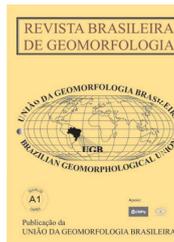


www.ugb.org.br  
ISSN 2236-5664

## Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 19, nº 2 (2018)

<http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v19i2.1295>



# RELEVOS GRANÍTICOS DO NORDESTE BRASILEIRO

## GRANITE RELIEFS IN NORTHEAST BRAZIL

**Rúbson Pinheiro Maia**

*Departamento de Geografia, Universidade Federal do Ceará  
Campus do Pici, Bloco 911, Fortaleza, Ceará. CEP: 60455-760. Brasil  
Email: rubsonpinheiro@yahoo.com.br*

**Marcos Antônio Leite do Nascimento**

*Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte  
Campus Universitário s/n, Natal, Rio Grande do Norte. CEP: 58.078-970. Brasil  
Email: marcos@geologia.ufrn.br*

### Informações sobre o Artigo

Recebido (Received):

24/08/2017

Aceito (Accepted):

10/01/2018

### Palavras-chave:

Relevo Saprolítico; Intemperismo; Tafoni; Bacias de Dissolução; Caneluras.

### Keywords:

Saprolite relief; Weathering; Tafoni; Dissolution Basins; Fluting.

### Resumo:

A exumação de plutons sin, tardi e pós orogênicos tem revelado um diversificado mostuário de formas graníticas no extremo nordeste do Brasil. São maciços, lajedos e campos de inselbergues que em conjunto, caracterizam as extensas superfícies erosivas denominadas depressões sertanejas. Sobre essas superfícies, emergem os relevos graníticos como altos do embasamento. Nesses, um conjunto de feições erosionais formam padrões de relevo associados à meteorização diferencial pela pré-disposição mineralógica, petrográfica ou ao fraturamento. São bacias de dissolução, tafoni (tafone no singular), caneluras e blocos saprolitizados em diferentes graus de desenvolvimento. Nesse trabalho, foram analisados diferentes exemplos das principais feições de relevo granítico nos estados do Ceará e Paraíba. Foi verificado que muitas das feições que caracterizam a morfologia dos lajedos e inselbergues estão associadas à dissolução ao longo de superfícies de descontinuidades em paleoambiente epigênico. Nesse ínterim, constatou-se que a morfologia granítica, em muitos aspectos associados aos lajedos e bolas de granito, fora condicionada sobretudo por eventos de esfoliação pré, sin e pós exumação e que as feições de dissolução estão em muitos casos, geneticamente associadas a enclaves máficos, tendo esses, seu principal ponto de partida.

### Abstract:

The exhumation of different sin, tardi and post-orogenic plutons has revealed a diverse sample of granitic forms in the extreme northeastern Brazil. They are massifs, slabs and fields of inselbergs that together characterize the extensive erosive surfaces denominated the *sertanejas* depressions. On these surfaces granite reliefs emerge as the top of the basement. In these, a set of erosional features forms prominent patterns associated with weathering differentiated by mineralogical, petrographic or fracturing pre-disposition. They are saprolitic dissolution basins, tafoni (singular tafone), fluting and blocks in different degrees of development. In

this work, different examples of the main features of granite relief in the states of Ceará and Paraíba were analyzed. It was verified that many of the features that characterize the morphology of slabs and inselbergs are associated with dissolution along discontinuous surfaces in an epigenic paleoenvironment. During this time, it was found that the granite morphology, in many aspects associated with slabs and granite balls, had been conditioned mainly by exfoliation and pre, sin and post-exhumation events and that in many cases the dissolution features are genetically associated with mafic enclaves; their main point of departure.

## 1. Introdução

Muitos dos mais expressivos cenários geomorfológicos globais ocorrem em áreas graníticas (Migon, 2006). São diferentes tipologias de maciços e inselbergues (*Bornhadts, bolders, inselbguerbirges, castlle koopies, etc*) que se formam a partir da exposição subaérea de corpos graníticos (Twidale, 1995). Em seu interior, o modelado granítico apresenta grande diversidade de formas, cuja gênese é atribuída a uma ação combinada de processos que se desenvolvem em fases que precedem sua exposição em superfície (Twidale e Vidal Romani, 1994). Trata-se de feições erosionais associadas à meteorização (Goudie, 2004) comandada pelas condições climáticas e pela predisposição mineralógica e petrográfica às alterações químicas (Vidal Romani e Temiño, 2004). A esse respeito, algumas características muito específicas como isotropia, baixa porosidade, permeabilidade reduzida ao sistema de descontinuidades, baixa solubilidade, etc (Vidal Romani, 1994), fazem com que as formas resultantes dos processos de meteorização sejam muito similares quando não iguais, mesmo em contextos climáticos muito diferentes.

Na literatura geomorfológica, muitos trabalhos têm abordado os aspectos genéticos acerca das formas que caracterizam a morfologia granítica. Especificamente sobre relevos associados a meteorização/exumação, pode-se destacar Oberlander (1972), Romer (2007), Twidale (2002), Twidale e Romani (1994), Alvarez (1999), Migón (2006), Romani e Temiño (2004), Matmon *et al.*, (2013), Kajdasa *et al.*, (2017).

Esses trabalhos demonstraram a importância do manto de intemperismo e dos processos erosivos para a origem e evolução dos relevos que se desenvolvem em granitos, especificamente na interface rocha x solo.

Nessa perspectiva, o presente trabalho fará uma análise acerca dos aspectos morfogenéticos das mais expressivas formas graníticas que ocorrem no Nordeste setentrional Brasileiro. Foram selecionados os inselbergues de Quixadá (CE), Taparuaba (CE),

Patos (PB) e os lajedo de Pai Mateus (PB) como áreas amostrais. Nessas áreas, um amplo mostruário de feições de relevo granítico está associado à exumação de plútons sin, tardi e pós colisionais decorrentes da orogenia brasileira. Essas feições incluem lajedos e campos de inselbergues, *tors*, blocos exumados (*boulders*) em diferentes graus de saprolitização, bacias de dissolução, tafoni e caneluras.

## 2. Localização e caracterização

No Nordeste setentrional Brasileiro, a Província Borborema corresponde a extensas exposições de embasamento pré-cambriano caracterizada por dobramentos e por intenso plutonismo granítico (Fetter, 2000) decorrentes da orogênese brasileira (Jardim de Sá, 1994; Arthaud, 2007). No decorrer da orogênese Brasileira muitos corpos graníticos intrudiram a crosta continental. (Almeida *et al.*, 1967; Sial, 1986; Jardim de Sá, 1994; Nascimento *et al.*, 2015). Os granitos orogênicos são interpretados como resultantes da intrusão em regiões distensionais associadas às estruturas tectônicas locais e regionais (Neves, 2012). Tais estruturas são representadas por zonas de cisalhamento de direção NE-SW e E-W (Vauches *et al.*, 1995). Nessas zonas de cisalhamento, as intrusões decorrem do magma ascendente por meio da crosta (Castro *et al.*, 2002). Vários exemplos de intrusões ao longo de zonas de cisalhamento podem ser encontrados na Província Borborema, (Van Schmus *et al.*, 1995) (Figura 1).

Em termos percentuais, as áreas de exposição granítica associadas aos plútons correspondem a aproximadamente 15% do Nordeste setentrional (área compreendida na Figura 1). O caráter granítico dos corpos intrusivos da Província Borborema geralmente sustenta relevos residuais, expostos pela denudação diferencial de antigas áreas orogênicas e posteriormente retrabalhados por processos erosivos de distintos sistemas morfogenéticos cambiantes ao longo do cenozoico. (Corrêa *et al.*, 2010). Dessa forma, vários campos de inselbergues surgem nas depressões

sertanejas, sobretudo em áreas de intrusões graníticas exumadas pela erosão diferencial (Maia *et al.*, 2015). Contudo, a esta origem aparentemente simples e binomial, sobrepõem-se aspectos mais particulares

da mineralogia e da fábrica das rochas plutônicas, estando muitas vezes os granitos pórfiros, ricos em fenocristais de K-feldspatos, extremamente rebaixados pela morfogênese semiárida (Nascimento *et al.*, 2015).

