



TAXAS DE DENUDAÇÃO EM MACIÇOS CRISTALINOS NO NORDESTE BRASILEIRO, CEARÁ

Danielle Lopes de Sousa Lima¹
Frederico de Holanda Bastos²
Lionel Siame³
Abner Monteiro Nunes Cordeiro⁴

RESUMO

Os maciços de Baturité, Aratanha, Maranguape e Uruburetama, localizados no semiárido brasileiro, constituem planaltos graníticos e metamórficos situados no Domínio Ceará Central (DCC), que representam o maior domínio tectônico da porção setentrional da Província Borborema. O presente trabalho tem como objetivo analisar as taxas de denudação desses maciços e interpretar os aspectos litoestruturais e climáticos relacionados à sua evolução. Para tanto, foram coletadas amostras de afloramentos de rochas e de sedimentos fluviais, que foram analisadas para mensurar as concentrações do nuclídeo cosmogênico ^{10}Be produzido *in situ* em grãos de quartzo para se obter as taxas de denudação. No maciço metamórfico de Baturité, as taxas médias de denudação estimadas nos sedimentos fluviais das encostas são de $18,0 \pm 1,8$ m/Ma, enquanto nos afloramentos do topo a taxa reduz consideravelmente para $2,8 \pm 0,2$ m/Ma. Situação semelhante ocorre nos maciços graníticos de Aratanha e Maranguape, verificando-se taxas médias de $17,3 \pm 1,7$ m/Ma nos sedimentos fluviais, com redução para $2,8 \pm 0,2$ m/Ma nos afloramentos. Por sua vez, o maciço granítico de Uruburetama apresenta taxas médias de denudação de $12,7 \pm 1,1$ m/Ma nos sedimentos fluviais, enquanto nos afloramentos estas diminuem para $3,6 \pm 0,3$ m/Ma. Esses dados evidenciam claramente o papel da erosão diferencial de granitos, quartzitos e ortogneisses em termos de evolução geomorfológica regional mantendo maciços, enquanto que rochas paraderivadas constituem superfícies de aplainamento. Além disso, destaca-se também o controle edafoclimático, onde as áreas de barlavento apresentam taxas médias de $13,4 \pm 1,3$ m/Ma, enquanto que os setores de sotavento apresentam valores $18,0 \pm 1,7$ m/Ma, indicando o papel da vegetação na diminuição da denudação.

Palavras-chave: Nuclídeos Cosmogênicos, Evolução Geomorfológica, Maciços Cristalinos, Semiárido Brasileiro.

INTRODUÇÃO

O desenvolvimento e incorporação de técnicas e métodos aplicados aos processos denudacionais, proporcionam novas perspectivas nas investigações geomorfológicas,

¹ Departamento de Geografia, Universidade Estadual do Ceará (UECE), Fortaleza, Ceará danielle.llopes@hotmail.com;

² Departamento de Geografia, Universidade Estadual do Ceará (UECE), Fortaleza, Ceará fred.holanda@uece.br;

³ Centre de Recherche et d'Enseignement de Géosciences de l'Environnement, Université Aix-Marseille (AMU), Aix-En-Provence, França, siame@cerge.fr;

⁴ Departamento de Geografia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Ensino Superior do Seridó, Caicó, Rio Grande do Norte, abner.cordeiro@ufrn.br.

possibilitando restringir as taxas de evolução da paisagem. No âmbito da Geomorfologia o isótopo cosmogênico Berílio-10 (^{10}Be) produzido *in situ* no quartzo possui grande aplicabilidade, mostrando-se como um importante método para o desenvolvimento de estudos quantitativos dos mecanismos envolvendo a evolução da superfície terrestre (Braucher *et al.*, 2000; Siame; Braucher; Bourlès, 2000).

Os maciços de Baturité, Aratanha, Maranguape e Uruburetama (Figura 1), localizados no semiárido brasileiro, constituem planaltos graníticos e metamórficos situados no Domínio Ceará Central (DCC), configurando como relevos residuais montanhosos que se destacam ao longo de superfícies de aplainamento regionais.

