

Telhado verde como técnica compensatória para mitigação do escoamento superficial em drenagem urbana

Green roof as a compensatory technique for mitigating surface runoff in urban drainage

Tejado verde como técnica compensatoria para mitigación del desagüe superficial en drenaje urbano

Resumo

Para estabelecer o equilíbrio entre meio ambiente e desenvolvimento, as cidades necessitam cada vez mais adaptar suas edificações aos novos conceitos de Desenvolvimento de Baixo Impacto (DBI), cujo princípio é resgatar padrões hidrológicos existentes antes da urbanização, a exemplo das técnicas compensatórias em drenagem urbana, como os telhados verdes. Este trabalho propõe uma análise da atenuação da vazão de pico e da redução do escoamento superficial com a utilização dos telhados verdes em quatro bacias urbanas do município de Fortaleza/CE, onde são estabelecidos cenários com dois tipos de espessuras e inclinações diferentes com o propósito de evidenciar a influência dessas características na eficiência de cada sistema de naturação. A mitigação do escoamento superficial foi mais favorável no cenário que apresenta 60% das edificações com coberturas verdes, inclinação de até 15° e espessura da camada de substrato de 20 cm, cuja redução do pico de vazão observada foi de 23,65%, já no cenário que apresenta 60% das edificações com coberturas verdes, inclinação superior a 15° e espessura da camada de substrato de 12 cm, a redução da vazão foi de 14,73%. A técnica compensatória dos telhados verdes mostra-se capaz de reduzir o escoamento superficial direto e minimizar as águas despejadas no sistema de drenagem urbana, melhorando, conseqüentemente, as condições de inundações e alagamentos dentro das cidades. Todavia, constata-se que sua eficiência é altamente influenciada pela inclinação e espessura da camada de solo.


Palavras-chave: Telhados verdes; Escoamento superficial; Técnicas compensatórias; Drenagem urbana.

Abstract

To establish a balance between the environment and development, cities increasingly need to adapt their buildings to the new concepts of Low Impact Development (DBI), whose principle is to rescue existing hydrological patterns before urbanization, such as compensatory techniques in urban drainage like green roofs. This work proposes an analysis of the attenuation of peak flow and the reduction of surface runoff with the use of green roofs in four urban basins in the city of Fortaleza/CE, where scenarios with two types of thicknesses and different inclinations are established with the purpose of to show the influence of these characteristics on the efficiency of each naturation system. The mitigation of surface runoff was more favorable in the scenario that presents 60% of the buildings with green roofs, an inclination of up to 15° and a thickness of the substrate layer of 20 cm, whose peak flow reduction observed was 23.65%, in the scenario that presents 60% of the buildings with green roofs, slope higher than 15° and substrate layer thickness of 12 cm, the flow reduction was 14.73%. The compensatory technique of green roofs can reduce direct surface runoff and minimize the water discharged into the urban drainage system, consequently improving the flooding conditions within cities. However, its efficiency seems highly influenced by the slope and thickness of the soil layer.

Keywords: Green roofs; Surface runoff; Compensatory techniques; Urban drainage

Lídia Nunes de Sousa 
lidanunes06@gmail.com

Anísio de Sousa Meneses Filho 
Universidade de Fortaleza
(Unifor)
anisiomeneses@unifor.br

Resumen

Para establecer el equilibrio entre medio ambiente y desarrollo, las ciudades necesitan cada vez más adaptar sus edificaciones a los nuevos conceptos de Desarrollo de Bajo Impacto (DBI), cuyo principio es rescatar estándares hidrológicos existentes antes de la urbanización, a ejemplo de las técnicas compensatorias en drenaje urbano, como los tejados verdes. Este trabajo propone un análisis de la atenuación del flujo máximo y de la reducción del desagüe superficial con la utilización de los tejados verdes en cuatro cuencas urbana del municipio de Fortaleza-CE, donde son establecidos escenarios con dos tipos de grosor e inclinaciones diferentes con el propósito de evidenciar la influencia de estas características en la efectividad de cada sistema de naturación. La atenuación del desagüe superficial fue más favorable en el escenario que presenta 60% de las edificaciones con coberturas verdes, inclinación de hasta 15° y espesor de la capa de substrato de 20cm, cuya reducción del flujo máximo observado fue de 23,65%, ya en el escenario que presenta 60% de las edificaciones con coberturas verdes, inclinación superior a 15° y espesor de la capa de substrato de 12cm, la reducción del flujo fue de 14,73%. La técnica compensatoria de los tejados verdes se muestra capaz de reducir el desagüe superficial directo y minimizar las aguas tiradas en el sistema de drenaje urbano, mejorando, consecuentemente, las condiciones de inundaciones dentro de las ciudades. Todavía, se comprueba que su eficiencia es altamente influenciada por la inclinación y espesor de la capa de suelo.

