Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>

Sensoriamento Remoto aplicado na Avaliação do Impacto do Armazenamento da Água de Chuva no Sistema de Drenagem Urbana

Camila Oliveira de Britto Salgueiro¹; Haylla Rebeka de Albuquerque Lins Leonardo²; Leidjane Maria Maciel de Oliveira³; Sylvana Melo dos Santos⁴

¹Pesquisadora, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental - DECIV, UFPE, Recife, Pernambuco, Brasil, camila.salgueiro@ufpe.br; ²Mestranda, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGE, Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, Recife, Pernambuco, haylla.rebeka@ufpe.br; ³Professora do DECIV e do PPGE, UFPE, Recife, Pernambuco, Brasil, leidjane.oliveira@ufpe.br; ⁴Professora do DECIV e do PPGE, UFPE, Recife, Pernambuco, Brasil, sylvana.santos@ufpe.br.

Artigo recebido em 05/10/2021 e aceito em 25/10/2021

RESUMO

O processo de urbanização, com intensificação no número de construções, resulta na impermeabilização das superfícies, na redução da infiltração e do escoamento subterrâneo, e no consequente aumento do escoamento superficial. Nesse contexto, pesquisadores têm buscado tecnologias para minimizar tais problemas visando a melhoria não só da conjuntura atual, mas também das próximas gerações. Assim, se inserem as tecnologias verdes para mitigação dos problemas ambientais, com destaque para os telhados verdes. Tal cenário de crescimento urbanístico e de problemas ambientais é evidenciado nos grandes centros urbanos, a exemplo do município de Recife-PE, especificamente na Região Político Administrativa RPA2, no bairro de Dois Unidos. Para identificar áreas verdes e urbanizadas, foi empregada a tecnologia do Sensoriamento Remoto com o emprego do Índice de Construção por Diferença Normalizada (NDBI) e, para identificar os pontos baixos das vias e realizar a análise de alagamento foi utilizado o Modelo Digital de Elevação (MDE) com a geração das curvas de nível. Os resultados indicaram que as duas ações investigadas, telhados verdes e caixas d'água, conjuntamente, foram ineficientes na resolução dos alagamentos e que os custos da adaptação dos telhados para implantação das coberturas verdes foram mais onerosos que a aquisição de caixas d'água de 500 L. Por outro lado, tais ações podem contribuir para a redução das dimensões do projeto de drenagem urbana reduzindo o volume de água pluvial excedente (acima da capacidade de escoamento da sarjeta) em cerca de 45% (de 46.033,30 m³ para 20.902,23 m³).

Palavras-chave: drenagem urbana, telhado verde; caixa d'água.

Remote Sensing applied to the Impact Assessment of Rainwater Storage in the Urban Drainage System

ABSTRACT

The urbanization process, with an increase in the number of constructions, results in the waterproofing of surfaces, reducing infiltration and underground runoff, and a consequent increase in surface runoff. In this context, researchers are looking for technologies to minimize such environmental problems, aiming to improve not only the current situation, but also the next generations. Thus, green technologies are included to mitigate environmental problems, with an emphasis on green roofs. Such a scenario of urban growth and environmental problems is evidenced in large urban centers, such as the municipality of Recife-PE, specifically in the Administrative Political Region RPA2, in the neighborhood of Dois Unidos. To identify green and urbanized areas, Remote Sensing technology was used with the use of the Normalized Difference Construction Index (NDBI) and, to identify the low points of the roads and perform the flood analysis, the Digital Elevation Model was used (MDE) with the generation of contour lines. The results indicated that the two actions investigated, green roofs and water tanks, together, were inefficient in resolving the floods and that the costs of adapting the roofs for the implementation of green roofs were more expensive than the purchase of water tanks from 500 L. On the other hand, such actions can contribute to reducing the dimensions of the urban drainage project by reducing the volume of excess rainwater (above the drainage capacity of the gutter) by about 45% (from 46,033.30 m³ to 20,902.23 m³).

Keywords: urban drainage, green roof, water tanks.

Introdução

Com o aumento populacional somado à aceleração no processo de urbanização, alguns problemas, inclusive os ambientais, têm se tornado uma realidade em diversos centros urbanos, inclusive na cidade do Recife, em Pernambuco. Borges *et al.* (2020) frisaram que o crescimento populacional está atrelado ao desenvolvimento até determinado ponto, sendo importante que tal crescimento não tenha resultados negativos para o meio ambiente e seus habitantes. De acordo com os autores, é necessário que tal expansão seja proporcional ao crescimento estrutural urbano visando manter as condições mínimas de sobrevivência. Nesse sentido, é válido citar que tais problemas ambientais interferem diretamente na vida da sociedade com consequências tanto a curto, como a longo prazo, tornando-se, por isso, cada vez mais necessário buscar medidas de solução. Nesse contexto, Silva (2021) citou como exemplos de problemas urbanos: o aumento da temperatura e a geração de ilhas de calor; a impermeabilização do solo gerada pelo aumento de construções, fato que compromete a drenagem de água e aumenta o escoamento superficial; e a elevação dos níveis dos córregos, favorecendo a ocorrência de enchentes.

Nesse cenário, observa-se principalmente o crescimento rápido da população e do número de construções, o que, segundo Santos *et al.* (2013), hidrologicamente falando, gera a redução na taxa de infiltração devido ao aumento nas áreas impermeabilizadas. Moura e Silva (2015) destacaram que o aumento no escoamento superficial tem como principal causa o excesso de precipitação. Sobre isso, Santos *et al.* (2013) afirmaram que a intensificação do escoamento superficial resulta no aumento da frequência e na magnitude dos topos do hidrograma de escoamento, com consequente elevação do nível d'água acima dos limites considerados normais para o escoamento. Segundo Barros *et al.* (2021), esse aumento no escoamento superficial acaba resultando na ocorrência de alagamentos em centros urbanos. Nesse contexto, se inserem os conceitos de inundação, alagamento, enchente e enxurrada, que costumam ser confundidos entre si por se tratar de impactos que podem ser naturais, ou não, e são resultantes dos eventos pluviométricos extremos.

De acordo com Tucci (2007), a inundação ocorre quando as águas dos mananciais hídricos naturais e dos canais superficiais, saem da calha normal de escoamento devido à falta de capacidade de transporte de um destes sistemas, sendo direcionadas para áreas ocupadas pela população. Para França e Suassuna (2018), o alagamento

constitui a extrapolação da capacidade de escoamento de sistemas de drenagem urbana e consequente acúmulo de água em ruas, calçadas ou outras infraestruturas urbanas, em decorrência de precipitações intensas. Sobre as enchentes, Pompêo (2000) destacou que as mesmas são fenômenos naturais, que ocorrem periodicamente nos cursos d'água, em áreas urbanas, como consequência de chuvas intensas de longo período de retorno ou devido aos transbordamentos de cursos d'água provocados por mudanças no equilíbrio do ciclo hidrológico em regiões a montante das áreas urbanas, podendo ainda ocorrer devido à própria urbanização. No que se refere à enxurrada, segundo França e Suassuna (2018), ela está relacionada com o escoamento superficial de alta velocidade e energia, provocado por chuvas intensas e concentradas. Sobre isso, os autores destacaram que a enxurrada normalmente ocorre em pequenas bacias de relevo acidentado, e pela elevação súbita das vazões de determinada drenagem resultando em transbordamento brusco da calha fluvial, e apresenta grande poder destrutivo.

Santos *et al.* (2013) complementaram que a inundação, em aspectos gerais, é advinda das modificações do uso do solo, tendo como consequência o extravasamento do nível dos cursos d'água além dos seus limites máximos. Dessa forma, é válido citar que, a partir do momento que ocorre mudança no solo, de permeável para impermeável, tem-se um impacto direto no aumento do escoamento superficial como um todo. Assim sendo, os eventos pluviométricos extremos constituem uma das principais problemáticas ambientais nos centros urbanos.

Sobre os prejuízos resultantes de escoamentos superficiais descontrolados, em áreas urbanas, Nagem (2008) classificou-os em dois principais grupos: tangíveis e intangíveis. Sendo os prejuízos tangíveis àqueles relacionados com a propriedade, os custos operacionais de congestionamentos urbanos e a manutenção de veículos, a infraestrutura urbana e as perdas de vidas humanas; a exemplo de custos diretos, e de desvalorização de imóveis, custos com atendimentos de assistência a desabrigados e desalojados e custos de limpeza. No grupo de prejuízos intangíveis têm-se situações como empobrecimento progressivo da população atingida, perda de produção econômica, interrupção das atividades comerciais, prejuízos ambientais, entre outros.

