

Artigo de Pesquisa

## Inselbergs modelados por colapso: considerações sobre o controle estrutural em escarpas graníticas

### *Inselbergs shaped by collapse: considerations on the structural control on granitic scarps*

Rubson Pinheiro Maia <sup>1</sup>, Anna Sabrina Vidal de Souza <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal do Ceará, Departamento de Geografia, Fortaleza, Brasil. [rubsonpinheiro@yahoo.com.br](mailto:rubsonpinheiro@yahoo.com.br).  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1688-5187>

<sup>2</sup> Universidade Federal do Ceará, Departamento de Geografia, Fortaleza, Brasil. [annasabrinavidal@gmail.com](mailto:annasabrinavidal@gmail.com).  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5070-8208>

Recebido: 16/05/2023; Aceito: 04/09/2023; Publicado: 09/04/2024

**Resumo:** *Inselbergs* caracterizados por feições de fraturamento correspondem à manifestação geomorfológica do desmembramento do corpo rochoso e colapso. As escarpas íngremes e parcialmente recobertas por blocos angulosos dispostos caoticamente revela, em termos evolutivos, a predominância dos controles morfoestruturais, dados pela presença de veios/diques, *sheeting joints*, e fraturas verticais. Esses planos estruturais, por sua vez, criam anisotropias que orientam as direções de fraturamento e queda de blocos. Nesse trabalho, propõe-se um modelo de evolução geomorfológica de *inselbergs* graníticos submetidos a uma pré-disposição estrutural ao fraturamento. Para tanto, foram analisados os *inselbergs* Pedra da Galinha Choca (PGC) e a Pedra Faladeira (Quixadá, NE do Brasil) cujas morfologias atestam processos de desintegração mecânica. A extração e interpretação de dados baseou-se em trabalhos de campo e levantamento aerofotogramétrico com drone, cujos produtos são modelo digital de alta resolução, ortomosaico e MDE. Observou-se que redes de fraturamentos multidirecionais promovem o encaixe de blocos, permitindo a manutenção de escarpas íngremes (>60°), nas quais feições de dissolução tendem a ser incipientes dada a instabilidade estrutural que promove colapso. Assim, as principais feições de ornamentação nesses relevos são cavidades do tipo tafone de colapso (TC) e megablocos colapsados (MBC). Como resultado desse contexto estrutural, tem-se *inselberg* com feições angulosas, escarpas íngremes e amplos depósitos de tálus.

**Palavras-chave:** Fraturas; Escarpa; Blocos; Colapso.

**Abstract:** *Inselbergs* characterised by fracturing features correspond to the geomorphological manifestation of break-up of the rock mass and collapse. The steep slopes partially covered by angular boulders scattered chaotically reveal, in evolutionary terms, the predominance of the morphostructural controls, given by the presence of veins/dikes, *sheeting joints*, and vertical fractures. These structural planes in turn create anisotropies guiding fracturing directions and rockfall. In this work, we propose a model of geomorphological evolution of granitic *inselbergs* subjected to a structural propensity to fracturing. For this purpose, we analysed the Pedra da Galinha Choca *inselberg* (PGC) and Pedra Faladeira (Quixadá, NE of Brazil) *inselbergs*, whose morphologies attest to mechanical disintegration processes. Data extraction and interpretation were based on fieldwork and UAV photogrammetry, which provided products such as high-resolution models, orthomosaic, and DEM. Networks of multidirectional fractures were observed to promote an arrangement of interlocking blocks, allowing the maintenance of steep slopes (>60°), in which solutional features tend to be incipient due to the structural instability promoting collapse. Thus, the main features on the hillslopes are cavities like collapse tafone (CT) and large collapsed boulders (LCB). As a result of this structural setting, the *inselberg* displays sharp outlines, steep slopes, and wide talus deposits.

**Keywords:** Fractures; Scarp; Blocks; Collapse.

## 1. Introdução

Relevos dominados por feições de fraturamento são caracterizados predominantemente pelo desmembramento do corpo rochoso. Colapso de blocos e desintegração mecânica são resultantes da propagação de fraturas que responde a um conjunto de processos, desde esforços tectônicos, gravitacionais, a condições climáticas (e.g., termoclastia) e processos erosivos (e.g. alívio de pressão na exumação de corpos graníticos) (Eppes, 2022). Os fraturamentos tendem a ocorrer ao longo de heterogeneidades da rocha, i.e., intrusões tardias, contatos intergranulares (Gomez-Heras *et al.*, 2006; Shang, 2020), ou se desenvolver paralelamente à superfície (e.g. *sheet joints*) (Martel, 2006). Os processos de intemperismo mecânico ao promoverem fraturamento gradual nas rochas, fornecem as condições para a instabilidade de escarpas íngremes e fraturadas, cuja evolução geomorfológica tem significativa influência do controle estrutural, como apontam diversos autores (Brideau *et al.*, 2009; Sted; Wolter, 2015; Matasci *et al.*, 2015; Neely *et al.*, 2019; Neely e Dibiase, 2020).

Estudos recentes com análises de sensoriamento remoto de alta resolução demonstram que sistemas de juntas e intrusões de diques e veios geram descontinuidades aproveitadas pela erosão, de modo que formas de relevo tais como torres, pilares e campos de boulders revelam a configuração estrutural nas rochas graníticas (Chigira; Kato, 2023; Chigira, 2021; Chigira; Hirata, 2021). Apesar da reconhecida influência das heranças estruturais na permanência de relevos residuais, como *inselbergs*, em meio à processos erosivos regionais (Migoñ, 2004; Vidal Romani, 2008), a diversidade de padrões morfológicos em *inselbergs* é ainda pouco explorada na literatura geomorfológica, sobretudo no tocante aos controles estruturais no aspecto das escarpas. Assim, as variadas formas que os *inselbergs* podem assumir como resultado da propagação de fraturas ainda carece de estudos.

Em termos gerais, *Inselbergs* são tipicamente caracterizados por escarpas maciças e convexas (*inselbergs* dômicos) (Twidale, 1981). Quando apresentam intenso padrão de fraturamento que guiou intemperismo químico e individualização de blocos ou boulders *in situ*, são definidos como *nubbins* (ou *boulder-strewn inselbergs*) ou *Castle Koopies* (*castelated inselbergs*) (Migoñ, 2013) - os quais já não exibem a forma de escarpas contínuas. Entretanto, muitas formas de relevo (e.g. *inselbergs*, pilares, torres) em rochas graníticas apresentam padrões de fraturas multidirecionais e exibem proeminentes e íngremes escarpas cuja evolução responde a processos de fraturamento e colapso de blocos, a exemplo do Dedo de Deus (Teresópolis, RJ), Pedra do Frade (Itapajé, CE), Pico dos Pontões (ES), no Brasil, e Spitzkoppe (Namíbia) (cf. Fernandes *et al.*, 2010; Bastos *et al.*, 2021; Dantas *et al.*, 2014; Migoñ, 2010). Todos esses locais também convergem em uma característica – a formação de uma paisagem geomorfológica icônica dada as formas que os escarpamentos assumem.

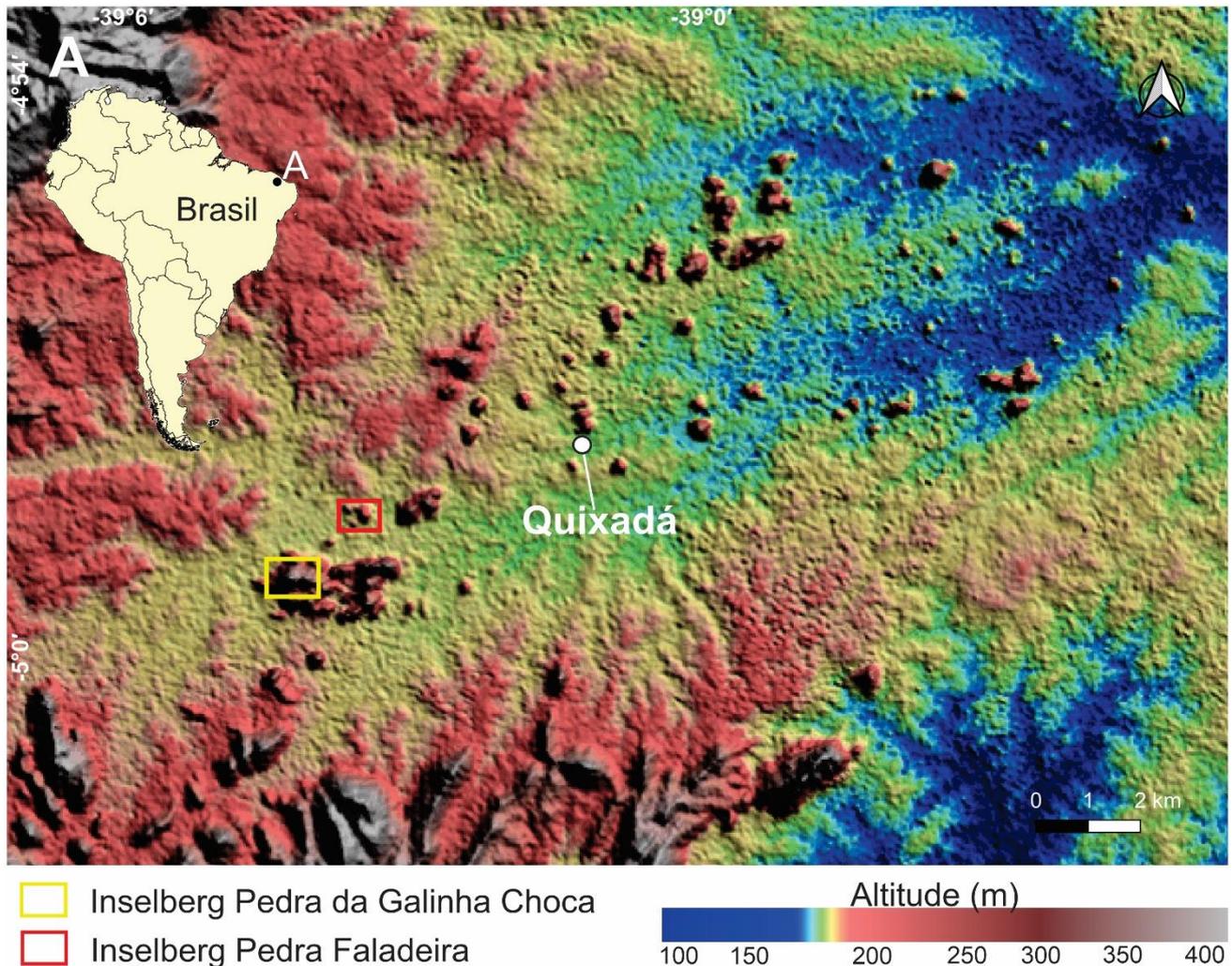
Dentre os trabalhos a respeito da evolução de escarpas fraturadas, nota-se que *inselbergs* assim caracterizados não constituem com frequência o objeto de atenção das pesquisas geomorfológicas. Nesse sentido, os *inselbergs* Pedra da Galinha Choca e Pedra Faladeira (Quixadá, Brasil), analisados nesse estudo, são exemplos de relevos representativos em termos de controle estrutural por processos de fraturamento e colapso, tanto por suas escarpas fraturadas, quanto pela geração de depósitos de talus. Diante disso, objetiva-se verificar a correlação da configuração estrutural da rocha granítica com a morfologia da escarpa, em comparação a outros exemplos similares de formas dessas formas de relevo, a fim de contribuir com a compressão dos processos de evolução geomorfológica em escarpas graníticas fraturadas.