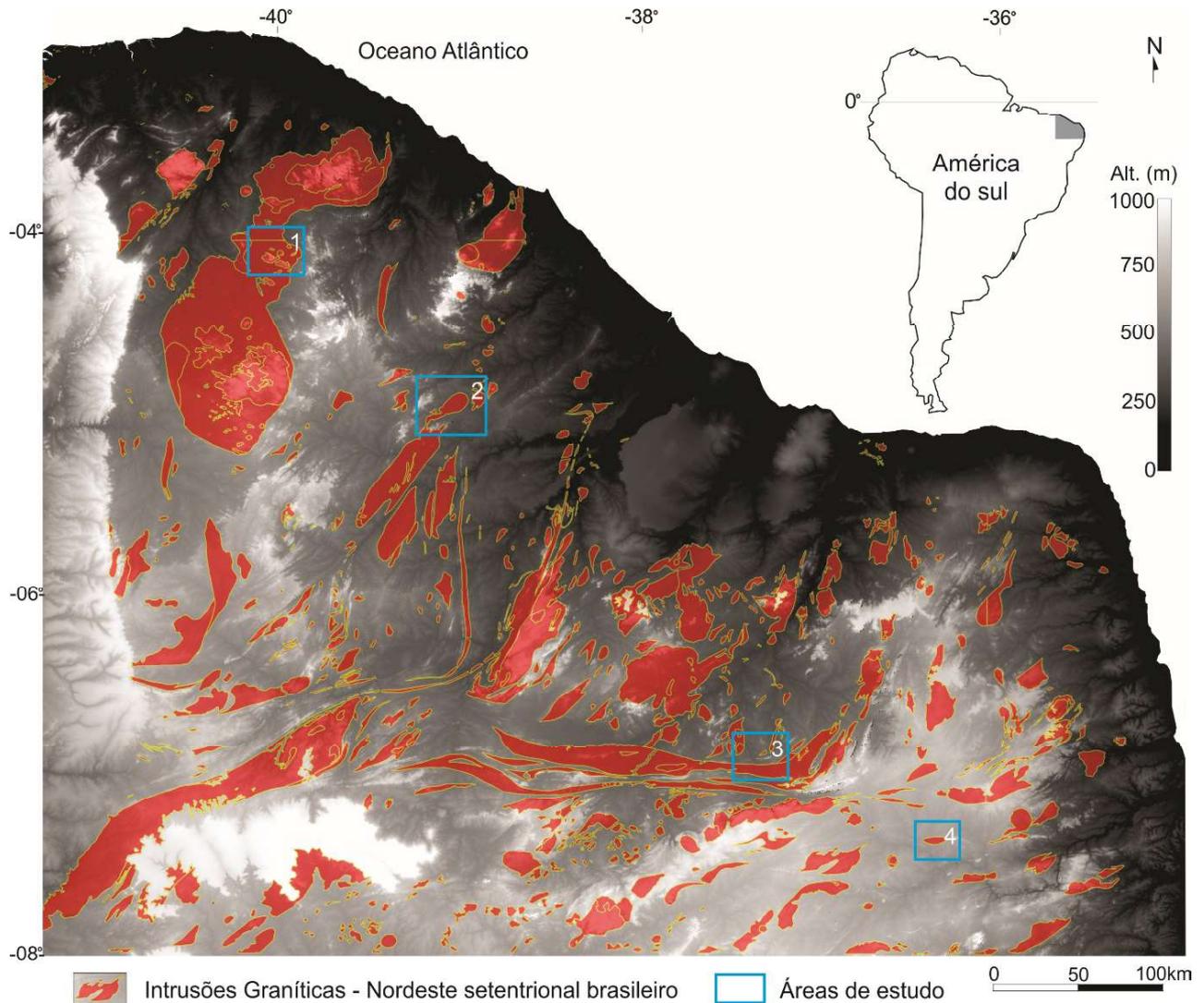


Figura 1 – Intrusões Graníticas do NE Brasileiro (Área 1: Pedra da Andorinha – CE, 2: Inselbergues de Quixadá - CE, 3: Inselbergues de Patos – PB, 4: Lajedo de Pai Mateus – PB).

Nesse trabalho são utilizados vários exemplos de feições de relevo granítico em diferentes áreas da Província Borborema (Quadrantes 1, 2, 3 e 4 da Figura 1). Dentre essa amostragem, os quadrantes 2 e 4, correspondentes as áreas de Quixadá no Ceará e Lajedo de Pai Mateus em Cabaceiras na Paraíba serão utilizadas como os mais expressivos no que diz respeito a inventariação das formas graníticas (Figura 2).

Em toda a área predomina o clima semiárido, caracterizado pela predominância de altas temperaturas

de um regime de chuvas concentradas principalmente nos quatro primeiros meses do ano. Segundo Nimer (1989), o clima semiárido é influenciado pela zona de convergência intertropical (ZCIT), com período seco de junho a janeiro e úmido de fevereiro a maio. Esse sistema de chuvas é controlado principalmente por diversos mecanismos, sendo possível destacar as frentes frias, o deslocamento latitudinal da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), os Vórtices Ciclônicos de Ar Superior (VCAS) e as ondas de leste

(Nobre, 1994). As precipitações pluviométricas somam um total de 700 mm anuais na média e a temperatura fica em torno de 27° C, com mínima de 20° C e máxima de 36° C. A umidade relativa do ar ao longo do ano

na região é em torno de 70% e acompanha a curva de precipitação pluviométrica, com valores mais elevados observados de fevereiro a maio e valores mais baixos de junho a janeiro (INMET, 2014).

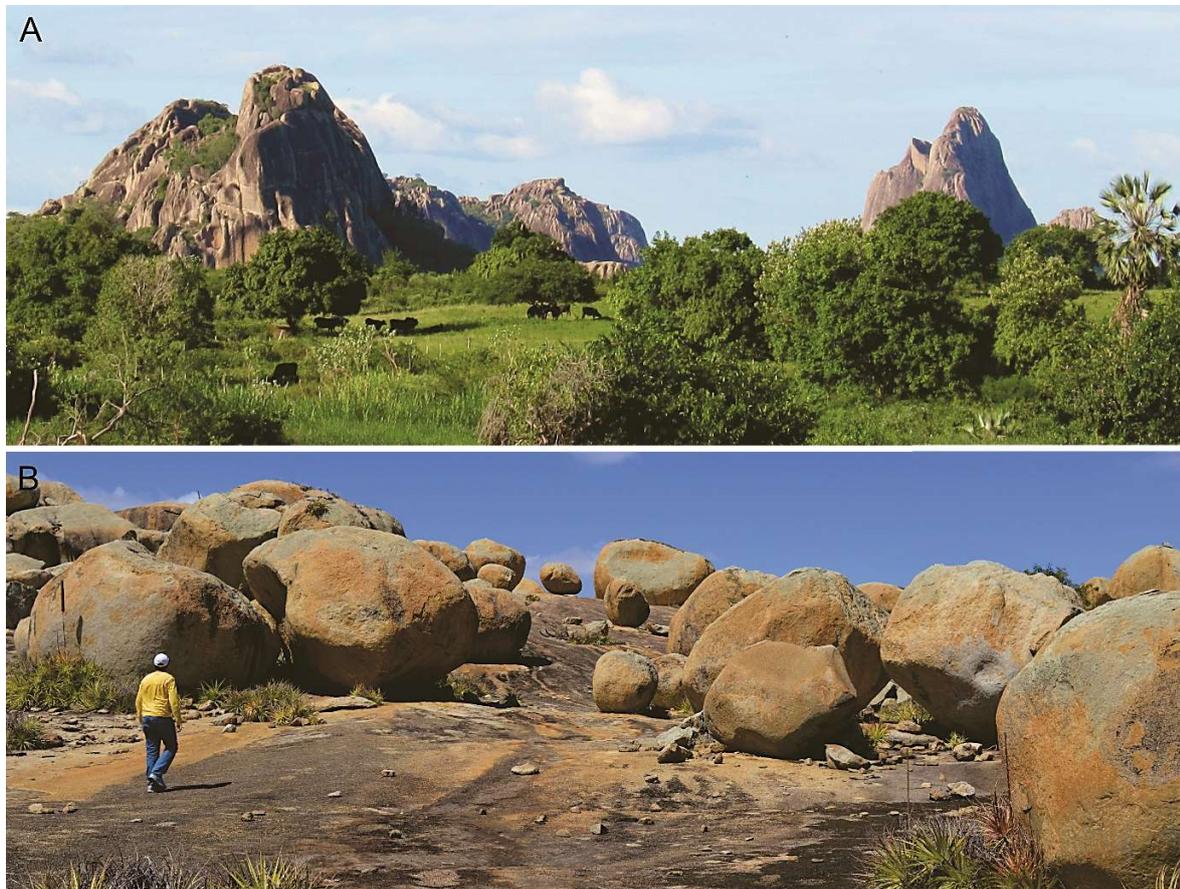


Figura 2 – Exemplos de relevos graníticos do Nordeste setentrional brasileiro. A: Quixadá – CE, B: Cabeceiras – PB (Fotos: Maia, A: 2014; B: 2016).

Dessa forma, a semiaridez atual tem atuado principalmente como mantenedor uma vez que em regime climático de estiagem prolongada, normalmente 2-3 do ano e médias de umidade relativa do ar abaixo dos 50%.

### 3. Métodos

As etapas metodológicas que guiaram esse trabalho foram estabelecidas com base em ampla revisão bibliográfica sobre a gênese e evolução do modelado granítico. Posteriormente, os trabalhos de campo e reconhecimento objetivaram a identificação e caracterização das formas de relevo em escala de detalhe. A identificação de microformas como alvéolos, bacias de dissolução, caneluras, entre outras, subsidiaram junto à bibliografia, a análise geomorfológica dos níveis de dissecação dos corpos

graníticos analisados. Nesses, fora realizada ampla análise da petrografia (observações macroscópicas) objetivando sua caracterização mineralógica e litoestrutural. Essa caracterização permitiu estabelecer correlações entre formas, faciologia, textura e estrutura.

O Processamento Digital de Imagens contou com composições coloridas utilizando-se de bandas espectrais do Sensor TM – Landsat 5 e do radar SRTM com resolução espacial de 30m. As imagens de radar permitiram a elaboração de blocos diagramas que deram suporte a interpretação geomorfológica e a representação tridimensional acerca da evolução do relevo.

Utilizou-se nesse trabalho a análise em ambiente SIG, de informações geológicas de mapeamentos regionais (CPRM) e geomorfológicas obtidas em campo, a partir da correlação entre as folhas Taperuaba (SB-

24-V-B-II), Quixadá (SB.24-V-B-VI), Quixeramobim (SB.24-V-D-III), Patos (SB-24-Z-D-I) e Boqueirão (SB-24-Z-D-III). Essa correlação permitiu associar as formas de relevo, seus padrões e densidade de ocorrência com as fácies e com os padrões litoestruturais dos diversos batólitos graníticos analisados.

#### 4. Resultados

A seguir apresentar-se-á as principais formas de relevo granítico das áreas amostrais de estudo de forma individualizada em tópicos e sub-tópicos dos resultados.

##### 4.1 Formas associadas à saprolitização.

No Nordeste setentrional brasileiro, mais especificamente nas áreas interioranas de embasamento cristalino (rochas ígneas e/ou metamórficas) aflorante, é comum encontrar formas de relevo saprolítico. Nesses, formas relictuais derivadas de um paleomanto de alteração (*grus*) evidenciam que as fases erosivas desencadeadas em períodos de morfogênese ativa removeram parcialmente os detritos friáveis resultantes da meteorização inicial. Dentre diversas ocorrências, nesse trabalho foram utilizados como os exemplos mais expressivos, o entorno do inselbergue Pedra da Andorinha, Taparuaba – CE e o Lajedo de Pai Mateus,

Cabaceiras - PB. Trata-se de lajedos, matacões, bolas de granito e *tors* que em conjunto resguardam em suas formas, indicadores geomorfológicos sugestivos de que estiveram associados a graus distintos de formação de *grus*. Doravante, a posterior remoção de detritos friáveis resultou na permanência dos blocos de maior tamanho pela incapacidade de sua remoção pelos agentes erosivos. Dessa forma, constituem formas fósseis associadas a um paleoambiente epigênico possivelmente relacionado a sistemas meteóricos derivados de climas tropicais mais úmidos.