Diante do exposto, pesquisadores vêm buscando opções de minimização dos problemas citados visando a melhoria não só da conjuntura atual, mas também das próximas gerações. De

acordo com Razzaghmanesh *et al.* (2016), uma das possíveis soluções para as consequências do crescimento da urbanização é introduzir infraestruturas verdes em ambientes urbanos. Teotônio *et al.* (2018) destacaram o potencial dos benefícios esperados ao se tornar os edifícios residenciais e comerciais mais verdes em constituírem uma ferramenta para melhorar a qualidade de vida nas cidades, e não deve ser negligenciado. Dentre as tecnologias verdes possíveis, estão os telhados verdes, que constituem uma opção tecnológica de melhoria no planejamento urbano, a partir da aplicação de uma camada vegetal na cobertura de edificações, contribuindo para a minimização do escoamento superficial, a absorção do gás carbônico/emissão o gás oxigênio e a retenção da água da chuva para posterior uso, entre outros.

De fato, Mediondo e Cunha (2004) evidenciaram que o uso de vegetação na cobertura dos telhados verdes, através da infiltração e acúmulo da água no substrato, resulta na diminuição do escoamento superficial, diferentemente do uso de telhados convencionais, nos quais a maioria da água precipitada vai diretamente para o escoamento superficial. Adicionalmente, para Castro e Goldenfum (2010), a implantação de coberturas vegetais pode proporcionar melhor dinâmica do escoamento superficial, redução da velocidade de liberação do excesso de água e redução nos volumes de escoamento.

O município do Recife requer atenção no que diz respeito ao escoamento superficial, pois segundo Albuquerque *et al.* (2013), o município sofre intensamente com alagamentos, transbordamentos de córregos e rios, e deslizamentos de morros devido à intensificação da precipitação que ocorre no período de chuvas. Ao analisar as precipitações e os respectivos impactos na cidade do Recife, Souza *et al.* (2012) constaram a vulnerabilidade da população, principalmente aos chamados eventos extremos, pois tais episódios têm como consequência os alagamentos e a saturação dos solos das encostas que deslizam morro abaixo, prejudicando, assim, ainda mais, os mais pobres que residem em áreas vulneráveis. De acordo com Melo *et al.* (2020), sobre o município de Recife, o período de chuvas contínuas está normalmente concentrado nos meses de abril e julho, período em que aumenta o risco de deslizamento nas áreas de morro.

Assim, fica evidenciado a necessidade de um estudo mais detalhado acerca do quantitativo do escoamento superficial, bem como a busca por medidas mitigadoras dos impactos, principalmente

em áreas vulneráveis sob os aspectos social, econômico e ambiental.

Sabe-se que problemas devido ao escoamento da água de chuva em eventos pluviométricos extremos afetam principalmente a parte da população de menor renda, que muitas vezes residem em áreas de maior vulnerabilidade. Dessa forma, a busca por ferramentas mitigadoras de impactos é uma necessidade para a sociedade como um todo, mas especialmente para os residentes em áreas de risco, que sofrem de forma ainda mais severa com as consequências.

Além de contribuir para a melhoria da qualidade de vida da população de baixa renda, uma grande motivação para realização deste trabalho é a existência da Lei Municipal Nº. 18.112 (Recife, 2015), que tornou obrigatório o uso de telhados verdes em projetos de edificações habitacionais multifamiliares com mais de quatro pavimentos e não-habitacionais com mais de 400 m² de área de coberta, para sua aprovação. Além disso, a Lei determina que em lotes com área superior a 500 m², edificados ou não, que tenham área impermeabilizada superior a 25% da área total do lote, deverão ser executados reservatórios de águas pluviais como condição para aprovação de projetos iniciais. De acordo com o instrumento legal indicado, desde 2015, o município conta com duas possibilidades de redução da água escoada superficialmente em cada edificação: os reservatórios e os telhados verdes.

Considerando o iminente crescimento na quantidade de coberturas verdes sobre os telhados das edificações e de reservatórios de acúmulo da água de chuva, à luz da obrigatoriedade prevista na Lei, este trabalho tem como objetivo estimar o impacto do armazenamento da água de chuva no volume escoado para o sistema de drenagem urbana.

Material e métodos

Identificação de áreas vulneráveis em Recife-PE

Recife tem área territorial de 218.843 km², população estimada de 1.653.461 habitantes, IBGE (2015), e conta com um PIB *per capita* igual a R\$ 31.994,38. Além disso, a densidade demográfica de tal município é de 7.039,64 hab./km². Para identificação das áreas vulneráveis, realizou-se um estudo sobre toda extensão do município de Recife-PE, tendo sido considerado os parâmetros de avaliação apresentados na Tabela 1, e a divisão da cidade em Regiões Político Administrativas, que englobam bairros com características similares (Figura 1) para que, assim, fosse identificado o bairro de maior vulnerabilidade em relação à impermeabilização da superfície, à área de risco de

desmoronamento, aos parâmetros socioeconômicos e aos níveis pluviométricos, a ser utilizado como área de estudo deste trabalho.

Tabela 1. Parâmetros de avaliação para Áreas de Vulnerabilidade (Recife-PE).

PARÂMETRO AVALIADO	FORMA DE AVALIAÇÃO
Quantidade de áreas construídas	NDBI: processamento de imagens no <i>software</i> QGIS
Ocorrência de morros íngremes	Sombreamento e Curvas de Nível – MDE: processamento de imagens no <i>software</i> QGIS
Parâmetros Socioeconômicos	Banco de dados da Prefeitura do Recife
Níveis Pluviométricos	Banco de dados do CEMADEN

Figura 1. Mapa com divisão das unidades de Região Político-Administrativas (RPA) do Recife.

Para a verificação das áreas construídas, utilizou-se o processamento de imagens pelo *software* de livre acesso QGIS, sendo obtido o Índice de Construção pela Diferença Normalizada (NDBI), conforme a metodologia de (Zha *et al.*, 2003). Ressalta-se que, no que diz respeito ao município do Recife, o acerto de imagens de sensores do satélite referentes à área teve como característica principal a presença mínima de nuvens, fator que pode interferir nos resultados. Nesse contexto, foi inicialmente realizada uma pesquisa com os satélites Landsat8 e Sentinel-2 visando escolher qual desses abrange um ramo de imagens com menor ocorrência de nuvem. Além disso, foram investigadas as datas com imagens disponíveis, que possibilitassem a aplicação do Sensoriamento Remoto, resultando em dados orbitais do satélite Landsat8, para os dias 28 de julho de 2013 e 17 de outubro de 2019.

O satélite estadunidense Landsat8, apresenta dois principais sensores: OLI (Sensor espectral), que tem como bandas espectrais B1, B2, B3, B4, B5, B6, B7, B8 e B9 e o TIRS (sensor termal), com bandas espectrais B10 e B11. Ressalta-se, também, que os dados orbitais foram reprojatados para o sistema de referência SIRGAS 2000/UTM ZONE 25S, com código de EPSG 31985. Avaliou-se o banco de imagens da plataforma de dados *Remote Pixel* (2021), disponível *online* e utilizou-se a órbita 214 no ponto 065, quadrícula que abrange a extensão do município de Recife-PE.

O Ângulo de Elevação do Sol (E) e a Distância Astronômica Terra-Sol (Dr) de cada imagem, pela plataforma de dados *Remote Pixel* (2021), ao se avaliar os dias aferidos no estudo em questão, foram, respectivamente: 51.27250323 e 1.0153656, na data de 28/07/2013; e 65.97150182 e 0.9966498, na data de 17/10/2019. Em seguida, processou-se para os dois anos (2013 e 2019), o Índice de Construção por Diferença Normalizada (NDBI), identificando assim as áreas urbanas e construídas, baseando-se no incremento da resposta espectral das áreas construídas entre as bandas construídas do infravermelho próximo e médio (França *et al.*, 2012).

As reflectâncias das bandas 5 e 6 foram processadas, e em seguida realizou-se a comparação entre as datas pesquisadas, para estudar as áreas com maior processo de urbanização, considerado a partir de construções observadas entre as imagens de cada data. Segundo Silva *et al.* (2014), dessa comparação é gerada uma imagem na qual são contidos apenas *pixels* de áreas construídas, que apresentam valores positivos, sendo os demais valores negativos. De acordo com os autores, esta técnica apresenta uma precisão de 92%.