## 2. Área de Estudo

O campo de *inselbergs* de Quixadá está localizado na porção central do estado do Ceará, Nordeste do Brasil, nas proximidades da cidade homônima. De acordo com a proposta geomorfológica mais recente, a área se insere na Superfície Sertaneja 1 (SS1), unidade caracterizada por processos de aplainamento no Nordeste brasileiro que resultaram em topografias planas ou suavemente onduladas, com ocorrência de relevos residuais (Costa *et al.*, 2020). Em Quixadá, a superfície circunjacente aos *inselbergs* é predominantemente plana e encontra-se a aproximadamente 170 m de altitude. Os *inselbergs*, por sua vez, apresentam altimetrias que variam entre 200 e 400 m (Figura 1). Na porção sudoeste do campo de *inselbergs*, encontram-se maciços cristalinos em rochas do embasamento que ultrapassam os 400 m de altitude (Maia *et al.*, 2015).

O tipo climático predominantemente da área estudada é semiárido, conforme classificação de Köppen (Alvares *et al.*, 2013). Os valores médios anuais de precipitação são de 700 mm (FUNCEME, 2021) com estação chuvosa concentrada entre fevereiro e maio, e temperaturas médias variando de 26° a 28° C (Zanella, 2014).

Quixadá é caracterizado por associações de Planossolos, Neossolos Litólicos e solos halomórficos predominam (EMBRAPA, 2017) e vegetação do tipo Caatinga arbustiva e arbórea (Gomes *et al.*, 2010).



**Figura 1.** Modelo digital de elevação da área de estudo, que abrange o campo de *inselbergs* de Quixadá, no Ceará Central, Nordeste setentrional do Brasil, próximo à cidade de Quixadá. O retângulo indica a localização dos *inselbergs* Pedra da Galinha Choca (amarelo) e Pedra Faladeira (vermelho). Fonte: Elaborado pelos autores.

Os *inselbergs* em Quixadá situam-se na porção setentrional da Província Borborema, cuja estruturação foi herdada da Orogenia Brasileira neoproterozoica (640 – 570 Ma), responsável pela conformação de zonas de cisalhamento. A configuração dessas estruturas foi seguida por ubíquo plutonismo granítico, uma das principais características da Província Borborema (Almeida *et al.*, 2000). Dentre os corpos graníticos neoproterozoicos, encontra-se o Plúton Quixadá (585 Ma) (Nogueira, 2004), classificado como Suíte Intrusiva Itaporanga, a qual é composta por anfibólio-biotita granodioritos, monzogranitos, sienogranitos, álcali-feldspato granitos e quartzo monzonitos, geralmente de granulação grossa e com textura porfirítica (Pinéo *et al.*, 2020).

O Plúton Quixadá apresenta aproximadamente 260 km<sup>2</sup> e caracteriza-se pela predominância da Fácies Quixadá ou Fácies Monzonito, de composição monzonítica a quartzo-monzonítica, textura porfirítica, com megacristais de microclina imersos em matriz anfibolítica (Torquato *et al.*, 1989; Almeida, 1995). Em menor representatividade espacial, encontra-se enclaves microgranulares máficos, de composição diorítica e quartzo diorítica, constituindo um segundo tipo petrográfico associado à Fácies Quixadá (Silva, 1989). Há também a ocorrência generalizada de diques félsicos sinplutônicos, de composição granítica a granodiorítica que apresentam baixos ângulos de mergulho (Almeida, 1995; Silva, 1989; Nogueira, 2004).

Semelhante a demais relevos graníticos no Nordeste do Brasil, os *inselbergs* de Quixadá têm sua geomorfologia herdada da ação do intemperismo diferencial sob influência de aspectos litológicos e estruturais

(Maia *et al.*, 2015; Maia; Nascimento, 2018; Maia *et al.*, 2018; Rodrigues *et al.*, 2019; Lima; Corrêa-Gomes, 2015). Considerando a variabilidade da morfologia de *inselbergs* em escala local, esse trabalho se baseia na proposta de Maia *et al.* (2015) que classifica os *inselbergs* de Quixadá conforme suas características morfogenéticas, e a influência de propriedades faciológicas dos granitoides nas feições erosionais. Os autores (op. cit.) distinguem: *inselbergs* de dissolução (Tipo 1), marcados por feições como caneluras e gnammas, que estão geralmente associadas a porções mais máficas da rocha; *inselbergs* de fraturamento (Tipo 2), caracterizado por escarpas fraturadas, blocos colapsados e formação de rampa de talus; e *inselbergs* maciços (Tipo 3), que apresentam morfologia dômica, e escarpas coesas e contínuas, sem feições de dissolução bem desenvolvidas.

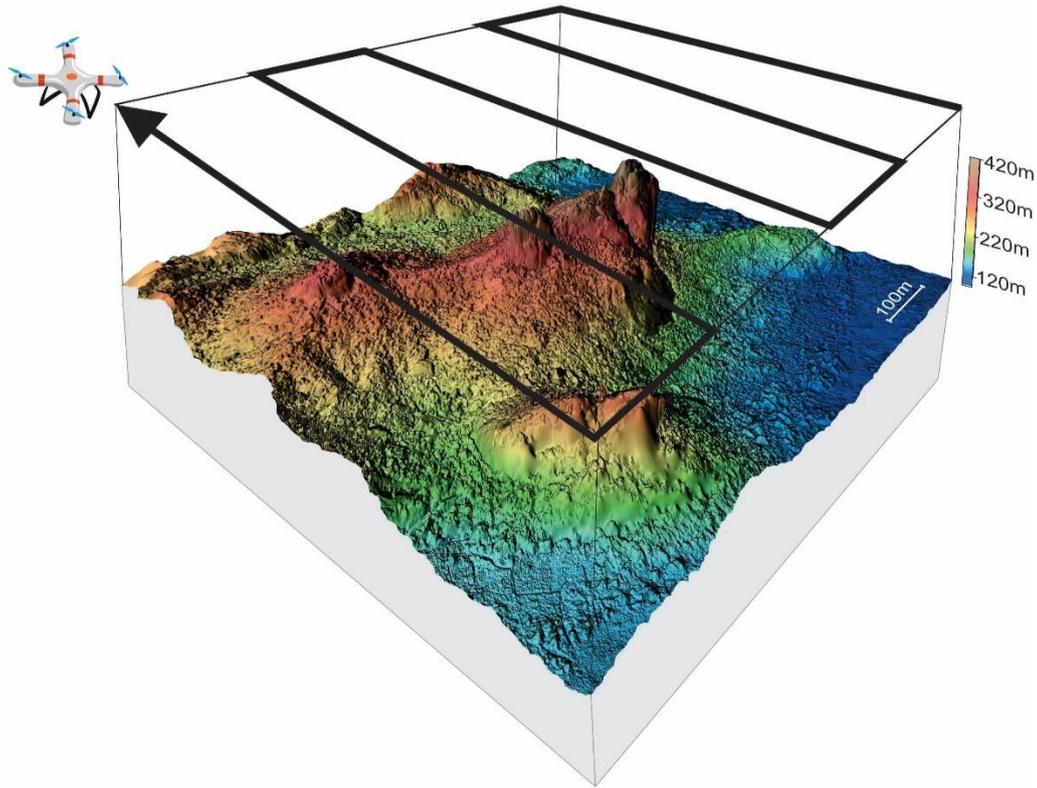
Na área de estudo, diversos *inselbergs* apresentam escarpas modeladas por colapso; nesse estudo, foram escolhidos dois relevos situados no setor sudoeste do campo de *inselbergs* que constituem exemplos representativos desse processos: O *inselberg* Pedra da Galinha Choca (PGC), onde foi realizada uma análise mais detalhada da configuração estrutural e sua relação com as características morfológicas do *inselberg*, e o *inselberg* Pedra Faladeira, que dista aproximadamente 1,5 km da PGC e apresenta um contexto geomorfológico similar (Figura 1). Nesse *inselberg*, a análise baseou-se na interpretação de campo e dados de fotografias aéreas de alta resolução.

Ressalta-se que a PGC foi apontada previamente como um *inselberg* de fraturamento, tipo 2 (Maia *et al.*, 2015) e constitui um dos relevos mais expressivos em termos de área e altura no plúton (Migoñ; Maia, 2020). O *inselberg* é caracterizado por seu complexo delineado devido à interseção de juntas verticais e grandes superfícies de esfoliação na rocha (Migoñ; Maia, 2020); ademais, destaca-se o desenvolvimento incipiente de feições de dissolução e a amplitude de sua rampa de talus, aspectos que contribuíram para que a PGC fosse classificada como *inselberg* de fraturamento (cf. Maia *et al.*, 2015).

### 3. Materiais e Métodos

A metodologia desse trabalho contou com ampla revisão bibliográfica, trabalhos de campo e elaboração de modelos digitais através da aerofotogrametria. A revisão bibliográfica levantou dados acerca das formas de relevo típicas em rochas graníticas, particularmente *inselbergs*, e dos fatores estruturais que condicionam a morfologia de escarpas em rochas ígneas e em outros litotipos. Também foram revisadas bibliografias específicas sobre a relação de aspectos estruturais na instabilidade de escarpas fraturadas.

