

Caracterização, gênese e evolução de depressões fechadas no município de João Pessoa (PB)

Characterization, genesis and evolution of closed depressions in the municipality of João Pessoa (PB)

Caracterización, génesis y evolución de depresiones cerradas en la ciudad de João Pessoa (PB)

Caio Lima dos Santos
Secretaria de Estado da Educação e Tecnologia do Estado da Paraíba –
SEECT
caiolimageo@gmail.com

Oswaldo Girão da Silva
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE
osgirao@gmail.com

Saulo Roberto de Oliveira Vital
Universidade Federal da Paraíba - UFPB
saulo.vital@academico.ufpb.br

Resumo

O presente manuscrito tem por objetivo caracterizar, bem como compreender, os fatores genéticos e evolutivos de depressões fechadas localizadas no município de João Pessoa, estado da Paraíba, Brasil. Para tanto foram considerados aspectos estruturais, morfológicos e morfométricos que se relacionam a esse relevo. Foram adotados os procedimentos metodológicos propostos por Williams (1972), no que se refere a análise morfométrica das depressões fechadas. Para tanto, foi utilizado MDE elaborado com dados do laser LiDAR, com resolução espacial de 2 metros. Conforme as condições estruturais observadas na área de estudo, identificou-se que as depressões fechadas mapeadas apresentam padrão de forma, estando alinhadas e tendendo a evoluir para formar cabeceira de drenagem em anfiteatros, conectando-se com a drenagem fluvial local.

Palavras-chave: João Pessoa (PB); Depressões fechadas; Cárste subjacente.

Abstract

The present manuscript aims to characterize, as well as understand, the genetic and evolutionary factors of closed depressions located in the municipality of João Pessoa, state of Paraíba, Brazil. For that, structural, morphological and morphometric aspects related to this relief were considered. The methodological procedures proposed by Williams (1972) were adopted for the morphometric analysis of closed depressions. For this purpose, a DEM elaborated with data from the LiDAR laser was used, with a spatial resolution of 2 meters. The data obtained showed that the mapped closed depressions present a pattern of shape, are aligned and tend to evolve to form a drainage head, connecting its drainage with the river drainage, according to the structural conditions observed in the study area.

Keywords: João Pessoa (PB); Closed depressions; Underlying karst.

Resumen

El presente manuscrito tiene como objetivo caracterizar, así como comprender, los factores genéticos y evolutivos de las depresiones cerradas ubicadas en el municipio de João Pessoa, estado de Paraíba, Brasil. Para ello se consideraron aspectos estructurales, morfológicos y morfométricos relacionados con este relieve. Se adoptaron los procedimientos metodológicos propuestos por Williams (1972) para el análisis morfométrico de depresiones cerradas. Para ello se utilizó un DEM elaborado con datos del láser LiDAR, con una resolución espacial de 2 metros. Los datos obtenidos mostraron que las depresiones cerradas mapeadas presentan un patrón de forma, están alineadas y tienden a evolucionar para formar una cabecera de drenaje, conectando su drenaje con el drenaje del río, de acuerdo a las condiciones estructurales observadas en el área de estudio.

Palabras clave: João Pessoa (PB); Depresiones cerradas; Karst subyacente.

Introdução

Depressões fechadas representam formas típicas do relevo cárstico, na sua porção superficial, sendo a dissolução das rochas o principal agente formador deste relevo. Além do processo de dissolução, a atuação de outros fatores é fundamental para a formação de um carste, sendo eles: as condições litológicas (presença da rocha solúvel, com maior ênfase para as rochas carbonáticas), geológicas, estratigráfica, climáticas (pretéritas e hodiernas), o recobrimento do solo e os movimentos tectônicos (BIGARELLA *et al.*, 1994; KLIMCHOUK e FORD, 2000; FORD e WILLIAMS,

2007). Assim, a solubilidade das rochas por si só não é responsável pela gênese das áreas cársticas. Tal aspecto deve ocorrer em associação as estruturas geológicas e as características litológicas, sendo o ciclo hidrológico o “gatilho” para a gênese do processo de carstificação (FORD e WILLIAMS, 2007; FRUMKIN, 2013).

No município de João Pessoa, estado da Paraíba, é observada a ocorrência de feições do relevo cárstico, denominadas depressões fechadas. Estas feições ocorrem em locais que, eventualmente, estão associadas a presença de lagoas.

Esforços investigativos iniciais já foram empreendidos por Vital (2015) e Vital *et al.* (2020) com o intuito de compreender a dinâmica evolutiva destas feições. Porém, a análise dos referidos autores considerou toda a extensão da Bacia Sedimentar

da Paraíba, que por seu turno representa o contexto geológico onde a área de estudo aqui analisada está inserida. Outro aspecto relevante a ser considerado se refere a base de dados utilizada pelos autores citados, relacionada a caracterização do relevo, que foi gerada a partir do MDE (Modelo Digital de Elevação) elaborado com base nos dados do SRTM TOPODATA (Shuttle Radar Topography Mission), com resolução espacial de 30 metros.

Desse modo, a análise específica para o contexto do município de João Pessoa, além da disponibilidade de dados mais acurados para a área (MDE elaborado com base em dados do laser LiDAR, com resolução espacial de 2 metros), motivou a realização desta pesquisa, que tem o intuito aprofundar o entendimento acerca das características, gênese e evolução das depressões fechadas que ocorrem na área de estudo.

É importante ressaltar que todas as depressões identificadas nesse estudo ocorrem sobre os sedimentos da Formação Barreiras, formada por material siliclástico. A ocorrência de depressões fechadas neste contexto pode estar associada a dois fatores: dissolução do material que cimenta os grãos das rochas, seguido de remoção mecânica em subsuperfície e o consequente níveis endurecidos no solo (FILIZOLA *et al.*, 2001; HUGGET, 2016; SAURO *et al.*, 2016); ou a ocorrência de processo de dissolução na rocha carbonática soterrada, configurando um carste subjacente (KLIMCHOUK e FORD, 2000; FORD e WILLIAMS, 2007).

Desse modo, o presente manuscrito tem por objetivo realizar a caracterização morfométrica de depressões fechadas identificadas no município de João Pessoa, bem como compreender sua dinâmica genética e evolutiva.

Procedimento Metodológico

O mapeamento das feições cársticas no município de João Pessoa tomou por base as feições já mapeadas por Vital (2015), que teve como base cartográfica o modelo de elevação digital elaborado a partir de imagens do radar SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) com resolução espacial de 30m. Procedeu-se então uma nova delimitação dos divisores destas áreas, tendo em vista a maior acurácia da base cartográfica utilizada para essa pesquisa em detrimento da base adotada pelo referido autor.

Além da nova delimitação dessas depressões fechadas, foram mapeadas novas feições, baseando-se nos mesmos critérios estabelecidos por esse autor: ocorrência de drenagem radial centrípeta e a distribuição das curvas de nível.

Esse procedimento foi realizado com auxílio do *software* Global Mapper, com base no Modelo Digital de Elevação (MDE), seguindo a seguinte rotina de trabalho: extração automática das drenagens; geração automática de curvas de nível com equidistância de um metro; delimitação manual das bacias fechadas com base nas drenagens e nas curvas de nível.

Também se recorreu à análise de cartas topográficas elaboradas para a área de estudo na década de 1970, fornecidas pela (Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE), produzidas na escala de 1:25.000, objetivando identificar depressões fechadas que possam estar atualmente aterradas e com suas formas total ou parcialmente alteradas, devido ao processo de urbanização. Esse procedimento pautou-se na identificação de lagoas descritas nas referidas cartas topográficas, tendo em vista serem um forte indicativo de ocorrência de depressões fechadas.

A análise morfométrica das feições mapeadas considerou a proposta de Williams (1972), sendo obtidos os valores de área, perímetro, amplitude altimétrica, altitude máxima, altitude mínima, declividade média, tamanho do eixo maior e do eixo menor, elipsidade, simetria interna e relação profundidade/diâmetro. Os referidos valores morfométricos foram obtidos com auxílio do *software* Global Mapper.

A área e o perímetro foram calculados de forma automática, sendo esse o mesmo procedimento utilizado para verificar a declividade média. A amplitude altimétrica considerou a diferença entre o ponto de maior altitude e cota mais baixa no relevo dentro das depressões, ou seja, altitude mínima e altitude máxima. O eixo maior foi determinado considerando a maior distância axial entre os divisores, tendo o ponto de maior profundidade da depressão como referência. Da mesma forma, a determinação do eixo menor considerou a maior distância axial entre os divisores perpendicular ao eixo maior. O valor da variável elipsidade foi calculado considerando a razão entre o eixo maior e o eixo menor. Os valores abaixo de 1 representam formas circulares; valores acima de 1 representam formas mais elípticas. O cálculo da simetria interna considera o produto entre o tamanho (eixo maior) e a largura da depressão (eixo menor), conforme a figura 1.