Palabras clave: *Tejados verdes; Desagüe superficial; Técnicas compensatorias; Drenaje urbano.*

1 Introdução

Ao longo dos anos, a população tem ocupado cada vez mais os espaços urbanos, geralmente de forma não planejada, modificando assim o ciclo hidrológico e sobrecarregando o sistema de drenagem dessas localidades, fazendo surgir as cheias urbanas e consequentemente trazendo prejuízos sociais e econômicos para a própria população.

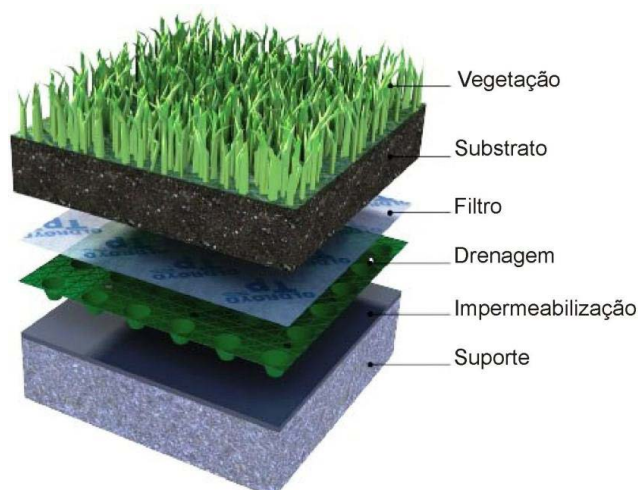
A drenagem urbana, como um conjunto de medidas que visa à redução de danos decorrentes dos alagamentos, vem para equacionar tal problema. Inicialmente os projetos de drenagem surgem com uma concepção higienista com um viés de atuação local, onde a preocupação limita-se a transferir os problemas de alagamentos, através de canalizações, para jusante, sem considerar a integração do sistema como um todo, ou seja, do ponto de vista do ciclo hidrológico. Tal prática torna-se insustentável, porque à medida que a população cresce, aumentam-se as vazões de cheias necessitando de investimentos para ampliação da rede de drenagem existente.

Em busca de atingir padrões de escoamento de uma bacia não urbanizada, buscando compensar os efeitos da urbanização sobre os processos hidrológicos, surgem as técnicas compensatórias, com uma abordagem ambientalista, preocupada com a sustentabilidade do meio urbano. Como principais técnicas, podemos citar os telhados verdes, as trincheiras de infiltração, valas de infiltração, poços de infiltração, pavimentos permeáveis, bacias de retenção e bacias de retenção.

As técnicas compensatórias englobam ações estruturais, ou seja, aquelas que necessitam da intervenção de obras de engenharia e ações não estruturais que correspondem à aplicação de regulamentos, normas e outros dispositivos que não necessitam da interferência através de obras (CRUZ; TUCCI; SILVEIRA, 1998).

Este trabalho apresenta um estudo sobre o uso de uma medida estrutural de controle na fonte, isto é, de controle pontual, como uma das possíveis soluções para a redução de enchentes em bacias urbanas, que são os telhados verdes, os quais, de forma simplificada, representam um sistema composto por camadas de impermeabilização, drenagem, substrato (camada de solo) e vegetação, conforme ilustrado na Fig.1.

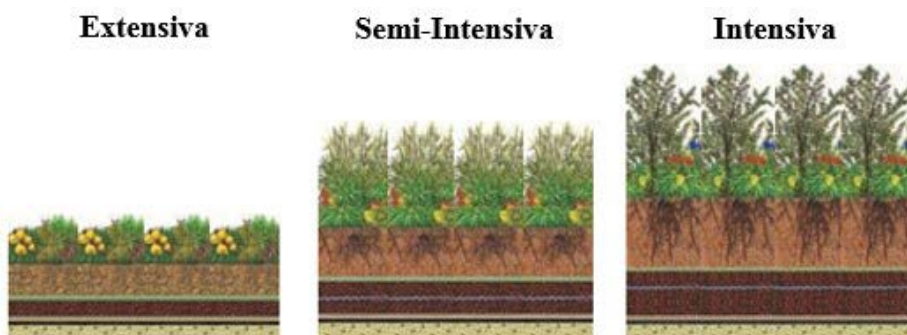
Figura 1 – Camadas de um telhado verde



Fonte: Stahlhöfer e Pereira, 2013.