Em campo, foi realizado levantamento aerofotogramétrico com drone (Phantom 4 Pro – DJI) no *inselberg* Pedra da Galinha Choca. Esse procedimento deu-se conforme o protocolo de aquisição fotogramétrica, adaptando-o para o contexto dos *inselbergs* (Figura 2). O levantamento contou com fotos no nadir realizadas com sobreposição frontal e lateral de 70%, fotos oblíquas (45°) e horizontais em pontos específicos. Os dados foram processados no Metashape Agisoft PhotoScan através do algoritmo *Structure from Motion* (SfM) e permitiram a criação de um modelo detalhado (18.1 pontos por m<sup>2</sup>) das características morfológicas e texturais das escarpas.



**Figura 2.** Protocolo de aquisição aerofotogramétrica para geração de Ortomosaico e Modelo Digital de Elevação.

Fonte: Elaborado pelos autores.

O MDE gerado assim como o Ortomosaico, (23.5 cm e 7.2cm de resolução, respectivamente) permitiram a elaboração do mapa de lineamentos estruturais no *inselberg* Pedra da Galinha Choca, produzido através da extração manual de feições lineares, tais como fraturas e diques, em plataforma GIS (QGIS software 3.16). A alta resolução das imagens permitiu a identificação detalhada (feições sub-métricas) de sets de fraturas. Ainda em ambiente SIG, foi gerada uma roseta de orientação preferencial dos lineamentos por meio da ferramenta Line Direction Histogram. Ressalta-se que a nuvem de pontos do *inselberg* (*Point Cloud*) com resolução de aprox. 20 cm, manipulada no software Cloud Compare, serviu de suporte à extração de lineamentos, uma vez que permite a visualização tridimensional do relevo e das feições estruturais de detalhe, tornando-se um avanço em face às limitações da imagem 2D. Foi realizada a mensuração das espessuras de juntas paralela à superfície do *inselberg*, por meio da ferramenta *Point Picking*, onde dois pontos são selecionados no modelo 3D e a distância é medida. Esses dados serviram para a definição dessas juntas como *sheet joints* (caracterizadas por espessuras > 30 cm) (Migoñ, 2006).

A partir da nuvem de pontos também foram extraídos dados de ângulo das fraturas (total de 12 medidas), utilizando a ferramenta Virtual Compass > Plane tool, na qual um plano virtual é posicionado sobre a superfície da fratura no modelo 3D, e o ângulo de mergulho e a direção de mergulho são mensurados; para este estudo, apenas os ângulos foram computados para análise do arranjo dos fraturamentos multidirecionais. A fraturas horizontalizadas foram definidas como aquelas < 45°, e verticais aquelas > 45°.

A fim de gerar um mapa de densidade de lineamentos na PGC, foi gerado um grid de dimensões 10 m x 10 m em ambiente SIG, a partir do qual foi computado a contagem de linhas em cada célula – com base nos lineamentos mapeamentos previamente. Para tanto, foi utilizado o algoritmo Interseção, que extrai as partes sobrepostas das feições nas camadas (lineamentos e grid), de modo a unir o atributo de ambas. Na sequência, a contagem de lineamentos em cada célula foi realizada por meio de análise vetorial, com algoritmo Estatísticas por Categoria, obtendo-se uma tabela, na qual gera-se uma coluna de “Count”. Após essa etapa, a camada grid é unida com a camada de estatística (Propriedades > União). Para que esses dados fossem visualizáveis no mapa, foi aplicado o algoritmo Centróide a partir da camada grid, gerando uma nova camada. Nesta, os dados de contagem estão unidos nos centróides. A partir disso é possível fazer a interpolação dos dados (IDW), gerando um dado raster, no qual são atribuídos pesos ponderados aos pontos amostrais, fornecendo uma visualização gradativa do menor

para o maior valor de contagem. Com base nesse dado, foi aplicada uma falsa-cor em cinco categorias de intervalos iguais, a fim de discriminar densidade de lineamentos muito baixa/baixa/média/alta/muito alta, correspondentes à contagem de 1 – 3/ 3 – 6/ 6 – 9/ 9 – 12/ 12 – 15 lineamentos/10 m<sup>2</sup>, respectivamente.

A partir do modelo digital de elevação do *inselberg* PGC, foi gerado um mapa de declividade (software QGIS 3.16), utilizando uma paleta de cores a distinguir os declives em intervalos iguais de 0° - 20°; 20° - 40°; 40° - 60°, e 60° - 80°. Esse produto permite analisar aspectos da morfometria das escarpas em relação à configuração estrutural do *inselberg*. Ademais, foram mapeados manualmente Megablocos colapsados (MBC) na rampa de talus com base na ortofoto. MBC foram definidos como os blocos de morfologia angulosa com dimensões mínimas de 5 x 5 m. A medição dos diâmetros dos blocos foi feita no software QGIS com a ferramenta Linha. A distinção entre blocos colapsos e boulders individualizados *in situ*, que também ocorrem na área, se deu por reconhecimento de campo, e com base na bibliografia de feições graníticas. Assim, os boulders foram distinguidos de blocos colapsados sobretudo devido aos primeiros possuírem, em geral, morfologia arredondada como consequência de processos de intemperismo esferoidal e abrigarem microfeições de intemperismo, como karren e bacias de dissolução (cf. Twidale; Bourne, 1976), em contraste com as bordas angulosas dos blocos resultantes do desprendimento de partes da escarpa.

No *inselberg* Pedra Faladeira, a análise de feições estruturais e a identificação das formas de colapso nas escarpas se deu com base nas fotografias obtidas com o drone e os trabalhos de campo. Essa etapa permitiu, por exemplo, o reconhecimento de feições geológicas de maior detalhe, tais como diques métricos. A análise dessa área serviu de comparação com as observações de maior detalhe feitas no *inselberg* PGC, uma vez que se encontram em um contexto similar em termos geológicos e geomorfológicos na área de estudo.

#### 4. Resultados

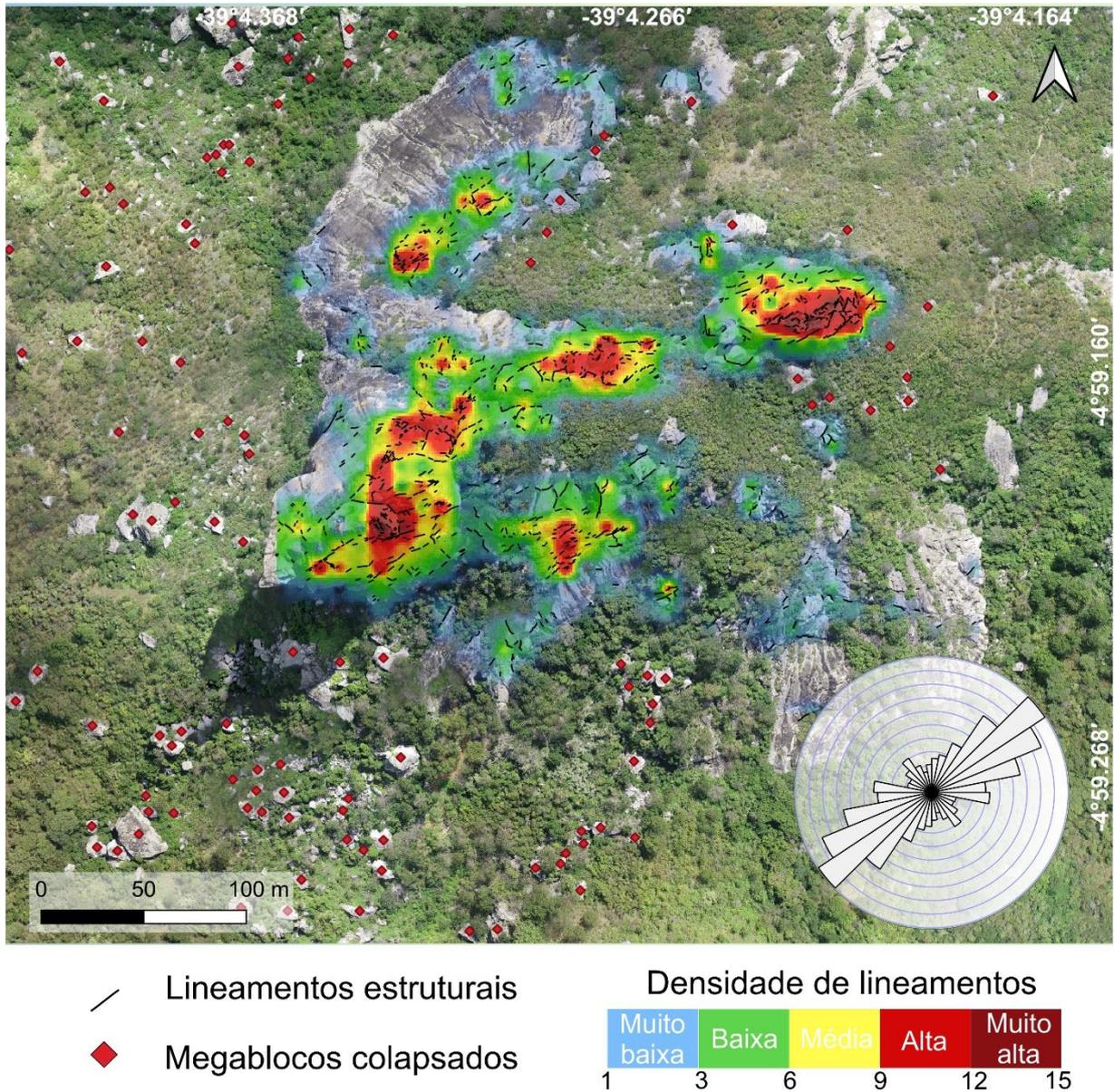
Considerando que *inselbergs* de fraturamento são aqueles cujas escarpas são marcadas desmembramento rúptil (*inselbergs* Tipo 2 de Maia *et al.*, 2015), verificou-se que os *inselbergs* Pedra da Galinha e Pedra Faladeira, em Quixadá - CE, apresentam feições morfológicas que atestam os processos de desintegração mecânica, a saber: escarpas angulosas resultantes da queda de blocos devido a propagação de fraturas, e rampa de talus que circunda o relevo aflorante (Figura 3).

Essas características morfológicas resultantes do fraturamento, comuns em rochas areníticas e quartzíticas (Young *et al.*, 2009) também se manifestam em rochas graníticas. Nestas, nota-se que a propagação de fraturas tende a ocorrer ao longo de corpos intrusivos (e.g.: veios) e como resultado de processos erosivos do corpo granítico em exumação (ex.: fraturas de alívio). Essa pré-disposição estrutural ao fraturamento cria o contexto para os desmembramento e colapso de blocos, tal como será demonstrado.