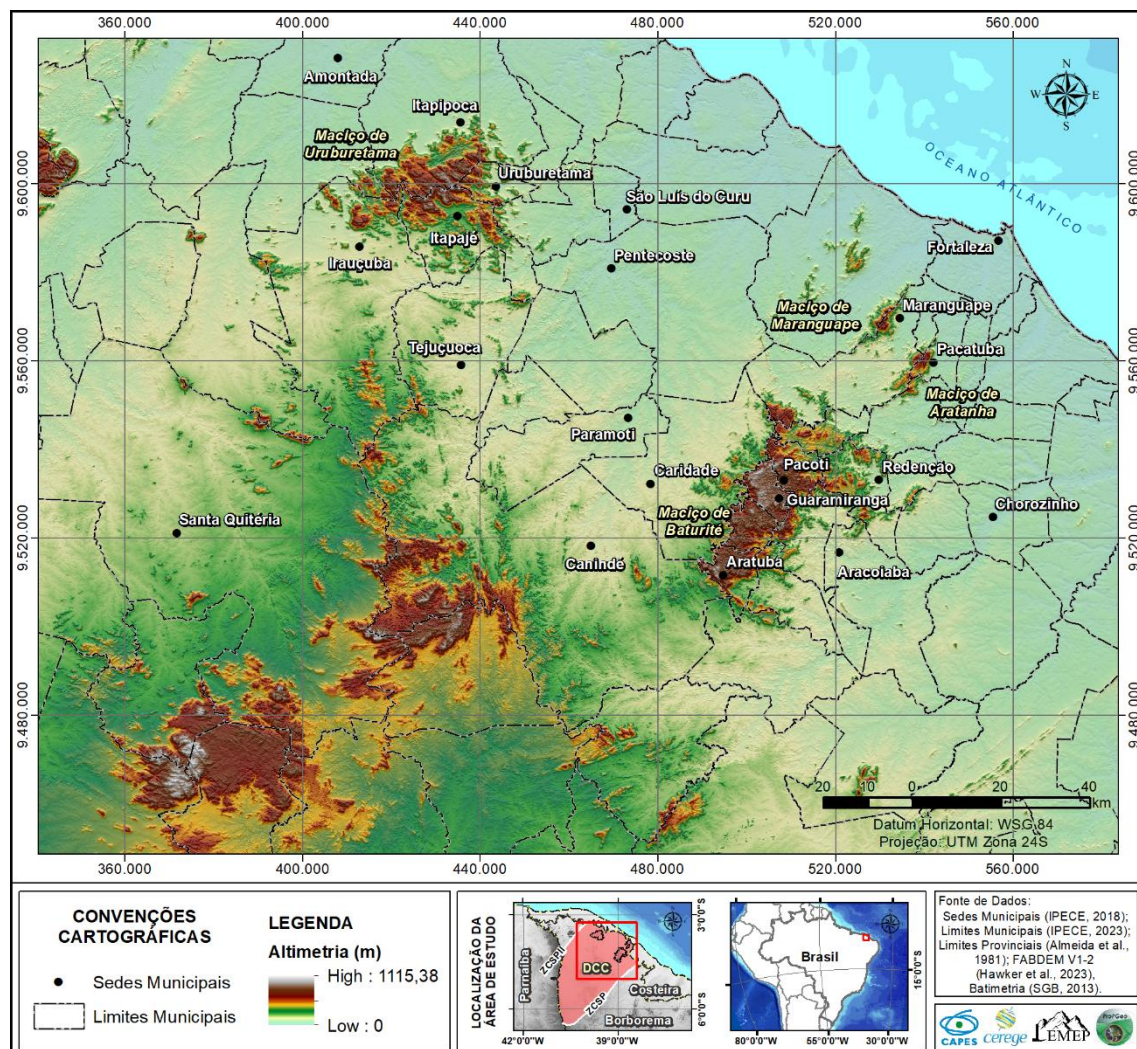


Figura 1 – Localização da área de estudo, Ceará, Brasil.

O DCC se caracteriza como o bloco tectônico de maior expressão da porção setentrional do cinturão orogênico Neoproterozóico conhecido como Província



Borborema (Angelim *et al.*, 2003; Fetter *et al.*, 2000; Angelim *et al.*, 2003; Brito Neves; Santos; Van Schmus, 2000), cujo soerguimento cenozoico lhe conferiu a condição de mais importante divisor de águas do Ceará (Saadi; Torquato, 1992).