Diferentes estágios do desenvolvimento do relevo saprolítico podem ser encontrados nas áreas dos lajedos. Esses estágios podem ser subdivididos em pré-esfoliação, manto de alteração e blocos exumados.

A Figura 3 sintetiza os 6 estágios a formação de um relevo saprolítico a partir da meteorização e exumação de blocos fraturados. Nesses casos, as fraturas possibilitam o avanço irregular da frente de intemperismo (Fase epigênica: Estágios 1, 2 e 3), restando o núcleo inalterado dos blocos fraturados como resíduos temporários. Contudo, se o processo de meteorização progressiva regride e a erosão é desencadeada, os blocos residuais são exumados (Estágios 4, 5 e 6) originando assim o relevo saprolítico na forma de bolas de granito e *tors*.

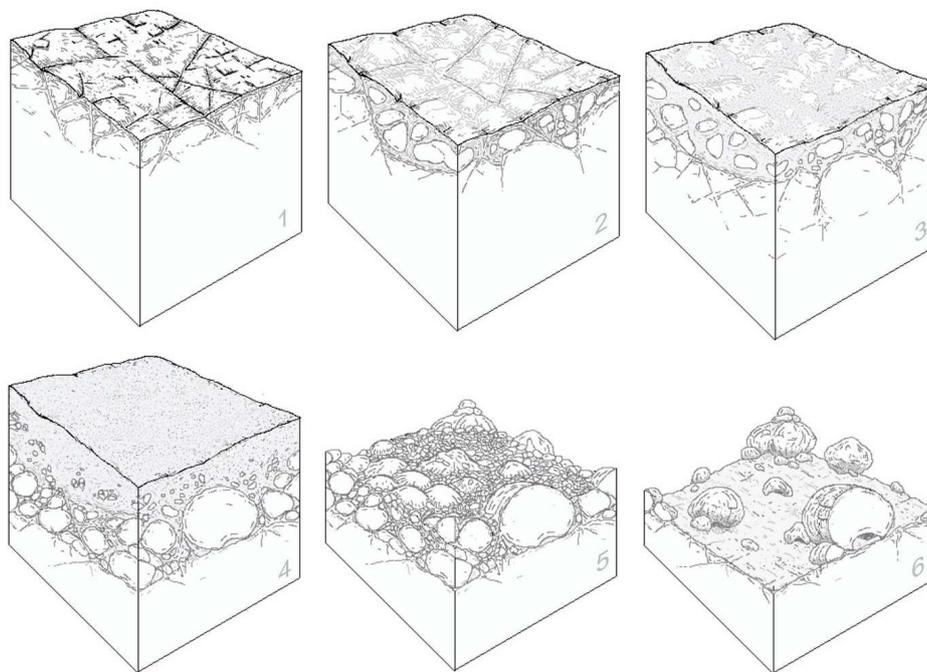


Figura 3 - Etapas de desenvolvimento do relevo saprolítico. 1: Estágio inicial referente ao fraturamento termoclástico. 2: Esfoliação esferoidal pré-epigênica. 3: Rocha alterada. 4: Formação do manto de alteração. 5: Remoção das fácies arenosílicas. 6: Formação do relevo saprolítico por exumação pedogênica.

No estágio pré-esfoliação (Figura 4) o sistema de juntas secas constitui o ponto de partida para a posterior individualização dos blocos e formação do relevo saprolítico. As juntas derivadas do fraturamento termoclástico e de alívio de pressão permitem o acesso dos agentes intempéricos ao interior da rocha acelerando a meteorização.

Nos casos em que a rocha não apresenta nenhum grau de fluxo magmático ou foliação metamórfica,

o fraturamento não apresenta direção preferencial, propagando-se caoticamente segundo meio isotrópico (*Polygonal cracking*) (Figura 4, Foto D). Assim nenhum padrão estrutural é observado, tanto sobre as feições erosionais quanto nos blocos residuais. Já nos casos quando a exumação ocorre na fase pré-esfoliação, ou seja, a remoção do manto de alteração expõe o saprólito em fase inicial de meteorização, o relevo resultante é do tipo *castle koopies* (Figura 4, Foto E).

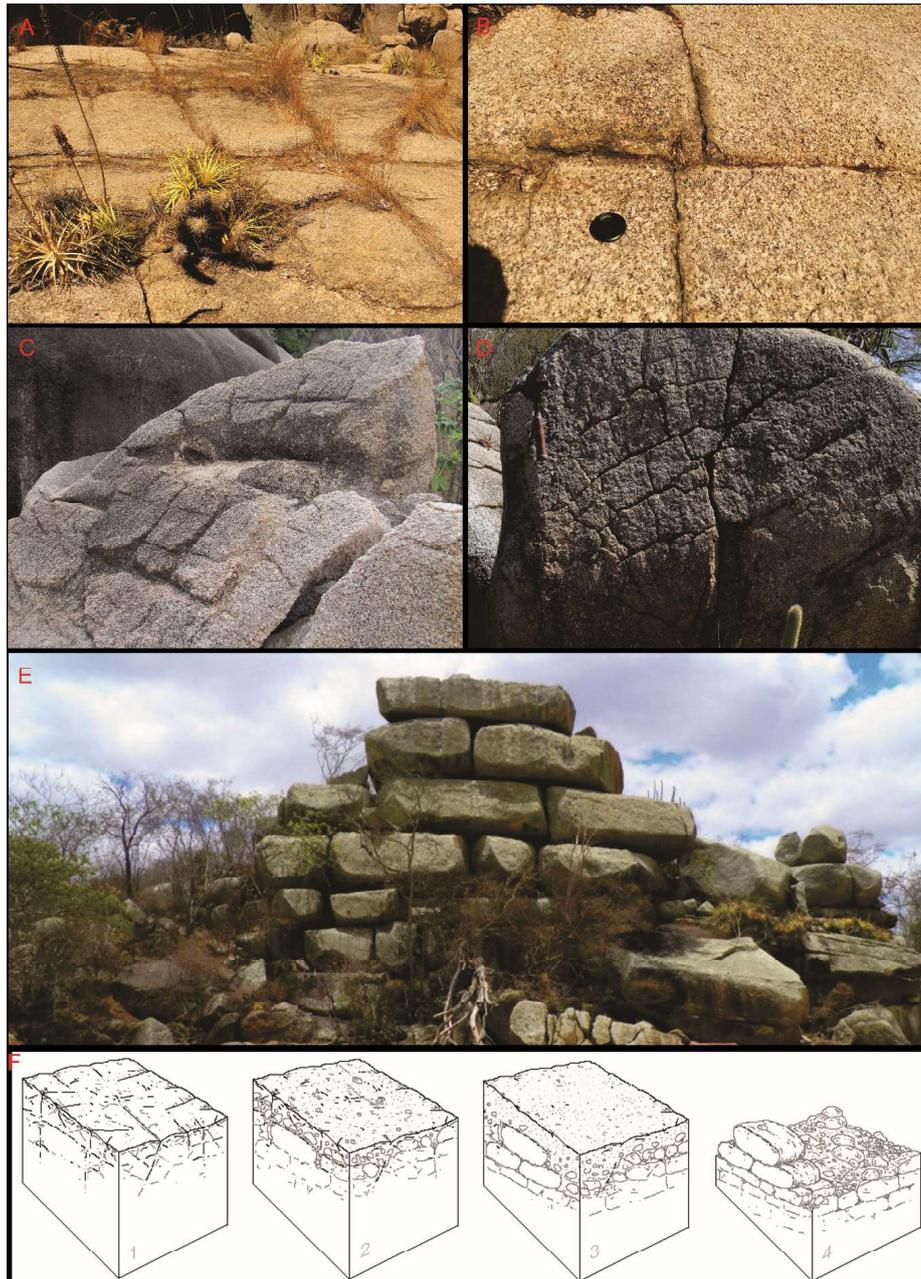


Figura 4 – Diferentes exemplos do estágio pré-esfoliação a partir das formas de fraturamento do granito. Fotos A e B: Estágio pré-esfoliação caracterizado por sistema de juntas ortogonais (Lajedo Pedra da Andorinha – CE). Fotos C e D: *Polygonal cracking* em blocos parcialmente intemperizados. E: Inselbergue do tipo *castle koopies* (Plúton Bravo, Cabaceiras - PB) F: Exumação de blocos parcialmente saprolitizados no estágio pré-esfoliação (Fotos: A, B, C e D: Maia, 2016 e E: Nascimento, 2016).

Padrões de fraturamento caóticos podem contraditoriamente gerar focos de resistência, condicionando o surgimento de *castle koopies*. Isso ocorre quando sistemas verticais obliteram fraturas horizontais de forma descontínua. Essa trama produz no empilhamento dos blocos, aumentando a resistência à erosão.

Na fase evolutiva seguinte, de esfoliação esferoidal, os blocos de granito parcialmente intemperizados, constituem formas relictuais de formato arredondado que se desenvolveram in situ, primeiro pelo fraturamento poligênico acompanhado pela esfoliação esferoidal, sendo esta a responsável por lhe conferir suas formas atuais. Nas diversas ocorrências analisadas nos estados

do Ceará e Paraíba, foram observados que a ausência de manto de alteração limita a meteorização química o que torna a esfoliação por deslocamento da superfície, o principal processo geomorfológico operante na atualidade (Figura 5).

A presença das placas de escamação (Fotos A e B, Figura 5) e a distribuição em superfície de associações de algas e fungos (liquens) sugerem que as últimas fases de esfoliação ocorreram pós-exumação. Nesse ínterim, fora observado que as áreas recentemente expostas ainda se situam desprovidas de liquens. As pequenas partes desagregadas permanecem nos entornos dos blocos maiores até serem parcialmente fracionadas e removidas pelo escoamento superficial.