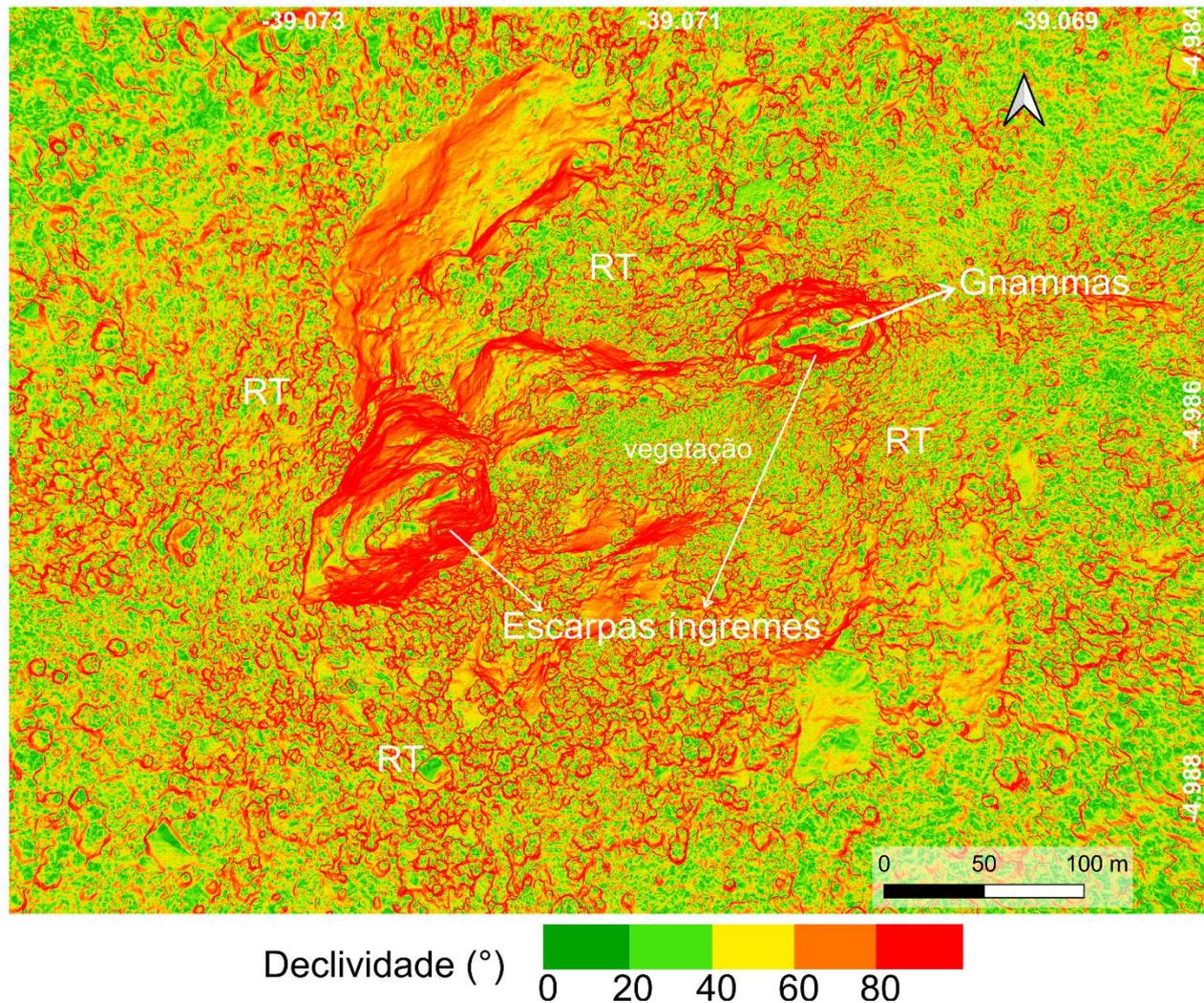
**Figura 3.** Pedra da Galinha Choca, composta predominantemente de feições associadas ao fraturamento: escarpas íngremes com morfologia angulosa e ampla rampa de tálus. Os dados de altitude indicados na figura foram extraídos no modelo digital de elevação da PGC obtido com aerofotogrametria. Fonte: Elaborado pelos autores.

A análise de lineamentos estruturais no *inselberg* Pedra da Galinha Choca permitiu verificar que o arranjo de fraturas no *inselberg* possui direção preferencial NE-SW (Figura 4). Esse trend se reflete na morfologia da escarpa, pois coincide com o alinhamento dos dois picos que o *inselberg* apresenta. A densidade de lineamentos no *inselberg* PGC revela que a contagem de fraturas alta – muito alta (9 a 15 lineamentos/10 m<sup>2</sup>) ocupa maior área no segmento NE, ao passo que o segmento SW possui fraturas mais concentradas apenas em um setor da escarpa. Isso se dá pois, no setor NE, a densidade de lineamentos é relativa à interseção de fraturas verticais e horizontais, contexto similar ao que é observado na porção mais à NW. Por outro lado, a concentração de lineamentos no setor SW se dá em função da presença de fraturas paralelas à superfície do *inselberg* (*sheet joints*), as quais individualizam placas rochosas de espessuras entre 7 e 9 m, e que, como não estão totalmente desprendidas, ainda permanecem em ligação com a escarpa (veja BPC na Figura 6). Na porção central do *inselberg*, as densidades mais altas também respondem pela presença de fraturas paralelas à escarpa com espessuras de ca. 2 m, e que provavelmente resultam do processo de exumação e alívio de pressão do corpo granítico.



**Figura 4.** Mosaico aerofotogramétrico do *inselberg* Pedra da Galinha com lineamentos estruturais (fraturas) e distribuição dos megablocos colapsados na rampa de talus. A roseta indica a direção preferencial dos lineamentos. O valor atribuído à densidade de lineamentos corresponde à contagem de lineamentos a cada 10 m<sup>2</sup>. Fonte: Elaborado pelos autores.

As feições estruturais mapeadas incluem fraturas extensionais e fraturas ao longo de diques centimétricos. É preciso destacar que os baixos ângulos dos mergulhos dos diques na área analisada (8° - 34°) fazem com que suas direções mapeadas no nadir sejam sempre paralelas à direção das escarpas. As demais fraturas, conforme foi observado e em campo e pela análise do modelo 3D do *inselberg*, são verticais (ângulos de 66° a 80°). As fraturas verticais tanto intersectam as fraturas horizontais, como podem ser paralelas às escarpas íngremes (>60°) (Figura 5).



**Figura 5.** Mapa de declividade da Pedra da Galinha Choca, Quixadá. As porções com baixos declives correspondem à rampa de talus (RT) ou a áreas vegetadas na escarpa, ao passo que porções com declividade acima de 60° representam as escarpas do *inselberg*. No topo das cristas onde a declividade é menor, feições do tipo Bacias de dissolução (gnammas) ocorrem. Fonte: Elaborado pelos autores.

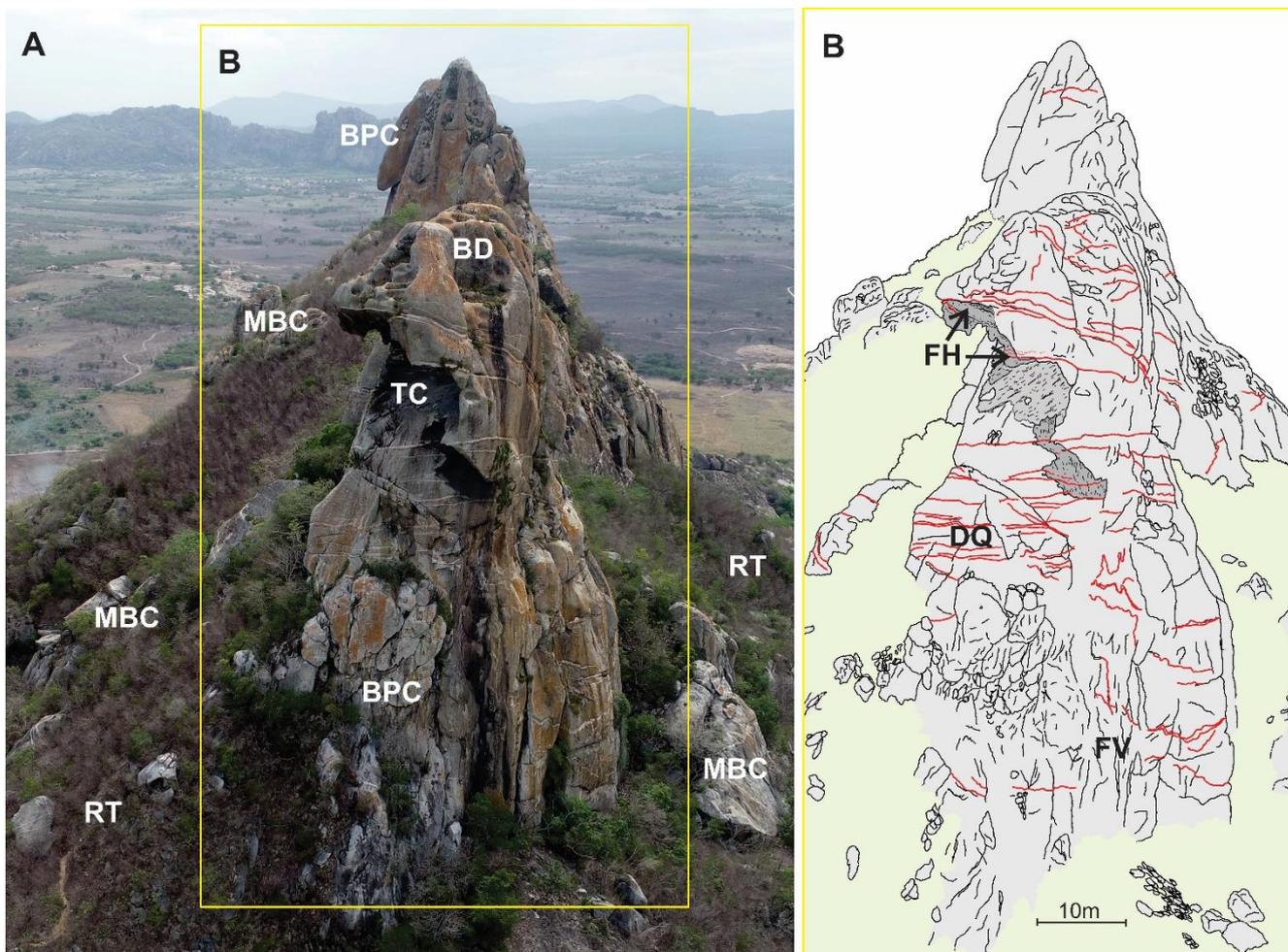
O arranjo de fraturas ao longo de planos estruturais (diques e veios) somado àquele formado pelas fraturas verticais e de alívio formam redes de fraturamento multidirecional na escarpa do *inselberg*, favorecendo o gradual colapso de blocos. Esse processo é atestado pela presença de Megablocos colapsados (com dimensões de 5 m x 5 m a 29 m x 14 m), mapeados preferencialmente próximo às porções das escarpas que são mais fraturadas - média e alta densidade (Figura 4), como é esperado, uma vez que tendem a fornecer mais fragmentos rochosos que alimentam a rampa de talus. É possível observar que os setores que mais fornecem blocos para formação da rampa de talus também são os que mais ficam encobertos por ela, de modo que, com a presença de blocos formando a rampa de talus, muitas dessas áreas tendem a apresentar declividades menores (20 – 40°) (note RT na Figura 5). Ressalta-se na porção mais central do *inselberg* onde as declividades são baixas isso se deve à presença de uma densa vegetação, não correspondendo a depósitos de talus. Já nas superfícies menos declivosas dos picos do *inselberg*, concentram-se feições associadas à dissolução do granito, tais como bacias de dissolução (BD) (gnammas), com diâmetros por volta de 2 m.

