

MORFOLOGIA, GÊNESE E EVOLUÇÃO DE DEPRESSÕES FECHADAS NA BACIA SEDIMENTAR DA PARAÍBA

*MORPHOLOGY, GENESIS AND DEVELOPMENT OF CLOSED DEPRESSIONS IN
THE SEDIMENTARY BASIN OF PARAÍBA*

*MORFOLOGÍA, GÉNESIS Y EVOLUCIÓN DE DEPRESIONES CERRADAS EN LA
CUENCA SEDIMENTARIA DEL PARAÍBA*

SAULO ROBERTO DE OLIVEIRA VITAL^{1*}
ALCINA MAGNÓLIA FRANCA BARRETO²
WILLIAM SALLUN FILHO³

¹ Professor do Programa de Pós-graduação em Geografia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte/UFRN. DGC/CERES, CEP: 59300-000, Caicó, Rio Grande do Norte, Brasil, Tel.: (+55 84) 3342-2238, srovital@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-2028-0033>

*Autor correspondente

² Professora do Programa de Pós-graduação em Geociências da Universidade Federal de Pernambuco/UFPE. Campus Central, CEP: 50670-901, Recife, Pernambuco, Brasil, Tel.: (+55 81) 2126-8000, alcinabarreto@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-0864-7995>

³ Pesquisador do Instituto Geológico do Estado de São Paulo/IG e Professor do Programa de Pós-graduação em Geociências da Universidade de São Paulo/USP.

CEP: 04015-011, São Paulo, Brasil, Tel.: (+55 11) 0800 11 3560, wfilho@sp.gov.br

<https://orcid.org/0000-0001-8449-3970>

Recebido 22/06/2020

Enviado para correção 23/06/2020

Aceito 09/07/2020

RESUMO

Depressões fechadas em sedimentos areno-argilosos inconsolidados da Formação Barreiras foram identificadas na Bacia Sedimentar da Paraíba. Considerando esse fenômeno, o objetivo desse estudo consistiu em analisar as características geomorfológicas e geológicas das feições, a fim de compreender sua gênese e evolução. Foram utilizadas imagens do SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission), a partir das quais foram delimitadas as bacias fechadas e obtidas informações morfométricas. As mesmas imagens foram utilizadas para a extração de lineamentos estruturais, a fim de correlacioná-los com os alinhamentos entre as depressões fechadas, e verificar a hipótese de ocorrência de dissolução e carstificação. Além disso, foi realizada a medição das direções de fraturas no campo, sobre afloramentos da Formação Gramame. Por fim, informações geológicas foram obtidas a partir do mapeamento geológico dos estados da Paraíba e Pernambuco, para a extração dos limites geográficos da Formação Gramame. A partir dos dados morfométricos, percebeu-se que essas formas de relevo possuem grandes extensões, perímetros irregulares e grande elipsidade, seguindo orientações preferenciais, em consonância com as descontinuidades regionais. Os dados geológicos e as observações de campo demonstram que as mesmas estão sofrendo influência da dissolução nos calcários subjacentes, no entanto não se exclui a ocorrência do mesmo processo nos sedimentos areno-argilosos da Formação Barreiras. Esses aspectos abrem caminhos para futuros estudos tratando da composição química e suscetibilidade à dissolução das rochas sobre a qual essas formas se desenvolvem. Para mais, possibilita uma melhor compreensão da dinâmica hidrogeológica da região e sua relação com o sistema cárstico, e o esclarecimento de aspectos conceituais e sistemáticos do Carste da Bacia da Paraíba.

Palavras-chave: Gênese, Evolução, Depressões Fechadas, Carste, Bacia da Paraíba.

ABSTRACT

Closed depressions in unconsolidated sandy-clay sediments of the Barriers Formation were identified in the sedimentary basin of Paraíba. Taking into account this phenomenon, the aim of this study consisted in analyzing the geomorphologic and geologic characteristics of these features, in order to understand its genesis and evolution. Were used images from SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission), from which were delimited the closed basins and obtained morphometric information. The same images were used to the extracting of structural lineaments in order to correlate them with the alignments of the closed depressions and verify the hypothesis of dissolution and carstification. Furthermore, the measurement was carried out the directions of camp fracture, about outcrops of the Gramame Formation. Finally, geologic informations were obtained from the geological mapping of the states of Paraíba and Pernambuco, to extraction geographic limits of the Gramame Formation. From the morfometrics data it was realized that these landforms have large extension, irregular perimeters, and great ellipsity, following preferential guidelines, in line with regional discontinuities. The geological datas and the field observations demonstrate that the same are being influenced by dissolution in the underlying limestones, however the same process is not

excluded in the sandy-clay sediments of Barriers Formation. These aspects open ways for future studies dealing with chemical composition and susceptibility to the dissolution of rocks on which these forms developing. In addition it enables a better understanding of region's hydrogeological dynamics and its relation with the karst system, and the clarification of conceptual and systematic aspects of Karst in the Paraíba Basin.

Keywords: Genesis, Evolution, Closed Depressions, Karst, Basin of Paraíba.

RESUMEN

Se han identificado depresiones cerradas en sedimentos arenoso-arcillosos no consolidados de la Formación Barreiras en la Cuenca Sedimentaria de Paraíba. Considerando este fenómeno, el objetivo de este estudio fue analizar las características geomorfológicas y geológicas de estas formas, con el fin de comprender su génesis y evolución. Se utilizaron imágenes SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission), de las cuales se delimitaron las cuencas cerradas y se obtuvo información morfométrica. Las mismas imágenes se utilizaron para la extracción de lineamientos estructurales, con el fin de correlacionarlos con los alineamientos entre las depresiones cerradas y verificar la hipótesis de disolución y carstificación. Además, se realizó la medición de direcciones de fractura en el campo sobre los afloramientos de la Formación Gramame. Finalmente, se obtuvo información geológica del mapeo geológico de los estados de Paraíba y Pernambuco, para extraer los límites geográficos de la Formación Gramame. A partir de los datos morfométricos, se advirtió que estos accidentes geográficos tienen grandes extensiones, perímetros irregulares y gran elipsidad, siguiendo pautas preferenciales, en línea con las discontinuidades regionales. Los datos geológicos y las observaciones de campo muestran que están siendo influenciados por la disolución en las calizas subyacentes, sin embargo, el mismo proceso no puede excluirse en los sedimentos arenosos-arcillosos de la Formación Barreiras. Estos aspectos abren el camino para futuros estudios que aborden la composición química y la susceptibilidad a la disolución de las rocas sobre las que se desarrollan estas formas. Además, proporciona una mejor comprensión de la dinámica hidrogeológica de la región y su relación con el sistema kárstico, y el esclarecimiento de aspectos conceptuales y sistemáticos del Karst en la Cuenca del Paraíba.

Palabras clave: Génesis, Evolución, Depresiones Cerradas, Karst, Cuenca del Paraíba.

INTRODUÇÃO

No município de João Pessoa (PB) e regiões circunvizinhas, ocorrem formas de relevo que chamam a atenção por serem muito frequentes e por apresentarem características típicas de depressões originadas por processos cársticos. A maioria dessas feições se desenvolvem sobre os sedimentos areno-argilosos mal consolidados da Formação Barreiras, que, em grande parte da Bacia da Paraíba, repousa de forma discordante sobre os calcários e margas da Formação Gramame (Maastrichtiano).

Em virtude desse contexto geológico, alguns pesquisadores chegaram a atribuir uma gênese cárstica ou pseudocárstica a essas depressões (LUMMERTZ, 1997; OLIVEIRA, 2001; MELO *et al.*, 2001; FURRIER, 2007; FURRIER; VITAL, 2011; MARINHO, 2011; ARAÚJO, 2012). Porém, em nenhum desses estudos foi realizada uma análise pormenorizada acerca de sua gênese.

Acerca da origem dessas formas de relevo sobre coberturas siliciclásticas, na literatura nacional e internacional, admite-se, comumente, dois tipos de processos: o primeiro, relacionado à ocorrência de intemperismo químico, onde a dissolução é sucedida por erosão mecânica subsuperficial e colapso de níveis endurecidos (TWIDALE, 1987; FILIZOLA; BOULET, 1996; FILIZOLA *et al.*, 2001; HARDT, 2011; SAURO, 2014); e o segundo, ligado à ocorrência de processos de dissolução em calcários soterrados, configurando um carste subjacente (TWIDALE, 1987; KLIMCHOUK; FORD, 2000).