No que se refere à escolha da área de estudo, visando contribuir para melhoria da qualidade de vida da população em situação de maior vulnerabilidade, considerou-se prioritariamente áreas de morro. Segundo Cavalcanti (2012), a configuração do relevo do Recife é marcada por quatro principais grupos: ambiente dos morros; planícies; litorâneos; e aquáticos. Em relação à quantidade de morros, segundo Assis (2001), a ocupação desordenada das encostas é o principal motivo para o grande número de desabamentos e desmoronamentos que ocorrem na época das chuvas em morros da cidade do Recife. O autor destacou que a ocupação destas áreas foi adensada na década de 80 e concentra a parte da população mais carente do município. De acordo com Gusmão Filho (1993 *apud* Assis, 2001), nessas áreas existem muitas invasões e, no

equivalente a 30% da cidade, na época, já havia uma concentração maior que 400.000 pessoas. Ainda sobre o município de Recife, ressalta-se que as características geomorfológicas do município são naturalmente de alto risco para a população, sendo tais riscos ainda mais agravados devido à urbanização sem planejamento.

Uma vez definido que as áreas de morro seriam utilizadas para investigação e considerando que as mesmas constituem localidades de risco para deslizamentos, foram utilizados os dados disponibilizados pela plataforma Dados Recife, referente ao Monitoramento de Áreas de Risco realizado pela Secretaria Executiva de Defesa Civil de Pernambuco, que é responsável pelo monitoramento permanente das áreas de risco em morros e na planície, sujeitos a alagamentos, deslizamentos e enxurradas. Assim sendo, foram levantados os quantitativos de lonas implantadas de 2015 a 2020, Figura 2, que têm como principal objetivo minimizar o risco de deslizamentos de morro na ocorrência de eventos pluviométricos extremos.

Figura 2. Quantidade de lonas colocadas em áreas de risco, no Recife-PE, de 2015 a 2020. Fonte: Secretaria Executiva de Defesa Civil de Recife (2020).

O ano de 2019 foi um ano preocupante, com o maior quantitativo de lonas colocadas no período de 2015 a 2020, tendo sido, por isso, o ano escolhido para maior detalhamento, por RPA, quanto à quantidade de vistorias, de chamados pela população e de solicitações pela população em áreas de risco (Tabela 2).

Tabela 2. Dados de áreas de risco, em 2019.

RPA	VISTORIAS	CHAMADOS PELA POPULAÇÃO	SOLICITAÇÕES
1	20	1769	1928
2	15	1474	1622
3	18	2318	2575
4	78	890	954
5	8	518	556
6	0	219	241
Média	23,2	1198,0	1312,7

Fonte dos dados: Secretaria Executiva de Defesa Civil de Recife (2020).

Sobre a quantidade de vistorias na área do Recife, é perceptível que a RPA 4 foi a que mais recebeu vistorias no ano de 2019, sendo a única com valores acima da média (23,2) das demais RPA's, e na RPA 6 não foram realizadas vistorias. No que se refere ao somatório de chamados, em três regiões político administrativas (RPA 1, RPA 2 e RPA 3), os valores foram acima da média, com destaque para a RPA3, com a maior quantidade de chamados da área. Sendo possível que em um único chamado pode ser registrado mais de uma solicitação pela população, conclui-se que as principais áreas de risco do município podem estar associadas à maior quantidade de solicitações. A maior quantidade de solicitações ocorreu na RPA 3, destacando, mais uma vez, essa Região Político Administrativa na investigação do risco.

Com a identificação de áreas íngremes é possível constatar a existência de morro e, assim sendo, em cada RPA foi realizado o artifício de processamento do Modelo Digital de Elevação (MDE), tendo sido utilizado o dado *Raster*, disponibilizado de forma *online* no Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil, através do projeto TOPODATA (INPE, 2020), para caracterização do relevo presente foram utilizadas as quadrículas 07S36 e 08S36, que abrangem a extensão do município do Recife, no âmbito do parâmetro altitude. Assim, o MDE foi estabelecido a partir da superfície contínua formada pela interpolação dos valores altimétricos e, em seguida, foram encontradas as curvas de nível da área de estudo, sendo possível observar a declividade do terreno. Do processamento da imagem foi delimitado o sombreamento referente à visão tridimensional da água (áreas de encostas e morro), que são consideradas áreas de maior vulnerabilidade quanto à ocorrência de deslizamentos, no que diz respeito aos eventos críticos de cheia, que comumente estão associadas a desastres que atingem a população residente, no local, de forma abrupta.

Historicamente, a ocupação dessas áreas vem inserida dentro de um contexto de vulnerabilidade sócio-econômico-ambiental. Nesse contexto, se inserem as políticas habitacionais e urbanas como formas de ordenação territorial e provisão de habitações de interesse social. Alguns instrumentos previstos no Estatuto da Cidade podem ser empregados para esse fim, dentre eles: o parcelamento e edificação compulsórios e o IPTU progressivo, o Solo Criado, e o estabelecimento de Zonas Especiais de Interesse Social (ZEIS), conforme Ministério das Cidades (2009).

De acordo com o Ministério das Cidades (2009), no processo de construção de uma ordem

urbanística, as ZEIS constituem um tipo especial de zoneamento visando a inclusão da população de menor renda no direito à cidade e à terra urbana, servida de equipamentos e infraestrutura, tanto por meio da delimitação de áreas previamente ocupadas por assentamentos precários, quanto por meio da delimitação de vazios urbanos e de imóveis subutilizados, destinados à produção de novas moradias populares.

Considerando o cenário da cidade de Recife, de forma a incorporar aspectos socioeconômicos neste estudo, apresenta-se na Tabela 3, para cada RPA, a porcentagem de bairros que não têm áreas de ZEIS inseridos no mesmo, bem como informações sócio-econômicas (população e domicílios, alfabetização, densidade

demográfica, Rendimento Nominal Médio Mensal dos Domicílios) obtidas das médias dos bairros que compõem a respectiva RPA, e caracterização espacial (área e quantitativo de bairros).

Melo *et al.* (2020), considerando o período chuvoso de abril a junho, destacaram que as precipitações acumuladas nos dias anteriores, em áreas de morro na cidade de Recife, com possíveis deslizamentos de terra, são úteis na previsão de desastres. Observa-se, portanto, que nessas áreas também ocorrem eventos de deslizamento ainda que não seja um dia chuvoso e estes podem estar associados à fragilização do solo devido à alta incidência de chuva anterior, ou seja, podem ser consequência de um histórico de chuvas já acumulado de períodos anteriores.

Tabela 3. Dados obtidos das médias dos bairros de cada RPA para contextualização da vulnerabilidade sócio-econômica.

RPA	ÁREA (ha)	QT. BAIRROS	BAIRROS SZ		POPULAÇÃO (hab.)	Ds. Dem.*	Qt. Dm.	Qt. Mor./Dm.	Alfab.** (%)	RNMMD (R\$)
			Qt	%						
1	139,64	11	7	63,64%	7101,27	60,23	2269,00	2,88	92,37%	R\$ 2.221,28
2	82,22	18	6	33,33%	12285,22	148,40	3607,94	3,34	92,91%	R\$ 2.519,23
3	266,48	29	10	34,48%	10779,69	126,45	3270,66	3,33	93,85%	R\$ 4.332,95
4	351,00	12	2	16,67%	23245,58	101,10	7213,83	3,23	93,45%	R\$ 2.904,46
5	187,25	16	0	0,00%	16486,13	139,14	4900,44	3,32	92,71%	R\$ 1.533,20
6	486,50	8	1	12,50%	47831,25	132,95	15060,50	3,28	93,39%	R\$ 2.371,86

*RPA = Região Político Administrativa; Qt. = quantidade; SZ = sem Zeis; hab. = habitantes; Ds. Dem. = densidade demográfica; Dm. = domicílios; Mor./Dm. = moradores/domicílios; * = habitante/hectare; ** = 10 anos e mais; Alfab. = Alfabetização; RNMMD = Rendimento Nominal Médio Mensal dos Domicílios.

Fonte dos dados: Secretaria Executiva de Defesa Civil de Recife (2020).

Verificação da ocorrência de alagamento

Para definição de áreas de alagamentos foram consideradas as informações disponíveis no banco de dados do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN) referente ao ano de 2019, e determinados os valores máximos mensais de cada posto, Tabela 4, que expõem as áreas de morro a maiores possibilidades de deslizamentos.