As escarpas íngremes (com declividades que chegam a 80°), por sua vez, podem ser maciças, quando cruzamentos de fraturas horizontais e verticais é menor e, portanto, limita a produção de blocos auxiliando a manutenção de sua altimetria. O setor SW e NW são exemplos dessa situação, onde o cruzamento de fraturas é localizado. Por outro lado, a escarpa pode apresentar um arranjo em que fraturas horizontais e verticais se intersectam de modo mais recorrente, criando o contexto estrutural para a produção de blocos nas escarpas. Nesse contexto, os blocos se mantem *in locu* enquanto a trama estrutural representada pela densa rede de fraturas

horizontais e verticais permitirem o encaixe/travamento dos blocos sobrepostos. Essa configuração permite que a escarpa sustente sua alta declividade não obstante a presença dessa rede de fraturas, tal como ocorre no setor NE da Pedra da Galinha. A manutenção de blocos na escarpa pode ser entendida como a fase pré-colapso (BPC, Figura 6A) e resulta do efeito encaixe, gerado pelo fraturamento multidirecional. Um exemplo de efeito encaixe ocorre também nos *Castle Koppies*.

Quando colapso de blocos da escarpa ocorre, tende a deixar cavidades que podem originar tafoni, nesse caso gerados exclusivamente pela remoção do bloco. Essa forma na escarpa atesta os efeitos da evolução geomorfológica de corpos rochosos submetidos ao desmembramento rúptil. Como exemplo, observa-se na área de estudo um tafone de colapso (TC) de dimensões de ca. 20 m x 30 que dá forma uma das escarpas na Pedra da Galinha (Figura 6A). As escarpas dominadas por feições de colapso, apresentam-se, via de regra, associadas a uma rampa de tálus (RT) compostas por Megablocos colapsados (MBC), de dimensão métrica e decamétrica que costumam possuir faces angulosas, preservando os planos de fraturamento que promoveram seu desprendimento da escarpa (Figura 6A). Blocos mais arredondados também visualizados relativamente próximos às escarpas, mas, por outro lado, constituem provavelmente boulders individualizados *in situ*.

Na Figura 6B, pode-se observar com mais detalhe como o arranjo estrutural na escarpa do *inselberg* correlaciona-se com o desenvolvimento de feições de desintegração mecânica. Nesse contexto, a configuração dos planos de fraturas fornece uma predisposição à individualização de blocos, e as feições observadas denunciam o colapso de uma porção da escarpa.



**Figura 06.** Feições típicas em *inselberg* de fraturamento (Pedra da Galinha Choca – Quixadá, CE): (a) Feições de relevo associadas a processos de colapso. BPC: Bloco Pré-colapso, MBC: Megablocos colapsados, RT: Rampa de Tálus. TC: Tafoni de Colapso. BD: Bacias de Dissolução; (b) Identificação de estruturas na escarpa. FH: Fraturas Horizontais, DQ: Diques (linhas em vermelho), FV: Fraturas Verticais. Fonte: Elaborado pelos autores.

A Pedra da Faladeira é um *inselberg* com 30 m de altura que dista aproximadamente 1,5 km a nordeste da PGC e exibe feições de fraturamento e desprendimento de blocos, sobretudo como resultado de fraturamentos verticais. O *inselberg* apresenta escarpas íngremes e maciças, com cicatrizes de colapso (CC) paralelas à escarpa (Figura 7A), as quais indicam os planos de fraturas onde ocorreu o desprendimento dos blocos. A dimensão dos megablocos colapsados na rampa de talus adjacente permite visualizar que o espaçamento das fraturas que os individualizaram era de dimensão métrica. Semelhante à PGC, as formas angulosas dos MBC atestam sua origem de colapso e blocos arredondados (boulders) não foram identificados nesse setor.

Observa-se, ainda, aumento de no espaçamento de fraturas e individualização de fragmentos rochosos dos próprios MBC. A figura 7B permite visualizar que blocos angulosos sofrem desintegração mecânica relativa à presença de dique de espessura métrica (cujo contato está indicado pelo tracejado vermelho), o qual apresenta fraturas paralelas (indicadas pelas setas vermelhas). Essas fraturas que se propaga em um dos eixos do bloco promove seu desmembramento, gerando fragmentos menores.



**Figura 7.** Visão oblíqua do *inselberg* Pedra Faladeira com feições de colapso de blocos influenciadas pela configuração estrutural. (a) *Inselberg* com feições de cicatriz de colapso (CC) indicando o plano de fraturamento de blocos. Os megablocos colapsados (MBC) dispõem-se nas adjacências; (b) MBC com maior grau de fraturamento dada a presença de um dique de espessura métrica (DQ), cuja zona de contato é indicada pela linha vermelha tracejada; o dique em si apresenta fraturas e gera fragmentos rochosos menores (indicados pelas setas vermelhas). Fonte: Elaborado pelos autores.

## 5. Discussão

Fraturas estão entre os fatores-chave a guiar a evolução geomorfológica de muitos relevos, os quais evidenciam em sua morfologia, a geometria e o padrão das estruturas rúpteis (Ericson *et al.*, 2005). Nos *inselbergs* em análise, foi observada uma rede de estruturas rúpteis, na qual diques e fraturas com geometrias variáveis se intersectam, promovendo a formação de feições associadas ao fraturamento e colapso. Fora apontado que o fraturamento e resistência de um corpo rochoso com diques/veios se deve primariamente à orientação dessas estruturas, as quais condicionam o modo de fraturamento (Turichshev, Hadjigeorgiou, 2017). No *inselberg* PGC, diques com orientações preferencialmente de baixo ângulo de mergulho promovem planos de fratura conforme

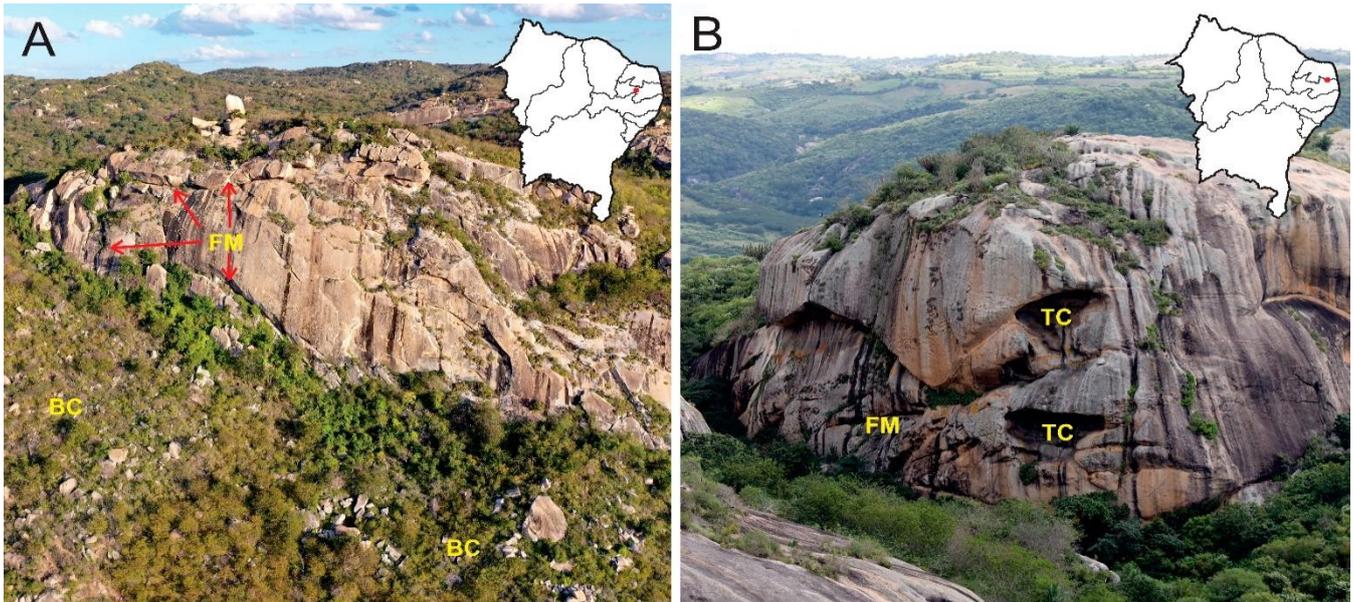
sua geometria, constituindo um arranjo de fraturas horizontalizadas. Isso se dá devido à ruptura ocorrer preferencialmente ao longo da interface dique-rocha, configuração de fraturamento predisposta em diques ou veios mais resistentes que sua encaixante (Shang, 2020), como no caso analisado, diques ricos em sílica (Almeida, 1995).