As feições cársticas encobertas podem ser definidas como um carste do tipo intraestratal, subdividido em profundo, subjacente, entrincheirado e desnudado. Nesse sentido, o carste é visto a partir de uma abordagem evolutiva, onde os seus subtipos representam fases que vão desde o soterramento em ambiente profundo até a sua completa exposição (CARLSON, 1992; KLIMCHOUK; FORD, 2000).

A esse respeito, algumas ocorrências importantes podem ser destacadas, tais como as descritas por Twidale (1987), Sponholz (1994), Soriano e Simón (1995) e Sallun Filho e Karmann (2007). Em alguns casos, o conjunto de formas é classificado como carste, em virtude do processo de dissolução nos próprios arenitos (WRAY, 1997; HARDT *et al.*, 2009; HARDT, 2011), em outros, são descritas como pseudocarste (MAURITY; KOTSCHOUBEY, 2001).

A definição de cavernas e depressões sobre arenitos, como sendo de origem cárstica ou pseudocárstica ainda é uma questão bastante controversa na literatura nacional e internacional (HARDT, 2011; EBERHARD; SHARPLES, 2013; SAURO *et al.*, 2013; AUBRECHT *et al.*, 2013). No entanto, atualmente, admite-se que, independente da litologia, se houver processos de dissolução e formação de um sistema cárstico, caracterizado por suas feições principais, tais como espeleotemas (que remete a certo nível de dissolução) e interligações entre feições exógenas e endógenas em pleno estágio de funcionamento e evolução, configura-se um carste. Nesse ínterim, o termo pseudocarste tornou-se relegado a feições que remetem a uma paisagem cárstica, mas que não foram elaboradas por processos de dissolução.

Assim, a existência de um relevo dominado por depressões indica que processos cársticos estão ocorrendo em ambiente profundo ou subsuperficial através de rochas suscetíveis à dissolução (GUERRERO; GUTIÉRREZ; GALVE, 2013). Nesse sentido, é indispensável a realização de estudos que visem esclarecer as características geomorfológicas dessas feições, a amplitude do fenômeno e suas relações com a geologia regional, gerando suporte para o esclarecimento de questões voltadas ao entendimento dos processos que as originaram, de como estão evoluindo atualmente e suas consequências para a sociedade.

No contexto da área estudada, a origem das mesmas ainda constitui algo a ser pesquisado, uma vez que os fenômenos responsáveis por sua origem, até o momento, foram pouco esclarecidos. Dentre as diversas questões que envolvem esse tema, está a dos riscos geomorfológicos, visto que a cidade de João Pessoa, principal cidade localizada na bacia estudada, se encontra em fase de expansão e ainda não se tem nenhum posicionamento acerca de como essas formas de relevo influenciam e são influenciadas pela população. Porém, a temática dos riscos de desastres foge do escopo deste trabalho, que tem como principal objetivo, realizar uma análise geológica e geomorfológica de depressões fechadas no município de João Pessoa (PB) e regiões circunvizinhas, visando elucidar os mecanismos responsáveis por sua gênese e evolução.

MATERIAIS E MÉTODO

Para a detecção das depressões fechadas, foram combinadas informações presentes em cartas topográficas da Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE) na escala de 1:25.000, cartas topográficas cedidas pela Prefeitura Municipal de João Pessoa, na escala 1:10.000, imagens dos satélites Landsat e Rapideye, obtidas a partir do portal do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e do Ministério do Meio Ambiente (MMA), além de dados do Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), obtidas no Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil (TOPODATA).

As informações presentes nas cartas topográficas e na imagem do SRTM, foram utilizadas como base para a extração da rede de drenagem, curvas de nível do terreno, feições indicativas de lineamentos e estruturas antrópicas, tais como rodovias e acessos para realização de trabalhos de campo.

As depressões fechadas foram detectadas a partir de um processo de extração automática das drenagens e das curvas de nível do terreno, onde foram identificados pontos onde a drenagem forma um padrão radial centrípeto. Em torno desses pontos, com base nas curvas de nível, foram traçados os divisores topográficos das referidas bacias fechadas.

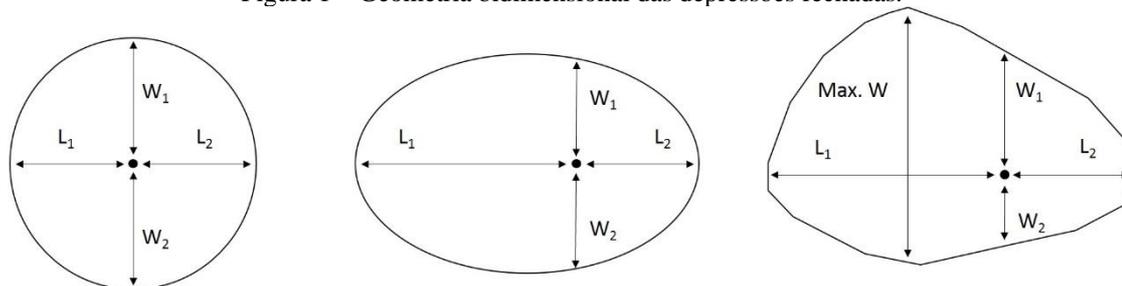
As imagens do Landsat e do Rapideye foram utilizadas como auxílio para identificação de pontos com presença de água, correspondentes ao centro de algumas depressões, no intuito de confirmar sua ocorrência.

Em relação às características morfométricas, foram obtidos dados de área, perímetro, eixo, elipsidade, simetria interna, e profundidade/diâmetro. Os eixos maiores e menores das

depressões fechadas foram obtidos com base na medição da distância entre os seus divisores, utilizando como auxílio, sua sobreposição a figuras geométricas circulares e elipsoidais.

Os dados relativos à elipsidade foram extraídos a partir da razão entre o eixo maior e menor da depressão, onde, valores próximos a 0 indicam circularidade e valores acima de 1 indicam elipsidade. Esse parâmetro é importante, uma vez que depressões com elevado grau de elipsidade estão orientadas na direção do fluxo das águas subsuperficiais. A simetria interna, que correspondente à regularidade dos divisores da depressão, foi obtida a partir da relação entre comprimento e largura entre as partes do eixo longitudinal de cada lado do sumidouro (produto de simetria), conforme equação $P_s = R_l \times R_w$, onde, P_s = produto de simetria, $R_l = L_1/L_2$ e $R_w = W_1/W_2$, conforme proposto por Williams (1972) (Figura 1).

Figura 1 – Geometria bidimensional das depressões fechadas.



Fonte: Adaptado de Williams (1972).

Os valores de profundidade/diâmetro (P/D) foram calculados a partir do produto entre a amplitude da depressão e seu eixo médio. A P/D é um índice importante para o estudo da gênese de depressões cársticas, pois caracteriza quantitativamente sua forma em perfil, classificando tipos de perfis íngreme (acima de 1) e suave (abaixo de 1), sendo, em geral, o íngreme, característico de processos de colapso, e o suave de dissolução lenta. Os valores de área e o perímetro de cada depressão foram auferidos a partir da medição automática do limite interpretado, utilizando um Sistema de Informações Geográficas (SIG).

Tendo em vista que as dolinas possuem extensões pequenas, e que, a base utilizada nesse estudo não teve resolução suficiente para extração de valores morfométricos das mesmas, foi possível extrair os dados morfométricos somente das depressões de grande extensão.

Em um segundo momento da pesquisa, foi construído um mapa morfoestrutural a partir da identificação dos lineamentos regionais, sobre o qual, também, foram traçados os alinhamentos entre as depressões fechadas. Por fim, foram realizadas medições de direções de fraturas, com uso de bússola geológica, em afloramentos de calcários da Formação Gramame, onde foram coletadas cerca de 100 amostras em cada ponto levantado. A intenção foi correlacionar essas diferentes informações, para esclarecer a influência do quadro estrutural regional na circulação das águas e, conseqüentemente, na gênese das formas de relevo estudadas. Junto a esses dados, também foram gerados mapas de hipsometria e de declividade, a fim de compreender as características geomorfológicas da região e sua relação com a evolução das depressões.