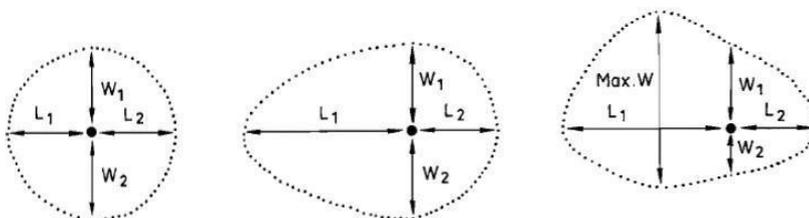


Figura 1: Medidas consideradas no cálculo de simetria interna de depressões cársticas.
Fonte: Williams (1972).

O cálculo da equação é feito com base na seguinte fórmula:

$$P_s = R_l \times R_w$$

Onde,

PS = Produto de simetria $R_l = L_1/L_2$

$R_w = W_1/W_2$

O índice P/D (Profundidade/Diâmetro) estabelece uma relação entre amplitude altimétrica e o diâmetro da depressão. Desse modo, foi calculado o diâmetro de uma figura geométrica circular com valores de área aproximados aos obtido para a feição mapeada. Valores obtidos abaixo de 1 caracterizam depressões suaves, de pouca profundidade, ao passo que valores superiores a um representam feições íngremes.

Após essa etapa, os dados morfométricos obtidos foram submetidos a uma análise de correlação, no intuito de verificar a ocorrência de um padrão de uniformidade entre as áreas mapeadas. Esse procedimento foi realizado no programa *Microsoft Excel* através da geração de gráficos de dispersão. Esse gráfico permite a construção de uma regressão linear, estabelecendo uma relação entre duas variáveis analisadas.

Esse procedimento consistiu na comparação de parâmetros obtidos para todas as feições mapeadas. Foram inseridos de dois em dois parâmetros morfométricos no *software*, que realizou o procedimento de modo automático.

O mapa geológico do município de João Pessoa foi adaptado a escala de trabalho adotada nessa pesquisa, equivalente a 1:100.000, a partir do mapa elaborado pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) no ano de 2002 na escala 1:500.000, desenvolvido para o estado da Paraíba. A realização desse procedimento considerou a compartimentação do relevo a partir do MDE utilizado na pesquisa.

O mapa de lineamentos e alinhamento das depressões fechadas foi elaborado com base no MDE e no alinhamento espacial das feições mapeadas, respectivamente. Esse procedimento consiste na vetorização manual de estruturas lineares (drenagens) identificadas nesse modelo de elevação e na vetorização de linhas retas interligando as depressões, com auxílio do *software* QGIS 3.14. Posteriormente, os dados vetoriais foram exportados para o *software* Spring 5.5.6 onde foram geradas rosetas de direções preferenciais para os lineamentos identificados e o alinhamento das depressões.

A espessura das formações rochosas foi verificada a partir do processo de interpolação de dados referentes a altimetria dessas camadas na Bacia Sedimentar Paraíba. Esses dados foram extraídos de documentos que contém informações referentes a topografia das camadas litológicas descritas em dados de poços tubulares, que foram coletados a partir da plataforma Sistema de Águas Subterrâneas (SIAGAS), do Serviço Geológico do Brasil (CPRM), Companhia de Águas e Esgotos da Paraíba (CAGEPA), Agência Executiva de Águas (AESAs) e empresas privadas (Construções e HIDROTEC).

Esse procedimento consistiu no preenchimento de uma tabela com os dados descritos utilizando o programa *Microsoft Excel*. Posteriormente essa tabela foi importada para o *software* Surfer 12, onde foi realizado o processo de interpolação e geração de um modelo de superfície para cada camada. Em seguida foram verificados os valores topográficos desse modelo, e procedeu-se a reclassificação desses valores e a atribuição de pesos para cada grupo reclassificado no *software* ArcMap 10.4.

A geomorfologia foi analisada com base no mapeamento geomorfológico para o município de João Pessoa proposto por Barbosa (2015). Este mapa foi sobreposto ao mapa das feições selecionadas para esse estudo. Assim, no processo de reclassificação e atribuição de pesos para cada classe geomorfológica considerou-se maior peso para as classes onde ocorrem as depressões fechadas selecionadas para esse estudo.

Resultados e discussão

Foram mapeadas um total de 13 (treze) depressões fechadas (FIGURAS 2 e 3), considerando as feições identificadas por Vital (2015) dentro dos limites do município de João Pessoa.

Depressão	Coordenadas UTM	Endereço
01	290.611,849 / 9.207.492,087	Três lagoas, Bairro Oitizeiro.
02	293.157,140 / 9.211.753,969	Lagoa do Parque Sólon de Lucena, Bairro Centro
03	294.725,749 / 9.212.553,072	Av. Epitácio Pessoa, Bairro dos Estados / Expedicionários
04	289.812,746 / 9.205.893,881	Avenida das Indústrias, Distrito Industrial
05	291.203,777 / 9.209.741,413	Lagoa Antônio Lins, Av. Doutor Antônio Lins, Bairro Cruz das Armas
06	290.641,446 / 9.206.189,845	Rua Henrique Nascimento, Bairro Costa e Silva
07	291.174,181 / 9.208.143,208	Lagoa do Buracão, Av. Ana Nery, Oitizeiro
08	288.658,486 / 9.210.185,360	Rua Francisco José das Neves, Bairro Alto do Matheus
09	289.220,818 / 9.208.172,804	Rua Luiz Barbalho, Bairro Jardim Veneza
10	293.334,718 / 9.212.049,933	Av. Camilo de Holanda, Bairro Centro.
11	290.108,710 / 9.203.822,132	Via Perimetral Sul, Bairro Gramame.
12	292.742,790 / 9.206.663,387	Rua José Lins Sobrinho, Bairro João Paulo II
13	290.345,481 / 9.204.177,289	Via Perimetral Sul, Bairro Gramame.

Figura 2: Localização das depressões mapeadas

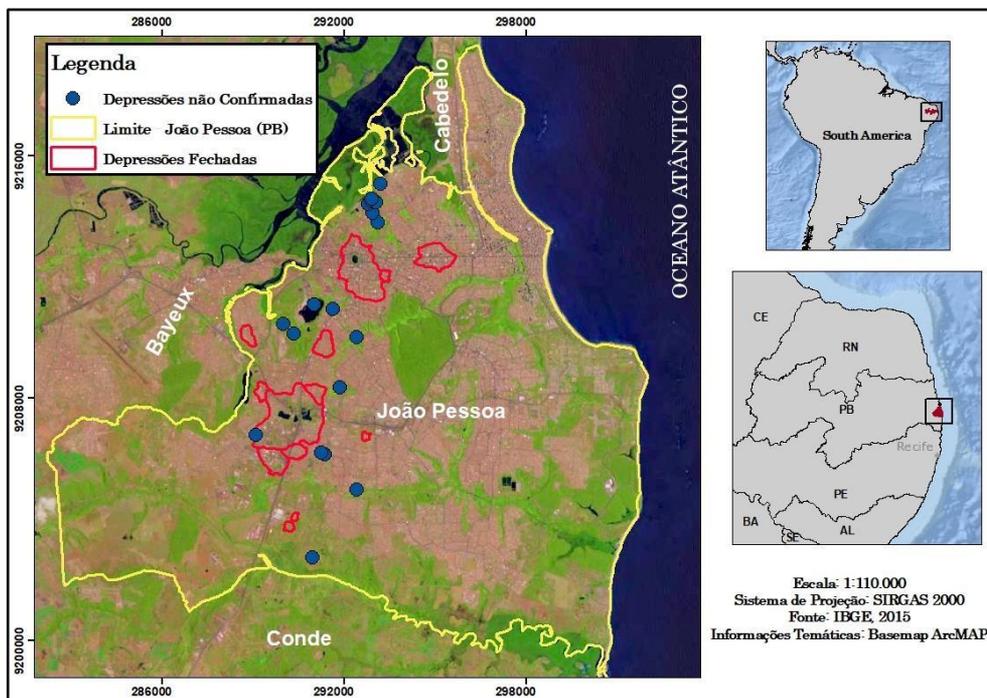


Figura 3: Localização das depressões fechadas na área de estudo

Além dessas depressões fechadas, foram identificadas outras 18 (dezoito) não confirmadas, as quais foram localizadas a partir da análise de cartas topográficas elaboradas para a área de estudo na década de 1970, fornecidas pela SUDENE na escala de 1:25.000. A área de ocorrência dessas possíveis depressões se localiza no mesmo contexto geológico/geomorfológico das depressões mapeadas nesse estudo.

Tais feições foram identificadas nas referidas cartas topográficas como lagos ou lagoas perenes, uma vez que no período da elaboração desse documento cartográfico, o município de João Pessoa apresentava baixo índice de urbanização, estando essas áreas possivelmente ainda pouco alteradas. A formação de lagoa constitui um fator preponderante para identificar depressões cársticas, sabendo, pois, que tal feição geomorfológica, dentre outras características, apresenta drenagem radial centrípeta, e por vezes, acúmulo de água nas áreas mais deprimidas.