Em rochas graníticas, a variabilidade textural pode ser um fator favorável à propagação de fraturas em microescala. Eppes (2022) apontou que o fraturamento intergranular é favorecido em rochas porfíricas, tais como as observadas na área de estudo compreendida pelo Pluton Quixadá (Almeida, 1995). No *inselberg* Pedra da Galinha e Pedra Faladeira, além do aspecto textural e do fraturamento ao longo de diques, há ampla ocorrência de fraturas paralelas às escarpas, que podem resultar da descompressão do corpo rochoso ou em resposta à tensão gravitacional (Hencher *et al.*, 2011). O desenvolvimento dessas fraturas é comum na exumação de corpos graníticos, e tendem a variar desde escalas centimétricas (*slabs*) a alguns metros de espessura (*sheet joints*), geralmente superpondo-se a estruturas preexistentes (Migoñ, 2006). Nesse contexto, autores apontam que a presença das fraturas em diversas escalas, e particularmente estas últimas, promove e acelera a erosão de modo generalizado, uma vez que constituem pontos de concentração do intemperismo químico e mecânico, levando a um gradual fraturamento, até atingir o ponto crítico de colapso (Vidal Romani; Twidale, 1999; Hencher *et al.*, 2011; Eppes, 2022). É por isso que, em escarpas íngremes, o plano de fratura de *sheeting joints* comumente constitui a superfície de deslizamento de placas rochosas (Sted; Wolter, 2015).

Rede de fraturas formadas em corpos ígneos desde estágios iniciais de sua cristalização à exumação do corpo demonstram construir significativamente para evolução de formas em escarpas. Nesse sentido, Chigira; Kato (2023) e Chigira (2021) apontaram que diversos tipos de fraturas, incluindo intersecção de juntas incluindo diques e pares conjugados de fraturas verticais promovem predisposições para a evolução de torres e pilares em granitos. Similarmente, os picos observados no *inselberg* Pedra da Galinha foram descritos como torres (Migoñ e Maia, 2020), dada sua morfologia geométrica resultante da intersecção de fraturas multidirecionais. Assim, verifica-se que a configuração estrutural de diversos sistemas de fraturas, confere a delineação de formas geométricas no relevo, que resguardam o padrão das fraturas preexistentes.

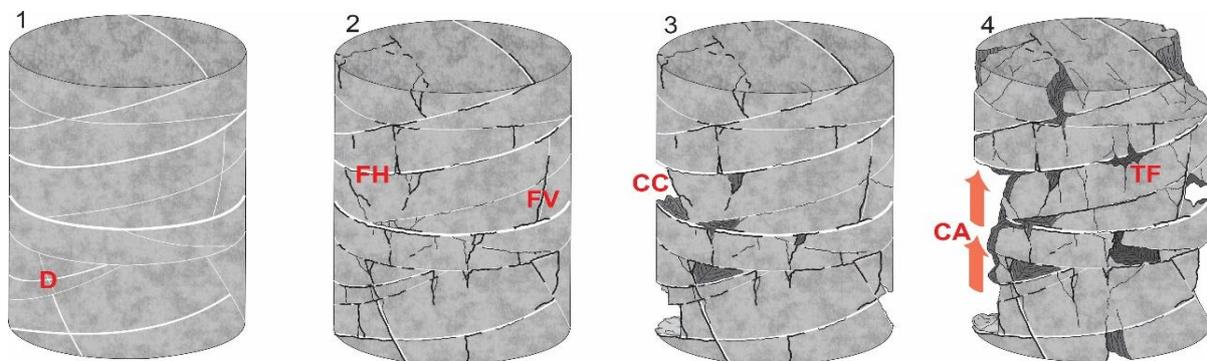
Diversos exemplos de escarpas fraturadas em rochas granitoides exibem padrão de fraturamento similar ao observado nos *inselbergs* de Quixadá. Fraturamentos multidirecionais também foram descritos e apontados em relevos como Dedo de Deus (RJ), onde o significativo controle estrutural por fraturas verticais em maior escala e por fraturas em diversos ângulos promoveu a manutenção de uma forma de relevo do tipo pináculo (Fernandes *et al.*, 2010). Em *inselbergs*, a evolução da forma guiada por rede de fraturas foi apontada em um dos mais elevados e íngremes *inselbergs* do mundo – Spitzkoppe (Namíbia) (Migoñ, 2010).

No Nordeste do Brasil, relevos sustentados granitoides porfíricos com ampla concorrência de diques félsicos, tais como *inselbergs* no Açude Gargalheiras (RN) (Figura 8A) e a Pedra da Caveira (Paraíba) (Figura 8B), constituem exemplos de escarpas fraturadas em contexto geológico similar ao da área de estudo (Suíte Itaporanga) (Dantas *et al.*, 2021). Nos locais mencionados, padrões de fraturamento preferenciais ao longo de diques e de fraturas de alívio são abundantes e a morfologia da escarpa revela processos de desintegração mecânica, evidenciados pelas feições de colapso, tais como rampa de talus e tafoni de colapso. Nesse sentido, Migoñ e Maia (2020) descrevem feições de colapso associada a *sheeting joints* e fraturas verticais na região de Pedra da Boca, onde se encontra o *inselberg* da Figura 8B.



**Figura 8.** Escarpas fraturadas em granitos da Suíte Itaporanga (granitoides de textura porfirítica) – mesma unidade litológica da área de estudo. Nota-se que feições associadas ao colapso são semelhantes às reportadas nesse estudo. FM: Fraturas multidirecionais, BC: Blocos colapsados na rampa de talus, TC: Tafone de colapso. (a) Escarpa de *inselberg* no Açude Gargalheiras (RN). (b) *Inselberg* Pedra da Caveira (PB). Fonte: Elaborado pelos autores

Com base na análise dos padrões comuns de juntas e fraturas em relevos graníticos com escarpas fraturas na área de estudo e em outros locais no Nordeste brasileiro, observam-se similaridades na configuração estrutural que gera feições de colapso nas escarpas, tal como propõe-se a seguir (Figura 9). Nota-se que a existência de enxames de diques (D) de baixo ângulo cria um padrão de anisotropias paralelas horizontais, isso faz com que as fraturas ao longo da superfície de contato dique e rocha encaixante forme um padrão de empilhamento vertical (1). Associado a esse sistema, as fraturas verticais (FV) intersectam as horizontais (FH), promovendo desprendimento dos blocos, que se mantem *in locu*, enquanto o efeito de encaixe existir (2). O desprendimento de blocos na escarpa (3), além de deixar uma cavidade (CC), deixa também uma área suspensa, levando ao colapso ascendente (CA), processo que resulta da falta de sustentáculo devido à remoção de um bloco na parte sotoposta da escarpa (4). A respeito do efeito encaixe, Krabbendam *et al.* (2022) apontaram que o arranjo irregular de fraturas gerado pela interseção de discontinuidades na rocha leva à individualização de blocos em um padrão denominado ‘*interlocking fracture pattern*’, no qual os blocos são delimitados por fraturas interconectadas que conferem certa resistência à massa rochosa, retardando a desintegração da forma de relevo. Portanto, esse padrão pode ser entendido como eficiente na manutenção de escarpas íngremes, ainda que fraturadas.



**Figura 9.** Modelo representativo do desenvolvimento de feições de colapso a partir do cruzamento de fraturas horizontais e verticais. Os estágios 2, 3 e 4, mostram o processo de desmembramento do corpo rochoso, formação dos tafoni e a consequente produção de blocos para a rampa de tálus. D: Diques, FH: Fraturas Horizontais ao longo dos planos dos diques, FV: Fraturas Verticais. CC: Cavidade de Colapso. CA: Colapso ascendente. TF: Tafone. Fonte: Elaborado pelos autores.

Nos processos de evolução de escarpas por colapso (*rockfall*) a individualização e consequente desprendimento de blocos pode ser desencadeado por processos tectônicos ou climáticos atuais. No tocante ao último aspecto, Collins e Stock (2016) demonstraram que o desprendimento de placas rochosas paralelas à escarpa pode ser acelerado em função de variações diárias no aquecimento e resfriamento da superfície (termoclastia), de modo a promover gradual deformação e separação da fratura de alívio, e finalmente seu colapso.

Considerando que o fraturamento e colapso constituem processos erosivos particularmente comuns em escarpas íngremes (Matasci *et al.*, 2015), pode-se avaliar o modo se dão no relevo a partir das feições resultantes. Por exemplo, a rampa de talus atesta a configuração estrutural do maciço rochoso que propiciou a queda e acumulação de blocos, como conclui Verdian *et al.* (2021). No *inselberg* Pedra da Galinha, as adjacências de setores com maior densidade de fraturas na escarpa (média – alta) tendem a serem áreas de maior acumulação de blocos na rampa de talus, tal como demonstrado pela análise de lineamentos e mapeamento de MBCs (veja Figura 4). De modo similar, Lee e Dan (2005) apontaram uma correlação positiva entre instabilidade de escarpas e ocorrência de fraturas, a partir de mapeamento de lineamentos.

Apesar da configuração morfológica do *inselberg* PGC ser marcada pelo fraturamento e colapso de blocos, se diferencia de outros *inselbergs* caracterizado por densa rede de fraturas. Por exemplo, *nubbins* são típicos *inselbergs* formados por blocos, individualizados devido ao padrão de fraturas e juntas no corpo granítico, e *castellated inselbergs* também tem sua morfologia resultante do arranjo de fraturas ortogonais (Twidale, 1981). A distinção ocorre uma vez que ambos os tipos de *inselbergs* não mantêm uma escarpa definida e íngreme, como se observa na área de estudo, porquanto a erosão guiada pelo padrão estrutural individualizou blocos, os quais, permanecem *in situ*.

Nesse sentido, os blocos presentes nos *nubbins* tendem a apresentar formato mais arredado, como herança provável de processos de intemperismo sob mantos de alteração (Migoñ, 2006). Os blocos rochosos advindos do colapso de escarpas fraturadas na PGC, por sua vez, apresentam aspecto anguloso e comumente mantêm as características do padrão de fraturamento do relevo. Ou seja, suas dimensões evidenciam, muitas vezes, o espaçamento da rede de fraturas na escarpa (Verdian *et al.*, 2021). Os blocos pré-colapso (BPC) que estão se individualizando nas escarpas devido ao fraturamento multidirecional são considerados como “*latent sediments*” (op.cit.), ou seja, são porções das escarpas que, no processo de evolução por colapso, irão compor os fragmentos maiores da rampa de talus. É, portanto, que o espaçamento das fraturas estabelece o tamanho inicial dos fragmentos dos megablocos colapsados.