Com os lineamentos estruturais, os alinhamentos entre as depressões e as fraturas mapeadas no campo, foram gerados diagramas de roseta, para visualizar as direções predominantes das referidas estruturas. As informações obtidas nos mapas geológicos (1:500.000), dos estados da Paraíba e de Pernambuco foram utilizadas para compreender o contexto geológico sobre o qual as depressões estão inseridas. Vale ressaltar que, para a área estudada, essa foi a informação cartográfica de maior detalhe disponível no momento. Para a

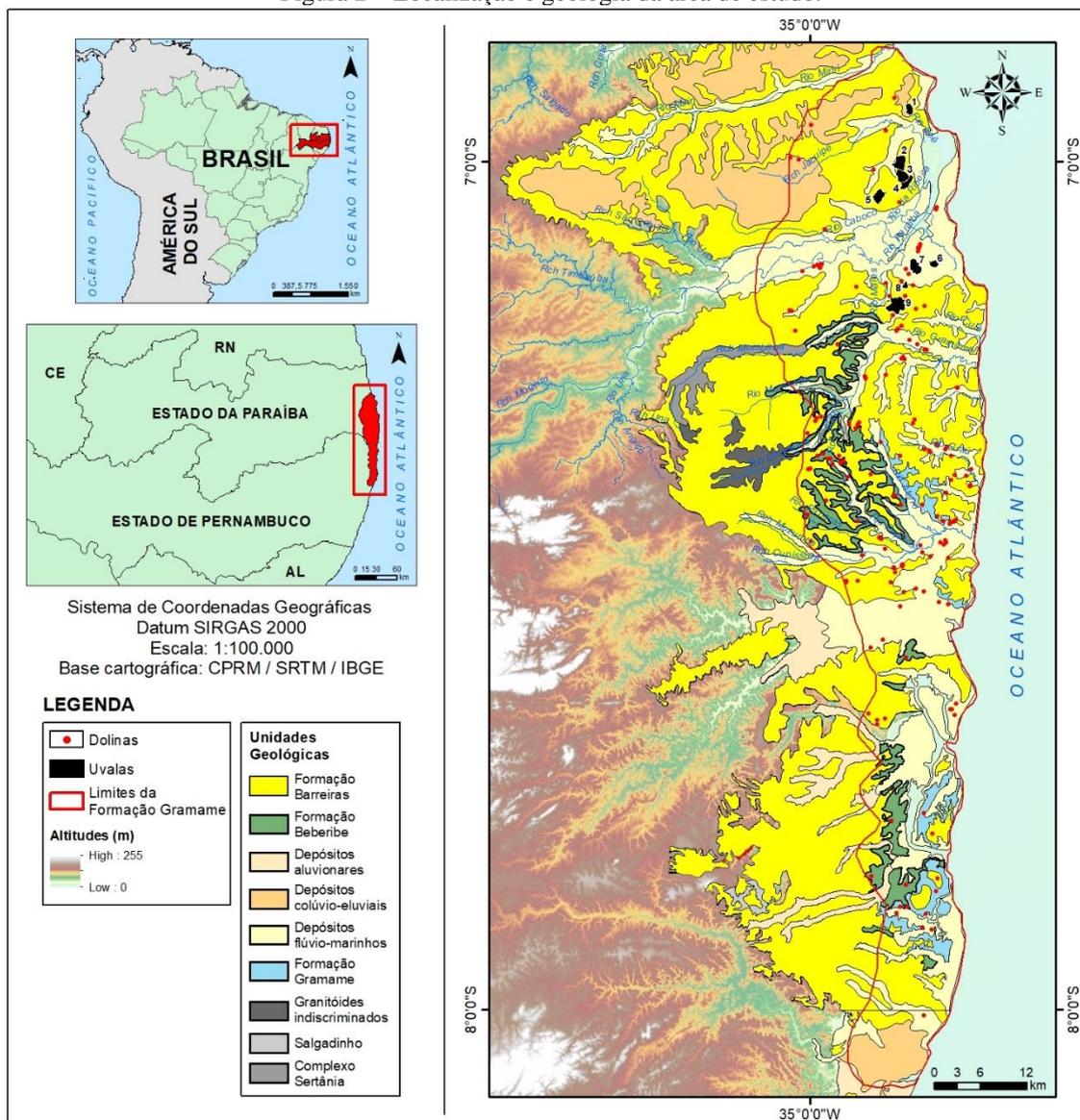
delimitação dos domínios da Formação Gramame e, portanto, circunscrição da área de estudo, foram utilizadas as linhas isópacas da referida formação, existentes em Barbosa (2007).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Distribuição geográfica, geologia e morfometria

A área de estudo encontra-se localizada na faixa costeira dos estados da Paraíba e de Pernambuco, na região Nordeste do Brasil, obedecendo os domínios da Formação Gramame (Figura 2).

Figura 2 – Localização e geologia da área de estudo.



Fonte: Adaptado de CPRM (2006).

A geologia da área se encontra inserida no contexto das formações litoestratigráficas que compõem a Bacia Sedimentar da Paraíba. A referida bacia apresenta uma sucessão sedimentar principiada por arenitos de origem continental, fluviais e flúvio-lacustres, depositados sobre o embasamento cristalino, correspondentes à Formação Beberibe, cuja

origem remonta do Coniaciano–Santoniano. Sobre esta formação, ocorrem arenitos calcíferos cuja gênese encontra-se associada ao início de um evento transgressivo que recobriu os depósitos continentais basais, a qual recebe o nome de Formação Itamaracá, de idade Neo-Campaniano-Eo-Maastrichtiano. Acima dos estratos da Formação Itamaracá ocorre calcários compactos sem influência de siliciclastos, cognominada Formação Gramame. Estes calcários foram depositados no máximo transgressivo, durante o Maastrichtiano. Acima destes, ocorrem calcários com uma gradativa influência de siliciclastos, devido à ocorrência de um evento regressivo que se processou no final do Maastrichtiano, denominada Formação Maria Farinha, que remonta do Paleoceno-Eoceno (BARBOSA, 2007; BARBOSA *et al.*, 2007).

Recobrimo os depósitos do Grupo Paraíba, ocorrem os sedimentos areno-argilosos da Formação Barreiras, a qual se apresenta como uma sequência notável e contínua de sedimentos pouco ou não consolidados, variando entre argilas e conglomerados, com uma estratificação irregular e muito indistinta (MABESOONE; SILVA; BEURLEN, 1972; MABESOONE; ROLIM, 1982, ARAI, 2006).

No norte da Bacia da Paraíba, mais especificamente na região do município de João Pessoa, entre as sub-bacias Alhandra e Miriri, as camadas da Formação Maria Farinha e do topo do Maastrichtiano, correspondentes ao Gramame Superior, desapareceram gradativamente, de modo que a Formação Barreiras repousa de forma discordante sobre os calcários da Formação Gramame (BARBOSA *et al.*, 2003).

Nesse contexto litoestratigráfico, ocorrem depressões fechadas, circulares ou elípticas que podem estar associadas à subsidência topográfica gerada por fenômenos cársticos de subsuperfície (carste subjacente), o que constitui um provável sistema cárstico.