Geomorfologicamente, o DCC é marcado por forte controle estrutural decorrente de zonas de cisalhamento transcorrentes do Neoproterozoico e da reativação tectônica no Cretáceo (Brito Neves *et al.*, 1999; Peulvast; Claudino-Sales, 2004), que influenciaram a dissecação e a orientação preferencial dos maciços residuais (Maia; Bezerra; Claudino-Sales, 2010). O DCC reúne registros significativos da evolução geodinâmica da Província Borborema.

Deste modo, o presente trabalho tem como objetivo analisar as taxas de denudação desses maciços pré-litorâneos e interpretar os aspectos litoestruturais e climáticos relacionados à sua evolução. Por meio da integração de dados geológicos, geomorfológicos, climáticos e isotópicos, o estudo contribui para ampliar o conhecimento sobre os mecanismos que regulam a morfodinâmica desses compartimentos do relevo nordestino.

MATERIAL E MÉTODOS

As etapas metodológicas adotadas na elaboração deste trabalho fundamentaram-se em levantamento bibliográfico sobre os aspectos geológicos, geomorfológicos e climáticos da área de estudo. Esses aspectos constituem fatores associados aos processos denudacionais, sendo variáveis relevantes no contexto da morfodinâmica. Para isso, foram considerados os estudos de Bastos (2012); Bastos e Cordeiro (2021); Bétard e Peulvast (2011); Cordeiro *et al.* (2023), Funceme (2024), Lima *et al.* (2019); Pineó *et al.* (2020), Pitombeira *et al.*, (2021), Souza (2000), entre outros.

As taxas de denudação máximas foram estimadas a partir da concentração do isótopo cosmogênico ^{10}Be *in situ* em 49 amostras coletadas em trabalhos de campo: 35 de sedimentos fluviais coletados nos exutórios de bacias hidrográficas e 14 de afloramentos de rochas situados em cristas e domos rochosos. As análises foram realizadas no *Laboratoire National des Nucléides Cosmogéniques* (LN2C), no *Centre Européen de Recherche et d'Enseignement des Géosciences de l'Environnement* (CEREGE) na França.



As amostras passaram por análises laboratoriais que envolvem seleção granulométrica, separação física, magnética e gravimétrica. Sendo realizados os procedimentos necessários para concentrar e purificar o quartzo (SiO_2) nas amostras, assim como a separação química do Be e a medição isotópica por *Accelerator Mass Spectrometry* (AMS) (Arnold *et al.*, 2010; Bierman *et al.*, 2021; Braucher *et al.*, 2011; Gosse; Phillips, 2001). A preparação das amostras seguiu o protocolo adaptado de Brown *et al.* (1991) e Merchel e Herpers (1999) e por Braucher *et al.* (2011).

Os dados obtidos foram relacionados ao arcabouço litoestrutural da área (Pinéo *et al.*, 2020; Pitombeira *et al.*, 2021), com o objetivo de identificar variações nas taxas de denudação e evidenciar a influência da litologia sobre os processos de erosão diferencial. Ademais, avaliou-se a atuação de fatores climáticos, como os efeitos de barlavento e sotavento, na dinâmica dos processos denudacionais, considerando as interações entre clima (Funceme, 2024), solos e cobertura vegetal na evolução da paisagem.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

No maciço metamórfico de Baturité, as taxas médias de denudação estimadas nos sedimentos fluviais situados nas encostas do maciço são de $18,0 \pm 1,8$ m/Ma, enquanto nos afloramentos do topo do relevo a taxa reduz consideravelmente para $2,8 \pm 0,2$ m/Ma, indicando um ritmo de denudação mais lento em afloramentos rochosos.

Situação semelhante ocorre nos maciços graníticos de Aratanha e Maranguape, verificando-se taxas médias de $17,3 \pm 1,7$ m/Ma nos sedimentos fluviais, com redução para $2,8 \pm 0,2$ m/Ma nos afloramentos. Já o maciço granítico de Uruburetama apresenta taxas médias de denudação de $12,7 \pm 1,1$ m/Ma nos sedimentos fluviais, enquanto nos afloramentos estas diminuem para $3,6 \pm 0,3$ m/Ma.