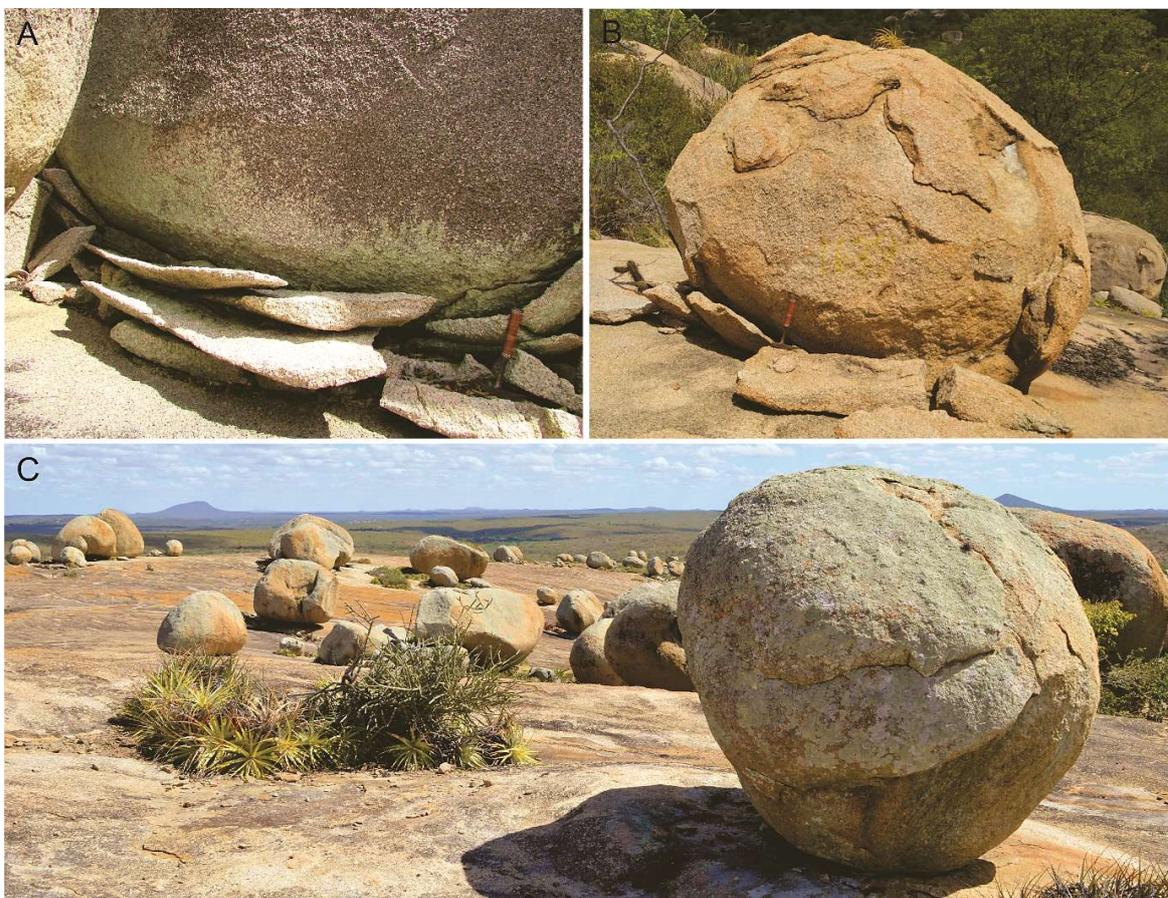


Figura 5 - Relevo saprolítico de blocos de granito modelados pela disjunção esferoidal em paleoambiente epigênico (Fotos A e B: Blocos de granito em lajedos nos arredores da Pedra da Andorinha – CE. Foto C: Lajedo de Pai Mateus – PB, Fotos: Maia, 2016)

#### 4.2 Formas associadas à meteorização.

As formas associadas as diferentes formas de intemperismo, são as que melhor caracterizam a morfologia dos inselbergues. São diferentes tipos de tafoni, bacias de dissolução e caneluras que podem ocorrer de diferentes maneiras e escalas, requerendo para

melhor detalhamento, uma apresentação individualizada.

##### 4.2.1 Tafoni

Tafoni são cavidades poligênicas e poliformes que se formam a partir da expansão de um núcleo que vai progressivamente sendo consumido pelo intemperismo

(Romani, 1994). Eles também podem ser de diferentes tipos: tafone de parede, tafone basal, *honeycombs* e alvéolos.

Nas diversas ocorrências analisadas no Ceará e na Paraíba, os tafoni de parede geralmente têm formato alongado e horizontalizado, como uma reentrância erosional na forma de um abrigo cárstico. Contudo, em virtude de sua origem poligênica, assumem outros formatos podendo ser inclinado em relação a superfície, quando se desenvolvem a partir de fraturas ou mesmo amorfo quando deriva do colapso de blocos.

Resultam da meteorização inicial ao longo das juntas, fraturas ou outras linhas mais frágeis, especialmente nas zonas onde a água pode residir. Dessa forma, a intemperização cavernosa no interior da rocha parte de um ponto central e vai sendo alargada por meio da progressiva descamação das superfícies interiores e da sua desintegração granular.

Segundo seu fator genético, podem ser encontrados em diferentes cotas topográficas. Tafoni que se desenvolvem ao longo de fraturas podem situar-se em diferentes pontos das escarpas graníticas, salvo os casos em que as fraturas sejam por alívio de pressão. Nesses casos os tafoni se dispõem preferencialmente nas partes mais elevadas ou nos limites laterais dos inselbergues. Esses tafoni geralmente apresentam-se curvilíneos, forma que mantém relação genética com as fraturas de alívio de pressão que o originaram. Já os tafoni associados a paleoníveis de dissolução epigênica (*flared slope*) estão mais comumente situados em setores intermediários a basais das escarpas graníticas. Ocorrem na forma de rasas reentrâncias que se estendem por uma das faces laterais dos inselbergues.

Diferentemente dos tafoni que se desenvolvem em fraturas, esses estão associados a paleoníveis de meteorização, alçados atualmente pela erosão diferencial do embasamento circunjacente (Figura 6).

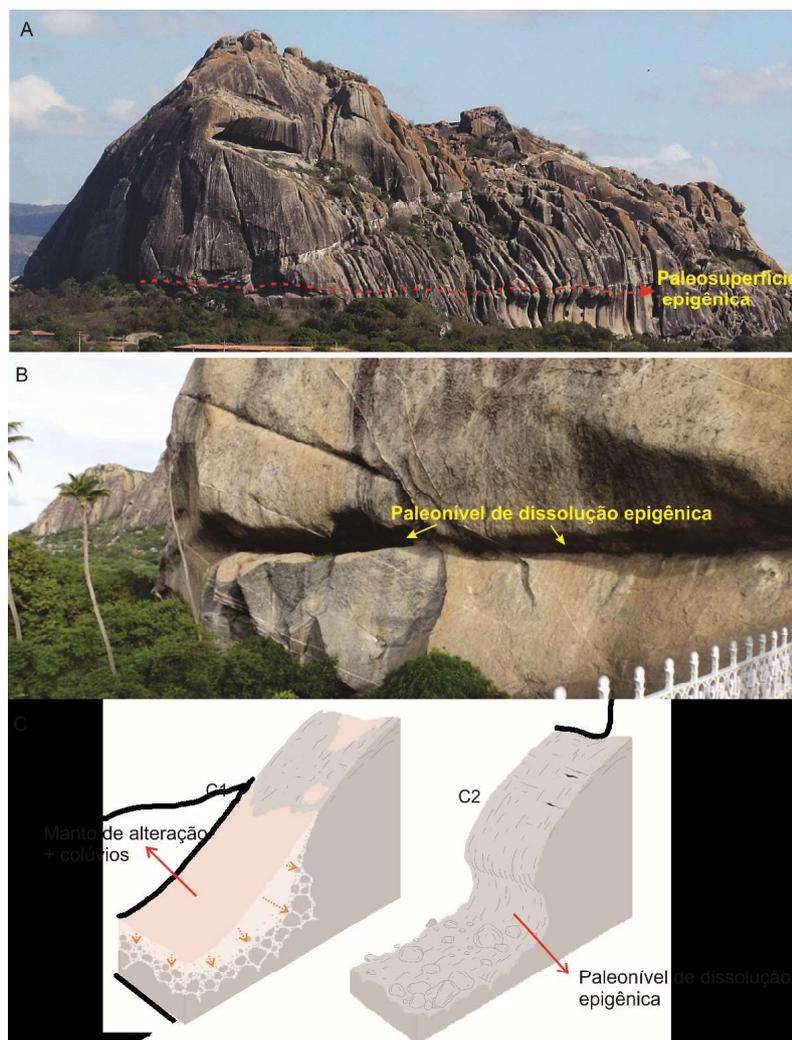


Figura 6 - Paleoníveis de dissolução epigênica – *flared slope* (Quixadá – CE, Fotos: Maia, 2015).

Outro tipo de feição tafoniforme são as cavidades basais que se formam em blocos de granito. Na área de estudo, os melhores exemplos dessas feições são encontrados no lajedo de Pai Mateus na PB (Área 4, Figura 1). Trata-se de feições côncavas que se expandem de forma ascendente da base do bloco granítico consumindo seu interior. Essa expansão amplia-se até

o ponto de romper a lateral do bloco, gerando assim um acesso à parte interna do bloco (Figura 7). A principal variável de controle das características dimensionais e morfológicas é condicionada pelo volume de rocha disponível. Em seu interior, a expansão da cavidade ocorre pela progressiva descamação das superfícies internas acompanhada pela desintegração granular.



Figura 7 - Tafone basal em bloco granítico (Pedra do capacete, lajedo de pai Mateus – PB, Foto: Maia, 2016).