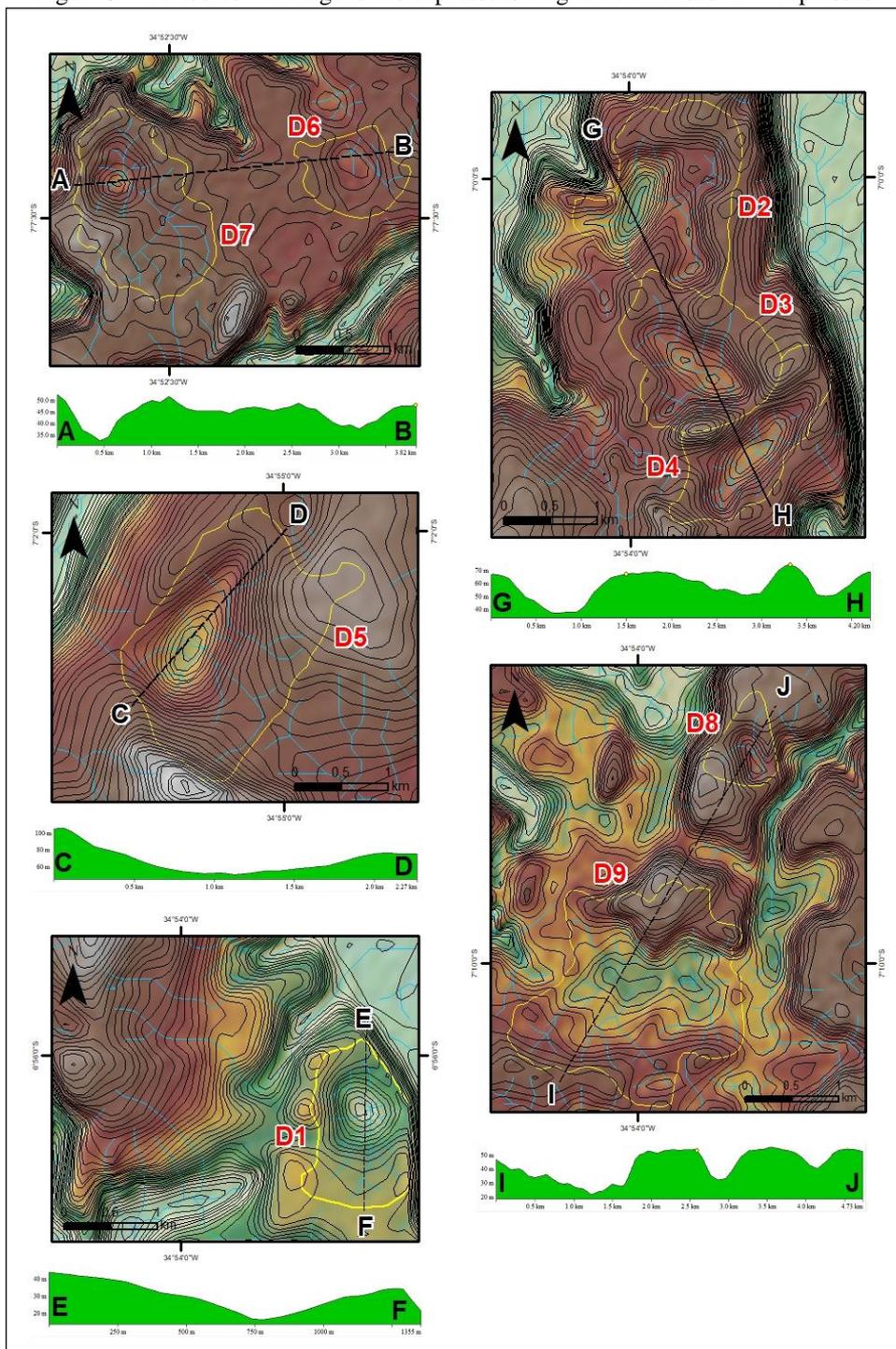
Através dos dados obtidos na presente pesquisa, foi possível detectar 243 depressões fechadas. Pela base cartográfica utilizada, conforme escala adotada neste estudo, foi possível delimitar os divisores de uma pequena parte das depressões, uma vez que a maioria não apresentou extensão suficiente para visualização de seus interflúvios. Por esse motivo, as depressões de maior extensão foram separadas das depressões de menor extensão. As depressões maiores apresentam grandes extensões (acima de 1km²); divisores sinuosos; drenagem centrípeta, claramente perceptível a partir das imagens orbitais; e ocorrência de subdepressões. Por outro lado, as depressões de menor porte formam lagoas de pequena extensão, com algumas centenas de metros, além de divisores e drenagens invisíveis na base cartográfica adotada nesse estudo (Figura 3).

A partir da análise dessas características, é pertinente afirmar que as grandes depressões fechadas apresentam atributos que remetem a uvalas, tendo em vista não somente seu tamanho, mas uma série de especificidades bem definidas por Čalić (2011), sobretudo em relação às funções hidrológicas e ao condicionamento estrutural. Embora a ampliação da apresentada pelo referido autor tenha sido desenvolvida a partir de observações em um contexto marcado por uma plataforma carbonática exposta, existem outros estudos que tratam da existência de feições dessa natureza sobre rochas siliciclásticas ou rochas carbonáticas inumadas (BUSCHE; SPONHOLZ, 1992; HARDT, 2011). Desse modo, o fato de as reconhecer como tal, não constitui uma simples distinção de nomenclaturas, mas traz em si um significado que vai além disso ou da própria litologia sobre a qual se desenvolvem, mas faz referência aos processos responsáveis por sua evolução.

Através do mapa da distribuição das depressões fechadas, é notório a distinção no tocante ao número de feições existentes na porção norte e na porção sul da área estudada. Observa-se, portanto, que as uvalas estão restritas à zona norte da área de estudo, mais especificamente na altura das cidades de João Pessoa, Santa Rita e Lucena, enquanto as depressões de menor porte se distribuem sobre toda área.

Essa diferenciação remete a uma ideia de distintos quadros evolutivos, marcado por díspares níveis de dissecação entre as zonas norte e sul da Bacia da Paraíba, tendo como referência geográfica a planície do rio Gramame/Mumbaba, onde a porção setentrional possui um menor índice de dissecação (FURRIER; ARAÚJO; MENESES, 2006). Tomando como base essa afirmativa, entende-se que as depressões ali localizadas tendam a expandir horizontalmente, em oposição àquelas da região sul.

Figura 3 – Divisores e drenagens das depressões de grande extensão. D = depressão.

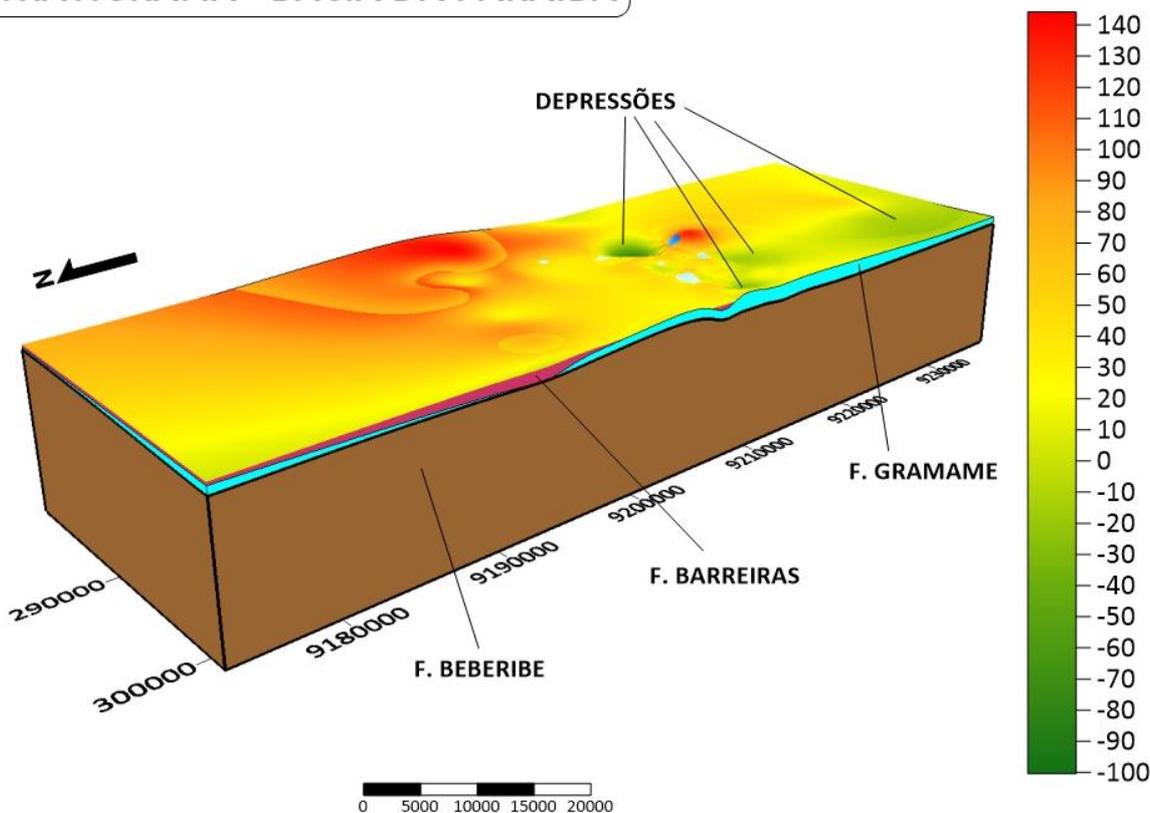


Fonte: os autores.

Outro aspecto importante observado, é que a sinuosidade dos divisores das uvalas as confere uma forma muito semelhante a bacias de origem fluvial, remontando a características de bacias poligonais. Além disso, em alguns casos, chega-se a observar capturas de drenagem em anfiteatros que possuem formas muito semelhantes às depressões fechadas, a exemplo da forma observada a nordeste da depressão 6, a qual, provavelmente, está passando por este processo atualmente. Isso sugere que muitas das cabeceiras de drenagem em anfiteatro da região foram depressões fechadas no passado (paleodepressões?) (Figura 4).

Figura 4 – Bloco diagrama da porção noroeste do município de João Pessoa (PB). Observa-se na direção SW-NE e uvalas passando por processos de captura de drenagem.

ESTRATIGRAFIA - BACIA DA PARAÍBA



Fonte: Vital, S.R.O.; Santos, C.L.