As bacias regionais situadas preferencialmente nas superfícies sertanejas apresentam uma taxa média de denudação intermediária de $14,0 \pm 1,2$ m/MA, variando de $13,3 \pm 0,9$ (DL22-16, rio Aracatiaçu), $13,4 \pm 1,2$ (DL22-17, rio Choró) e $15,4 \pm 1,5$ (DL22-01, rio Curu).

Esses dados evidenciam claramente o papel da erosão diferencial de granitos, quartzitos e ortognaisses em termos de evolução geomorfológica regional tendo menor competência denudacional para rebaixar esses maciços, enquanto que rochas paraderivadas constituem superfícies de aplainamento rebaixadas mais rapidamente.



15º SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA

Verifica-se que os maciços estudados apresentam uma ampla variação nas taxas de denudação, especialmente nas bacias hidrográficas, cujos valores oscilam entre 3,5 e 32,8 m/Ma. Nos afloramentos rochosos, as taxas são mais baixas e apresentam menor variabilidade, variando de 1,1 a 8,1 m/Ma. Em relação à litologia, as amostras coletadas em quartzito revelam taxas entre 2,6 e 2,9 m/Ma, enquanto aquelas obtidas em granitos demonstram um intervalo mais amplo, de 1,1 a 8,1 m/Ma. Esse dados refletem um contraste na dinâmica de denudação entre os diferentes ambientes (Figura 2).

