolução paleoambiental do maciço estrutural Serra dos Cavalos (PE) foram elaboradas a partir da análise morfoestratigráfica dos depósitos de encostas. Com base nos resultados sedimentológicos, foi possível determinar que os sedimentos depositados nas encostas dos perfis Garrote Velho e Cabeleira resultaram de processos rápidos de transporte e deposição. A classe granulométrica, aliada ao grau de seleção dos grãos (muito pobremente selecionados), sugere que o ambiente onde ocorreu esse processo foi influenciado por eventos de precipitação, intensificando o intemperismo químico.

Essas condições indicam que o transporte ocorreu de forma rápida e unidirecional, caracterizando-se por uma assimetria fortemente positiva. O material transportado corresponde a silte grosso no perfil Garrote Velho e a sedimentos areno-argilosos no perfil Cabeleira. A combinação dos resultados de seleção e assimetria sugere que os sedimentos do perfil GV foram influenciados tanto por processos fluviais quanto por processos de encosta, enquanto, no perfil CB, a ausência de influência fluvial é explicada pela sua distância da drenagem.

A área de coleta Garrote Velho configura-se na paisagem como uma rampa de colúvio que transita lateralmente para um plano aluvial, evidenciando uma sedimentação de caráter alúvio-coluvial. O perfil de coleta foi analisado conforme a exposição da área, uma vez que não foi possível realizar uma escavação mais profunda. Com base nas análises realizadas, infere-se que essa área corresponde a uma rampa suave em transição para o plano, com uma significativa contribuição de deposição fluvial, embora a influência da encosta no processo de sedimentação também seja evidente.

Na área de coleta do perfil Cabeleira, observa-se uma rampa com avental coluvial. Não pode ser classificada como um leque aluvial, devido à ausência de contribuição fluvial na sedimentação dessa encosta. Assim, trata-se de uma forma de espraiamento em avental, apresentando uma leve convexidade ao longo de sua extensão. Dessa forma, embora tenha um formato semelhante ao de um leque, a presença de convexidade confirma a característica de um avental coluvial.

As datações indicam uma associação entre os eventos perturbadores e períodos de precipitação de alta magnitude e baixa frequência. A periodicidade das datas obtidas sugere uma ligação com o evento regional de grande escala conhecido como Paleo-ENOS, manifestado em duas fases distintas.

No perfil GV, a datação coincide com um período de transição entre um pico de temperatura elevada e o ponto mais baixo do período, registrando temperaturas negativas durante o maior decréscimo térmico observado. Esse período de instabilidade, no qual se insere a coleta GV, ocorreu ao longo de aproximadamente 200 anos. Para o perfil CB, a datação situou-se em um momento após uma estabilização dos valores de temperatura, seguido de uma queda contínua iniciada entre 5.000 e 4.000 anos AP, que permaneceu constante.

Esses resultados reforçam a correlação entre as transições de períodos de aumento e redução de temperatura e a desestabilização dos sedimentos de encosta. Quando patamares de estabilidade são superados, ocorre uma desorganização do sistema analisado até que a paisagem atinja um novo nível de resiliência, promovendo estabilidade. No entanto, ao surgir uma nova alteração no geossistema, novos patamares de desestabilização serão alcançados.

AGRADECIMENTOS

As autoras agradecem apoio recebido pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq pela bolsa de mestrado, à Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco – FACEPE pelo financiamento da pesquisa (Processo APQ-0923-1.07/15) e ao Programa de Pós-Graduação em Geografia – PPGeo pelo financiamento dos trabalhos de campo.