Para a formação dos tafoni basais, o nicho de intemperismo formado pelo contato irregular entre a superfície do lajedo e a superfície de contato do bloco residual amplia-se em todas as direções tornando as paredes laterais do bloco residual cada vez mais finas. A desagregação química possibilitada pela zona de sombra é mais intensa que a esfoliação, por esse motivo as feições erosionais internas são melhor desenvolvidas que as externas. Isso porque no interior do tafone ocorre a menor incidência da insolação e do ressecamento, daí porque o desgaste intempérico é mais intenso na parte central bloco do que em sua superfície (Figura 7).

Os alvéolos ou *honeycomb* são dentre as demais feições tafoniformes a de menor expressão espacial. Geralmente ocupam o interior de cavidades maiores com tamanhos individuais que variam de escala centimétrica a decimétrica. Trata-se de concavidades circulares densamente distribuídas na forma de nichos de intemperismo. Na área de estudo, fora observado que sua ocorrência é mais frequente em cavidades geradas por colapso estando irregularmente dispostos ao longo de superfícies de descontinuidades como fraturas,

veios e diques (Figura 8). As cavidades hospedeiras, foram denominadas de tafone de colapso. Estas, de modo distinto as diversas formas tradicionais de tafone, origina-se pelo fraturamento e desprendimento de blocos. A cavidade deixada pelo colapso, passa a abrigar condições propícias para o intemperismo cavernoso responsável pela ampliação da mesma, assim como ocorre no desenvolvimento dos demais tipos de tafoni.

De modo distinto as demais feições do modelado granítico, os tafoni de colapso e os *honeycombs* em seu interior, não apresentam necessariamente elementos sugestivos de uma origem atrelada há um paleomanto de intemperismo. Nesses casos, o intemperismo ao longo das fraturas origina os *honeycombs* na fase pré-colapso (Fase 2, Figura 8 – B). Assim, o papel exercido pelas fraturas ao criar no interior da rocha, um ambiente propício ao intemperismo cavernoso, é análogo ao papel exercido pelo manto de alteração no que se refere a proteção contra o ressecamento e a manutenção da umidade. A expansão dos *honeycombs* no interior das fraturas auxilia na desagregação da rocha originando assim a cavidade de colapso.

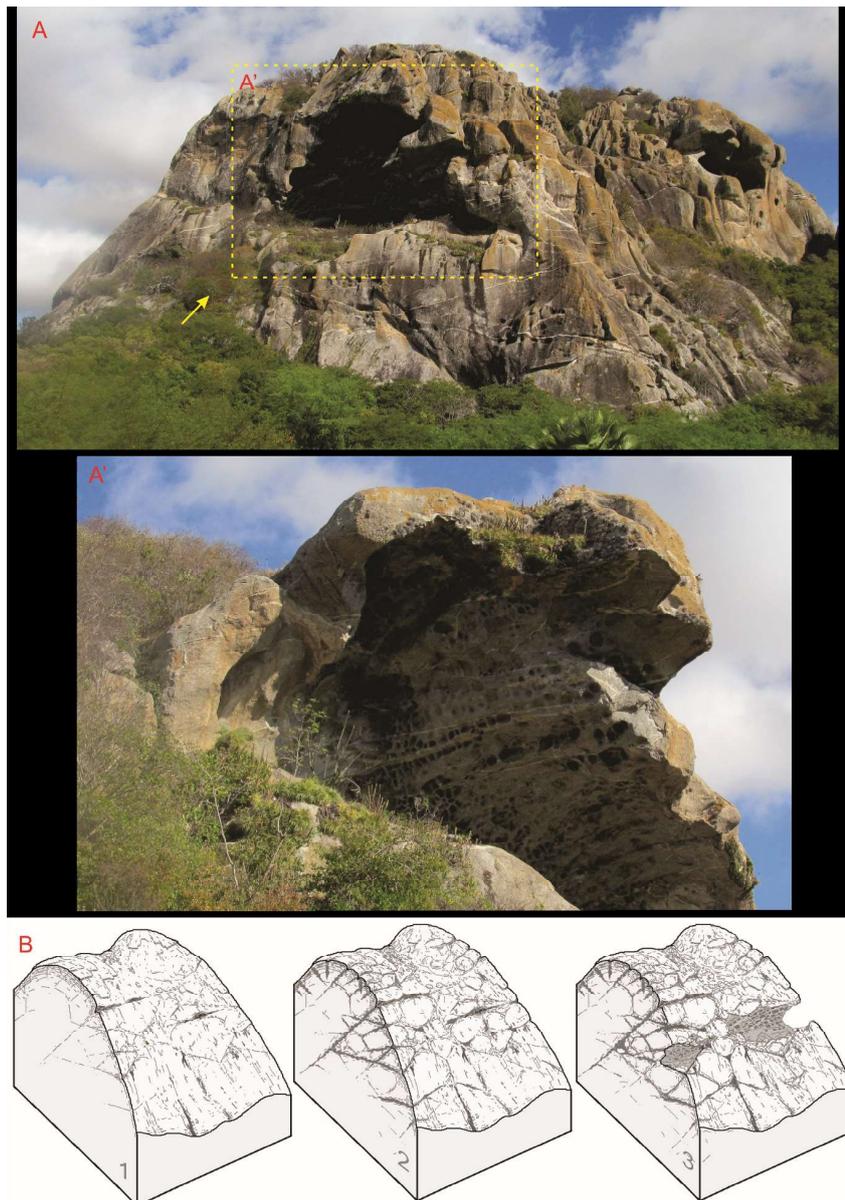


Figura 8 – A: Tafoni de parede em inselbergue. No detalhe da foto A' observa-se alvéolos no interior da cavidade. Seta amarela na foto A indica o ângulo em que foi retirada a foto A'. B: Sequência evolutiva baseada no colapso de blocos e geração de tafoni (Fotos: Quixadá-Ce. Maia, 2015).

#### 4.2.2 Bacias de dissolução

Denominadas classicamente como *weatering pits*, *pías* ou *gnammas* essas cavidades nas superfícies expostas das rochas graníticas, em virtude de seu formato e gênese, foram denominadas como bacia de dissolução.

Trata-se de feições negativas de formato circular que ocorrem normalmente em escala variável de decimétrica a métrica. Também podem ser elipsoidais, mantendo ainda as características geométricas originais dos enclaves que a geraram (Figura 9, Fotos A e B). Nos

casos em que estão em fase mais avançada de evolução, apresentam a forma côncava, com perfil esférico ou ovalado. Seu formato por vezes assemelha-se a uma marmita, diferenciando-se desta por seu fator genético e pela ausência de seixos em seu interior. Sua ocorrência é mais comum em declives podendo estar isoladas ou interconectadas por exutórios. Quando o talvegue do exutório não é suficientemente desenvolvido e dessa forma não drena o fundo da bacia de dissolução, tem-se o acúmulo de água (Figura 9, Foto C).

Fora observado que nas escarpas com declives superiores a 45 graus, a interconexão entre pequenas bacias de dissolução por seus exutórios, pode evoluir para uma só feição do tipo canelura (Figura 10). Isso acontece a partir do aprofundamento e alargamento do exutório. Nesse processo, os fundos das bacias de dissolução passam a formar patamares que promoverão na drenagem, um efeito em cascata. Esses casos foram observados com maior frequência em inselbergues situados em granitos com ampla quantidade de enclaves máficos. Contudo, é importante destacar que

a presença de enclaves não constitui um pré-requisito para a formação de caneluras mas sim um facilitador geomorfológico para sua formação.

Nos casos em que as escarpas graníticas dos inselbergues são nucleadas por enclaves e por consequência, por bacias de dissolução tem-se o adensamento desse tipo de feição originando diversas reentrâncias erosionais que confinam a drenagem efêmera. Associados a esse contexto tem-se os inselbergues caracterizados por feições de dissolução.