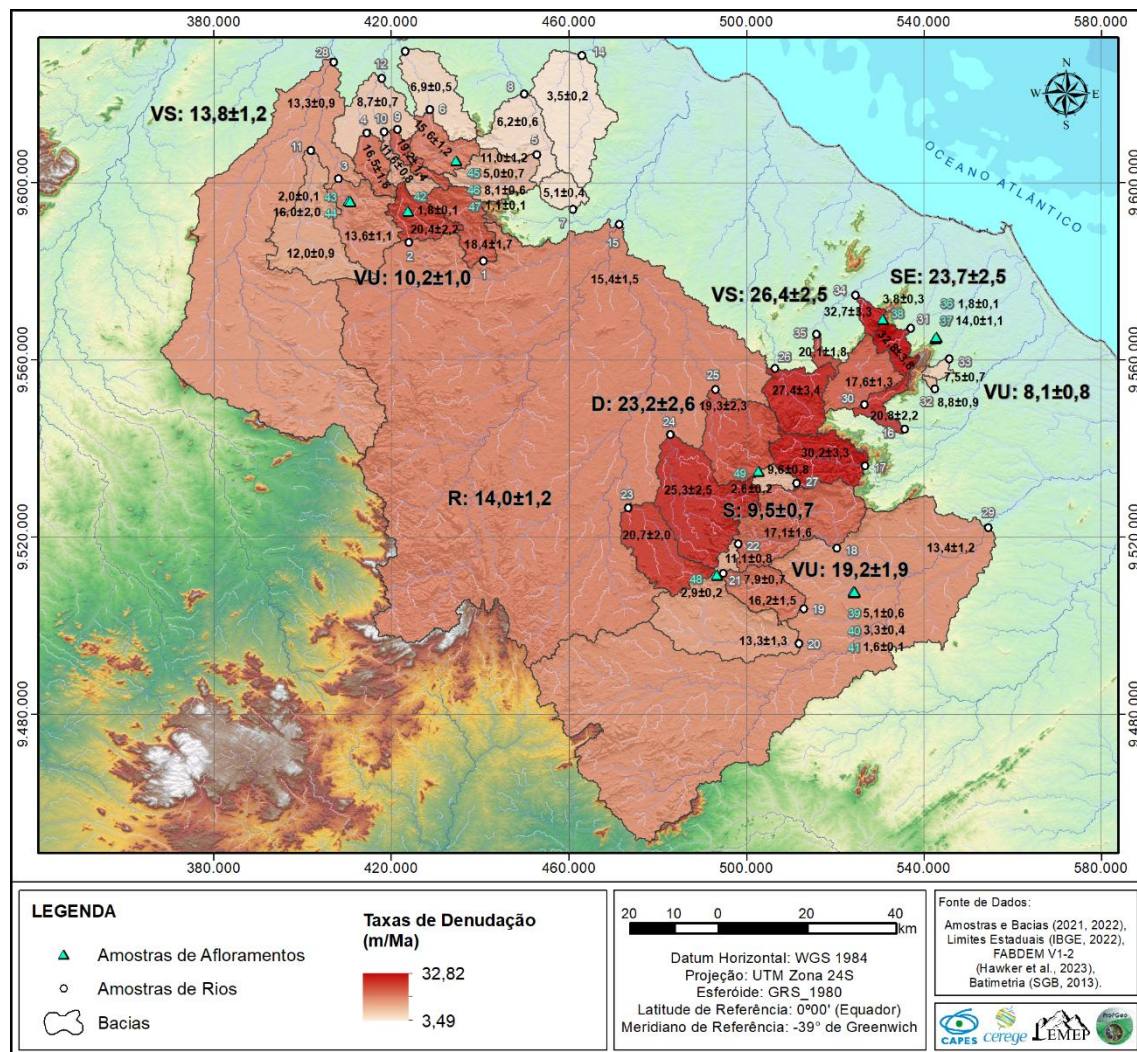


Figura 2 – Taxas de denudação (m/Ma) a partir de concentrações *in situ* de ^{10}Be medidas em sedimentos fluviais e em afloramentos de rocha. Os números pretos grandes correspondem aos valores médios e incertezas de 1σ para taxas máximas de denudação calculadas usando ^{10}Be *in situ* e a suposição de equilíbrio secular. Abreviações: S: Somital; VU: vertente úmida; VS: vertente seca; SE: Superfície Erosiva; R: Bacias Regionais.



Sob a perspectiva mesoclimática, os setores de barlavento apresentam taxas médias de denudação de $13,4 \pm 1,3$ m/Ma, com valores de $8,1 \pm 0,8$ m/Ma em Aratanha, $10,2 \pm 1,0$ m/Ma em Uruburetama e $19,2 \pm 1,9$ m/Ma em Baturité. Em contraste, as áreas situadas em sotavento registram taxas médias mais elevadas, alcançando $18,0 \pm 1,7$ m/Ma, com destaque para os valores de $26,4 \pm 2,5$ m/Ma em Maranguape, $13,8 \pm 1,2$ m/Ma em Uruburetama e $23,2 \pm 2,6$ m/Ma em Baturité.

De modo geral, verifica-se que os setores mais secos de sotavento apresentam taxas de denudação mais elevadas, resultado direto das características resistásticas dessas áreas. A cobertura vegetal arbustiva oferece pouca proteção contra os processos erosivos, especialmente em ambientes semiáridos sujeitos a chuvas intensas e concentradas em curtos períodos do ano. Adicionalmente, os acentuados declives desses compartimentos favorecem a ação erosiva dessas áreas.

A cobertura vegetal e as propriedades do solo desempenham papel fundamental no controle da erosão, contribuindo para a retenção e estabilização dos sedimentos superficiais. Contudo, em áreas de relevo acentuado, a inclinação favorece o deslocamento de materiais coluviais, intensificando os processos de transporte e redistribuição de sedimentos ao longo das vertentes.

Com base nos dados analisados, observa-se que os maciços de Baturité, Aratanha e Maranguape, bem como suas áreas adjacentes, concentram as maiores taxas máximas de denudação da região estudada, superando os valores registrados no maciço de Uruburetama e entorno. Essa diferença pode estar relacionada à interação entre fatores litológicos, climáticos, geomorfológicos, pedológicos, com destaque para o papel da vegetação na redução dos processos erosivos.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As taxas de denudação analisadas refletem variações significativas entre diferentes litologias, formas de relevo e condições climáticas. Os maciços de Baturité, Aratanha e Maranguape concentram os maiores valores quando comparados ao maciço de Uruburetama. De modo geral, os setores de sotavento apresentam taxas mais elevadas, onde a limitada proteção da vegetação e os declives acentuados favorecem a erosão. Em contraste, os topo dos maciços (em afloramentos) mostram taxas mais baixas, indicando um ritmo de denudação mais lento. Os granitos, quartzitos e ortognaisses são mais