A verificação sobre a ocorrência de alagamento em um determinado ponto na via de tráfego foi realizada considerando a comparação entre dois valores: vazão gerada pela área de contribuição e vazão escoada na sarjeta. A vazão gerada pela área de contribuição corresponde à água escoada pelas áreas impermeáveis situadas na área investigada, bem como de áreas adjacentes desde que essas últimas estejam em altitude maior que a primeira, de forma que a água pluvial escoa, por gravidade, para a área investigada. Assim,

considera-se como superfícies de escoamento as vias de tráfego e telhados. Segundo Schlickmann e Back (2020), existem diversos métodos disponíveis para estimativa da vazão gerada pela área de contribuição, que estão fundamentados em uma série de parâmetros que visam representar a vazão de projeto de uma área de drenagem. Nesse contexto, o Método Racional se destaca pela facilidade de uso, uma vez que relaciona a vazão com o coeficiente de escoamento, intensidade de precipitação e área de contribuição. Os autores destacaram, entretanto, que, para grandes áreas, o Método Racional tende a superestimar a vazão máxima. Segundo Santos (2010), em pequenas bacias, com chuvas de curta duração, pode-se adotar o Método Racional, e em bacias maiores, com chuvas mais demoradas, ou em casos em que se deseja, além da vazão máxima, o volume das cheias, é necessário utilizar modelos baseados no hidrograma unitário.

Tabela 4. Valores de precipitação diária máxima mensal referente a cada posto, em 2019.

POSTO	PRECIPITAÇÃO (mm)											
	JAN.	FEV.	MAR.	ABR.	MAI.	JUN.	JUL.	AGO.	SET.	OUT.	NOV.	DEZ.
P1	46,24	26,00	58,30	23,84	30,48	164,48	82,03	27,75	12,61	13,60	1,38	6,52
P2	38,78	67,27	29,36	46,20	36,47	213,99	141,29	30,32	49,23	16,74	0,79	3,74
P3	78,80	23,00	55,80	19,40	29,00	182,80	72,60	32,40	19,00	18,00	5,20	22,00
P4	67,40	19,60	38,80	67,60	20,20	194,60	127,40	26,60	40,20	9,20	0,20	8,20
P5	43,06	61,11	35,95	77,08	29,25	183,84	146,27	32,41	25,58	18,12	0,59	9,63
P6	20,54	21,13	7,00	6,40	1,80	199,81	150,53	38,21	24,41	17,92	4,39	16,35
P7	44,85	75,43	0,00	0,00	0,00	214,92	46,87	0,00	0,00	0,00	0,63	7,12
P8	48,86	17,70	9,09	26,21	44,15	210,59	181,50	48,28	27,59	6,57	10,64	11,21
P9	44,92	20,29	48,77	24,29	29,96	161,53	70,83	32,56	14,21	13,66	0,40	12,04
P10	71,31	29,33	47,12	28,46	1,96	173,92	81,82	28,71	9,44	17,55	1,78	19,11
P11	41,79	70,18	34,41	43,71	36,89	210,20	147,50	28,58	32,44	19,71	0,00	9,45
P12	2,19	26,25	39,75	38,40	38,91	176,65	145,84	37,11	22,24	44,35	3,59	27,48
P13	71,65	21,26	26,99	48,32	20,79	181,63	103,54	21,87	22,47	6,31	2,75	6,87
P14	49,80	31,00	36,20	54,40	24,20	230,20	143,20	27,80	63,00	12,40	0,40	8,80
P15	48,02	37,87	17,81	55,22	26,57	152,45	149,85	18,78	59,58	19,13	2,17	6,31
P16	59,22	41,52	28,78	35,71	27,79	213,52	99,65	32,75	33,88	9,48	0,00	0,00
P17	46,62	42,03	26,92	42,54	28,49	86,19	152,65	20,29	59,04	23,27	0,40	7,08

*JAN. = janeiro; FEV. = fevereiro; MAR. = março; ABR. = abril; MAI. = maio; JUN. = junho; JUL. = julho; AGO. = agosto; SET. = setembro; OUT. = outubro; NOV. = novembro; DEZ. = dezembro. Localização dos postos: P1 – Alto Bela Vista; P2 – Alto Mandu; P3 – Areias; P4 – Boa Vista; P5 – Campina do Barreto; P6 – Córrego Jenipapo; P7 – Dois Irmãos; P8 – Dois Unidos; P9 – Ibura; P10 – Imbiribeira; P11 – Morro da Conceição; P12 – Nova Descoberta; P13 – Pina; P14 – Porto; P15 – Recife-Apac; P16 – San Martin; P17 – Torreão. Fonte das informações: CEMADEN (2021).

De acordo com Santos (2010), no Plano Diretor de Drenagem Urbana de Porto Alegre, estabeleceu-se o uso do Método Racional em áreas menores ou iguais 2 km² e o Método Unitário (com uso da chuva excedente pelo Método SCS) para áreas maiores que 2 km². Outros autores (Tucci, 2007; Pinto *et al.*, 1973 apud Santos, 2010) consideram que o uso do Método Racional é plausível para áreas de 2 a 5 km² e tempo de concentração menor que 1 hora. De acordo com Porto *et al.* (2004), o Método Racional é o mais utilizado para a determinação de vazões de pico em pequenas bacias, com área de até 2 km² e com baixa complexidade. Para Collischon e Dornelles (2015), esse método é ideal para bacias com área entre 1 e 3 km². O Método Racional considera o uso da Equação 1 e de um coeficiente único de deflúvio C

(coeficiente de escoamento superficial), estimado com base nas características fisiográficas da bacia. Alguns estudos sugerem diferentes tabelas para adoção do valor do coeficiente de escoamento superficial, considerando, basicamente a superfície de escoamento e/ou o tipo de uso do solo, Tabela 5.

$$Q_{\max} = 0,278 C i A \quad (1)$$

Onde: $Q_{\max}$ é a vazão máxima escoada da área de contribuição (m³/s); C é o coeficiente adimensional de escoamento superficial (ou de perdas); i é a intensidade da chuva (mm/h) referente ao tempo de concentração (t_c); e A é a área da bacia (km²).

Tabela 5. Valores para o coeficiente de escoamento superficial considerando: (1) Natureza da Superfície; e (2) Uso e ocupação do solo.

NATUREZA DA SUPERFÍCIE			USO E OCUPAÇÃO DO SOLO	
SUPERFÍCIE	INTERVALO	VALOR ESPERADO	ZONA	VALOR SUGERIDO
Asfalto	0,70 a 0,95	0,83	Centro da Cidade	0,70 a 0,95
Concreto	0,80 a 0,95	0,88	Partes adjacentes ao centro com menor densidade	0,60 a 0,70
Calçadas	0,75 a 0,85	0,80	Áreas Residenciais com poucas superfícies livres	0,50 a 0,60
Telhado	0,75 a 0,95	0,85	Áreas Residenciais com muitas superfícies livres	0,25 a 0,50
Áreas Rurais	0,0 a 0,30	-	Subúrbios com alguma edificação	0,10 a 0,25
			Matas, parques e campos de esportes	0,05 a 0,20

Fonte: Adaptado de Collischon e Dornelles (2015).

De forma geral, para o dimensionamento de um sistema de drenagem urbana, segundo Silva Júnior *et al.* (2015), considera-se, como fator chave, a chuva de projeto que advém da equação

IDF (intensidade, duração e frequência) da área, associada a um período de retorno pré-definido. Nesse contexto, Maia *et al.* (2020) afirmaram que a curva obtida da equação IDF é utilizada na

medição da quantidade de água de um ponto da bacia hidrográfica, relacionando intensidade (mm/h), duração (min) e seu tempo de retorno (anos). Nesta investigação foi utilizada a equação IDF correspondente ao município do Recife apresentada por Ramos (2010), Equação 2, considerando uma chuva de duração de 10 minutos, com tempo de retorno de 2 anos e coeficiente de escoamento superficial de 0,95 (área se refere à superfície urbanizada e centro da cidade, Tabela 5), Equação 2.

$$i = \frac{1423,97 \times T^{0,1124}}{(t_c + 21)^{0,7721}} \quad (2)$$

Onde: i é a intensidade máxima (mm/h); t_c é o tempo de concentração (min); T é o tempo de retorno (anos).

Para o cálculo da vazão escoada na sarjeta, segundo Guo (2000), a capacidade de escoamento das vias, que ocorre principalmente pelas sarjetas,

é dependente das características hidrogeométricas e limitadas pelas características de tráfego local. Segundo o autor, o princípio de cálculo emprega a Equação Simplificada de Izzard, que é uma modificação da Equação de Manning e está apresentada na Equação 3, e segundo Moraes (2015), é estabelecida a partir do coeficiente de simplificação encontrado em função da largura da via, Tabela 6, e da declividade da via.

$$Q_{\text{EscSup}} = K \times \sqrt{i} \quad (3)$$

Onde: Q_{EscSup} é a vazão do escoamento superficial pela sarjeta (m^3/s); K é o coeficiente de simplificação (m^3/s); i é a declividade da via (m/m). Em geral, quando a vazão máxima escoada da área de contribuição é maior que a capacidade de escoamento sobre a sarjeta ($Q_{\text{máx}} > Q_{\text{EscSup}}$), ocorre um ponto de alagamento e se faz necessário a implantação (ou revisão) do Sistema de Drenagem Urbano (SDU) e a colocação de uma boca de lobo (Moraes, 2015).