REFERÊNCIAS

- ADAMS, J., MASLIN, M., THOMAS, E. Sudden climate transitions during the Quaternary. **Progress in Physical Geography**, 23(1), 1–36, 1999.
- AMORIM, R. F. **Integração Entre Dinâmicas Geomorfológicas Multitemporais no Planalto da Borborema, Semiárido do NE do Brasil**. Recife - Tese de Doutorado – Universidade Federal de Pernambuco, 194p. 2015.
- CAMARGO FILHO, M., BIGARELLA, J. J. Correlação de parâmetros estatísticos de sedimentos de vertentes, rampas de colúvio-alúvio e terraço de várzea da bacia do Bananas – Guarapuava – PR. **Geosul**, 14, 438 – 442, 1998.
- EMBRAPA SOLOS. **ZAPE - Levantamento de Reconhecimento de Baixa e Média Intensidade dos Solos do Estado de Pernambuco**. EMBRAPA. [S.l.]. 2001. Disponível em: <https://geoinfo.dados.embrapa.br/catalogue/#/dataset/2993>. Acesso: 20/02/2020
- FRIEDMAN, G.M. Distribution between Dune, Beach and River Sands from Textural Characteristic. **Journal of Sedimentary Petrology**, 31, 529-545, 1965.
- FOLK, R. L., WARD, W. Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters. **Journal of Sedimentary Research**, 27, 3-26, 1957.
- FRYE, J. C. & WILLMAN, H. B. Morphostratigraphic units in Pleistocene stratigraphy. *Am. Assoc. Petroleum Geologists Bull.*, v.46, p.112-113, 1962.
- GALE, S.J., HOARE, P.G. **Quaternary Sediments: Petrographic Methods for the Study of Ulithified Rocks**. Londres: Bethaven Press, 1991, 318 p.
- HAJEK, E. A., HELLER, P. L., SHEETS, B. A. Significance of channel-belt clustering in alluvial basins, **Geology**, 38, 535– 538, 2010.
- HUGHES, P. D. Geomorphology and Quaternary stratigraphy: The roles of morpho-, litho-, and allostratigraphy. **Geomorphology**, 123(3-4), 189-199. 2010.
- KNOX, J. C. Valley alluviation in southwestern Wisconsin. **Annals of the Association of American Geographers**, v. 62, p. 401-410, 1972.
- LIMA, F. J. **Evolução geomorfológica e reconstrução paleoambiental do setor subúmido do Planalto Sedimentar do Araripe: um estudo a partir dos depósitos coluviais localizados nos municípios de Crato e Barbalha – Ceará**. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.
- MACMANUS, J. Grain Size determination and interpretation. In: TUCKER, M. **Techniques in sedimentology**. Cambridge, Blackwell, pp. 63-85, 1998.
- MARTINS, L.R. Significance of skewness and kurtosis in environmental interpretation. **Journal of Sedimentary Petrology**, 35 (1): 768-770, 1965.

- MELO, R. F. T. **Evolução geomorfológica em bases paleoclimáticas do maciço estrutural de Água Branca – AL**. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.
- MOY, C. M; SELTZER, G. O.; RODBELL, D. T.; ANDERSON, D. M. Variability of El Niño/Southern Oscillation activity at millennial timescales during the Holocene epoch. **Nature**, 14;420(6912):162-5. 2002.
- NEVES, S.P., MARIANO, G., Assessing the tectonic significance of a large-scale transcurrent shear zone system: the Pernambuco lineament, northeastern Brazil. **Journal of Structural Geology**, 21(10): 1369-1383. 1999.
- NEVES, S.P., VAUCHEZ, A., FERAUD, G., Tectono-thermal evolution, magma emplacement, and shear zone development in the Caruaru area (Borborema Province, NE Brazil). **Precambrian Research**, 99: 1-32. 2000.
- PETIT, J. R. et al. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. **Nature**, v.399,429-436, 1999.
- PHILIPP, R. P.; MACHADO, R. The Neoproterozoic to Cambrian granitic magmatismo of the Pelotas Batholit, Southern Brazil. **J. S. Am Earth Sci**, 19:461-478, 2009.
- RIBEIRO, A. S. **Dinâmica paleoambiental da vegetação e clima durante o Quaternário Tardio em domínios da mata Atlântica, brejo do semi-árido e cerrados nordestinos, utilizando isótopos do carbono da matéria orgânica do solo e das plantas**. Tese (Doutorado em Ciências) Universidade de São Paulo, Piracicaba. 2002, 193 p.
- SOUSA, S. G. **Evolução Da Paisagem Geomorfológica Na Bacia Hidrográfica Do Rio Cariús (BHRC), Semiárido Brasileiro**. Tese (Doutorado) Universidade Federal de Pernambuco. 2024, 201p.
- SILVA, D. G. **Reconstrução da dinâmica geomorfológica do semiárido brasileiro no Quaternário superior a partir de uma abordagem multiproxy**. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, 2013.
- STANISTREET, I.G.; MACCARTHY, T.S. The Okavango fan and the classification of subaerial fan systems. **Sedimentary Geology**. 86:11-133. 1993.
- WALLINGA, J., MURRAY, A., WINTLE A. The single-aliquot regenerative-dose (SAR) protocol applied to coarse-grain feldspar. **Radiation Measurements**, 32, 5-6, 529-533, 2000.