A partir da obtenção dos índices morfométricos, foi possível constatar que a maioria das depressões de grande porte apresentam extensões acima de um quilômetro quadrado, além de possuírem formas bastante assimétricas, elipsoidais, eixos maiores seguindo direções preferenciais, muito semelhantes àquelas dos lineamentos regionais, com amplitudes não que ultrapassam, em média, 35 metros. A extração de valores relativos à área, variam de 2 a 5 km². Ao relacionar a amplitude e extensão (eixo maior) através do índice profundidade/diâmetro (P/D), percebeu-se que as mesmas apresentam ondulação muito suave, remontando a uma gênese provavelmente ligada à subsidência lenta do terreno. A profundidade/diâmetro apresenta-se, em média, com valores abaixo de 0,05.

Em relação à simetria, a maioria das feições apresentam valores acima de 1, caracterizando formas bastante assimétricas. As zonas de drenagens centrípetas representam a zona de maior permeabilidade, onde constata-se a elevação do gradiente hidráulico e a instalação de linhas de fluxo autogênico. A morfologia predominante, com uma relação entre

profundidade e diâmetro (P/D) muito baixa, caracteriza um relevo dominado por vertentes de inclinação bastante suave e fundo plano. A declividade predominantemente plana e suave ondulada reflete o mergulho estrutural da área, que é de camadas plano-paralelas com suave inclinação para leste (homoclinal), influenciando também no alinhamento do fluxo geral (Tabela 1).

Tabela 1 - Índices morfométricos das grandes depressões.

Depressão	Nº de subdepressões	Amplitude média (m)	Elipsidade	Simetria interna	P/D *	Área (km ²)	Perímetro (km)
D1	1	33	1,84	1,08	0,02	1,17	4,2
D2	3	35	1,07	1,2	0,04	1,8	4,0
D3	2	37	1,08	1,02	0,03	1,6	5,3
D4	1	41	2,76	1,06	0,02	1,7	5,9
D5	1	69	1,45	2,04	0,04	2,0	6,0
D6	1	28	1,69	1,02	0,01	2,1	5,0
D7	2	33	1,20	1,20	0,01	0,8	3,7
D8	1	25	1,60	3,17	0,03	0,5	1,0
D9	3	30	1,20	2,17	0,04	3,8	8,9

* Relação Profundidade/Diâmetro.

Análise morfoestrutural

A declividade geral do terreno apresenta um predomínio de 0 a 16%, com a ocorrência de poucas zonas acima desse intervalo, que correspondem às vertentes dos vales fluviais (Figura 5A). O referido mapa reforça a discussão anteriormente realizada, no sentido de que a porção norte da área de estudo possui um predomínio de áreas planas, diferentemente da porção sul, onde o nível de dissecação é maior e, portanto, ocorre uma maior quantidade de vertentes com declividades acima de 45%. Assim, propõe-se que esse quadro tem forte relação com a morfogênese das depressões fechadas.

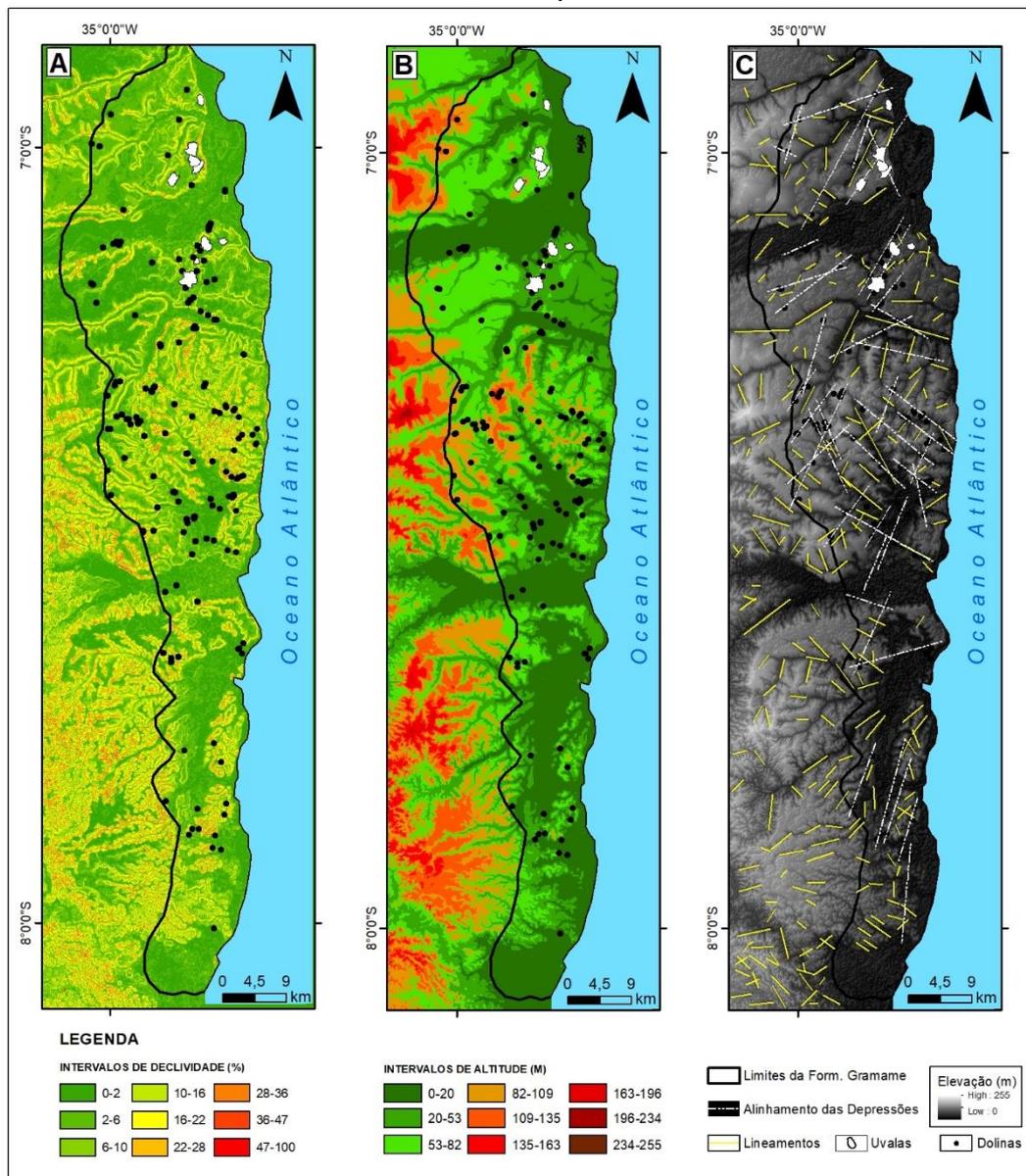
Em relação à altimetria da área (Figura 5B), tem-se um predomínio de elevações de 0 a 90 metros (dentro da área de estudo), com ocorrência de porções acima de 200 metros no Piemonte da Borborema, que está mapeada, mas se encontra fora dos domínios da Formação Gramame.

Através do mapa morfoestrutural (Figura 5C), percebe-se o escalonamento do relevo de oeste para leste, onde se registra uma paulatina queda das cotas altimétricas, o que demonstra uma amplitude topográfica razoável para a ocorrência de processos de circulação das águas subsuperficiais e, conseqüentemente, de dissolução.

Dentre as áreas assinaladas no mapa, destaca-se o alto estrutural denominado por Brito Neves *et al.*, (2009) “Tabuleiro das Lagoas”. O nome dado a esse compartimento é bastante sugestivo, uma vez que faz referência à grande quantidade de lagoas existentes nessa região, que podem ter a sua origem ligada ao processo de carstificação.

Outra região bastante representativa do ponto de vista dos processos analisados nesse estudo, também denominada pelo mesmo autor, refere-se ao “Horst Tabuleiro do Santana”, sobre o qual ocorre grande quantidade de depressões fechadas, com formas bastante elípticas, indicando forte controle estrutural.

Figura 5 – Mapa morfoestrutural apresentando as correlações entre as direções dos lineamentos e dos alinhamentos entre as depressões fechadas.