Tabela 6: Coeficiente de simplificação em função da largura da via.

LARGURA DA VIA (m)	3	4	5	6	7	8	9	10
K (m^3/s)	0,539	0,718	0,898	1,077	1,257	1,436	1,616	1,795

Fonte: Moraes (2015).

O armazenamento de água de chuva pode constituir uma alternativa para diminuição da ocorrência de alagamento por conta de eventos pluviométricos extremos. Dessa forma, pode-se esperar não apenas benefícios ambientais, mas também econômicos, com eventual redução na demanda por água, advinda do sistema público de abastecimento, em centros urbanos. Destaca-se, entretanto, que nessas condições, é necessário estudos específicos sobre a viabilidade e a eficiência do atendimento aos usos pretendidos, riscos sanitários, dimensionamento do sistema de captação, coleta e armazenamento, entre outros detalhes técnicos (Maia *et al.*, 2020).

Segundo Mota e Martins (2019), legislações específicas sobre coleta de água da chuva têm sido empregadas em diversas cidades do Brasil, como por exemplo São Paulo, Rio de Janeiro, Curitiba e Porto Alegre, a fim de diminuir os eventos de cheias em tais localidades. Os autores citaram, ainda, a definição de regras específicas para novos estabelecimentos, a fim, não só, de diminuir o pico das cheias, mas para armazenamento e utilização da água captada e armazenada. A utilização de tecnologias de coleta e armazenamento de água de chuva, como implantação de caixas d'água e telhados verdes, pode diminuir a quantidade de água escoada pela

sarjeta, uma vez que, parte da água de chuva que resultaria no volume de água escoada superficialmente, gerada pela área de contribuição, ficaria retida no lote.

Para estimativa do impacto do armazenamento da água de chuva na redução dos pontos de alagamento foram considerados dois cenários: uso de caixas d'água de 500 L e implantação de telhados verdes com vegetação de Coroa-de-Frade. As motivações para adoção de tais medidas são descritas a seguir.

No caso das caixas d'água de 500 L, diante das possibilidades de caixas d'água existentes no comércio, foi considerada a ação da Companhia de Saneamento do Estado de Pernambuco, a Compesa, que, no âmbito do pacote de medidas para o enfrentamento da pandemia da Covid 19 iniciou em fevereiro de 2021 a distribuição de caixas d'água de 500 L para mais de 700 clientes cadastrados na tarifa social. Um dos critérios para ser cadastrado na tarifa social é possuir contracheque; benefício social ou benefício previdenciário, no valor de até 1 (um) salário mínimo vigente (desde 1º de janeiro de 2021, o valor do salário mínimo no Brasil é de R\$ 1.100,00).

No que se refere aos telhados verdes, adotou-se como referência a melhor capacidade de

retenção encontrada por Silva (2017) em que, por meio de dados experimentais, observou uma boa capacidade de retenção com o emprego desta tecnologia. Segundo o autor, os valores de retenção observados em seu estudo foram de 75% e 86%, para os telhados verdes com emprego da vegetação Babosa e da vegetação Coroa-de-Frade, respectivamente. No experimento realizado por Silva (2017), as condições experimentadas foram: precipitação com intensidade controlada de 26 mm/h e duração de 60 minutos, vertendo um volume total de 111,0 L sobre o telhado verde Babosa e um volume total de 88,1 L sobre o telhado verde Coroa-de-Frade. Assim sendo, o telhado com Babosa reteve cerca de 83,3 L e o com Coroa-de-Frade, 75,8 L.

Diante do exposto, considerou-se a adoção das duas medidas de controle (reservatório e telhado verde) conforme os seguintes cenários:

1) Uso de caixas d'água de 500 L em cada domicílio, tendo sido considerado a quantidade de domicílios na região de 4.201 domicílios, e, portanto, a capacidade de armazenamento, nesse caso, é de 2.100.500,00 L ou 2.100,50 m³;

2) Uso de telhados verdes com modelo análogo ao utilizado por Silva (2017), com espessura de 20 cm e cobertura vegetal de Coroa-de-Frade, em que foi observado, pelo autor, a capacidade de armazenamento de 86% do volume precipitado. Neste caso, foi adotado para cada telhado a área de captação de 64,05 m², sendo a quantidade de domicílios na região de 4.201 domicílios. Para determinação do volume armazenado, foi considerado um evento

pluviométrico com duração de 1 hora em que o valor da intensidade a lâmina de água precipitada foi calculado com a equação IDF local.

Resultados

Identificação de áreas impermeáveis e de morros em Recife-PE

Apresenta-se nas Figuras 3 e 4 as imagens referentes ao processamento do NDBI no município de Recife em 28 de julho de 2013 e em 17 de outubro de 2019, respectivamente. Ressalta-se que, como já citado, valores negativos representam áreas não construídas, variando de roxo escuro, roxo claro e branco, e valores positivos correspondem a áreas construídas, sendo essas apresentadas em amarelo e vermelho (área com maior índice), como visto nas imagens. Ao analisar tais imagens, foi possível perceber que bairros que antes tinham predominância de tons representativos de áreas não construídas (roxo escuro, roxo claro e branco, ou seja, valores negativos), em 2013, passaram a ter pontos de áreas construídas, como Guabiraba, Pau Ferro, Sítio dos Pintos, entre outros, em 2019.

Percebe-se ainda que algumas regiões antes cobertas pelo amarelo, em 2013, passaram a ser vermelhas, em 2019, o que indica um aumento na quantidade de construções, como Ibura, Cohab, Vasco da Gama, Bomba do Hemetério, Morro da Conceição, Torrões, San Martin, Engenho do Meio, entre outros. Nesse contexto, é notório o aumento nas áreas construídas no município do Recife ao se comparar os dias estudados.

Figura 3. Carta georreferenciada do NDBI, em 28/07/2013.

Figura 4. Carta georreferenciada do NDBI, em 17/10/2019.

Definição da área de estudo: população em situação econômica menos favorecida

Analisando-se as RPAs com relação aos itens levantados na Tabela 3, observou-se que: a

RPA 1 destacou-se por apresentar o melhor cenário para os habitantes, afastando a RPA, dentre as demais, do cenário mais crítico em termos de vulnerabilidade sócio-econômica. Assim,

constatou-se para a RPA 1 os seguintes comparativos: maior percentual (63,64%) de bairros sem Zonas Especiais de Interesse Social (ZEIS), indicando existência de menor vulnerabilidade; além disso, observou-se a ocorrência das menores quantidades de habitantes (7.101,27 habitantes) e de domicílios (2.269,00 domicílios), bem como os menores valores de densidade demográfica (60,23 habitante/ha), e da relação morador/domicílio (2,88 moradores/domicílio), que implica na menor quantidade de pessoas afetadas com possível mau funcionamento do sistema de drenagem urbana. Ainda que tenha apresentado o menor percentual de alfabetização (considerando indivíduos a partir dos 10 anos de idade) entre as RPAs investigadas, este parâmetro não foi levado em consideração, uma vez que todas as RPAs apresentaram valores muito próximos (de 92,37% para a RPA 1 a 93,85% para RPA 3, ou seja, variação máxima de 1,48%).

No caso da RPA 2, observou-se que apesar de compreender a menor área dentre as RPAs, de 82,22 ha, concentrou a segunda maior quantidade de bairros (18), tendo, em consequência, a maior densidade demográfica (148,40 habitante/ha) e a maior relação morador/domicílio (3,34 moradores/domicílio).

A RPA 3 se destacou pela maior quantidade total de bairros (29 bairros) e de bairros sem ZEIS (10 bairros), além do maior rendimento nominal médio mensal dos domicílios (R\$ 4.332,95) e, assim como a RPA 4, não apresentou destaques em termos de valores mínimos dentre as RPAs investigadas.

No que se refere à RPA 5, esta apresentou o menor rendimento nominal médio mensal dos domicílios (R\$ 1.533,20), e o terceiro maior valor da relação morador/domicílio (3,32

moradores/domicílio), além de que todos os bairros inseridos nessa região apresentam áreas de ZEIS, indicando vulnerabilidade nesse quesito.