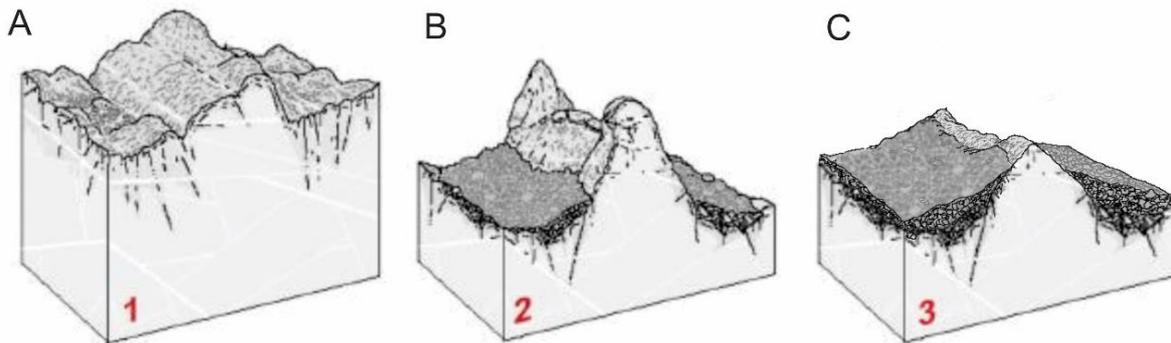
Além dos blocos colapsados, outras feições nas escarpas atestam o controle das estruturas, a exemplo do tafone de colapso (TC), observado em uma das cristas da PGC. Apesar da ampliação da cavidade em tafoni ter reconhecida influência de processos de dissolução e intemperismo químico (Mellor *et al.*, 1997; Huang; Wang, 2017), tafoni são feições poligenéticas. Recentemente fora demonstrado que estruturas rúpteis e descontinuidades em granitos condicionam a formação de cavidades em escarpas (Maia *et al.*, 2022), e que essas formas tendem a manter as orientações e dimensões dos planos de fraturas que controlaram sua formação (Eppes, 2022). No caso de *inselbergs* cuja morfologia é predominantemente caracterizada por desintegração mecânica, mecanismos como o colapso ascendente, permitem que blocos se desprendam ao longo do plano de fratura, formando cavidades associadas diretamente ao colapso.

Tendo em vista que que arranjos complexos de descontinuidades da rocha reduzem a integridade dos maciços rochosos e favorecem o colapso de blocos (Brideau *et al.*, 2009), propõe-se aqui que a evolução de *inselbergs* fraturados se dê a partir do condicionamento gerado por tipos diferentes de estruturas rúpteis as quais guiam a erosão e favorecem a desestabilização da escarpa emergente. Um fator importante para que haja a fragmentação e desprendimento de blocos nas escarpas e sua contínua desintegração mecânica é a presença de *through-going fractures* (Eppes, 2022), que consistem em fraturas persistentes, que perpassam todo um bloco rochoso, capaz de fragmentá-lo em duas partes.

Com base no que foi observado na área de estudo, verifica-se que a intensa propagação de fraturas requer descontinuidades que concentram os diversos esforços que o corpo rochoso recebe, sejam tectônicos ou climáticos. Desse modo, em estágios iniciais do intemperismo e modelagem do relevo em condições epigênicas, anisotropias “primárias” herdadas das fases de pré-cristalização do corpo granítico, tais como redes de diques e veios e a foliação de fluxo magmático (ainda que incipiente e heterogênea), irão concentrar e direcionam os processos de intemperismo seletivo (Figura 10A) (Vidal Romaní, 2008).

Com a continua exumação do corpo granítico em relevo e formação de fraturas de alívio paralelas à superfície, eleva-se a complexidade da trama estrutural, e a intersecção de fraturas aumenta. Como resultado, o colapso de blocos é proporcional ao grau de fraturamento, formando um depósito de talus adjacente. Dada a instabilidade das escarpas relativa à intensa desintegração mecânica, as escarpas íngremes dos *inselbergs* não apresentam elevado desenvolvimento de feições associadas à dissolução e processos de intemperismo químico (e.g. gnammas e caneluras), os quais exigem certa estabilidade para seu desenvolvimento. Nesse estágio, o fraturamento e colapso de blocos faz a escarpa recuar lateralmente (Migoñ, 2006) (Figura 10B).

Em estágios mais avançados da evolução de escarpas íngremes e fraturadas, estas tendem a dar lugar à rampa de talus que, não apenas se torna um setor do *inselberg*, mas constitui a morfologia resultante da intensa desintegração mecânica (Figura 10C).



**Figura 10.** Modelo de evolução esquemático para *inselbergs* do tipo 2/fraturamento: (a) Fase 1: A erosão alcança uma zona onde há uma diferenciação nos planos de orientação dos diques e fraturas. (b) Fase 2: A morfologia íngreme e angulosa do *inselberg* resulta da trama estrutural geradas por enxames de diques somada às fraturas de alívio. (c) Fase 3: O constante fraturamento e colapso produz blocos que originam as rampas de talus, a qual caracteriza o estágio mais avançado de desintegração mecânica. Fonte: Elaborado pelos autores.

## 6. Conclusões

Escarpas caracterizadas por redes de fraturas multidirecionais, rampas de talus e incipiente desenvolvimento de feições de dissolução evidenciam a preponderância dos processos de colapso de blocos como principal elemento morfogenético. Verificou-se que esses processos, quando ocorrem em rochas graníticas, resultam de fraturamentos ao longo de planos de diques/veios, *sheeting joints* (fraturas paralelas à superfície) e fraturas verticais, os quais tendem a reduzir a integridade da rocha levando à gradual desintegração mecânica.

Foi observado que *inselbergs* caracterizados por feições de fraturamento, a exemplo da Pedra da Galinha Choca (Quixadá, NE do Brasil), possuem configurações estruturais similares às observadas em feições como torres e pináculos graníticos, comumente sustentados por um encaixe de fraturas multidirecionais, e cuja forma evolui por processos de erosão catastróficos (associados ao colapso). Ademais, é possível concluir que essa tendência de erosão predominante por fraturamento e desprendimento de blocos, comum em diversos litótipos, tende a ser favorecida em rochas graníticas de granulação grossa, nas quais microfraturas intergranulares auxiliam a propagação de fraturas persistentes.

Propõe-se, portanto, que o controle estrutural na evolução *inselbergs* fraturados se dá uma vez que a intersecção de fraturas advindas de processos tectônicos pretéritos e exumação do corpo rochoso promove, por um lado, o efeito encaixe de blocos na escarpa, que permanece íngreme e sustentam a configuração estrutural da rocha. Por outro lado, os graduais processos de erosão ao longo de descontinuidades geram instabilidade na escarpa, a qual tende a ser modelada por feições de colapso. Blocos colapsados nas adjacências das escarpas formam, por sua vez, amplos depósitos de talus, os quais evidenciam avançados estágios de ação do intemperismo mecânico.

**Contribuições dos Autores:** Concepção, R.M e A.S.; metodologia, R.M e A.S.; validação, R.M.; pesquisa, R.M. e A.S.; escrita do artigo, R.M e A.S.; revisão, R.M.; aquisição de financiamento, R.M. Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito.

**Agradecimentos:** Agradecemos à CAPES – PROEX pelo apoio financeiro concedido ao Programa de Pós-Graduação em Geografia e ao Projeto “*Inselbergs* de Quixadá – Ceará – Brasil: Origem e Evolução Geomorfológica” pelo CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico).

**Conflito de Interesse:** Os autores declaram não haver conflito de interesses. Os financiadores não tiveram interferência no desenvolvimento do estudo; na coleta, análise ou interpretação dos dados; na redação do manuscrito, ou na decisão de publicar os resultados.

## Referências

1. ALMEIDA, A. R. **Petrologia e aspectos tectônicos do complexo granítico Quixadá-Quixeramobim, CE**. 1995. 279 p. Tese (Doutorado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.
2. ALMEIDA, F.F.M., BRITO NEVES, B.B., CARNEIRO, C.D.R. The origin and evolution of the South American Platform. **Earth-Science Reviews** 50, 77-111, 2 000. DOI: 10.1016/S0012-8252(99)00072-0.
3. ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Koppen’s climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
4. BASTOS, F.H., LIMA, D.L.S., CORDEIRO, A.M.N., MAIA, R.P. Relevos Graníticos do Nordeste Brasileiro: uma proposta taxonômica. In: JÚNIOR, O. A. C., GOMES, M.C.V., GUIMARÃES, R.F., GOMES, R.A.T. Revisões de Literatura da Geomorfologia Brasileira. São Paulo: União da Geomorfologia Brasileira, 2021, pp. 737-762.
5. BRIDEAU, M.-A.; YAN, M.; STEAD, D. The role of tectonic damage and brittle rock fracture in the development of large rock slope failures. **Geomorphology**, v. 103, p. 30-49, 2009. DOI: 10.1016/j.geomorph.2008.04.010.
6. CHIGIRA, M. Rock pillars shaped by columnar joints in granite at Mt. Mizugaki, Central Japan. **Island Arc**, v. 30, e12424, 2021.
7. CHIGIRA, M.; HIRATA, T. The Kui boulder fields: Formation processes controlled by columnar joints of granodiorite. **Catena**, v. 207, p. 1-10, 2021.
8. CHIGIRA, M.; KATO, H. Granite rock towers shaped by mesh-like joint sets, which formed in the shallower portion of a granite body during cooling at depth. **Island Arc**, v. 32, e12484, 2023.
9. COLLINS, B.D.; STOCK, G.M., Rockfall triggering by cyclic thermal stressing of exfoliation fractures. **Nature Geoscience**, v. 9, 2016.
10. COSTA, L. R. F; MAIA, R. P.; BARRETO, L. L.; CLAUDINO-SALES, V. C. Geomorfologia do nordeste setentrional brasileiro: uma proposta de classificação. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, São Paulo, v. 21, n. 1, p. 185-208, 2020.
11. CRISPIM, A. B. **Fragilidade ambiental decorrente das relações sociedade/natureza no semiárido brasileiro: o contexto do município de Quixadá-CE**. 2016. 233 p. Tese (Doutorado em Geografia) – Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, 2016.
12. DANTAS, E.P., MEDEIROS, V.C., CAVALCANTE, R. Projeto geologia e recursos minerais do Estado do Rio Grande do Norte: Mapa geológico e Mapa de recursos minerais, CPRM. 2021. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/22401>. Acesso em: 03 ago 2023.
13. DANTAS, M., SHINZATO, E., RENK, J.F.C., MORAES, J.M., MACHADO, M.F., NOGUEIRA, A.C. Emprego Da Geomorfologia Para Avaliação De Suscetibilidade A Movimentos De Massa E Inundação – Mimoso Do Sul/Es. **Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental**, v. 4, p. 23 – 43, 2014.
14. EMBRAPA. **Levantamento exploratório de reconhecimento de solos do estado do Ceará**. EMBRAPA, 2017. Disponível em: [http://geoinfo.cnps.embrapa.br/layers/geonode%3Asolos\\_ce\\_lat\\_long\\_wgs84](http://geoinfo.cnps.embrapa.br/layers/geonode%3Asolos_ce_lat_long_wgs84). Acessado em 25 abril 2023.
15. EPPES, M-C.M. Mechanical Weathering: A Conceptual Overview. In: SHRODER,
16. J.J.F. (ed.), **Treatise on Geomorphology**, vol. 3. Amsterdam: Elsevier, Academic Press, 2022, pp.30–45. DOI: 10.1016/B978-0-12-
17. ERICSON, K.; MIGOÑ, P.; OLVMO, M. Fractures and drainage in the granite mountainous area. A study from Sierra Nevada, USA. **Geomorphology**, v. 64, p. 97-116, 2005.
18. FERNANDES, N.F., TUPINAMBÁ, M., MELLO, C.L., PEIXOTO, M.,N.,O. Rio de Janeiro: A Metropolis Between Granite-Gneiss Massifs. In: MIGON, P. (Ed.), **Geomorphological Landscapes of the World**. Springer Dordrecht Heidelberg London New York, 2010, pp. 89 -100. DOI 10.1007/978-90-481-3055-9\_10.
19. FUNCEME. **Calendários de chuvas no estado Ceará**. FUNCEME, 2021. Disponível em: <http://funceme.br/app-calendarario/ano/municipios/media/2021>. Acessado em 11 novembro 2022.
20. GOMES, D. D. M.; MEDEIROS, C. N.; ALBUQUERQUE, E.L.S. **Análise têmporo-espacial das ocorrências de focos de calor no estado do Ceará**: Configuração dos cenários no contexto das unidades fitogeográficas e das macrorregiões de planejamento. Fortaleza: IPECE, 2010.