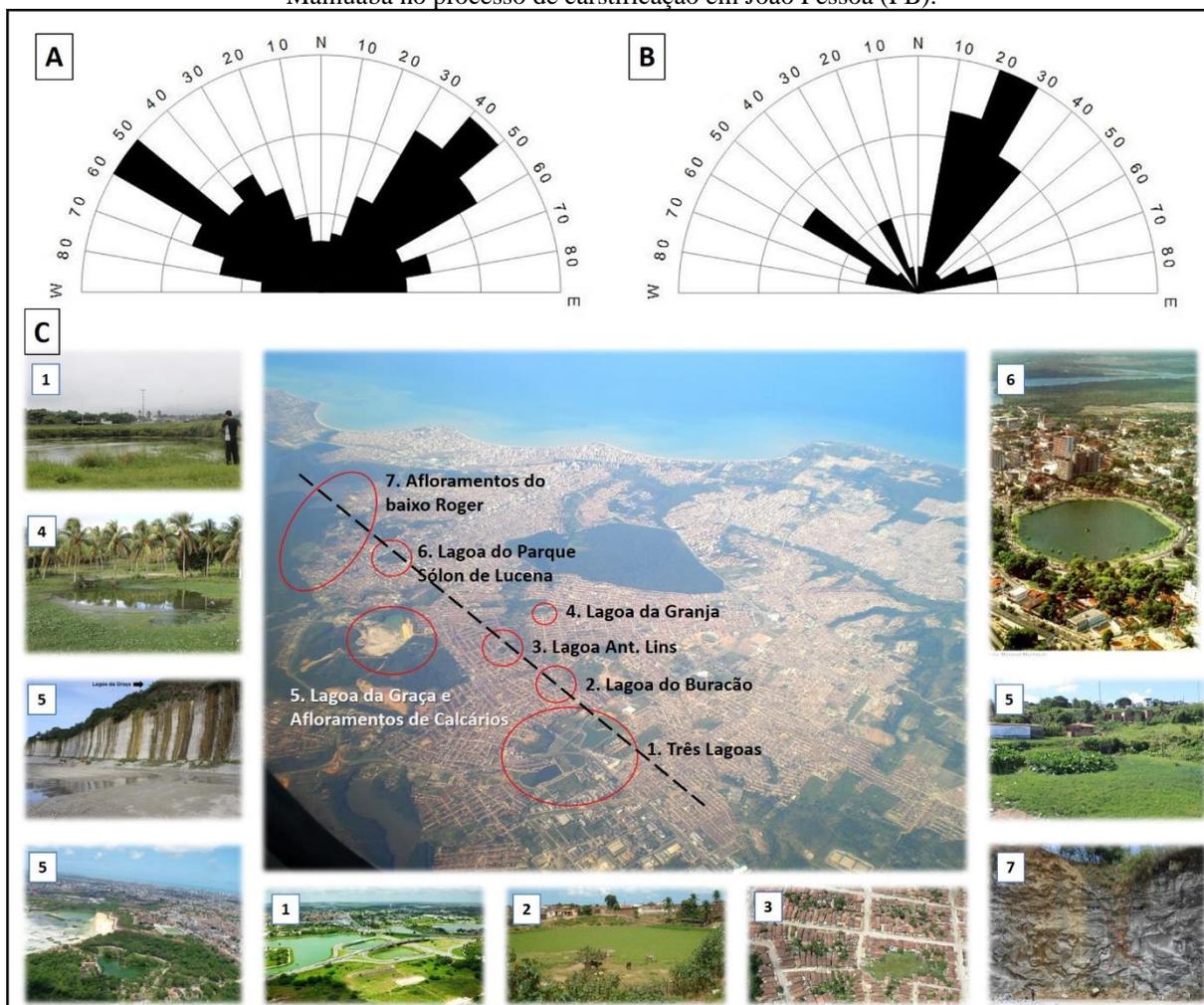
Fonte: os autores.

A direção dos lineamentos estruturais (Figura 6A) e o alinhamento entre as depressões (Figura 6B), além da clara elipsidade das mesmas, demonstra um forte controle estrutural, com direções predominantes SW-NE e NE-NW. Essas direções constituem o principal entrecruzamento entre discontinuidades geológicas na região, que constitui fator primordial para a ocorrência da dissolução e carstificação.

Tratando de um contexto específico, o prolongamento da falha do Rio Mamuaba, por exemplo, tem clara influência na direção geral das depressões fechadas do oeste de João Pessoa, as quais se encontram claramente alinhadas em conformidade com essa estrutura (Figura 6C). É notório que a região do anfiteatro onde está localizada a empresa de exploração de calcários na cidade de João Pessoa, está exatamente sobre essa zona falhada. Destarte, esses aspectos estruturais tornam-se importantes indicadores da ocorrência do processo de dissolução nos

calcários subjacentes da Formação Gramame, pois, junto à questão estrutural, a existência de rochas carbonáticas em clima úmido e a circulação das águas nas discontinuidades, são fatores preponderantes para a formação do carste.

Figura 6 – Alinhamento das depressões na zona oeste de João Pessoa, demonstrando a influência da falha do Rio Mamuaba no processo de carstificação em João Pessoa (PB).



Fonte: os autores. Foto central: Rosa, P. Fotos laterais: Vital, S.R.O.

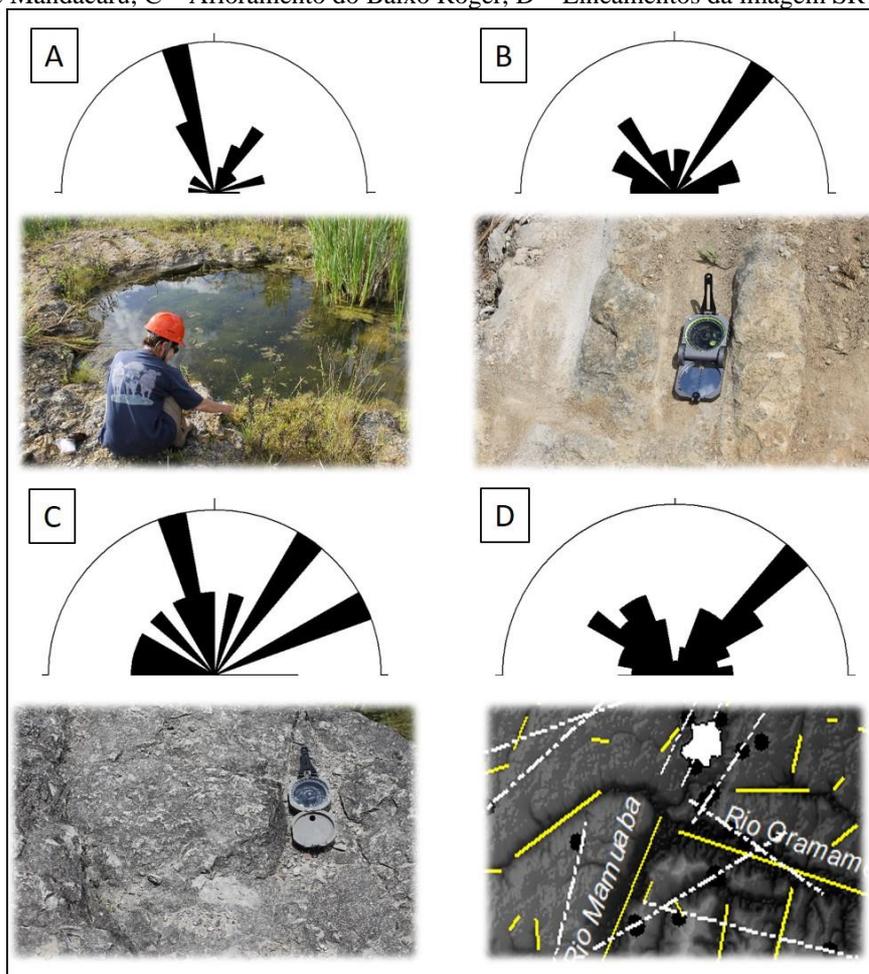
Além disso, é notória a compatibilidade entre a direção da falha do riacho Pau Brasil e as depressões do Tabuleiro Santana, as quais apresentam uma elipsidade claramente orientada na direção da falha mencionada. As fraturas identificadas nos afloramentos tiveram direções idênticas ou próximas àquelas obtidas através dos lineamentos demarcados na imagem SRTM, com destaque para a direção NNE-SSW, que foi identificada em três rosetas. Isso demonstra que todas as direções obtidas no campo estão em harmonia com aquelas obtidas através de imagens de radar (Figura 7).

As estruturas identificadas constituem reflexos de reativações cenozoicas do embasamento cristalino, as quais influenciam os estratos sedimentares sotopostos (BRITO NEVES *et al.*, 2009), não descartando a formação de novas estruturas (ANDRADES-FILHO; ROSSETTI, 2012), que são rotas preferenciais de circulação das águas. A harmonia entre as direções das estruturas e as depressões demonstra que a hipótese ligada à ocorrência da dissolução ao longo dessas discontinuidades é bastante coerente. Assim, a elipsidade das depressões torna-se um fator claro da influência estrutural na gênese e evolução das mesmas,

uma vez que seus eixos estão orientados de acordo com as principais direções aqui identificadas.