resistentes, enquanto que rochas paraderivadas constituem superfícies de aplainamento. A combinação entre clima, relevo, tipo de rocha e cobertura vegetal define a dinâmica erosiva regional. Dessa forma, apresentam-se informações que podem servir como subsídio para a interpretação da evolução geomorfológica dos maciços cristalinos da Província Borborema a partir da quantificação das taxas de denudação em relevos bastante representativos do DCC como os maciços pré-litorâneos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), por meio do Comitê Francês de Avaliação da Cooperação Universitária com o Brasil (CAPES/COFECUB), pelo apoio à pesquisa através da concessão de bolsa de doutorado ao primeiro autor. Estendem seus agradecimentos ao *Centre Européen de Recherche et d'Enseignement des Géosciences de l'Environnement* (CEREGE), pelo acolhimento e análises laboratoriais, e ao Laboratório de Estudos Morfoestruturais e Pedológicos (LEMEP) da Universidade Estadual do Ceará (UECE), por todo o suporte durante o desenvolvimento da pesquisa de doutorado.

REFERÊNCIAS

- ANGELIM, L. A. A.; VASCONCELOS, A. M.; GOMES, I. P.; SANTOS, E. J. Geotectônica do Escudo Atlântico: Província Borborema. In: BIZZI, L. A.; SCHOBENHAUS, C.; VIDOTTI, R. M.; GONÇALVES, J. H. (Orgs.). **Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil**: textos, mapas e SIG. Brasília: Serviço Geológico do Brasil, 2003. cap. 5, p. 264–281.
- ARNOLD, M.; MERCHEL, S.; BOURLÈS, D. L.; BRAUCHER, R.; BENEDETTI, L.; FINKEL, R. C.; AUMAÎTRE, G.; GOTTDANG, A.; KLEIN, M. The French accelerator mass spectrometry facility ASTER: improved performance and developments. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms**, v. 268, n. 11–12, p. 1954–1959, 2010.
- BASTOS, F. de H. **Movimentos de massa no Maciço de Baturité (Ce) e contribuições para estratégias de planejamento ambiental**. 2012. 257 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.



BASTOS, F. H.; CORDEIRO, A. M. N. Geomorphological properties of the rocks and their repercussions in the relief of the north sector in Brazilian Northeast region. **W.M. Davis Revista de Geomorfologia**, v. 2, n. 1, p. 1–33, 2021.

BÉTARD, F.; PEULVAST, J.-P. Evolução morfoestrutural e morfopedológica do Maciço de Baturité e de seu Piemonte: do Cretáceo ao presente. In: BASTOS, F. H. (Org.). **Serra de Baturité: uma visão integrada das questões ambientais**. Fortaleza: Expressão Gráfica e Editor, 2011. p. 35–59.

BIERMAN, P. R.; BENDER, A. M.; CHRIST, A. J.; CORBETT, L. B.; HALSTED, C. T.; PORTENGA, E. W.; SCHMIDT, A. H. Dating by cosmogenic nuclides. In: ALDERTON, D. H. M. (Ed.). **Encyclopedia of Geology**. 2. ed. Elsevier, 2021. p. 101–115.

BRAUCHER, R.; MERCHEL, S.; BORGOMANO, J.; BOURLÈS, D. L. Production of cosmogenic radionuclides at great depth: A multi element approach. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 309, n. 1–2, p. 1–9, 2011.

BRAUCHER, R.; BOURLÈS, D. L.; BROWN, E. T.; COLIN, F.; MULLER, J.-P.; BRAUN, J.-J.; DELAUNE, M.; EDOU MINKO, A.; LESCOUET, C.; RAISBECK, G. M.; YIOU, F. Application of in situ-produced cosmogenic ^{10}Be and ^{26}Al to the study of lateritic soil development in tropical forest: theory and examples from Cameroon and Gabon. **Chemical Geology**, v. 170, n. 1–4, p. 95–111, 2000.

BRITO NEVES, B. B. América do Sul: quatro fusões, quatro fissões e o processo acrescionário andino. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 29, n. 3, p. 379–392, 1999.

BRITO NEVES, B. B.; SANTOS, E. J.; VAN SCHMUS, W. R. Tectonic history of the Borborema Province, Northeastern Brazil. In: CORDANI, G. U.; MILANI, E. J.; THOMAZ FILHO, A.; CAMPOS, D. A. (Orgs.). **Tectonic Evolution of South America**. 31st International Geological Congress, Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: Serviço Geológico do Brasil, 2000. p. 151–182.