A RPA 6 se destacou pela maior área (486,50 ha), menor quantidade de bairros (8 bairros), maior quantidade de habitantes (47.831,25 habitantes) e de domicílios (15.060,50 domicílios).

Para definição da área de estudo, foi construída uma matriz com parâmetros de hierarquização, em que os aspectos positivos que indicam a existência de menor vulnerabilidade, conferem pontuação menor (variando de 1 a 6, pois são 6 RPAs analisadas, pela ordem inversa de agravamento), por exemplo, quanto maior o rendimento nominal médio mensal dos domicílios, menor é a vulnerabilidade, assim sendo, para os dados informados na Tabela 3, tem-se RPA 3, com parâmetro de hierarquização 1, e a RPA 5 com parâmetro de hierarquização 6. De forma contrária, foi considerado para os aspectos negativos que indicam maior vulnerabilidade, e, portanto, com pontuação maior (de 1 a 6, pois são 6 RPAs analisadas, pela ordem direta de agravamento). Foram considerados como aspectos positivos: área, bairros sem ZEIS, e rendimento nominal médio mensal dos domicílios. Foram considerados como aspectos negativos: quantidade de bairros, de população e de domicílios, densidade demográfica, e relação moradores/domicílio. Após a distribuição dos pesos e o somatório das pontuações obtidas em cada item por RPA, Tabela 7, observou-se que as RPAs 2 e 5 contabilizaram a mesma pontuação na hierarquização. Assim sendo, considerou-se como prioridade, para a realização do estudo, dentre as duas RPAs 2 e 5, a que se destacou pela maior quantidade de pessoas impactadas, em termos de densidade demográfica, que foi a RPA 2.

Tabela 7. Hierarquização dos aspectos sócio-econômicos para investigação da vulnerabilidade.

RPA	PARÂMETROS								
	ÁREA	QT. BAIRROS	BAIRROS SZ	POPULAÇÃO	DS. DEM.	DM.	MOR./DM.	RNMMD	TOTAL
1	5	4	1	1	1	1	1	5	19
2	6	5	3	3	6	3	6	3	35
3	3	6	2	2	3	2	5	1	24
4	2	3	4	5	2	5	2	2	25
5	4	2	6	4	5	4	4	6	35
6	1	1	5	6	4	6	3	4	30

*RPA = Região Político Administrativa; Qt. = quantidade; SZ = sem ZEIS; Ds. Dem. = densidade demográfica; Dm. = domicílios; Mor./Dm. = moradores/domicílios; RNMMD = Rendimento Nominal Médio Mensal dos Domicílios.

Definição da área de estudo: Pluviometria, Drenagem, Área Construída, e Declividade do Relevo.

Com relação à pluviometria, analisando os dados dos 17 postos pluviométricos existentes na

cidade de Recife, no ano de 2019, observou-se na Tabela 4 que a maior precipitação ocorreu, no mês de junho, no Posto Porto (P14) e foi de 230,20 mm.

Sobre os elementos do sistema de drenagem implantados no município de Recife, Lafayette *et al.* (2018) elaboraram uma análise

comparativa em relação à extensão das redes de condutos, das redes de canaletas, dos poços de visitas, das bocas de lobo e das caixas de gaveta, como detalhado na Tabela 8, na qual também consta os valores médios em extensão/unidades para cada um dos elementos. Observando os dados constantes na Tabela 8, verifica-se que as RPAs 6 e 3 destacam-se pelas maiores extensões da rede de condutos (268.463 m) e da rede de canaletas (158.353 m), respectivamente. Em termos de quantidade de elementos de microdrenagem, os destaques foram para as RPAs 1, 4 e 6, para poços de visita (3.422 unidades), para bocas de lobo (3.488 unidades) e para caixas de gaveta (12.564 unidades). Silva Júnior (2015) destacou, no ano de realização de sua pesquisa, que o município de Recife apresentou 159 pontos críticos de alagamento, sendo que em 29 vias observaram-se problemas de alagamento em toda sua extensão,

principalmente nos bairros de Jardim São Paulo (RPA 5) e Arruda (RPA 2), na qual encontra-se ruas integralmente alagadas.

Sobre os resultados do processamento das imagens, com relação à quantidade de área construída, determinada a partir do emprego do Índice de Construção por Diferença Normalizada (NDBI), observou-se que a maior quantidade nas RPAs 2, 5 e 6, enquanto as menores quantidades foram encontradas nas RPAs 3 e 4. De forma complementar pode-se ainda considerar a quantidade de áreas de vegetação por RPA. Sobre isso, Paz (2016) realizou uma análise comparativa para a cidade de Recife e concluiu que a RPA 2 corresponde a área com menores números, tendo em somatório de superfície um valor igual a 211.075,73 m², o que corresponde a apenas 7,07% do total da vegetação da cidade.

Tabela 8. Elementos de drenagem por RPA.

DRENAGEM	RPA 1	RPA 2	RPA 3	RPA 4	RPA 5	RPA 6	Média
Rede de condutos (m)	128.058	125.444	114.899	248.036	172.379	268.463	176.213
Rede de canaletas (m)	10.244	103.454	158.353	21.170	29.560	75.251	66.339
Poço de visita (un.)	3.422	2.310	2.740	2.887	2.097	2.740	2.699
Boca de lobo (un.)	2.521	2.165	2.114	3.488	2.716	2.591	2.599
Caixa de gaveta (un.)	4.224	4.953	3.949	10.673	7.547	12.564	7.318

*un. = unidade.

Fonte: Lafayette *et al.* (2018).

No que se refere à existência de morros, identificado a partir do sombreamento, estes estiveram presentes nas RPAs 2, 3, 4 e parte de 5 e 6. A partir da análise das curvas de nível, observou-se que as RPAs com morros mais íngremes foram a 3 e parte de 5 e 6, enquanto as menos íngremes foram as RPAs 2 e 4. A RPA 1 se destacou por praticamente não apresentar áreas de morros. Considerando que os resultados obtidos da análise da vulnerabilidade da população em situação econômica menos favorecida e da análise da declividade e existência de morros, sugere a RPA 2 como a mais vulnerável, esta foi a Região Política Administrativa definida. Apresenta-se na Figura 5 as curvas de nível obtidas da RPA 2.

Detalhamento da área de estudo

Dentro da RPA de estudo, considerou-se como área de investigação o bairro de Dois Unidos, onde apresenta-se na Figura 6 o detalhamento em que constam as áreas impermeáveis.

Estima-se o somatório dessa área como 1.369.186,11 m², sendo esse montante formado por 1.303.466,96 m² e 65.719,15 m² de edificações e das principais avenidas asfaltadas, respectivamente. Em seguida, foram identificadas as áreas de contribuição para os logradouros (conforme Figura 7, no que diz respeito às edificações), para estabelecimento da vazão de cada área.

Figura 5. Modelo Digital de Elevação do Terreno (MDE) - Curvas de Nível (RPA 2).

Figura 6. Modelo Digital de Elevação do Terreno (MDE) - Curvas de Nível (RPA 2).

Para a intensidade da chuva máxima, considerou-se um tempo de retorno de 2 anos e chuva com duração de 10 minutos, valores usuais nesse tipo de aplicação (Ramos, 2010), assim foi encontrada a intensidade de 108,61 mm/hora. Aplicou-se, então, o Método Racional para cada rua, sendo que, por se tratar de uma área urbanizada, utilizou-se como coeficiente de escoamento superficial, o valor de 0,95, conforme Tabela 5. A vazão de contribuição ($Q_{máx}$) para cada logradouro está apresentada na Tabela 9.

Figura 7. Identificação das áreas de contribuição para cada via de tráfego.

Tabela 9. Cálculo para avaliação se ocorre alagamento nos logradouros principais do bairro de Dois Unidos.