Ainda é relevante afirmar que a zona oeste do município de João Pessoa constitui uma das regiões com maiores sinais de atuação das estruturas que originam as depressões e os anfiteatros, com destaque para o anfiteatro do distrito mecânico e da empresa de exploração de calcários Intercement. Nesses anfiteatros ocorrem diversos afloramentos de calcários, com ressurgências e lagos, onde se observa uma forte declividade, muito provavelmente por contribuição do processo de dissolução na evolução das vertentes.

Figura 7 – Direções das estruturas medidas no campo. A – Afloramento da INTERCEMENT, B – Afloramento de Mandacaru, C – Afloramento do Baixo Roger, D – Lineamentos da imagem SRTM.



Fonte: os autores.

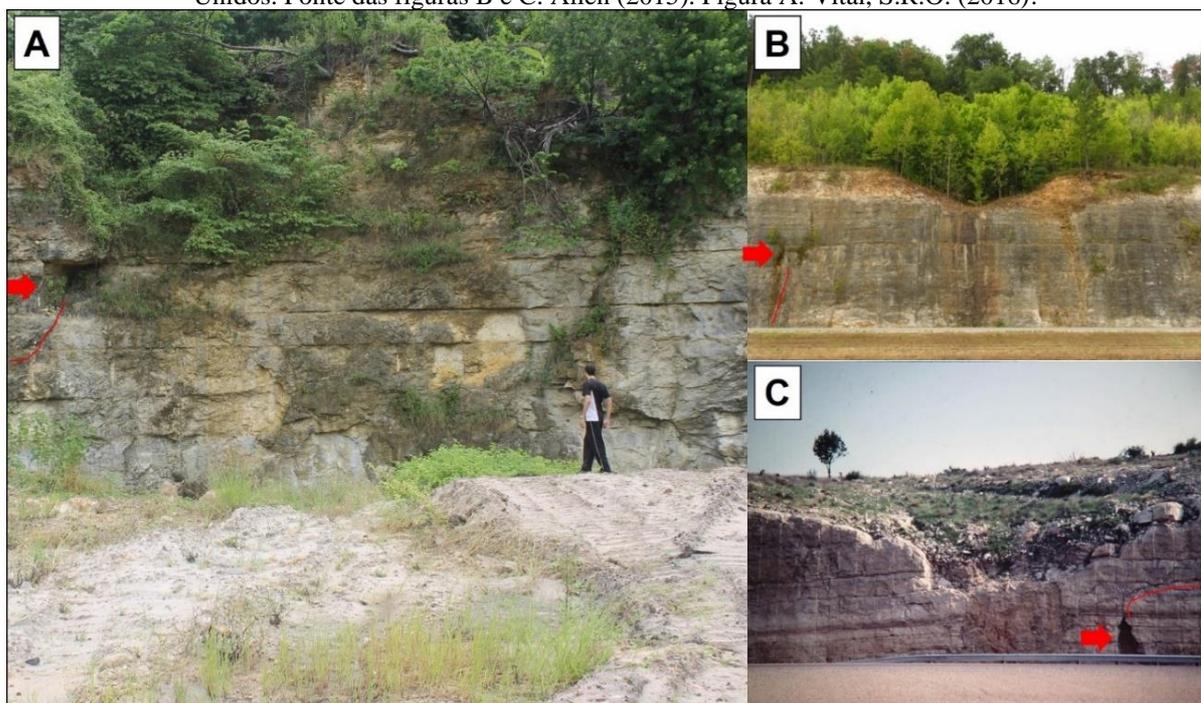
A respeito da identificação de níveis de dissolução associados às discontinuidades da Formação Gramame, pode-se destacar a ocorrência de diversas fraturas carstificadas, assim como microdutos de dissolução (Figura 7A). Também é importante destacar que não constitui dúvida o fato que o considerável intervalo de tempo entre a deposição das formações Gramame e Barreiras foi suficiente para produzir um sistema cárstico (ANDRADE, 1955), tendo em vista que o longo tempo de exposição desses calcários abriu espaço para a ação dos agentes meteóricos (aproximadamente, 30 milhões de anos), havendo, portanto, a gênese e evolução de feições cársticas. Porém, o estágio atualmente observado, tomando como base o postulado de Klimchouk e Ford (2000), pode ser classificado como correspondente a um carste subjacente,

uma vez que a Formação Gramame, de natureza carbonática, está recoberta por sedimentos terrígenos da Formação Barreiras.

Segundo os referidos autores, para que o carste esteja em funcionamento, são necessários alguns requisitos: condições estruturais para circulação subterrânea e espeleogênese; e regime de fluxo, através de recarga e descarga e química das águas. Portanto, essas características são perfeitamente observáveis na área através das relações estruturais aqui apresentadas e das feições observadas em campo.

Porém, para os mesmos, o desenvolvimento do carste exposto pode ser interrompido pelo enterro subsequente, tendo como resultado um paleocarste, que pode ser rejuvenescido pela exumação. Isso posto, abre-se várias precedentes para futuras investigações que visem elucidar essas questões, tornando a compreensão desse fenômeno mais clara. Das feições observadas em campo, conforme anteriormente mencionado, tem-se, por exemplo, a ocorrência de microdutos e dolinas em afloramentos da Formação Gramame, que atestam a ocorrência de processo de dissolução, além de muitas outras feições de especaste (Figura 8). Portanto, isso sinaliza para uma circulação subsuperficial, na interface entre as formações Gramame e Barreiras (em médio, 40 metros de profundidade), dando origem, principalmente, a depressões fechadas.

Figura 8 – Formação de depressões em afloramentos calcários, com preenchimento argiloso. As demarcações na foto indicam a ocorrência de condutos formados por dissolução. (A) afloramento da Formação Gramame em Caxitú, município do Conde (PB); (B) situação análoga encontrada em afloramentos de calcários no estado Arcansas, sudeste dos Estados Unidos; (C) ocorrência de situação semelhante no oeste do Texas, Estados Unidos. Fonte das figuras B e C: Allen (2015). Figura A: Vital, S.R.O. (2016).



Fonte: os autores.

Assim, entende-se que, a ocorrência de discontinuidades na Formação Gramame tem permitido a circulação das águas, que ocasiona a dissolução e o alargamento das fraturas, dando origem a depressões que refletem na cobertura superficial areno-argilosa pela subsidência lenta do terreno. Certamente, a visão tida nesses afloramentos reproduz claramente os processos que tem ocorrido em regiões onde o calcário se encontra soterrado. Além disso, não se pode deixar de pontuar a influência do clima atual na formação do carste aqui apresentado, onde os

montantes pluviométricos atingem cerca de 2.000 mm anuais e as temperaturas típicas do ambiente tropical contribuem para esse processo. Esses fatores, além da presença de grande volume de cobertura vegetal, contribuem para a intensificação do intemperismo químico, através da decomposição da matéria orgânica e da produção de ácidos orgânicos, tornando as águas bastante ácidas. Além disso, o relevo tabuliforme, favorece bastante à infiltração, e ao transporte de elementos pouco solúveis, tais como o magnésio e o ferro, para horizontes subsuperficiais, criando níveis endurecidos (fragipã e duripã). Assim, é provável que as depressões se encontrem presentes entre os pontos de interrupção desses níveis, de modo que, ocasionalmente, a penetração das águas nesses pontos promove a dissolução dos minerais suscetíveis seguida da remoção mecânica dos sedimentos (*piping*), dando origem a vazios subterrâneos, que resultam na subsidência do terreno.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir das análises realizadas nesse estudo, pode-se destacar os seguintes aspectos:

1. A distribuição geográfica e as características morfométricas das depressões fechadas, com destaque para a elipsidade, demonstram sua clara relação genética com as descontinuidades estruturais existentes na área de estudo.
2. As depressões estudadas apresentam características próprias de bacias poligonais, mas também podem ser consideradas como uvalas, uma vez que suas características estão em harmonia com aquelas discutidas na literatura nacional e internacional.
3. As características morfológicas e morfométricas das depressões estudadas, apontam para uma gênese cárstica, porém, bastante relacionada ao sistema fluvial, sendo razoável considerar e investigar, com maior nível de profundidade, a possibilidade de um fluvio-carste.
4. A investigação realizada, embora restrita aos domínios da Formação Gramame, apontam para possibilidade de ocorrência da dissolução, também, nos sedimentos areno-argilosos da Formação Barreiras. Isso abre precedente para a necessidade de estudos futuros que tratem da análise geoquímica desses sedimentos, a fim de investigar a suscetibilidade de determinados elementos suscetíveis à dissolução.
5. Estudos urbanos, tratando da relação desse carste com a sociedade, no tocante à iminência de desastres, são muito importantes.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, G. O. **Itamaracá**: contribuição para o estudo geomorfológico da costa pernambucana. UFPE: Recife, 1955.