As imagens do radar LiDAR utilizadas nesta pesquisa foram capturadas no ano de 2012, quando o município de João Pessoa/PB já se encontrava fortemente urbanizado, o que promoveu alterações significativas das feições e consequentemente sua descaracterização. Essa situação pode ser confirmada a partir do ocorrido na depressão 12, localizada no Bairro do João Paulo II, onde no ano de 2010 houve soterramento da lagoa presente nessa depressão a partir de uma ação do próprio poder público, com o objetivo de mitigar os problemas de inundações que ocorriam no local.

Desse modo, a identificação de depressões fechadas no campo e/ou a partir do método cartográfico adotado, não confirmou a existência das depressões identificadas nas cartas topográficas. No entanto, foi observado a existência de formas que resguardam algumas características destas feições, mas que não atendem a todos os critérios de classificação adotados nessa pesquisa, além daquelas que se encontram em processo de evolução morfodinâmica avançada, conforme será tratado posteriormente, e devido a estes fatos não foram selecionadas para análise nesta pesquisa.

Para a realização da análise morfológica e morfométrica das feições cársticas com maior nível de detalhamento, lançou-se mão da elaboração de gráficos de correlação, relacionando as diferentes variáveis morfométricas que caracterizam as feições, a fim de obter um parâmetro sobre o padrão de evolução e de conformidade entre essas variáveis.

Aspectos Estruturais e Morfológicos

A formação do relevo no município de João Pessoa sofre influência direta de processos subsuperficiais, decorrentes de suas características geológicas (FURRIER et al, 2006; MAIA et al, 2010; MAIA e BEZERRA, 2014; VITAL 2015; VITAL et al, 2020). Sua área territorial está assentada sobre a Bacia Sedimentar Paraíba, que, dentro de seus limites apresenta estratigrafia disposta em camadas de rochas de origem marinha (Calcário da Formação Gramame) e terrígenas (arenitos da Formação Beberibe/Itamaracá). Recobrimdo essas camadas, estão os sedimentos da Formação Barreiras, formada predominantemente por sedimentos argilosos (BARBOSA, 2007; ARAUJO, 2012).

O calcário da Formação Gramame apresenta-se como a principal litologia associada ao processo de dissolução, que associada aos aspectos estruturais, representam os fatores naturais que se relacionam a formação de relevos cársticos na área de estudo, e a ocorrência de seus respectivos processos morfodinâmicos (MAIA, 2018; VITAL et al, 2020).

Com relação ao contexto geológico, todas as feições mapeadas ocorrem sobre os sedimentos da Formação Barreiras. Abaixo desta camada litológica encontram-se os sedimentos da Formação Gramame, que constitui uma camada de rochas carbonáticas, aflorando em alguns pontos no município de João Pessoa (Figura 4 e 5). Essa condição geológica indica a formação de um carste subjacente, onde os processos de dissolução que ocorrem em subsuperfície repercutem na superfície, notadamente na ocorrência de formas típicas do relevo cárstico, que, nesse caso, se caracterizam como depressões fechadas.

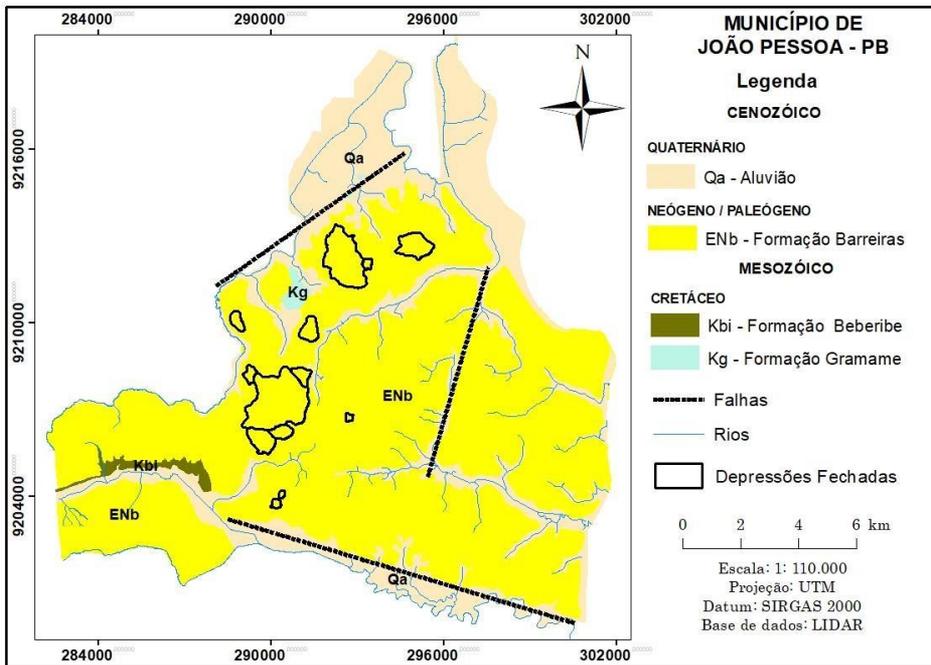


Figura 4: Mapa geológico do município de João Pessoa. Fonte: Santos, 2020.
Adaptado de Brasil (2002).

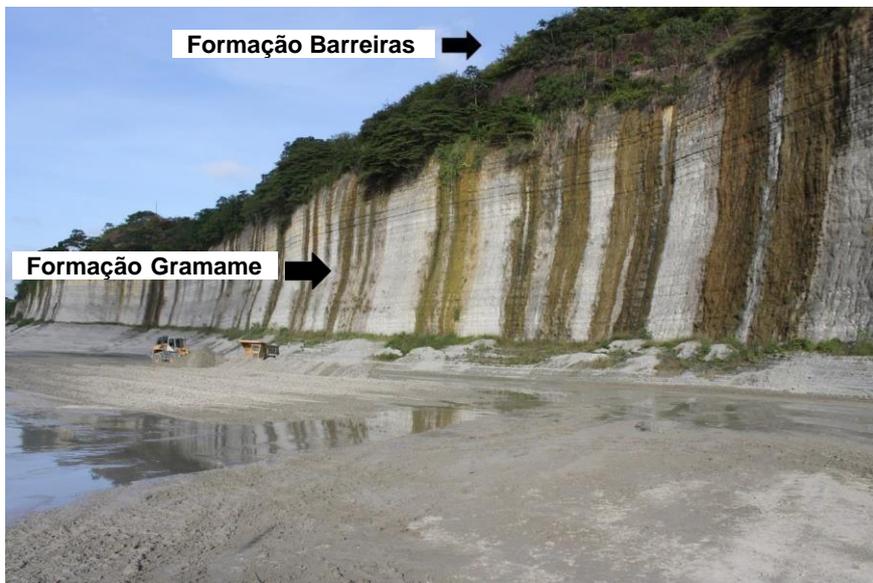


Figura 5 - Contato entre a Formação Barreiras e a Formação Gramame.
Fonte: Vital, 2015.

Na Figura 6 observa-se a representação da distribuição das camadas litológicas que formam a Bacia Sedimentar da Paraíba, na sub-bacia Alhandra. Essa representação foi elaborada a partir de dados litológicos descritos em documentos referentes a perfuração de poços. Os documentos consultados foram elaborados para áreas de abrangência das três formações litológicas representadas, não havendo nessa espacialidade a ocorrência da Formação Maria Farinha, cuja abrangência se limita ao litoral sul do estado da Paraíba. É importante ressaltar que a Formação Barreiras não constitui uma camada litoestratigráfica exclusiva da Bacia Sedimentar Paraíba, mas representa uma unidade capeadora de outras bacias marginais, pois se estende por vasta extensão do litoral brasileiro.

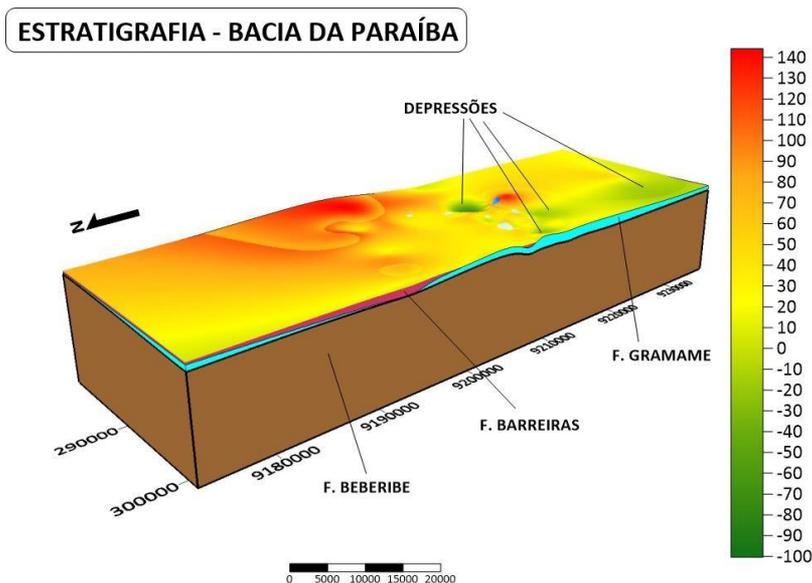


Figura 6: Distribuição das camadas litológicas que formam a Bacia Sedimentar Paraíba no município de João Pessoa e no seu entorno.
Fonte: Santos, 2020.