Ord.	Logradouro	$Q_{máx}$ (m³/s)	LV (m)	K (m³/s)	Curvas de Nível			i (m/m)	A_c (km²)	Q_{EscSup} (m³/s)	ΔQ (m³/s)
					MaC (m)	MeC (m)	ΔLC (m)				
1	Av Chagas Ferreira	3,597	5,94	1,077	30	18	887,63	0,014	0,126	0,125	3,472
2	Rua Canavieira	0,878	6,20	1,257	60	20	324,52	0,123	0,031	0,441	0,437
3	Sub Alto do Cap.	0,230	4,24	0,898	52	36	284,91	0,056	0,008	0,213	0,017
4	Rua Hilderbrando de Vasconcelos	2,457	8,97	1,616	36	12	2519,71	0,01	0,086	0,158	2,3
5	Rua Jornalista Nelson Firmo	0,675	6,39	1,257	30	22	50,24	0,159	0,024	0,502	0,173
6	Rua da Mata	0,574	4,33	0,898	70	66	127,02	0,031	0,02	0,159	0,414
7	Rua Pedro Elias de Lima	0,296	6,59	1,257	64	60	406,49	0,01	0,01	0,125	0,171
8	Rua Divisópolis	0,811	5,07	1,077	66	32	388,01	0,088	0,028	0,319	0,492
9	Rua Leôncio Rodrigues	0,781	7,53	1,436	34	20	166,95	0,084	0,027	0,416	0,365
10	Rua Alto Chagas Ferreira	0,486	6,03	1,257	70	64	51,23	0,117	0,017	0,43	0,056
11	Rua Sd. 5239	0,767	5,46	1,077	62	22	249,65	0,16	0,027	0,431	0,336
12	Rua Dorândia	0,505	9,24	1,795	66	62	53,15	0,075	0,018	0,492	0,012
13	Rua Mamede Coelho	1,852	4,9	0,898	14	10	750,26	0,005	0,065	0,066	1,787
14	Rua José Menezes Lyra Filho	1,471	7,03	1,436	60	24	312,67	0,115	0,051	0,487	0,984
15	Rua Expedicionário Teodoro Sativa	1,533	6,16	1,257	64	24	461,37	0,087	0,054	0,37	1,163
16	Rua Vinte e Um de Junho	0,669	6,65	1,257	64	30	342,01	0,099	0,023	0,396	0,272
17	Rua Tupiraçaba	0,602	4,74	0,898	66	46	145,67	0,137	0,021	0,333	0,27
18	Rua Arquelaú Silveira Lira	0,424	9,12	1,795	20	18	43,77	0,046	0,015	0,384	0,041
19	Rua Manoel Lopes de Albuquerque	0,334	3,71	0,718	62	34	152,58	0,184	0,012	0,308	0,027

* $Q_{máx}$ = vazão de contribuição; LV = largura da via; K = coeficiente de simplificação; MaC = maior cota; MeC = menor cota; ΔLC = distância entre cotas; i = declividade; A_c = área de contribuição; Q_{EscSup} = vazão escoada pela sarjeta; $\Delta Q = Q_{máx} - Q_{EscSup}$, que sendo positivo representa PONTO DE ALAGAMENTO.

Avaliação sobre a necessidade de ações para evitar alagamentos

Para investigação sobre a necessidade de ações que visem evitar/minimizar os alagamentos, foram comparados os valores da vazão da área de contribuição com os valores da vazão de transporte da sarjeta, encontradas a partir do Método de Racional e Equação de Izzard, detalhados anteriormente. Dessa forma, tem-se na Tabela 9 os

valores utilizados nos cálculos, bem como os resultados obtidos. Em função dos valores de largura das vias, Tabela 6, determinados com o emprego do Sensoriamento Remoto, foram definidos os respectivos valores de K (m³/s). Outros valores foram obtidos das imagens: maiores e menores cotas, e as distâncias entre esses dois pontos. Em seguida foram calculadas a declividade e a área de contribuição (impermeável), referente a

cada logradouro. Com esses dados, dispostos em planilha eletrônica, foram calculadas: vazão de escoamento e vazão de contribuição para cada logradouro. Da comparação de tais valores, pôde-se observar que todos os pontos estudados foram caracterizados como pontos de alagamento, reafirmando que o bairro de Dois Unidos apresenta muitas áreas de alagamento, em caso de chuvas intensas, indicando a necessidade de implantar ferramentas para minimização dos impactos consequentes.

Cálculo do potencial de reservação da água de chuva

Dos resultados apresentados na Tabela 9, observou-se que, no cenário de chuva intensa, ocorre alagamento em todos os pontos analisados, uma vez que a vazão gerada pela área impermeabilizada (edificações e vias públicas) foi maior que a capacidade de transporte da sarjeta. Assim sendo, foram analisadas duas possibilidades para redução do volume escoado. Somando os valores de vazão gerados pela área impermeabilizada, obteve-se o valor de 18,942 m³/s, que corresponde ao volume de 68.191,20 m³ ao longo do período de 1 hora (3600 segundos). Nesse período, o volume gerado pela vazão escoada pela sarjeta (6,155 m³/s) é de 22.158,00 m³. Observou-se, assim, que no intervalo de 1 hora, gera-se um excedente de vazão total de 12,787 m³/s, o que corresponde a 46.033,30 m³.

Com a instalação de caixas d'água (de 500 L) em cada um dos 4.201 domicílios seria possível reter 2.100,50 m³ de água de chuva. Entretanto, esse volume é insuficiente para resolver o problema local de alagamento.

No que se refere ao emprego dos telhados verdes, foi adotado, na análise, um telhado verde com 20 cm de altura de substrato e capacidade de retenção de 86% de seu volume. Assim sendo, considerando a implantação de telhados verdes nos 4.201 domicílios, com área de telhado aproximada de 64,05 m², e sendo a intensidade de precipitação adotada neste trabalho de 108,6066 mm, ou seja, 0,1086066 m, o volume de água total disponível para armazenamento é de 29.223,22 m³, e 86% desse montante, que é 25.131,97 m³, seria retido pelos telhados verdes.

Em relação aos custos, conforme levantamento de preços realizado em 2020, foi encontrado o valor médio de custo de R\$ 250,00 e de R\$ 1.533,36 para a implementação de caixas d'água de 500 L e de telhados verdes, respectivamente, ambos em cada domicílio.

Conclui-se, portanto, que as duas ações realizadas conjuntamente na área de Dois Unidos

ainda que não resolvam o problema de alagamento, podem contribuir substancialmente com a redução das dimensões do projeto de drenagem urbana no local, uma vez que reduziria o volume excedente em cerca de 45% (de 46.033,30 m³ para 20.902,23 m³).

A partir do levantamento de dados referentes à descrição da identificação das áreas vulneráveis, foi possível avaliar padrões referentes a quantidade de áreas construídas, áreas com morros, parâmetros socioeconômicos e dados pluviométricos de toda a extensão do município. Após análises, foi definido que o bairro de Dois Unidos seria adotado como a área que mais atendeu aos critérios de vulnerabilidade considerados relevantes, uma vez que possui área com grande quantidade de construção, existência de morros, padrões socioeconômicos que indicam vulnerabilidade e registros de casos recorrentes de alagamentos em estudos anteriores.

Sobre o potencial de reservação de água, após análises comparativas considerando o uso de caixas d'água com capacidade de 500 L e de telhados verdes. Observou-se que as duas soluções implicam em diferentes custos de implementação e diferentes capacidades de reservação. Em relação aos custos, os valores para implantação dos telhados verdes são mais elevados que os referentes à aquisição das caixas d'água, entretanto, vale citar, que a tecnologia de telhados verdes oferece uma série de outros benefícios, sendo assim, uma alternativa com maiores vantagens a longo prazo, quando comparada com a caixa d'água, apesar do maior custo inicial.

Sobre o impacto em relação ao armazenamento da água captada, pode-se concluir que devido à grande quantidade de pontos de alagamento no bairro com a chuva máxima, torna-se de extrema importância a alternativa de reservação de água como ferramenta para diminuição do escoamento superficial. Nesse contexto, foi observado que, para uma chuva intensa de duração igual a 1 hora, tem-se um volume excedente de 46.033,30 m³. No cenário descrito, a capacidade de retenção com o uso de caixas d'água foi de 2.100,50 m³ e no caso de telhados verdes foi de 25.131,97 m³, valores que diminuem o volume de água escoado e contribuem para um menor impacto na magnitude dos alagamentos.

Ressalta-se a importância da aplicação de sensoriamento remoto como ferramenta indispensável para a construção deste trabalho, desde a etapa de identificação de áreas vulneráveis, até a estimativa do impacto no armazenamento de água.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco (FACEPE) pelo incentivo a pesquisa e concessão de bolsa de Pós-Graduação da segunda autora; ao *United States Geological Survey* (USGS) pela aquisição da imagem de satélite; Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN) pelo banco de dados hidrológicos; ao Projeto de pesquisa "Coberturas vegetal e hídrica de bacias hidrográficas utilizando imagens orbitais no estado de Pernambuco", aprovado na Chamada Universal MCTIC/CNPq 2018, Processo Nº 433914/2018-1 da penúltima autora; e à PROPESQI/UFPE pelo apoio financeiro ao projeto da última autora (Processo No. 23076.041635/2020-55-Edital Propesqi No. 07/2020).