ANDRADES-FILHO, C. O.; ROSSETTI, D. F. Caracterização morfoestrutural da parte central emersa da Bacia Paraíba (PB). São Paulo, UNESP, **Geociências**, v.31, n.1, p.13-29, 2012.

ARAI, M. A Grande Elevação Eustática do Mioceno e Sua Influência na Origem do Grupo Barreiras. **Revista do Instituto de Geociências – USP**, v. 6, n. 2, p. 1-6, 2006.

ARAÚJO, M. E. **Água e rocha na definição do sítio de Nossa Senhora das Neves, atual cidade João Pessoa – Paraíba**. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Arquitetura Urbanismo. Universidade Federal da Bahia., v. 42, n. 3, p. 137-160, 2012.

AUBRECHT, R.; LÁNCZOS, T.; GREGOR, M.; SCHLÖGL, J.; ŠMÍDA, B.; LIŠČÁK, P.; Brewer-Carías, Ch.; Vlček. Reply to the Comment on “Sandstone caves on Venezuelan tepuis: Return to pseudokarst?” **Geomorphology** 197, 197 – 203, 2013.

BARBOSA, J. A. **A deposição carbonática na faixa costeira Recife-Natal:** aspectos estratigráficos, geoquímicos e paleontológicos. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Geociências. Universidade Federal de Pernambuco. 2007, 270p.

BARBOSA, J. A., SOUZA, E. M., LIMA-FILHO, M. F., NEUMANN, V. H. A estratigrafia da Bacia Paraíba: uma reconsideração. **Revista Estudos Geológicos**, v.13, p.89-108, 2003.

BARBOSA, J. A., NEUMANN, V. H., LIMA-FILHO, M., SOUZA, E. M., MORAES, M. A. Estratigrafia da faixa costeira Recife-Natal (Bacia da Paraíba e Plataforma de Natal), NE Brasil. **Revista Estudos Geológicos**, v.17, n.2, p.03-30, 2007.

BRITO NEVES, B. B.; ALBUQUERQUE, J. P. T.; COUTINHO, J. M. V., BEZERRA, F. H. R. Novos dados geológicos e geofísicos para a caracterização geométrica e estratigráfica da Sub-bacia de Alhandra (Sudeste da Paraíba). **Revista do Instituto de Geociências**. Geol. USP, Sér. Cient., São Paulo, v.9, n.2, p.63-87, 2009.

BUSCHE, D.; SPONHOLZ, B. Morphological and micromorphological aspects of the sandstone karst of eastern Niger. **Z. Geomorph. N. F. Suppl.-Bd.** 85, p. 1-18, 1992.

ĆALIĆ, J. Karstic uvala revisited: Toward a redefinition of the term. **Geomorphology**, v.134, p.32-42, 2011.

EBERHARD, R.; SHARPLES, C. Appropriate terminology for karst-like phenomena: the problem with pseudokarst. **International Journal of Speleology**. 42 (2), 109 – 113, 2013.

FILIZOLA, H. F.; BOULET, R. Evolution and opening of closed depressions developed in a quartz-kaolinitic sedimentar substratum at Taubaté basin (São Paulo, Brazil), and analogy to the slope evolution. **Geomorphology**, 16, p. 77-86, 1996.

FILIZOLA, H. F.; LAMOTTE, M.; FRITSCH, E.; BOULET, R.; ARAÚJO FILHO, J. C.; SILVA, F. B. R.; LEPRUN, J. C. Os fragipãs e duripãs das depressões dos tabuleiros costeiros do nordeste brasileiro: uma proposta de evolução. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n.4, p.947-963, 2001.

FURRIER, M. **Caracterização geomorfológica e do meio físico da folha João Pessoa – 1:100.000.** Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Geografia Física, Universidade de São Paulo, 2007.

FURRIER, M.; ARAÚJO, M. E.; MENESES, L. F. Geomorfologia e Tectônica da Formação Barreiras no Estado da Paraíba. **Revista do Instituto de Geociências – USP**, v.6, n.2, p.61-70, 2006.

FURRIER, M.; VITAL, S. R. O. A formação de dolinas em áreas urbanas: o caso do bairro de Cruz das Armas em João Pessoa-PB. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 4, n. 1, p. 161-173, 2011.

GUERRERO, J.; GUTIÉRREZ, F.; GALVE, J. P. Large depressions, thickened terraces, and gravitational deformation in the Ebro River valley (Zaragoza área, NE Spain): Evidence of glauberite and halite interstratal karstification. **Geomorphology** 196, p.162-176, 2013.

HARDT, R. **Da carstificação em arenitos**: aproximação com o suporte de geotecnologias. Tese (Doutorado). Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, 2011.

HARDT, R.; RODET, J.; FERREIRA PINTO, S. A.; WILLEMS, L. Exemplos brasileiros de carste em arenito: Chapada dos Guimarães (MT) e Serra de Itaqueri (SP). **Espeleo-Tema**, v. 20, n. 1/2, p. 7-23, 2009.

KLIMCHOUK, A.; FORD, D. Types of karst and evolution of hydrogeological setting. *In*: KLIMCHOUK, A. *et al.* (Ed.). **Speleogenesis: evolution e karst aquifers**. Alabama (USA): National Speleological Society, p.45-53, 2000.

LUMMERTZ, F. B. **Aspectos da hidráulica subterrânea na área da Grande João Pessoa**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, 1977.

MABESOONE, J. M.; ROLIM, J. L. Problemas estratigráficos e sedimentológicos do cenozoico nordestino. **Estudos Pesquisas, UFPE**, v.5, p.7-18, 1982.

MABESOONE, J. M.; SILVA, A. C.; BEURLIN, K. Estratigrafia e origem do Grupo Barreiras em Pernambuco, Paraíba e Rio Grande do Norte. **Revista Brasileira de Geociências**, v.2, p. 173-187, 1972.

MARINHO, E. G. A. **Bases geológicas e geomorfológicas das organizações espaciais no município de João Pessoa (PB)**. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, 2011.

MAURITY, C.; KOTSCHOUBEY, B. Pseudokarst features in the lateritic cover of Serra dos Carajás – Pará State, Brazil. *In*: International Congress of Speleology, 13, Speleological Congress of Latin América and Caribbean, 4, Brazilian Congress Of Speleology, 26, Brasília. **Anais...** Brasília:SBE/UIS, 2001.

MELO, A. S. T.; HECKENDORFF, W. D.; ALVES, E. L.; GUIMARÃES, M. M. M. O meio ambiente natural: componentes abióticos e bióticos. *In*: MELO, A.S.T. *et al.* (Org.). **Projeto de Pesquisa: Vale do Jaguaribe**, João Pessoa: Ed. UNIPÊ, 2001.

OLIVEIRA, F.B. **Degradação do meio físico e implicações ambientais na bacia do rio Jaguaribe – João Pessoa – PB**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, 2001.

SALLUN FILHO, W.; KARMANN, I. Dolinas em arenitos da Bacia do Paraná: evidências de carste subjacente em Jardim (MS) e Ponta Grossa (PR). **Revista Brasileira de Geociências**, v. 37, p. 551-564, 2007.

SAURO, F. Structural and lithological guidance on speleogenesis in quartz-sandstone: evidence of the arenisation process. **Geomorphology**, v.226, p.106-123, 2014.

SAURO, F.; PICCINI, L.; MECCHIA, M.; WAELE, J. Comment on “Sandsatone caves on Venezuelan tepuis: Return to pseudokarst? by R. Aubrecht, T. Lánczos, M. Gregor, J. Schlögl, B. Smída, P. Liscák, Ch. Brewer-Carías, L. Vlcek, *Geomorphology* 132 (2011), 351–365”. **Geomorphology** 197, 190-196, 2013.

SORIANO, M. A.; SIMÓN, J. L. Alluvial dolines in the central Ebro basin, Spain: a spatial and developmental hazard analysis. **Geomorphology**, v. 11, n. 4, p. 295-309, 1995.

SPONHOLZ, B. Silicate karst associated with lateritic formations (examples from eastern Niger). **Catena**, v. 21, n. 2, p. 269-278, 1994.

TWIDALE, C. R. Sinkholes (Dolines) in lateritised sediments, western sturt plateau, northern territory, Austrália. **Geomorphology**, v.1, n.1, p.33-52, 1987.

WILLIAMS, P. W. Morphometric analysis of polygonal karst in New Guinea. **Geological Society of America Bulletin**, v.83, n.3, p.761-96, 1972.

WRAY. R. A. L. A global review of solutional weathering forms on quartz sandstones. **Earth Science Reviews**, v. 42, n. 3, p. 137-16, 1997.