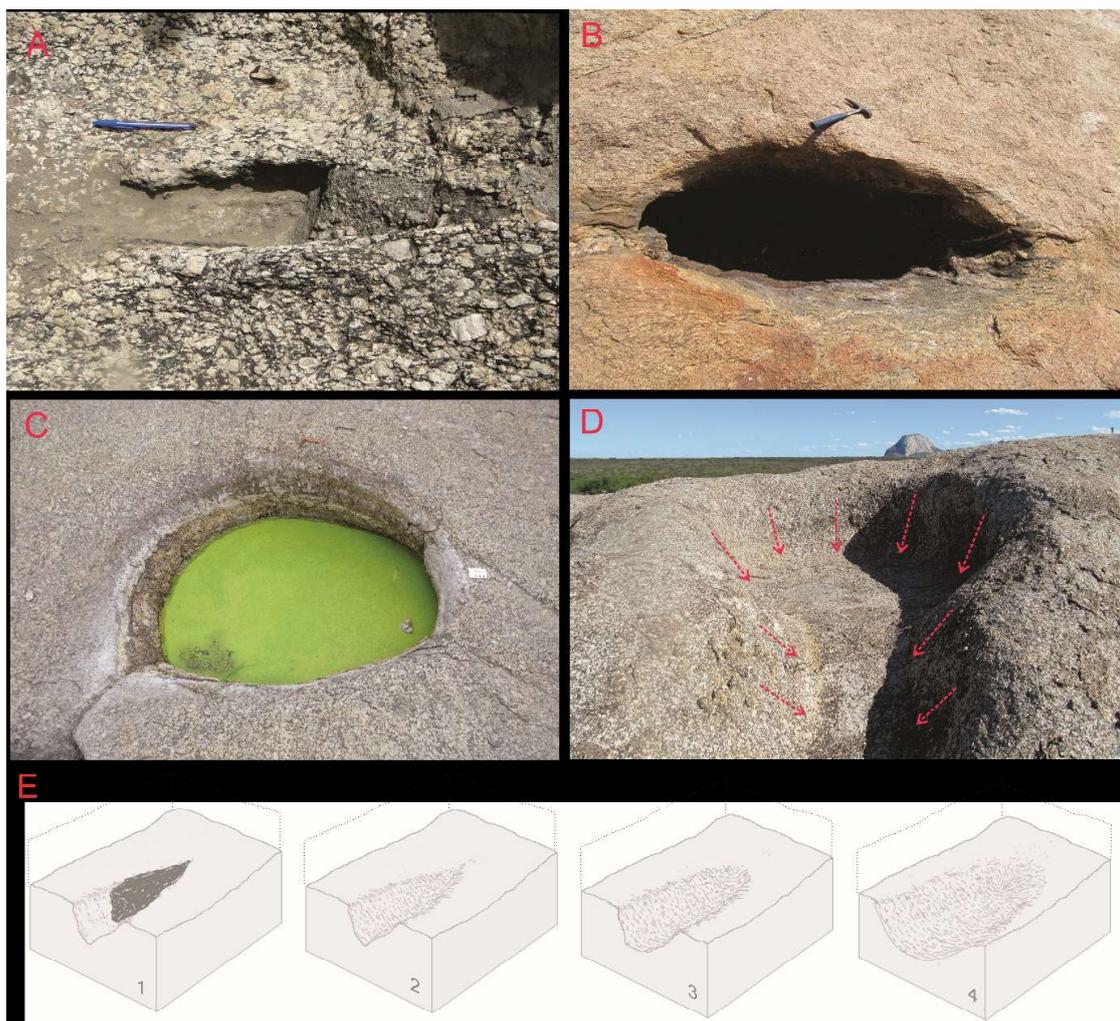


Figura 9 - Diferentes estágios de uma bacia de dissolução. A: Enclave parcialmente removido. B: Bacia de dissolução elipsoidal. C: Bacia de dissolução côncava. D: Bacia de dissolução esférica com exutório de escala métrica. As setas indicam o sentido do fluxo. E: Sequência evolutiva baseada na remoção de enclave elipsoidal máfico em condições epigênicas. Linha pontilhada representa nível do solo (Fotos A, C e D Quixadá – CE, Foto B: Patos – PB, Fotos: Maia, 2015).

#### 4.2.3 Caneluras

Caneluras são sulcos verticais rasos de erosão química que possuem normalmente perfil côncavo e baixa sinuosidade. Podem ocorrer nas escarpas de inselbergues e na superfície de blocos graníticos.

Especificamente nesses casos, são denominadas *karrens* (Figura 11) e são caracterizados por canais bem marcados dispostos paralelamente do topo a base do bloco granítico. Na área de estudo, sua maior ocorrência foi verificada na Paraíba, mais especificamente em blocos residuais saprolíticos do lajedo de Pai Mateus.

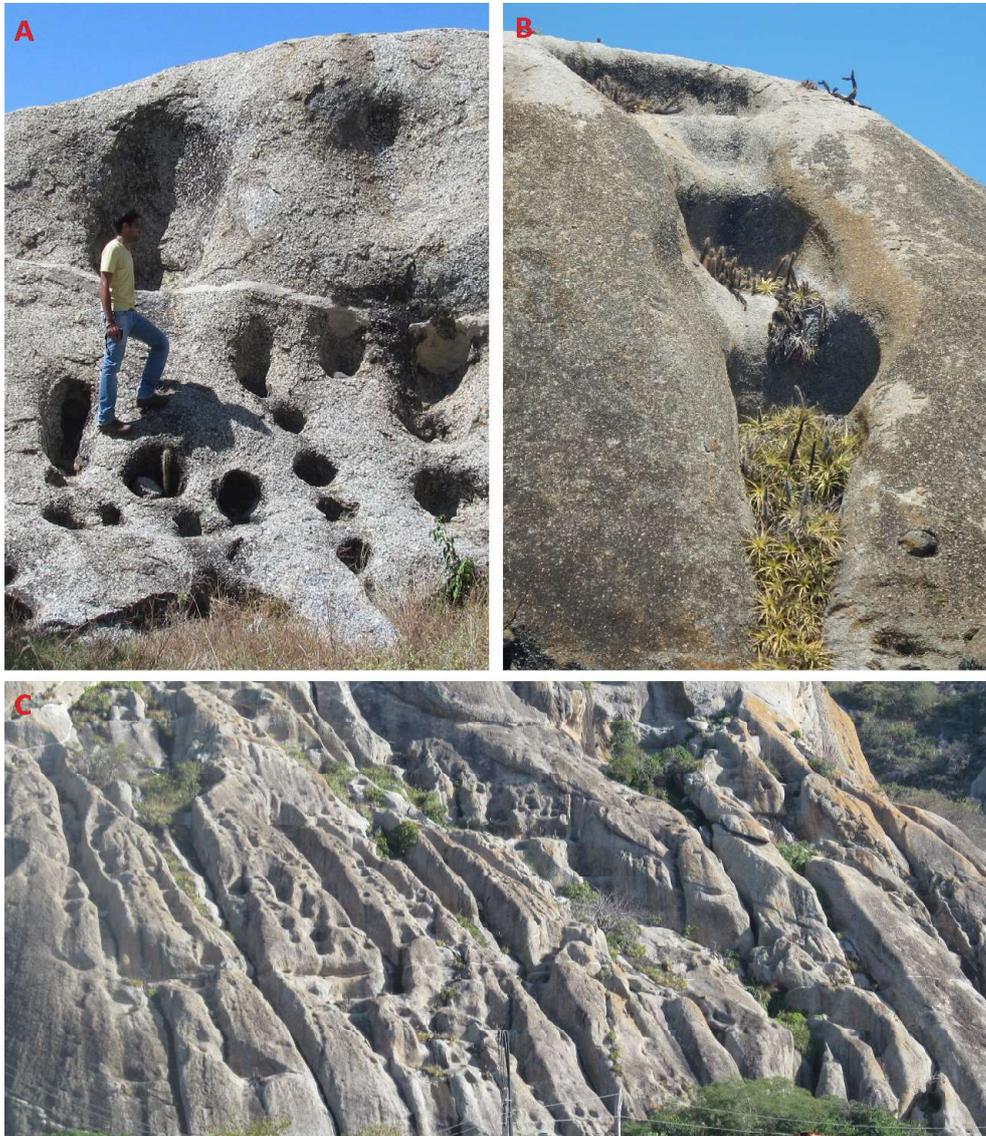


Figura 10 - Bacias de dissolução e Caneluras. A: Bacias de dissolução em estágio inicial de formação dispostas alinhadas segundo direção de escoamento. B: Bacias de dissolução conectadas. C: Sequência de caneluras em escarpa de inselbergue. Entre os sulcos mais expressivos, percebe-se a ocorrência de bacias de dissolução em fase de coalescência (Quixadá – CE, Fotos: Maia, 2016).

Quando ocorrem nas escarpas dos inselbergues, as caneluras organizam o sistema dispersor do escoamento originando focos de drenagem radial dentre os padrões majoritariamente dendríticos das depressões sertanejas. Por vezes acumulam em seu interior sedimentos e restos orgânicos permitindo assim o acesso da vegetação as

escarpas e topo dos inselbergues.

A maior ocorrência de caneluras nas escarpas dos inselbergues foi observada nos estados do CE e PB (Áreas 1, 2, e 3 da Figura 1). Nos inselbergues caracterizados por feições de dissolução (Figura 12), as caneluras constituem as microformas de maior

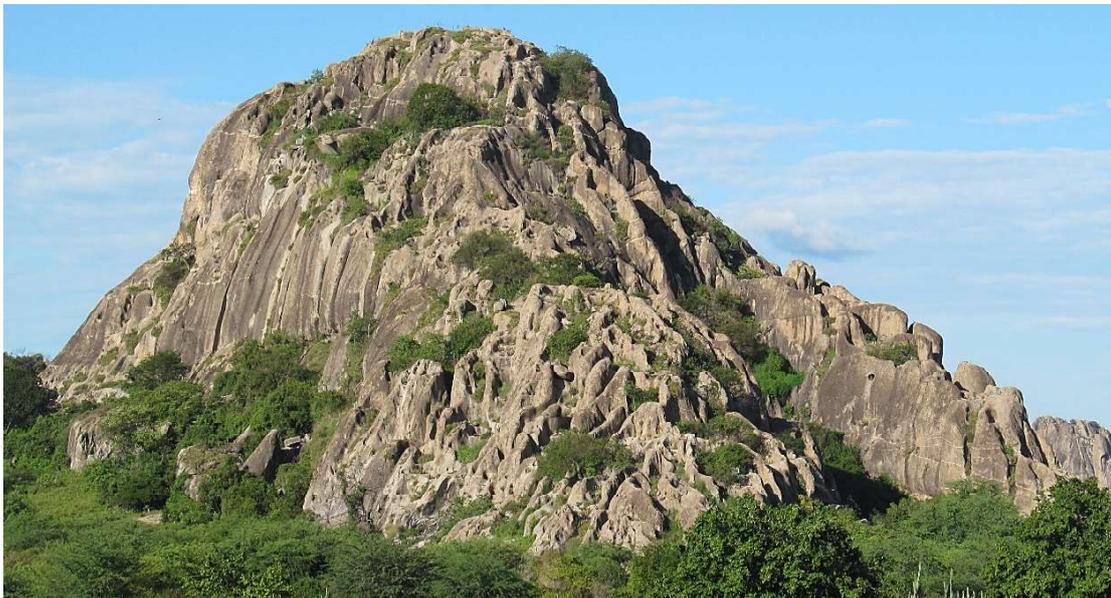
expressividade e que melhor caracterizam a morfologia.

Nos exemplos observados nesse trabalho, pode-se constatar que sua ocorrência está associada as variações faciológicas dos granitos. Nas fácies com predominância de uma matriz máfica (biotita e muscovita com ou sem anfíbólio) e textura porfírica, observa-se maior concentração de caneluras quando comparados a granitos félsicos com maior conteúdo de quartzo e feldspatos

e menor de minerais máficos. Fora observado que o intemperismo de enclaves elipsoidais máficos constitui o ponto de partida para sua formação. Em seguida, uma vez organizado o sistema dispensor da drenagem, sua evolução passa a não mais ser influenciada pela presença de enclaves, embora a variação faciológica do granito possa gerar um maior adensamento de caneluras em determinadas vertentes dos inselbergues.