Referências

- Albuquerque, R.T.D.B., Dantas, C.E.O., Araújo, E.L., Vasconcelos, T.L., 2013. Distribuição temporal das precipitações no município do Recife. *Revista Brasileira de Geografia Física* 6, 2, 245-252.
- Assis, H.M.B., 2001. Atividades impactantes sobre o meio ambiente da Região Metropolitana do Recife. CPRM, Recife, PE, 81 p.
- Barros, C.B.R., Soares, W., Holanda, M.A.C. R., 2021. Influence of the substrate of green roofs in the reduction of surface runoff when subjected to the climatic conditions of the Metropolitan Region of Recife. *Research, Society and Development* 10, 2-3.
- Borges, I.M.S., Lima, C.A.O., Fernandes, A.C.G., Nunes, E.A.C., Alves, A.E.F., 2020. The urbanization process and its environmental impacts in the City of Fagundes, Paraíba: historical outline. *Research, Society and Development*, 9, 4-6.
- Castro, A.S., Goldenfum, J.A., 2010. Uso de telhados verdes no controle quantitativo do escoamento superficial urbano. *Revista Atitude* 7, 75-81.
- Cavalcanti, R.M.S., 2012. Indicadores geomorfológicos, riscos e o planejamento urbano - uma apreciação teórico integradora para a cidade do Recife - PE. Tese do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFPE, Recife, PE, 184 f.
- CEMADEN - Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais. Pluviômetros Automáticos. Disponível em <<http://www.cemaden.gov.br/pluviometros-automatico/>>. Acesso em 20 de setembro de 2021.
- Collischonn, W., Dornelles, F., 2015. Hidrologia para engenharia e ciências ambientais. 2ª Edição. Porto Alegre. Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH).
- França, B.V., Suassuna, C.C.A., 2018. Avaliando resiliência urbana institucional frente a eventos hidrológicos extremos: o caso de Camaragibe-PE. *Revista Paisagens & Geografias* 3, 2, 21-32.
- França, A.F., Tavares Junior, J.R., Moreira Filho, J.C.C., 2012. Índices NDVI, NDWI e NDBI como ferramentas ao mapeamento temático do entorno da lagoa olho d'água, em Jaboatão dos Guararapes-PE. *Anais do IV Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação*, Recife, PE, 1-9.
- Guo, J.C.Y., 2000. Street Storm Water Conveyance Capacity. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 126, 2, 119.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2015. Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios - PNAD, 2013: síntese de indicadores. Rio de Janeiro, RJ, 296 p.
- INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2020. Topodata. Disponível em: <<http://www.webmapit.com.br/inpe/topodata>> Acesso em: 26 de jan. de 2020.
- Lafayette, F.B., Dantas, M.S., Montenegro, S. M.G.L.; Silva, P.O.; Gusmão, R.D., 2018. Plano de gestão da manutenção da rede de drenagem da cidade do Recife. *Anais do XIV Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste*, Maceió, AL, 5-6.
- Maia, A.C.J., Dâmaso, M.L.F., Silva, S.G., Silva Junior, T.L., Melo, M.B., 2020. Reservatório para armazenamento de água da chuva em edificações na cidade de Maceió - AL. *Caderno de Graduação Ciências Exatas e Tecnológicas* 6, 2, 219-231.
- Mediondo, E.M., Cunha, A.R., 2004. Experimento hidrológico para aproveitamento de águas de chuva usando coberturas verdes leves. São Carlos, SP. USP/SHS - Processo FAPESP 03/06580-7, 41 p.

- Melo, C.R., Cirilo, J.A., Amorim, S.F., Alves, F.H.B., Guedes, P.A., 2020. Avaliação dos índices de precipitação nos deslizamentos de terra na comunidade de Lagoa Encantada (Ibura - Recife) entre os Anos de 2013 e 2017. Anais do XV Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, Recife, PE, 10 p.
- Ministério das Cidades, 2009. Guia para regulamentação e implementação de Zonas Especiais de Interesse Social – ZEIS em Vazios Urbanos, Brasília: Ministério das Cidades, 55 p.
- Moraes, A.P., 2015. Procedimentos técnicos de dimensionamento da microdrenagem do Município de Santo André. Anais da XIX Exposição de Experiências Municipais em Saneamento, Poços de Caldas, MG, 15 p.
- Mota, H.S., Martins, J.H., 2019. Avaliação da capacidade de captação e armazenamento de água das chuvas no alto Vale do Jequitinhonha: uma proposta para mitigação do efeito da escassez de água na região. Humanidades & Tecnologia em Revista, 18, 13, 188-202.
- Moura, E.F.S., Silva, S.R., 2015. Estudo do grau de impermeabilização do solo e propostas de técnicas de drenagem urbana sustentável em área do Recife-PE. Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades 3, 15, 78-93.
- Nagem, F.R.M., 2008. Avaliação econômica dos prejuízos causados pelas cheias urbanas (Rio de Janeiro). Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – RJ, COPPE, 114 p.
- Paz, U.F., 2016. Gestão de áreas verdes públicas na cidade do Recife, Pernambuco, Brasil. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Gestão Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco, 197 p.
- Pompêo, C.A., 2000. Drenagem urbana sustentável. Revista Brasileira de Recursos Hídricos 5, 1, 15-23.
- Porto, R., Zahed, K., Tucci, C., Bidone, F. Drenagem Urbana. In: Tucci, C. E. M., 2004. org. Hidrologia-Ciência e Aplicação. Porto Alegre: ABRH.
- Ramos, A.M., 2010. Influência das mudanças climáticas devido ao efeito estufa na drenagem urbana de uma grande cidade. Tese de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, 139 f.
- Razzaghmanesh, M., Beecham, S., Salemi, T., 2016. The role of green roofs in mitigating urban heat island effects in the metropolitan area of Adelaide, South Australia. Urban Forestry & Urban Greening 15, 89-102.
- Secretaria Executiva de Defesa Civil de Recife, 2020. Banco de dados Recife.. Disponível em: <<http://dados.recife.pe.gov.br/>>. Acesso em: 20 fev. 2021.
- Recife, 2015. Lei nº 18.112 que dispõe sobre a melhoria da qualidade ambiental das edificações por meio da obrigatoriedade de instalação do telhado verde, e construção de reservatórios de acúmulo ou de retardo do escoamento das águas pluviais para a rede de drenagem e dá outras providências. 1 p.
- Remote Pixel. Disponível em: <<https://remotepixel.ca/>> Acesso em: 27 de fev. 2021.
- Santos, L.C.C., 2010. Estimativa de vazões máximas de projeto por métodos determinísticos e probabilísticos. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo, 173 p.
- Santos, P.T.S., Santos, S.M.; Montenegro, S.M.G.L., Coutinho, A.P., Moura, G.S.S., Antonino, A.C.D., 2013. Telhado verde: desempenho do sistema construtivo na redução do escoamento superficial. Ambiente Construído, 13 (1), 161-174.
- Schlickmann, R.L., Back, A.J., 2020. Avaliação de métodos de estimativa de vazão máxima para dimensionamento de bueiros. Revista Técnico-Científica de Engenharia Civil 3, 1, 16 p.
- Silva, F.M., Costa Júnior, N.P., Lima, Z.M.C., 2014. Avaliação microclimática de Natal/RN através de técnicas de sensoriamento remoto: uma contribuição aos estudos do clima urbano. Sociedade e Território 26, 2, 163 - 180.
- Silva Júnior, M.A.B., 2015. Alternativas compensatórias para controle de alagamentos em localidade do Recife-PE. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em

- Engenharia Civil da Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco, Recife, 153 p.
- Silva, T.F., 2017. Tecnologia alternativa em drenagem urbana: telhado verde. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco, 136 p.
- Silva, V. M., 2021. Propostas de soluções para a urbanização sustentável das vilas da Paz e Miguel Inácio Curi na Zona Leste de São Paulo: Componentes relativos ao Saneamento Básico. Trabalho de Conclusão de Curso de graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de São Paulo, Santos, SP, 95 f.
- Souza, W.M., Azevedo, P.V.; Araújo, L.E., 2012. Classificação da precipitação diária e impactos decorrentes dos desastres associados às chuvas na cidade do Recife-PE. *Revista Brasileira de Geografia Física* 2, 250-268.
- Teotônio, I., Silva, C.M., Cruz, C.O., 2018. Ecosolutions for urban environments regeneration: the economic value of green roofs. *Journal of Cleaner Production* 199, 121-135.
- Tucci, C.E.M., 2007. Inundações urbanas: impactos da urbanização. Porto Alegre: Ed. ABRH/RHAMA, 87-124.
- Zha, Y.; Gao, J.; Ni, S., 2003. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. *International Journal of Remote Sensing* 24, 583–594.