Essa representação não considerou a profundidade das camadas, tendo como objetivo maior a espessura, além de destacar a zona de contato entre as rochas carbonáticas (Formação Gramame) e a camada superficial capeadora (Formação Barreiras), tendo em vista o entendimento de ser essa a relação litológica de maior representatividade no que diz respeito aos processos cársticos na área de estudo.

Desse modo, a elaboração do modelo considerou os dados referentes as cotas topográficas de cada camada em relação ao nível de base. Nessa representação, observa-se a correlação entre a menor espessura da Formação Barreiras associada a ocorrência de depressões na superfície. No município de João Pessoa as feições cársticas ocorrem

predominantemente nas porções norte e oeste, exatamente onde a Formação Barreiras apresenta pouca espessura e a Formação Gramame aflora em alguns pontos na superfície.

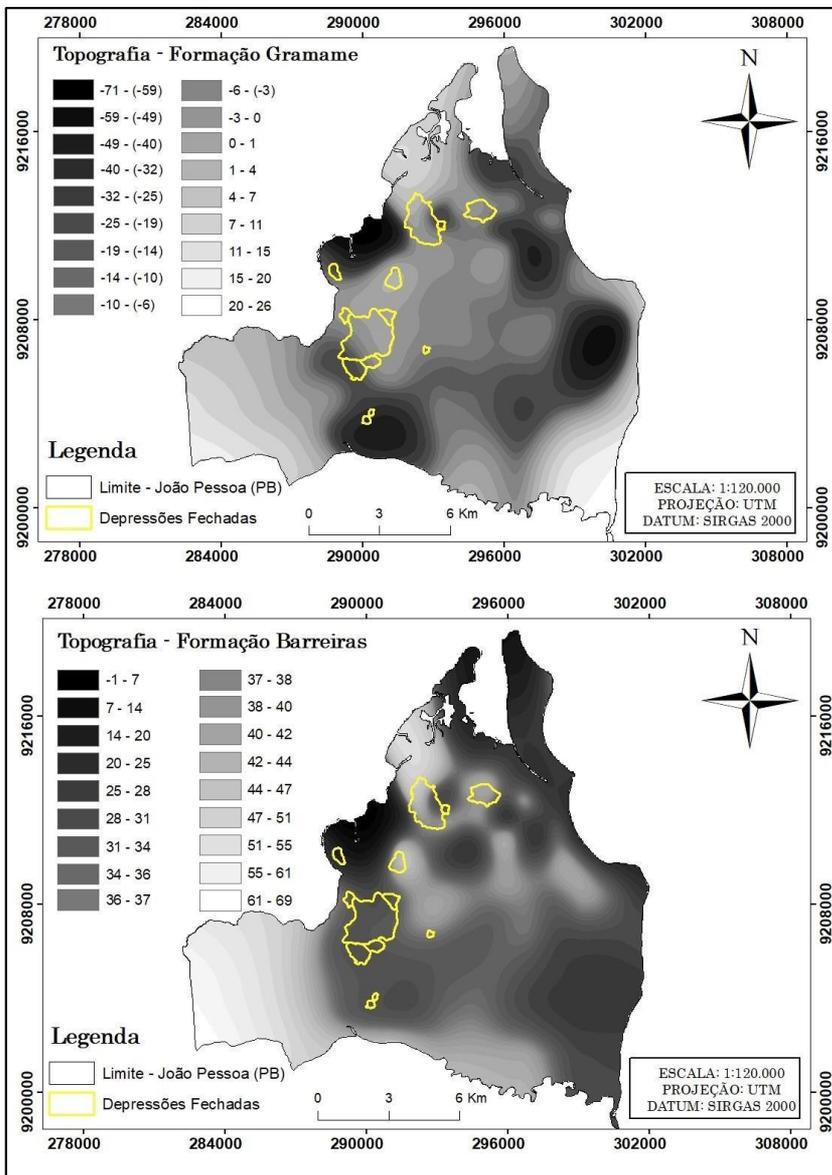


Figura 7 - Recorte da distribuição das camadas litológicas da Bacia Sedimentar Paraíba para o município de João Pessoa.

Fonte: Santos, 2020.

A Figura 7 apresenta recorte da topografia das Formações Gramame e Barreiras para o município de João Pessoa. As feições mapeadas para esse estudo foram sobrepostas a essa representação, sendo possível verificar que a área de ocorrência de tais feições está associada a menor espessura do Barreiras e da ocorrência de depressões no Gramame. De modo contrário, locais onde a Formação Barreiras apresenta maior espessura, não se verificou a formação de depressões fechadas, mesmo havendo ocorrência de depressões na camada rochosa subjacente.

Com base na classificação geomorfológica para o município de João Pessoa (Figura 8) proposta por Barbosa (2015), verificou-se que as depressões fechadas ocorrem numa superfície de denundação, alternando entre formas tabulares e formas convexas. Essa área coincide com a porção da Formação Barreiras que apresenta menor espessura em relação à Formação Gramame, que, por conseguinte, apresenta ocorrência de depressões nessa mesma área.

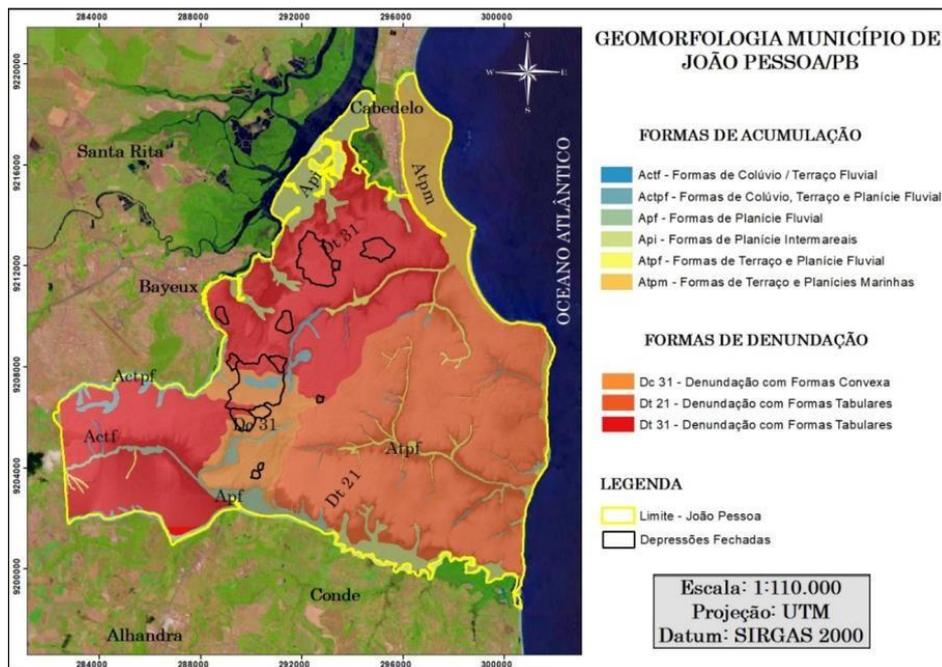


Figura 8: Geomorfologia do Município de João Pessoa/PB.

Fonte: Adaptado de Barbosa, 2015.

É importante ressaltar que os dados litológicos utilizados para elaboração dos modelos (topografia das Formações Barreiras e Gramame) não apresentam grande acurácia, uma vez que a perfuração de poços na área de estudo dispõe de baixo adensamento espacial. Essa situação representou um problema para o processo de interpolação dos dados, não sendo possível sobrepor com precisão as feições superficiais mapeadas (depressões fechadas) e as depressões identificadas na Formação

Gramame a partir do modelo gerado nesse processo. No entanto, foi verificado que a ocorrência destas depressões subjacentes coincide com as superfícies identificadas no mapa geomorfológico, sendo este um fator que reforça a ideia de ocorrência de feições cársticas nas áreas onde a camada litológica capeadora das rochas carbonáticas apresentam menor espessura.

Conforme Vital (2015), a gênese e evolução das formas cársticas na Bacia Sedimentar Paraíba apresenta forte controle estrutural. O referido autor detectou direções preferenciais de falhas (NNE-SSW), fraturas (NE-SW) e lineamentos (NNW-SSE), e identificou que essas feições ocorrem alinhadas, além de seus respectivos eixos estarem orientados preferencialmente a essas direções. Essa condição demonstra que a dissolução ocorre nessas linhas de fraqueza, e tem sua evolução predominantemente no sentido horizontal, formando depressões poligonais.