21. GÓMEZ-HERAS, M., SMITH, B.J., FORT, R. Surface temperature differences between minerals in crystalline rocks: Implications for granular disaggregation of granites through thermal fatigue. **Geomorphology**, 78, 236-249, 2006. DOI: 10.1016/j.geomorph.2005.12.013.
22. HENCHER, S. R., LEE, S. G., CARTER, T. G., RICHARDS, L. R. Sheeting Joints: Characterisation, Shear Strength and Engineering. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, v. 44, p. 1-22, 2011.
23. HUANG, R.; WANG, W. Microclimatic, chemical, and mineralogical evidence for tafoni weathering processes on the Miaowan Island, South China. **Journal of Asian Earth Sciences**, v. 134, p. 281-292, 2017.
24. KRABBENDAM, M., HALL, A. M., PALAMAKUMBURA, R. M., FINLAYSON, A. Glaciotectonic disintegration of roches moutonnées during glacial ripping in east Sweden. **Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography**, v. 104, p. 35-56, 2022. DOI: 10.1080/04353676.2021.2022356.
25. LIMA, G.M.P.; CORRÊA-GOMES, L.C. Itatim geomorphological site: Largest concentration of *inselbergs* in Brazil. In: VIEIRA, B.C., SALGADO, A.A.R., SANTOS, L.J.C. (Eds.), **Landscapes and Landforms of Brazil**. Dordrecht: Springer, 2015, p. 371-380. DOI: 10.1007/978-94-017-8023-0\_34.
26. LEE, S.; DAN, N.T. Probabilistic landslide susceptibility mapping in the Lai Chau province of Vietnam: focus on the relationship between tectonic fractures and landslides. **Environment Geology**, v. 48, p. 778787, 2005.
27. MAIA, R. P.; NASCIMENTO, M. A. L. do; BEZERA, F. H. R.; CASTRO, H. S. de; MEIRELES, A. J de A.; ROTHIS, L. M. Geomorfologia do campo de *inselbergues* de Quixadá, Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 13, n. 2, p. 240-253, 2015.
28. MAIA, R. P.; NASCIMENTO, M. A. L. Relevos graníticos do Nordeste Brasileiro. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 19, n.2, p. 373-389, 2018.
29. MAIA, R.P.; BASTOS, F.H.; WALDHERR, F.R.; NASCIMENTO, M.A.L.; AULER, A.S. Breves considerações sobre Tafoni em *inselbergs*: aspectos genéticos e morfoestruturais. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 23, p. 1792-1811, 2022. DOI: 10.20502/rbg.v23i4.2090.
30. MARTEL, S. J. Effect of topographic curvature on near-surface stresses and application to sheeting joints, **Geophysical Research Letters**, 33, L01308, 2006. DOI: 10.1029/2005GL024710.
31. MATASCI, B.; JABOYEDOFF, M.; LOYE, A.; PEDRAZZINI, A.; DERRON, M.-H.; PEDROZZI, G. Impacts of fracturing patterns on the rockfall susceptibility and erosion rate of stratified limestone. **Geomorphology**, v. 241, p. 83-97, 2015.
32. MELLOR, A., SHORT, J., KIRKBY, J. Tafoni in The El Chorro Area, Andalucía, Southern Spain. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 22, 817-833, 1997.
33. MIGNÓN, P. Structural control in the evolution of granite landscape. **Acta Universitatis Carolinae**, v. 39, n. 1, p. 19-32, 2004.
34. MIGNÓN, P. **Granite Landscapes of the world**. New York: Oxford University Press, 2006, 384p.
35. MIGNON, P. Spitzkoppe: The World of Granite Landforms. In: MIGNON, P. (Ed.), **Geomorphological Landscapes of the World**. Springer Dordrecht Heidelberg London New York, 2010, pp. 155 -164. DOI 10.1007/978-90-481-3055-9\_16
36. MIGNÓN, P. Weathering Mantles and Long-Term Landform Evolution. In: SHRODER, J. (Editor in Chief), POPE, G.A. (Ed.). **Treatise on Geomorphology**. San Diego: Academic Press, CA, vol. 4, Weathering and Soils Geomorphology, 2013, p. 127-144.
37. MIGNÓN, P.; MAIA, R. P. Pedra da Boca, Pai Mateus, and Quixadá — Three Possible Key Geoheritage Sites in Northeast Brazil. **Geoheritage**. v. 12, 51, 2020.
38. PINÉO, T. R. G.; PALHETA, E. S. M.; COSTA, F. G.; VASCONCELOS, A. M.; GOMES, I. P.; GOMES, F. E. M. G.; BESSA, M. D. M. R.; LIMA, A. F.; HOLANDA, J. L. R.; FREIRE, D. P. C. **Mapa Geológico do estado do Ceará**. CPRM, 2020. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/20418>. Acesso em: 10 out. 2020
39. NEELY, A.B., DiBIASE, R.A., CORBETT, L.B., BIERMAN, P.R.B., CAFFEE, M.W. Bedrock fracture density controls on hillslope erodibility in steep, rocky landscapes with patchy soil cover, southern California, USA. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 522, 186-197, 2019. DOI: 10.1016/j.epsl.2019.06.011 .
40. NEELY, A.B., BiBIASE, R.A. Drainage area, bedrock fracture spacing, and weathering controls
41. on landscape-scale patterns in surface sediment grain size. **Journal of Geophysical Research, Earth Surface**, v. 125, e2020JF005560, 2020. DOI: 10.1029/2020JF005560.
42. NOGUEIRA, J. F. **Estrutura, geocronologia e alojamento dos batólitos de Quixadá, Quixeramobim e Senador Pompeu - Ceará Central**. 2004. 140 p. Tese (Doutorado em Geologia) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2004.4
43. RODRIGUES, W. F.; MAIA, R. P.; GOMES, D. D. M. Condicionamento morfoestrutural do *inselberg* Pedra da Andorinha, sertão norte do Ceará, Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, São Paulo, v. 20, n. 4, p. 861-876, out./dez. 2019.
44. SILVA, H. F. Alguns aspectos petrográficos e geoquímicos do Batólito de Quixadá. **Revista brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 19, ed. 1, p. 101-107, mar. 1989.

45. SHANG, J. Rupture of Veined Granite in Polyaxial Compression: insights from three-dimensional discrete element method modeling. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, v. 125, n. 2, p. 1-25, 2020.
46. STEAD, D.; WOLTER, A. A critical review of rock slope failure mechanisms: The importance of structural geology. **Journal of Structural Geology**, v.74, 1-23, 2015. DOI: 10.1016/j.jsg.2015.02.002.
47. TORQUATO, J. R. F. (Coord); ALMEIDA, A. R; SIDRIM, A. C. G; MARANHÃO, C. M. L; PARENTE, C. V; TORQUATO, J. R. F; NETO, A. N; FILHO, J.F.A; SOUZA, J. V; SOUZA, M.J.N; ARTHAUD, M.H. Granitóides do Ceará: Região de Quixadá e Solonópole. **Revista de Geologia**, Fortaleza, v. 2, n.1-2, jun./dez, 1989.
48. TURICHSHEV, A.; HADJIGEORGIOU, J. Quantifying the effects of vein mineralogy, thickness, and orientation on the strength of intact veined rock. **Engineering geology**, v.226, 199-207, 2017.
49. TWIDALE, C.R. Granitic inselbergs: Domed, block-strewn and castellated. **The Geographical Journal**, v. 147, p. 54-71, 1981.
50. TWIDALE, C.R., BOURNE, J. A. The shaping and interpretation of large residual granite boulders. **Journal of the Geological Society of Australia: An International Geoscience Journal of the Geological Society of Australia**, v. 24, p. 371-381, 1976. DOI: 10.1080/00167617608728952
51. VIDAL ROMANI, J. R. Forms and structural fabric in granite rocks. **Cadernos Lab. Xeolóxico de Laxe**, v. 33, p. 175 – 198, 2008.
52. VIDAL ROMANÍ, J.R., TWIDALE, C.R. Sheet fractures, other stress forms and some engineering implications. **Geomorphology**, v. 31, p. 13-27, 1999.
53. VERDIAN, J.P., SKLAR, L.S., RIEBE, C.S., MOORE, J.R. Sediment size on talus slopes correlates with fracture spacing on bedrock cliffs: Implications for predicting initial sediment size distributions on hillslopes. **Earth Surface Dynamics**, v.9, 2021.
54. YOUNG, R. W., WRAY, R. A. L., YOUNG, A. R.M. **Sandstone Landforms**. Cambridge University Press, 2009, 304p.



This work is licensed under the Creative Commons License Attribution 4.0 Internacional (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) – CC BY. This license allows for others to distribute, remix, adapt and create from your work, even for comercial purposes, as long as they give you due credit for original creation.