*Figura 11 - Karrens (Lajedo Pai Mateus – PB. Fotos: Maia, 2016).*



*Figura 12 - Inselbergue caracterizado por feições de dissolução do tipo caneluras (Quixadá – CE, Foto: Maia, 2014).*

## **Discussões**

Os resultados obtidos por esse trabalho, mostram que diversas formas do modelado granítico, possuem sua gênese atribuída a condições epigênicas, onde a ação combinada de processos de meteorização precedem a

exposição e a exumação em superfície.

Tal constatação advém da ampla ocorrência de feições horizontais de dissolução compondo por vezes paleoníveis de dissolução epigênica. A maioria desses paleoníveis estão alçados topograficamente pela erosão

diferencial compondo tafoni (tafone na forma singular) nas escarpas dos inselbergues. Concomitantemente são observadas bacias de dissolução em diversas ordens de grandeza associadas geneticamente a concentrações de minerais máficos dispostos na forma de enclaves. A junção dessas bacias resulta na formação de ranhuras verticais do tipo caneluras (*flutes*) sendo estas em muitos casos, as feições mais características dos inselbergues, sobretudo aqueles onde haja predominância de uma matriz mais máfica, formada por minerais micáceos (biotita e muscovita) e anfibólios.

Corroborando com esta interpretação, estão às formas residuais do tipo relevos saprolíticos. Estas por sua vez, resultantes da remoção parcial dos produtos de alteração do granito (*grus*) onde apenas os detritos friáveis de menor calibre são removidos restando os blocos de granito (*boulders*) parcialmente alterados. Esses blocos de granito, em muitos casos apresentam tafoni basais ou outras formas menores associadas a dissolução, no caso dos *karrens* ou a esfoliação esferoidal.

O modelado granítico apresenta grande diversidade de formas cuja gênese é atribuída a uma ação combinada de processos que se desenvolvem em fases que precedem sua exposição em superfície (Twidale e Vidal, 1994). Nessa perspectiva, as concepções de duplo aplainamento servem para explicar a exumação e exposição do embasamento em superfície (Tarbuck e Lutgens, 2006), pois cada vez mais, têm se reconhecido que os componentes que regem a evolução associada aos relevos graníticos estão relacionados a processos que ocorrem na base do regolito (Twidale, 2002).

Não obstante, antes da exposição e meteorização da rocha granítica em superfície, a exumação do plúton granítico é responsável pelo sistema de fraturas que definirá a trama estrutural que submeter-se-á a etapa seguinte de saprolitização.

Para tanto, essas petrotramas deformacionais, que nos tempos atuais concentraram os campos de matações e demais relevos saprolitizados, estão relacionadas a um nítido controle estrutural exercido por zonas de cisalhamento transcorrentes. Estas zonas condicionaram o adensamento, a orientação, o espaçamento das ordens de fraturas e descontinuidades, que juntamente com as juntas de alívio sub-horizontais, associadas à prévia exumação do corpo, definem o tamanho, altura, direção e o empilhamento dos blocos graníticos (Lages, *et al.*, 2013).

O embasamento granítico exposto, uma vez submetido ao progressivo aprofundamento diferencial do *front* de alteração, associado à erosão superficial, faz com que os setores da superfície basal de intemperismo que não sofreram alteração sejam gradativamente alçados à superfície (Vitte, 2005). Dentre os motivos que podem gerar esse alçamento pode-se destacar a ausência de fraturas e/ou a diferenciação faciológica do embasamento (Maia, *et al.* 2015).

Ao ser exumado, as superfícies internas de um corpo granítico, definida pela estrutura que se encontra afetada por processos de meteorização, é muito superior a correspondente externa alterada, normalmente restringida à parte superficial do embasamento exposto. O principal resultado da meteorização é a perda da coesão granular da rocha, permitindo assim a evacuação dos detritos friáveis (Vidal Romaní e Temiño, 2004).

O embasamento fraturado facilita a saprolitização originando uma zona pedogênica. Na transição climática em que haja aumento da aridez, a redução da umidade resulta na expansão de sistemas florísticos caducifólios com mais espessamento e menor capacidade de proteção do manto de alteração (Bigarella, 1994; 2003). A erosão se processa removendo as frações mais finas resultando na exposição do saprólito. Isso resulta na formação de relevos saprolíticos, por vezes do tipo Tor de granito, onde blocos soltos e parcialmente alterados são expostos em superfície. Assim, a remoção dos detritos friáveis resultantes das alternâncias entre os ciclos erosivos originará relevos saprolíticos por meio da incapacidade dos sistemas erosivos removerem os blocos graníticos de maior calibre (Vidal Romaní e Twidale, 1998).

Essas concepções adéquam-se sobremaneira ao contexto evolutivo do nordeste setentrional brasileiro, onde várias feições atestam os efeitos da meteorização sob manto de alteração. Aqui destaca-se especialmente as diversas formas de dissolução apresentadas nos resultados desse trabalho, podendo-se enfatizar os tafoni de parede (quando horizontais, apresentados como paleosuperfícies de dissolução epigênicas) e basais, bacias de dissolução e caneluras. Todas essas formas em rochas graníticas necessitam do incremento do potencial de dissolução fornecido pelo manto de alteração por meio da formação de ácido carbônico. A esse respeito, Twidale (2002) propõe que o desenvolvimento da morfologia granítica se dá em duas etapas. A primeira pela meteorização química na base do manto de alteração (Roque *et al.*, 2013) através da formação da

etching superfície e o segundo, pela exposição gradual por partes da cobertura regolítica através dos processos superficiais. Nesse trabalho utilizar-se-á dessa distinção para discussão dos resultados.

Na área de estudo, a primeira etapa é representada pelas diversas morfologias associadas a dissolução. Constituem elementos fósseis do relevo, que embora estejam sendo preservadas pela semiaridez atual, a origem está possivelmente associada a sistemas intempéricos derivados de climas tropicais mais úmidos (Maia et al, 2015).

A esse respeito, é consensual que ciclos de umidade e secura conduzem ao estabelecimento de fases pedogênicas e morfogênicas respectivamente (Bigarella, 2003). Essa variação tem sido demonstrada como a principal responsável pelos processos erosivos desencadeados sobretudo na mudança de um clima úmido para seco.

Nessa transição, as formas desenvolvidas sob o manto de alteração passam a ser expostas diretamente em superfície (Vitte, 2005), constituindo assim as evidências geomorfológicas da existência de um paleomanto de alteração.

Dentre a ampla assembleia de morfologias derivadas da meteorização química que compõem o modelado granítico, os tafoni são os que apresentam maior diversidade quanto as formas. Portanto o termo é coletivo referindo-se a espaços vazios nas rochas, desenvolvidos a partir de uma célula basal onde há a degradação progressiva de uma cavidade inicial (Uña Alvarez, 1999). Tafoni ocorrem principalmente na forma de cavidades erosionais naturais com formatos tipicamente esféricos, elipsoidais ou poligonais (Paradise, 2011, 2013). Essas formas são especialmente bem desenvolvidas em rochas graníticas (Twidale e Bourne, 2008) mas podem ser encontradas também em arenitos (André e Hall, 2005; Turkington e Paradise, 2005) e até em rochas vulcânicas (e. g. McBride e Picard, 2000). Também foram descritos em diferentes contextos climáticos, entretanto são mais comuns e mais bem desenvolvidos em condições climáticas áridas e semiáridas (Roqué *et al.*, 2013) como resultado da meteorização cavernosa nos afloramentos rochosos (Goudie, 2004) sejam na base ou nas escarpas (Uña Alvarez, 1999).

Na área de estudo, os Tafoni de parede ocorrem principalmente em planos de fraturas horizontais

e transversais. As fraturas de alívio de pressão condicionam a dissolução química a partir da formação das zonas de sombra. Estas zonas constituem a base pela qual se instala os nichos de intemperismo que constituem as áreas de intensa meteorização/fafonização da rocha.

Também fora constatado que **níveis de dissolução horizontais** (*flared slope*) nas escarpas dos inselbergues sugerem que as feições de dissolução tenham se formado nessas condições. Essas paleosuperfícies de dissolução, segundo Twidale (1982) resultam de uma forma particular de corrosão química, podendo originar-se por ação de uma frente alteração desenvolvida na base de vertente, como resultado do ataque promovido pela água contida no manto de alteração-areias graníticas, seguidas da sua posterior exposição a superfície (Vieira, 2003).

Já os tafoni basais, resultam da expansão de nichos de intemperismo que partem da base consumindo o interior. Isso ocorre quando o bloco granítico se assenta sobre a superfície do lajedo, fazendo com que o encaixe da superfície deixe vazios em virtude das irregularidades de ambas (Uña Alvarez, 1999). Esses vazios podem constituir núcleos de sombra e umidade dando início a tafonização.

Quanto as formas derivadas da eliminação da cobertura regolítica, apenas quando a alteração não destrói totalmente a estrutura do maciço rochoso e quando este é exumado com posterior impressão dessas superfícies, que os processos exógenos poderão realizar a evacuação de detritos friáveis predispostos a separação. Assim tanto as *gnammas* como os tafoni podem aparecer como microformas, originadas em condições genéticas tão diferentes como os mecanismos de desagregação que lhe puseram em evidencia. Por esta razão, não se pode confundir a gênese das microformas com o momento em que independentemente do clima, atual e passado, a forma fora evidenciada em superfície (Vidal Romani, 1994).

## Conclusões

No Nordeste setentrional brasileiro, a maioria das formas que modelam o ambiente granítico possuem caráter pandêmico e portanto, desenvolvem-se de maneira similar mesmo quando submetidas a contextos climáticos e em fácies graníticas distintas. Em ambiente semiárido, as formas associadas a dissolução e a intemperização basal regolítica em condições

epigênicas, são responsáveis pela esculturação do relevo de modo análogo ao que ocorre em ambiente carstico. Assim, diversos tipos de tafoni, bacias de dissolução, caneluras e outras formas menos representativas, precisam ser compreendidas em termos genéticos a partir de dois estágios: Primeiro a formação da *etching* superfície correspondente ao front de alteração. Esse será responsável pela retenção da umidade no contato rocha-solo e pelo aumento da acidez da água e consequentemente do potencial de dissolução. Segundo, pela exposição gradual por partes da cobertura regolítica até sua total remoção. Uma vez removidos os detritos friáveis de textura areno-síltica, revela-se uma vasta assembleia de morfologias associadas geneticamente ao contato rocha solo. As bacias de dissolução e as caneluras, uma vez expostas em superfície passam a caracterizar a morfologia de lajedos e inselbergues. A remoção da cobertura regolítica expõem também os blocos residuais de maior volume originando assim os *boulders* que caracterizam os relevos saprolíticos. De modo distinto, em alguns casos específicos, quando a exumação precede a esfoliação, a formação do relevo saprolítico, origina feições angulares do tipo *tors* e *castle koopies*. Nesses casos, o relevo documenta que a exumação parcial do saprólito ocorreu na fase pré-esfoliação, expondo dessa forma, toda trama estrutural resultante do fraturamento termoclástico e de alívio de pressão.