Na Figura 9 dois aspectos são fortemente evidenciados: o alinhamento das feições cársticas mapeadas, predominantemente nas direções (NNE-SSW) e (E-W); e a concordância dessas direções com as estruturas lineares observadas na área. A condição estrutural representa elemento preponderante na dinâmica geomorfológica no município de João Pessoa.

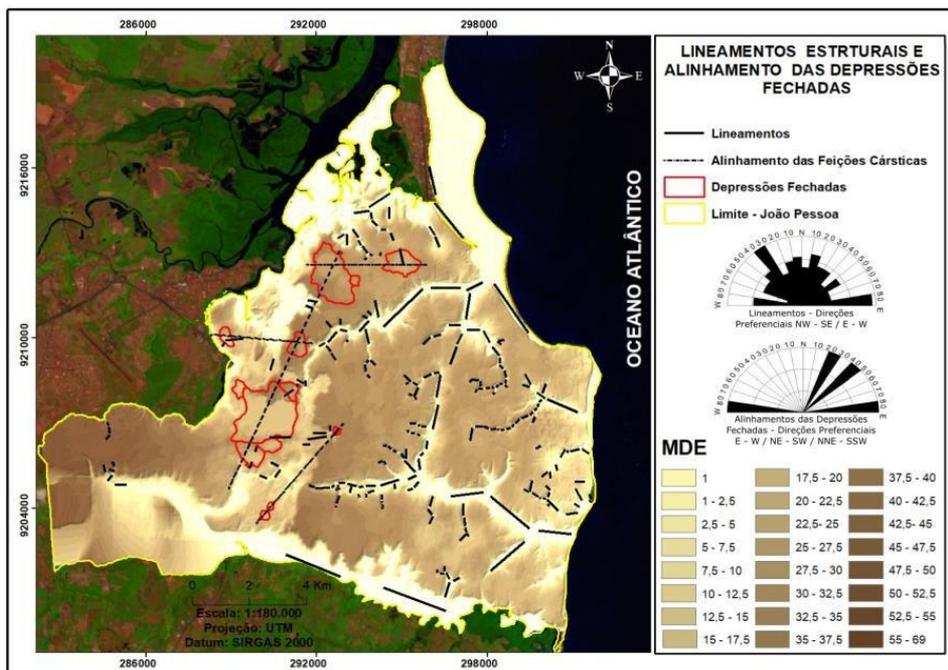


Figura 9: Lineamentos estruturais e alinhamento das depressões fechadas na área de estudo.

Fonte: Santos, 2020.

Desse modo, destaca-se que o processo de dissolução está condicionado as estruturas falhadas e lineares que ocorrem na área de estudo, observando a existência de áreas de exposição superficial da rocha calcária onde não é observado necessariamente a ocorrência de feições cársticas.

Assim, a formação de depressões fechadas no município de João Pessoa é resultado da associação dos seguintes fatores: ocorrência de zonas falhadas e estruturas lineares que se manifestam desde o embasamento cristalino até as estruturas rochosas superficiais, conforme (MAIA, 2010; VITAL, 2015); e a menor espessura da camada rochosa superficial. Enfatiza-se que as feições mencionadas ocorrem em função da ação dos fatores citados agindo em conjunto.

Um aspecto importante a se ressaltar é a tendência destas depressões serem capturadas pelas drenagens fluviais. Essa questão já fora discutida por Vital (2015) e Vital *et al.* (2020), quando se observou a formação de cabeceiras de drenagem e anfiteatros no processo de evolução das depressões fechadas no contexto da Bacia Sedimentar Paraíba, a partir da coalescência destas depressões. Os referidos autores destacaram a ocorrência de um anfiteatro com fortes características de uma antiga depressão cárstica localizado no Distrito Mecânico, em João Pessoa (Figura 10), numa área paralela à margem direita do rio Paraíba. Nesse mesmo contexto, é observado na depressão 2 (Lagoa do Parque Sólon de Lucena) aspectos morfológicos que indicam a mesma tendência a captura de drenagem dessa feição por drenagem fluvial, uma vez que é em direção dos cursos d'água que ocorrem preferencialmente os processos erosivos.

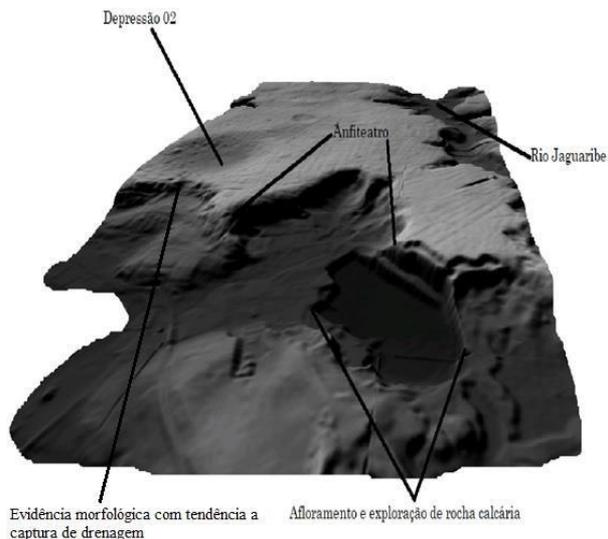


Figura 10: Recorte do modelo de elevação em 3D destacando a ocorrência de anfiteatro na área de estudo.

Fonte: Imagem LiDAR. Cedido pela SEPLAN/PMJP.

O processo de urbanização impossibilita a visualização em campo de evidências da evolução morfodinâmica que confirmem essa tese no contexto da depressão 2, pois a área encontra-se fortemente impermeabilizada.

Essa condição também foi observada na análise do Modelo de Elevação Digital realizada no processo de mapeamento das feições estudadas nessa pesquisa. Foram observadas diferentes áreas apresentando estrutura circular, típica de depressões cársticas (Figuras 11 e 12), conectadas a rede de drenagem fluvial por canal de drenagem cuja orientação de direção predominante corresponde a estruturas lineares, conforme apresentadas na Figura 9.

Desse modo, a dinâmica fluvial também figura como um fator preponderante no processo morfodinâmico no contexto das feições cársticas, e, também é produto das condições estruturais observadas na área de estudo, corroborando com ideia de que as feições cársticas nessa área resultam da associação de processos superficiais e subsuperficiais.

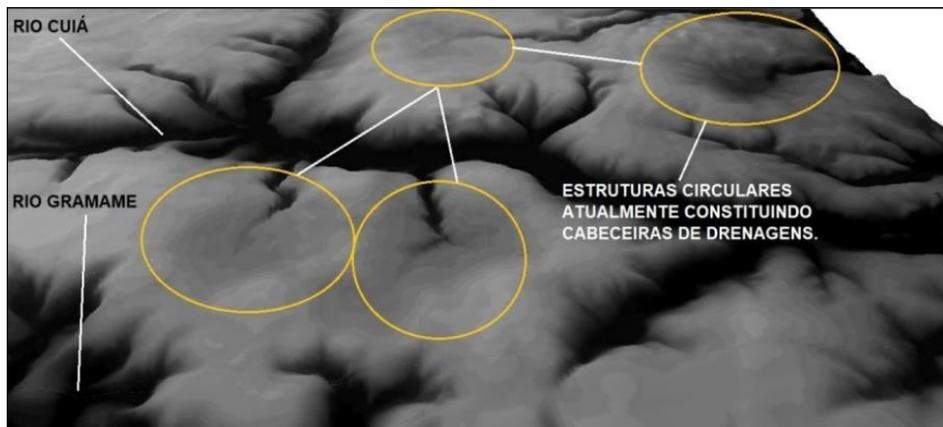


Figura 11: recorte do MDE elaborado para o município de João Pessoa destacando a ocorrência de feições circulares com morfologia idêntica às depressões fechadas identificadas na área de estudo, localizada na porção sul do município, entre o rio Cuiá e o rio Gramame.

Fonte: Imagem LiDAR. Cedido pela SEPLAN/PMJP.

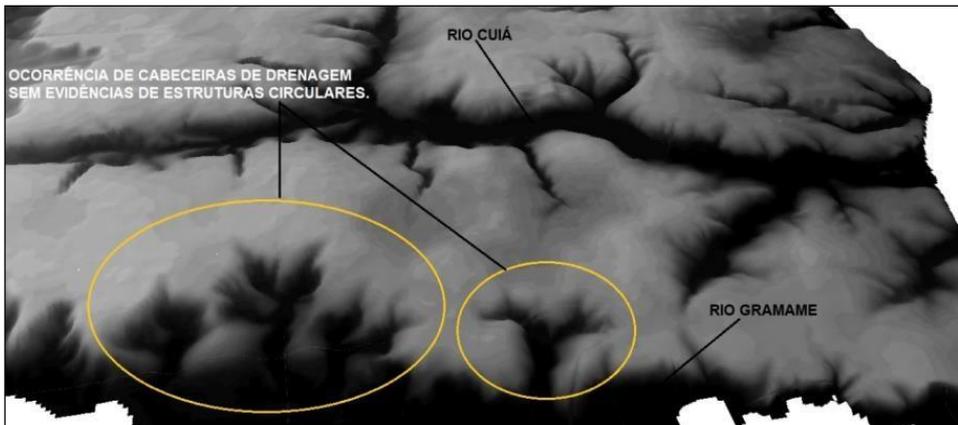


Figura 12: Recorte do MDE elaborado para o município de João Pessoa destacando a ocorrência de feições circulares com morfologia idêntica às depressões fechadas identificadas na área de estudo, localizada na porção norte do município, na confluência dos rios Jaguaribe e Mandacarú, tributários do rio Paraíba. A área forma a cabeceira de drenagem do rio Mandacarú, cuja distância entre a nascente e a desembocadura não ultrapassam 9 quilômetros.