BROWN, E. T.; EDMOND, J. M.; RAISBECK, G. M.; YIOU, F.; KURZ, M. D.; BROOK, E. J. Examination of surface exposure ages of Antarctic moraines using in situ produced ^{10}Be and ^{26}Al . **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 55, p. 2269–2283, 1991.

CORDEIRO, A. M. N.; BASTOS, F. H.; SIAME, L.; LIMA, D. L. S. Geomorphology of the Maranguape and Aratanha massifs, Borborema Province, Northeast of Brazil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 24, n. 1, 2023.

FETTER, A. H.; VAN SCHMUS, W. R.; SANTOS, T. J. S.; NOGUEIRA NETO, J. A.; ARTHAUD, M. H. U-Pb and Sm-Nd geochronological constraints on the crustal evolution and basement architecture of Ceará State, NW Borborema Province, NE Brazil: implications for the existence of the Paleoproterozoic supercontinent “Atlantica”. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 30, n. 1, p. 102–106, 2000.



FUNCEME – FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS. **Postos Pluviométricos do Estado do Ceará (1991–2024)**. Fortaleza: FUNCEME, 2024.

GOSSE, J. C.; PHILLIPS, F. M. Terrestrial in situ cosmogenic nuclides: theory and application. **Quaternary Science Reviews**, v. 20, n. 14, p. 1475–1560, 2001.

LIMA, D. L. S.; BASTOS, F. H.; CORDEIRO, A. M. N.; MAIA, R. P. Geomorfologia granítica do Maciço de Uruburetama, Ceará, Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 20, n. 2, p. 331–346, 2019.

MAIA, R. P.; BEZERRA, F. H. R.; CLAUDINO-SALES, V. Geomorfologia do Nordeste: concepções clássicas e atuais acerca das superfícies de aplainamento nordestinas. **Revista de Geografia**, Recife, PE, v. 27, n. 1, p. 6–19, set. 2010.

MERCHEL, S.; HERPERS, U. An update on radiochemical separation techniques for the determination of long-lived radionuclides via accelerator mass spectrometry. **Radiochimica Acta**, v. 84, n. 4, p. 215–219, 1999.

PEULVAST, J.-P.; CLAUDINO-SALES, V. Stepped surfaces and palaeolandforms in the northern Brazilian “Nordeste”: constraints on models of morphotectonic evolution. **Geomorphology**, v. 62, n. 1–2, p. 89–122, 2004.

PINÉO, T. R. G.; PALHETA, E. S. M.; COSTA, F. G.; VASCONCELOS, A. M.; GOMES, I. P.; GOMES, F. E. M.; BESSA, M. D. M. R.; LIMA, A. F.; HOLANDA, J. L. R.; FREIRE, D. P. C. **Mapa geológico do Estado do Ceará**. Projeto Geologia e Recursos Minerais do Estado do Ceará, escala 1:500.000. Fortaleza: Serviço Geológico do Brasil/CPRM, 2020.

PITOMBEIRA, J. P. A.; AMARAL, W. S.; SANTOS, T. J. S.; DANTAS, E. L.; FUCK, R. A. A new record of continental arc magmatism in the Ceará Central Domain, Borborema Province (NE Brazil): evidence from the Pacatuba-Maranguape Complex. **Precambrian Research**, v. 359, p. 1–28, 2021.

SAADI, A.; TORQUATO, J. R. Contribuição à neotectônica do Estado do Ceará. **Revista de Geologia da UFC**, v. 5, p. 5–38, 1992.

SIAME, L. L.; BRAUCHER, R.; BOURLÈS, D. L. Les nucléides cosmogéniques produits in-situ; de nouveaux outils en géomorphologie quantitative. **Bulletin de la Société géologique de France**, v. 171, n. 4, p. 383–396, 2000.

SOUZA, M. J. N. Bases naturais e esboço do zoneamento geoambiental do Estado do Ceará. In: LIMA, L. C. (Org.). **Compartimentação territorial e gestão regional do Ceará**. Fortaleza: FUNECE, 2000. p. 127–140.