### Referencias Bibliográficas:

- ALVAREZ, U.E. Evidencias y Pruebas Significativas sobre la Degradación Subaérea en Formas Menores Graníticas: Análisis de Casos. **Cadernos Lab. Geológico de Lage Coruña**. Vol. 24, pp. 177-190 1999.
- ANDRÉ, M.F; HALL, K. Honeycomb development on Alexander Island, glacial history of George VI Sound and paleoclimatic implications (Two Step Cliffs-Mars Oasis, W Antartica) **Geomorphology** 65, 117-138, 2005.
- ARTHAUD, M.H. **Evolução Neoproterozóica do Grupo Ceará (Domínio Ceará Central, NE Brasil): da sedimentação à colisão continental brasileira**. 2007. 170 f. Brasília, 2007. Tese (Doutorado em Geociências) - Instituto de Geociências da Universidade de Brasília. Brasília, 2007.
- BIGARELLA, J. J. **Estrutura e Origem das Paisagens Tropicais**. Vol.1. Florianópolis: Ed. UFSC, 1994.
- BIGARELLA, J. J. **Estrutura e Origem das Paisagens Tropicais**. Vol.3. Florianópolis: Ed. UFSC, 2003.
- BRASIL, CPRM – **Folhas Mapeamento Geológico 1:100.000** Taparuaba (SB-24-V-B-II), Quixadá (SB.24-V-B-VI), Quixeramobim (SB.24-V-D-III), Patos (SB-24-Z-D-I), Boqueirão (SB-24-Z-D-III).
- CASTRO, D.L; CASTELO BRANCO, R.M.G; MARTINS, G; CASTRO, N.A; Radiometric, magnetic, and gravity study of the Quixadá batholith, central Ceará domain (NE Brazil): evidence for Pan-African/Brasiliano extension-controlled emplacement. **Journal of South American Earth Sciences**.Vol. v.15, n. 5, p.543-551, oct. 2002.
- CORRÊA, A.C.B.; TAVARES, B.A. C.; MONTEIRO, . Megageomorfologia e morfoestrutura do Planalto Borborema. **Revista do Instituto Geológico**, São Paulo, v. 31, p. 35-52, 2010.
- FETTER, A.H.; SCHMUS, W.R.V.; SANTOS, T.J.S.; NETO, J.N.N.; ARTHAUD, M.H. 4 UPb 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**, São Paulo, v. 30, n. 1, p. 102-106, 2000.
- GOUDIE, A.S. **Encyclopedia of Geomorphology**. V. 1. IAG, International Geomorphology Union, 2004.
- INMET, Dados históricos/Clima, **Instituto Nacional de Meteorologia**, Disponível em: [www.inmet.gov.br](http://www.inmet.gov.br). 2014.
- JARDIM DE SÁ.; **A Província Borborema no Nordeste do Brasil e seu significado geodinâmico na cadeia brasileira-sul-africana**. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília. Tese de doutorado. 1994.
- KAJDASA, B.; MICHALIK, M. J.; MIGÓN, P. **Mechanims of granite alteration into grus Karkonosze granite, SW Poland**. *Catena* 150, 2017.
- LAGES, G. A.; MARINHO, M.S. ; NASCIMENTO, M. A. L. ; MEDEIROS, V.C. ; DANTAS, E. L. ; FIALHO, D. . Mar de Bolas do Lajedo do Pai Mateus, Cabaceiras, PB: Campo de matações graníticos gigantes e registros rupestres de civilização pré-colombiana. In: Winge M; Schobbenhaus C; Souza C R G; Fernandes A C S; Berbert-Born M; Sallun Filho W; Queiroz E T. (Org.). **Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil**. 1ed. Brasília: CPRM, 2013, v. III, p. 99-112
- MAIA, R. P.; NASCIMENTO, M.A.L.; BEZERRA, F. H. R.; CASTRO, H.S.; MEIRELES, A.J.A.; ROTHIS, L.M. Geomorfologia do campo de inselbergues de Quixadá – NE do

- Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, N16, Vol.2, 2015.
- MATMON, A; MUSHKIN, Y; ENZEL, T; GRODEK, ASTER, T. Erosion of a granite inselberg, Gross Spitzkoppe, Namib Desert. **Geomorphology**, Amsterdam, v. 201, p. 52-59, 2013.
- MCBRIDE, E.F., PICARD, M.D. Origin and development of tafoni in Tunnel Spring Tuff, Crystal Peak, Utah, USA. **Earth Surface Processes and Landforms** 25, 869– 879. 2000.
- MIGÓN, P. Granite Landscapes of the World. **Oxford University Press**, New York. 416 pp. 2006.
- NASCIMENTO, M. A. L; GALINDO, A. C; DMEDEIROS, V. C. Ediacaran to Cambrian magmatic suites in the Rio Grande do Norte domain, extreme Northeastern Borborema Province (NE of Brazil): Current knowledge. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 58, p. 281-299, 2015.
- NEVES, S.P; **Granitos Orogênicos: da geração dos magmas à intrusão e deformação**. Rio de Janeiro: Synergia, 2012.
- NIMER, E. Climatologia do Brasil. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 1989.
- NOBRE, P. Clima e Mudanças Climáticas no Nordeste. Projeto Áridas, **Ministério da Integração Nacional**, v. 1, n.1, 1994.
- OBERLANDER, T.M., Morphogenesis of granitic boulder slopes in the Mojave Desert, California. **Journal of Geology** 80 (1), 1–20. 1972.
- PARADISE T.R. Tafoni and Other Rock Basins. In: John F. Shroder (ed.) **Treatise on Geomorphology**, Volume 4, pp. 111-126. 2013.
- PARADISE, T. R., Tafoni and Weathered Stone Basins, in **Geomorphology** (editor G. Pope, J. Shroder), Reed-Elsevier **Geosciences Reference Series MORP** v.4: 28pp 2011.
- ROMANI, J. R.V. **Microformas graníticas tipo tafoni (cachola) y gnamma (pia) un micromodelado sin relacion con el clima o la estacionalidad**. 1994.
- ROMANÍ, J.R.V. & YEPES TEMIÑO, J. Historia de la Morfogénesis Granítica. **Caderno Laboratorio Xeolóxico de Laxe. Spain: A Coruña**, v. 29, p. 331-360, 2004.
- ROMANÍ, J.R.V. Forms and structural fabric in granite rocks. **Cadernos Laboratorio Xeolóxico do Laxe** 33, 175-198, 2008.
- ROMER, W. Differential weathering and erosion in an inselberg landscape in southern Zimbabwe: A morphometric study and some notes on factors influencing the long-term development of inselbergs. **Geomorphology**, Amsterdã, v.86, p. 349-368, 2007.
- ROQUÉ, C.; ZARROCA, M.; Linares. R. Subsurface initiation of tafoni in granite terra ins — Geophysical evidence from NE Spain: Geomorphological implications. **Geomorphology** 196, 2013.
- SIAL, A.N. Granite types in northeast Brazil: current knowledge. **Revista Brasileira de Geociências**, 1986.
- TARBUCK, E.J; LUTGENS, F.K. **Earth Science**. ed.11, New Jersey, USA: Person Prentice Hall, 2006.
- TURKINGTON, A. V., PARADISE, T. R. Sandstone weathering: a century of research and innovation. **Geomorphology** 67, 229-253, 2005.
- TWIDALE, C.R, BOURNE, A. Caves in granitic rocks: types, terminology and origins. **Cadernos Laboratorio Xeolóxico do Laxe** 33, 35-57, 2008.
- TWIDALE, C.R, VIDAL-ROMANÍ, J.R. On the multistage development of etch forms. **Geomorphology** 11, 107-124, 1994.
- TWIDALE, C.R; Bornhardt, Boulders and Inselbergues **Caderno do Laboratório Xeolóxico do Laxe**, Vol. 20, Coruna, 1995.
- TWIDALE, C.R; The two-stage concept landform and landscape development involving etching: origin, development and implications of na idea. **Earth Science** Ver. 57. 2002.
- UÑA ALVAREZ, E. de Evidencias y Pruebas Significativas sobre la Degradación Subaérea en Formas Menores Graníticas: **Análisis de Casos** **Cadernos Lab. Xeolóxico de Laxe** Coruña. 1999. Vol. 24, pp. 177-190.
- VAN SCHMUS, W. R.; BRITO NEVES, B. B.; HACKSPACHER, P. C.; BABINSKI, M. U/Pb and Sm/Nd geochronologic studies of the eastern Borborema Province, Northeast Brazil: initial conclusions. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 8, n. ¾, p. 267-288, 1995.
- VAUCHES, A., NEVES, S., CABY, R., CORSINI, M., EGYDIO-SILVA, M., ARTHAUD, M., AMARO, V., The Borborema shear zone system, NE Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 8, n. ¾, p. 247-266, 1995.
- VIEIRA, A. Alguns aspectos da paisagem da Serra de Montemuro: Formas de pormenor do modelado granítico. In Escola Superior de Educação da Guarda (Ed.) **Livro de homenagem a José Miguel Carreira Amarelo**, Guarda, ESEG Publicações 2003.
- VITTE, A.C. Etchplanação dinâmica e episódica nos trópicos quentes e úmidos. **Revista do Departamento de Geografia da USP**, São Paulo, n. 16, p. 105-118, 2005.