Fonte: Imagem LIDAR. Cedido pela SEPLAN/PMJP.

Também é observado nesse mesmo contexto geomorfológico a ocorrência de cabeceiras de drenagem apresentando morfologia diferenciada (Figura 13) em comparação as destacadas nas Figuras 11 e 12, demonstrando que sua formação está associada a outros processos geomorfológicos.



Figura 13: recorte do MDE elaborado para o município de João Pessoa destacando a ocorrência de cabeceiras de drenagem localizadas na porção sul do município, no contexto hidrográfico do rio Gramame. Destaque para as diferenças morfológicas em relação as feições observadas nas Figuras 11 e 12, apesar de sua relativa proximidade espacial.

Fonte: Imagem LIDAR. Cedido pela SEPLAN/PMJP.

Morfometria das Depressões

A Figura 14 apresenta os modelos de elevação e perfil longitudinal das depressões. As figuras 15 (a) (depressão 06) e (b) (depressão 07); e 16 (depressão 02) representam visão panorâmica/aérea de três depressões analisadas nessa pesquisa. Os parâmetros morfométricos obtidos para as depressões analisadas são apresentados na Figura 17.

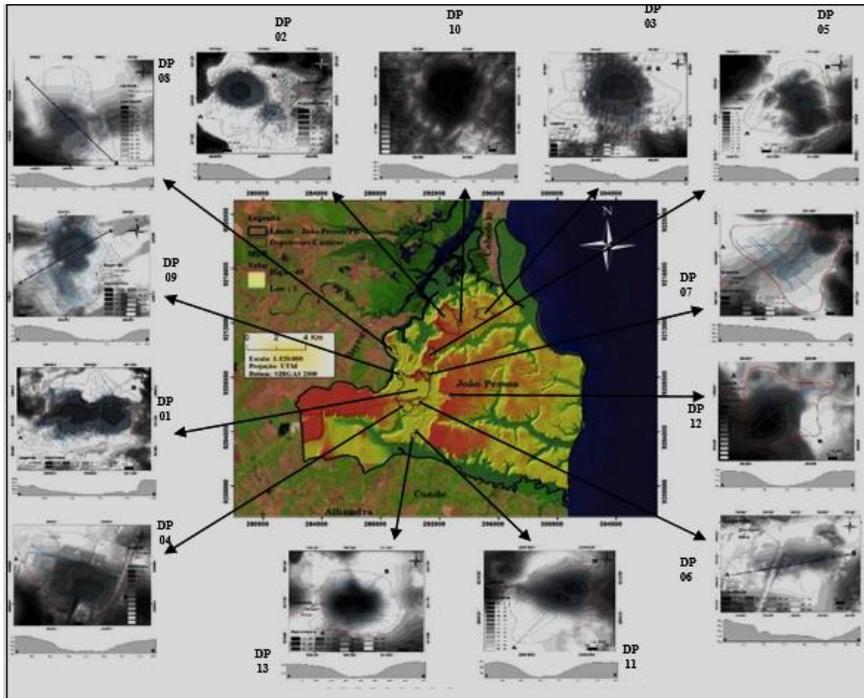


Figura 14: Modelo de elevação e perfil longitudinal das depressões mapeadas.



Figura 15: áreas representativas das depressões mapeadas. a) Depressão 06; b) depressão 07. Fonte: fotografia dos autores, 2020.



Figura 16: visão aérea da depressão 02, lagoa do parque Sólon de Lucena.
Fonte: Vavá daLuz, 2015.

Tabela 1: Dados morfométricos das depressões fechadas.

DP	01 (Três lagoas)	02 (Parque Sólon de Lucena)	03 (Av. Epitácio Pessoa)	04 (Distrito Industrial)	05 (Lagoa Antônio Lins)	06 (Gauchinha)	07 (Lagoa do Buracão)	08 (Alto do Matheus)	09 (Jd. Venezia)	10 (Av. Camilo de Holanda)	11 (Via Perimetral Sul)	12 (Geisel)	13 (Via Perimetral Sul)
AR	3,4 km ²	2,1 km ²	801.401 m ²	619.774m ²	407.223 m ²	282.496 m ²	268.699m ²	219.828 m ²	190.642 m ²	97.689 m ²	88.429 m ²	57.447 m	45.332 m ²
PE	8,2 km	6,7 km	3,8 km	3.239 m	2,5 km	2 km	2.199 m	2 km	1.980 m	1.287 m	1.153 m	992 m	841 m
AP	32,08 m	23,336 m	19,467 m	18,856 m	22,582 m	10,718 m	21,081 m	17,427 m	8,4 m	4,4 m	9,3 m	15 m	8,29 m
ATM	54,64 m	51,863 m	44,479 m	45,073 m	53,82	41,381m	52,177 m	39,552 m	36,611 m	43,622 m	36,702 m	50 m	35,998 m
ATMI	22,56 m	28,527 m	25,012 m	26,217 m	31,298 m	30,665m	31,096 m	22,125 m	28,134 m	39,198 m	27,449 m	35 m	27,708 m
DM	2,37%	2,19%	2,12%	2,50%	5,66%	3,21%	2,70%	3,98%	2,47%	2,93%	4,20%	4,20%	4,50%
EM	2.665 m	2.359 m	1.375 m	1.148 m	912 m	878 m	812 m	757 m	682 m	409 m	400 m	503 m	304 m
EMO	2.293 m	1.308m	944 m	795 m	707 m	510 m	539 m	382 m	539 m	382 m	342 m	459 m	234 m
ELP	1,16	1,80	1,46	1,44	1,28	1,72	1,5	1,98	1,26	1,07	1,16	1,19	1,3
SI	1,7	2,5	3,9	1,7	4,8	3,1	7,8	3,6	2,4	4,5	2,3	1,8	2,2
P/D	0,017	0,016	0,019	0,02	0,028	0,018	0,046	0,03	0,016	0,012	0,03	0,061	0,036

Abreviações: DP = Depressões; AR = Área; PE = Perímetro; AP = Amplitude; ATM = Altitude máxima; ATMI = Altitude mínima; DM = Declividade média; EM = Eixo

maior; EMO = Eixo menor; ELP = Elipsidade; SI = Simetria Interna; P/D = Profundidade x Diâmetro.

Estas depressões apresentam alto padrão de uniformidade, expresso, sobretudo na correlação dos índices analisados (FIGURAS 19, 20, 21 e 22) e médio padrão de uniformidade (FIGURAS 23, 24 e 25).

Verifica-se que o índice área apresenta forte correlação com outros índices morfométricos analisados, tais como o comprimento dos eixos e a amplitude altimétrica. Também foi possível considerar que o processo de coalescência representa etapa evolutiva das referidas feições.

Para além das condições estruturais que se relacionam a gênese das depressões, observa-se no processo de evolução uma clara indicação de que a obliteração de divisores entre duas depressões vizinhas resulta na conseqüente junção das mesmas, criando uma nova feição detentora de formato irregular e sinuoso, seguindo as linhas dos divisores (FIGURA 18). Essa situação pode ser exemplificada a partir do que se observa na área de estudo nas seguintes situações: ocorrência, em geral, de conjuntos de depressões, estando seus divisores limitados a outras depressões; no formato elíptico e assimétrico (FIGURA 17); na orientação preferencial dos eixos e; pelo alinhamento estrutural das formas.

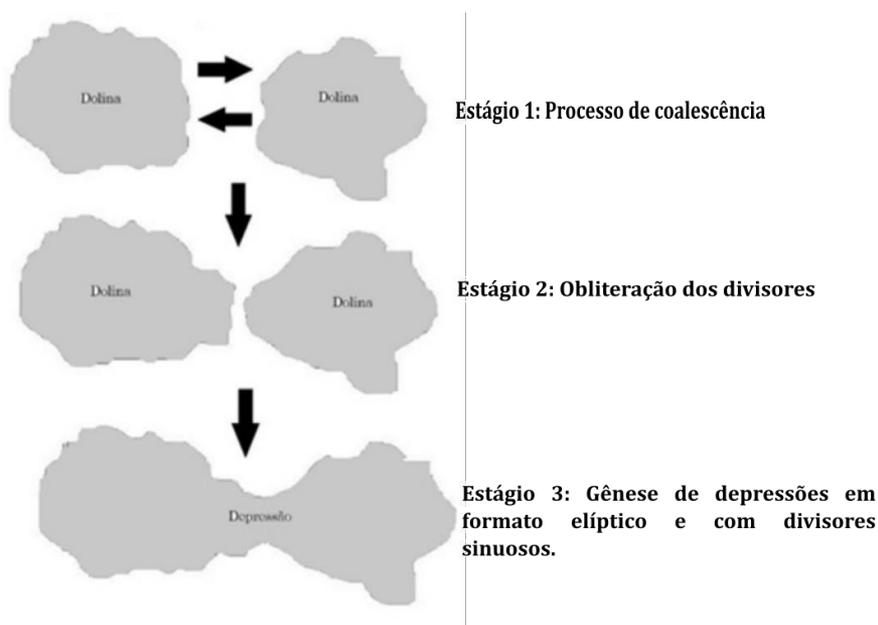


Figura 18: Evolução morfológica das depressões fechadas.

Fonte: Santos, 2020

A padronização das características morfométricas obtidas nessa pesquisa, ou seja, a variação uniforme dos padrões de forma, constitui um fator relevante quanto a evolução morfogenética das feições cársticas presentes na área de estudo, indicando uma íntima relação dos fatores genéticos das áreas que ainda resguardam características de uma depressão fechada, com aquelas que já se encontram em estágio avançado de evolução, formando cabeceiras de drenagem ou anfiteatro.

A análise dos dados indica que todas as depressões apresentam valor de elipsidade maior que 1 (um), o que significa que tais feições exibem forma elíptica, caracterizando depressões poligonais. Essa condição também está relacionada à simetria interna dessas feições, uma vez que seus divisores topográficos ostentam forte irregularidade/sinuosidade, caracterizando formas assimétricas. Tais condições são típicas de áreas originadas por forte controle estrutural.

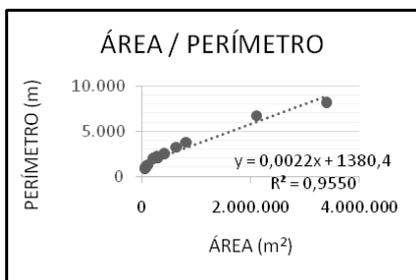


Figura 19: Correlação dos índices área/perímetro.

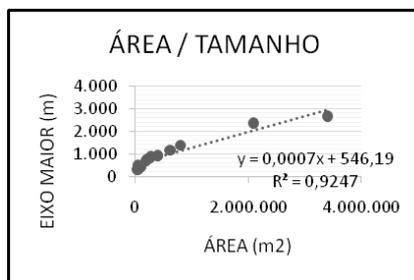


Figura 20: Correlação dos índices área/eixo maior.

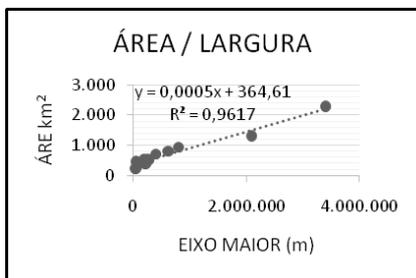


Figura 21: Correlação dos área/eixomenor.

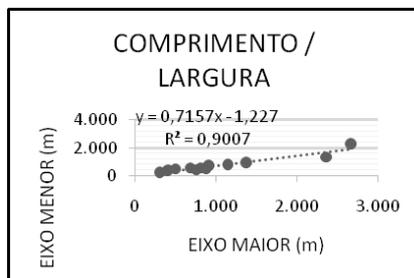


Figura 22: Correlação entre os eixos maior e menor.

A análise da correlação entre a simetria interna e o tamanho das depressões revela que em alguns casos, quanto maior a área, menor será a simetria interna, sendo o contrário também verdade (FIGURA 23), ou seja, a evolução e crescimento dessas formas implica em alteração da sua morfologia. Esse dado apresenta médio nível de correlação, demonstrando que a situação descrita não se aplica exatamente dessa forma em todas as feições estudadas.

Com relação a amplitude altimétrica (variação entre a altitude máxima e a altitude mínima), obteve-se valores oscilantes entre 4 e 32 metros. A maior amplitude

encontra-se na depressão 1 (Três Lagoas). O gráfico de correlação obtido para esses parâmetros (FIGURA 24) revela a existência de forte correlação entre o tamanho e a amplitude altimétrica das depressões. Tal aspecto revela uma tendência evolutiva das depressões expressa no alargamento e aumento da amplitude da forma, ou seja, a evolução morfodinâmica se revela no aumento do desnível entre o topo da superfície e a base. Esse aspecto pode ser confundido com o índice Profundidade/Diâmetro (P/D), conforme o (FIGURA 25), que por sua vez indica que a profundidade é inversamente proporcional ao diâmetro das depressões, demonstrando que as formas de menor diâmetro se apresentam mais profundas.

De fato, há uma relação entre o aumento da profundidade em função da diminuição do diâmetro, porém, a variação do índice P/D se relacionada, sobretudo, com a variação do índice área (diâmetro), e em menor proporção em relação a profundidade, que por sua vez, apresenta pouca variação altimétrica em função do tamanho das depressões.

Por seu turno, o índice P/D caracteriza, no geral, feições de pouca profundidade e grande extensão, uma vez que os valores obtidos são inferiores a 1, característico de depressões, dolinas e uvalas originadas por subsidência lenta do terreno, ou seja, a profundidade da feição diminui em função do aumento do seu diâmetro.

Em relação à declividade, as depressões apresentam, de modo geral, declividade suave, em média 2%. No entanto, a depressão 5 (Lagoa Antônio Lins) apresenta a maior média de declividade de todas as feições mapeadas (5,6%).

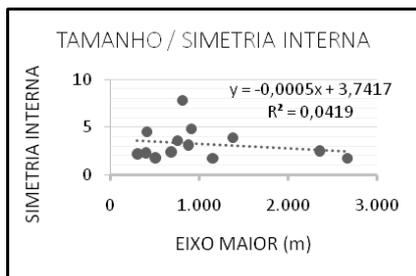


Figura 23: Correlação entre a eixo maior e a simetria interna.

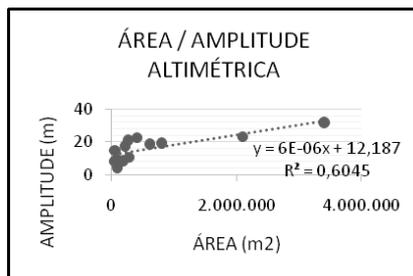


Figura 24: Correlação dos índices área/amplitude altimétrica.

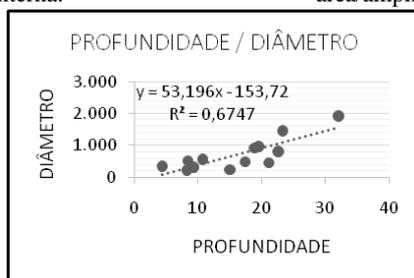


Figura 25: Correlação dos índices profundidade/diâmetro.

Considerações Finais

A análise morfométrica das feições cársticas mapeadas demonstrou que o processo de gênese e evolução destas formas do relevo está associada as condições litológicas e estruturais características da Bacia Sedimentar da Paraíba, onde a área de estudo está inserida. Esta condição foi observada por Vital (2015) quando verificou que no município de João Pessoa as feições cársticas ocorrem predominantemente nas porções norte e oeste, exatamente onde a Formação Barreiras apresenta pouca espessura e a Formação Gramame aflora em alguns pontos na superfície.

As depressões fechadas localizadas próximo aos cursos fluviais apresentam uma clara tendência a conectar sua drenagem aos rios, sempre na direção preferencial das falhas e lineamentos descritos. Aquelas inseridas mais afastadas dos cursos fluviais tendem a coalescer e fundir com outras, formando depressões maiores. Estas também tendem a conectar sua drenagem aos cursos fluviais, como é observado com forte evidência nas depressões 2 e 3.

De modo geral, observa-se que as feições de menor dimensão areal apresentam-se de forma mais poligonal, tendendo ao arredondamento conforme evoluem. Esse aspecto demonstra que as formas mais jovens são menores, mais elípticas e mais declivosas. De modo contrário, as mais antigas são maiores, mais arredondadas e menos declivosas. É possível então afirmar que as depressões menores representam formas mais jovens, e tendem a formar cabeceira de drenagem ou se fundir para formar depressões maiores, num estágio de evolução mais avançado.

As depressões menores estão mais suscetíveis aos processos morfodinâmicos, sendo a subsidência e a coalescência os fenômenos modeladores dessas feições, tendo como condição essencial a elaboração de drenagem vertical devido a concentração do fluxo, atuando como fator para o processo de dissolução nas zonas de fraqueza da rocha subjacente.

O controle estrutural orienta a dissolução subsuperficial e o processo erosivo superficial (coalescência), promovendo a formação de vazios que evoluem em direção a superfície. A condição estrutural é o fator condicionante para o processo de dissolução, uma vez que existem áreas de exposição da rocha calcária na área de estudo onde não se observa a ocorrência de feições cársticas. Da mesma forma, a espessura da camada capeadora sobre a rocha carbonática também constitui fator controlador secundário da repercussão em superfície da dissolução subsuperficial. Tal assertiva pode ser verificada na ocorrência de depressões na Formação Gramame que não se repercutem na superfície.

Portanto, a espessura da Formação Barreiras é um aspecto relevante para ocorrência de depressões cársticas, sendo importante considerar os processos erosivos nessa camada rochosa. A análise geomorfológica demonstra que a superfície de denudação (Dt 21) onde ocorrem as depressões fechadas mapeadas apresenta maior densidade de drenagem e, conseqüentemente maior índice de erosão se comparada a superfície de denudação (Dt 31), onde não foi detectada a ocorrência de depressões

cársticas superficiais, porém, ocorre depressão em subsuperfície, demonstrando que, mesmo havendo dissolução subsuperficial, a erosão é fator fundamental para que haja repercussão em superfície. Sendo assim, as áreas definidas como risco médio apresentam forte tendência para a formação de depressões cársticas no processo de evolução do relevo.

Referências

- AESA. Agência executiva de gestão das águas. *Dados de poços tabulares da AESA*, 2015.
- ARAUJO, M. E. *Água e Rocha na Definição do sítio de Nossa senhora das Neves, atual Cidade de João Pessoa – Paraíba*. 297f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Arquitetura, Universidade Federal da Bahia, 2012.
- BARBOSA, J. A. *A deposição carbonática na faixa costeira Recife-Natal: aspectos estratigráficos, geoquímicos e paleontológicos*. 270f. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Geociências. Universidade Federal de Pernambuco, 2007.
- BARBOSA, T. S. *Geomorfologia urbana e mapeamento geomorfológico do município de João Pessoa – PB, Brasil*. 2015. 115 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2015.
- BIGARELLA, J. J. BECKER, R. D. E. SANTOS, G. F. Fundamentos geológico geográficos, alterações químicas e físicas das rochas relevo cárstico e dômico. In: *Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais, v.1*, 425p Florianópolis: UFSC, 1994.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. CPRM. Geologia e Recursos Minerais do Estado da Paraíba. Recife – PE, 2002. Escala: 1:500.000.
- CAGEPA. Companhia de água e esgoto do Estado da Paraíba. *Dados de poços tabulares da CAGEPA*, 2015.
- CPRM. *Geologia e recursos minerais do estado da Paraíba*. Organizado por Edilton José dos Santos, Cícero Alves Ferreira, José Maria Ferreira da Silva Júnior – Recife: CPRM, 2002. 142 p. il. 2 mapas. Escala 1:500.000.
- CPRM. Serviço Geológico do Brasil. *Sistema de informações de águas subterrâneas(SIAGAS)*. Disponível em http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/visualizar_mapa.php. Acesso em 18 jul. de 2019.
- 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.
- FORD, D. WILLIAMS, P. *Karst hydrogeology and geomorphology*. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 578p, 2007.
- FRUMKIN, A. New Developments of Karst Geomorphology Concepts. In: John F. Shroder (ed), Frumkin, A. (Volume Editor). *Treatise on Geomorphology, Vol 6, Karst Geomorphology*, San Diego: Academic Press. p. 1-13, 2013.

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

HUGGETT, R. *Fundamentals of Geomorphology*. Routledge, London, 2016.

MAIA, R. P. BEZERRA, F. H. SALES, V. C. Geomorfologia do Nordeste: Concepções clássicas e atuais acerca das superfícies de aplainamento. *Revista de Geografia (Recife)*, v. 27, p. 6-19. 2010.

MAIA, R. P. BEZERRA, F. H. R. Condicionamento estrutural do relevo no Nordeste setentrional brasileiro. *Mercator-Revista de Geografia da UFC*, v. 13, n. 1, p. 127- 141, 2014.

MAIA, R. P. Geomorfologia Estrutural, Neotectônica e Carste: exemplos no Nordeste Brasileiro. *Revista de Geografia (Recife)*, v. 35, n. 4, 2018.

KLIMCHOUK, A. B. FORD, D. Types of Karst and Evolution of Hydrogeological Setting. In A. B. Klimchouk, D. C. Ford, A. N. Palmer & W. Dreybrodt (Eds.) *Spleogenesis, Evolution of Karst Aquifers*. National Speleological Society, Alabama, USA, pp. 45-53, 2000.

SANTOS, C. L. *Classificação de áreas de risco geomorfológico no município de João Pessoa-PB associadas a processos cársticos*. 154f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-graduação em Geografia, Centro de Ciências Humanas, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, 2020.

SANTOS, C. L.; SILVA, O. G.; VITAL, S. R. O. Mapeamento de Áreas de Risco Associadas ao Carste em Área Urbana no Município de João Pessoa-PB. *Sociedade & Natureza, [S. l.]*, v. 34, n. 1, 2022. DOI: 10.14393/SN-v34-2022-63641. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/sociedadenedureza/article/view/63641>. Acesso em: 2 jul. 2022.

SAURO, U. Dolines and sinkholes: aspects of evolution and problems of classification. In: *Acta carsologica*, v. 32, n. 2, 2016.

SEPLAN. Secretaria de planejamento da prefeitura de João Pessoa/PB. *Dados cartográficos disponibilizados pela SEPLAN/JP*, 2020.

SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling" Camara G, Souza RCM, Freitas UM, *Garrido J Computers & Graphics*, 20: (3) 395-403, May-Jun 1996. [https://doi.org/10.1016/0097-8493\(96\)00008-8](https://doi.org/10.1016/0097-8493(96)00008-8)

SURFER, version 12. Golden Software, 2014. *Conjunto de programas. (versão de teste)*. Disponível em <http://www.goldensoftware.com>. Acesso em 20 jul. de 2020.

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

VITAL, S. R. O. *Análise geológica-geomorfológica das depressões fechadas e dolinas em sedimentos da Formação Barreiras na região de João Pessoa (PB)*. 216f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-graduação em Geociências, Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, 2015.

VITAL, S. R. O. BARRETO, A. M. F. WILLIAM, S. F. TRAVASSOS, L. E. P. Morfologia, gênese e desenvolvimento de depressões fechadas na Bacia Sedimentar da Paraíba. *William Morris Davis - Revista de Geomorfologia*, v. 1, n. 2. p. 190-206, 2020. <https://doi.org/10.48025/ISSN26756900.v1n2.p190-206>.

Caio Lima dos Santos

Doutor e mestre em Geografia pela Universidade Federal de Pernambuco e graduado em Geografia Pela Universidade Federal da Paraíba. Atualmente é professor efetivo junto a Secretaria de Estado da Educação e Tecnologia – SEECT do Estado da Paraíba, atuando no ensino médio técnico.

R. Antônio Claudino Leal - Costa e Silva, João Pessoa - PB, CEP: 58082-050

Email: caiolimageo@gmail.com

ORCID: 0000-0002-6522-2603

Osvaldo Girão da Silva,

Doutorado em Geografia (Planejamento e Gestão Ambiental) pela Universidade Federal do Rio de Janeiro. Mestrado em Geografia (Regionalização e Análise Regional) pela Universidade Federal de Pernambuco e Licenciatura em Geografia pela Universidade Federal de Pernambuco. Atualmente é Professor Associado, Classe D, Nível 4 da Universidade Federal de Pernambuco, onde também atua no programa de pós-graduação em Geografia.

Av. Prof. Moraes Rego, 1235 - Cidade Universitária, Recife - PE, CEP: 50670-901

osgirao@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5797-4450>

Saulo Roberto de Oliveira Vital

Doutor em Geociências e mestre em Geografia pela Universidade Federal de Pernambuco. Graduado em Geografia pela Universidade Federal da Paraíba. Atualmente, é Professor Adjunto II da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), lotado no Departamento de Geociências do Centro de Ciências Exatas e da Natureza (DGEOC/CCEN). Também atua como Professor e Pesquisador Colaborador do Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (GEOCERES/UFRN), Líder do Grupo de Pesquisa em Geomorfologia e Gestão dos Riscos Naturais (GENAT), Membro do Grupo de Estudos e Pesquisas sobre o Espaço Costeiro (GEPEC), Coordenador do Laboratório de Geomorfologia e Gestão dos Riscos (LAGERISCO), Vice Coordenador do Laboratório de Estudos Geológicos e Ambientais (LEGAM) e Editor Chefe Adjunto do Periódico Científico Cadernos do LOGEPA.

Universidade Federal da Paraíba - Campus I - Cidade Universitária, João Pessoa - PB, 58051-900

saulo.vital@academico.ufpb.br

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

Recebido para publicação em agosto de 2022.

Aprovado para publicação em abril de 2023.