As coberturas verdes classificam-se de diversas maneiras, a mais comum está relacionado ao porte (Fig.2). Elas podem ser extensiva (menor porte – até 100 kg/m²), semi-intensiva (porte intermediário – de 100 a 700 kg/m²) e intensiva (maior porte – de 700 a 1.200 kg/m²). Supomos, para o estudo de caso, o sistema extensivo com plantas da espécie suculenta (onze horas), por possuir maior resistência em ambientes agressivos, menor custo de implantação e baixo investimento em manutenção.

Figura 2 – Ilustração das classes de coberturas verdes



Fonte: Garrido Neto, 2016.

Os benefícios dos telhados verdes abrangem desde vantagens sociais, como contato com a vida vegetal para conforto psicológico, diversidade visual no ambiente urbano e evita a ocorrência de cheias, portanto a mobilização da população local; vantagens econômicas, tais como economia de energia no resfriamento do ambiente, redução dos prejuízos por alagamentos e redução do dimensionamento das galerias pluviais; vantagens ambientais, assim como a redução do efeito da ilha de calor, retenção dos particulados da poluição atmosférica e a promoção da biodiversidade.

A preocupação com a sustentabilidade do meio ambiente, as constantes manchetes nos meios de comunicação sobre os problemas de enchentes que atingem a população mais carente, a escassez de experimentos sobre esta técnica em países com aspectos de clima tropical como o Brasil e também a falta de disciplinamento no campo legislativo para implementação dessa técnica de mitigação, principalmente no município de Fortaleza/CE, são as motivações para a realização deste estudo.

Sendo assim, este trabalho tem como principal objetivo avaliar o efeito da utilização de telhados verdes em bacias hidrográficas urbanizadas com relação ao escoamento superficial, no município de Fortaleza/CE, buscando apresentar um estudo comparativo de vazões de escoamentos gerados, antes e depois da aplicação dos telhados verdes, avaliar a capacidade de cada sistema de telhado verde na retenção do escoamento superficial e analisar a influência da inclinação e da espessura da camada de substrato das coberturas verdes na redução do pico de vazão.

2 Metodologia

2.1 Área de estudo

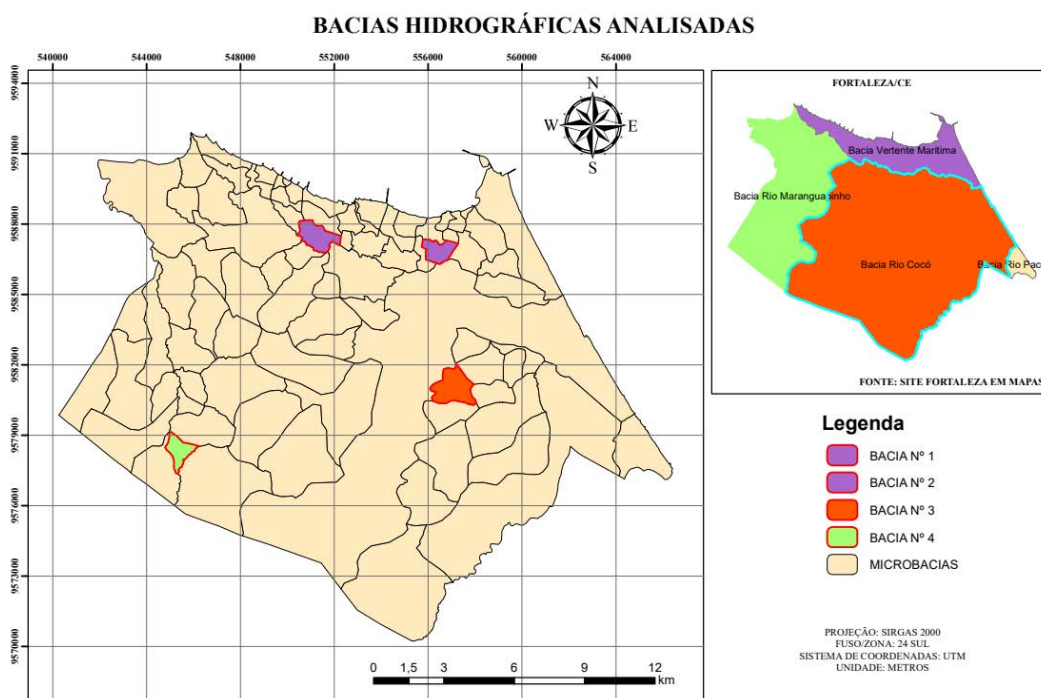
Obtidas no site Fortaleza (2018), mediante arquivos do formato *shapefile*, as bacias hidrográficas urbanas analisadas para o desenvolvimento deste trabalho situam-se na capital do estado do Ceará. Localizada no litoral do estado, tendo, baseado no último censo, uma população de 2.452.185 habitantes com uma densidade populacional de 7.786,44 hab/km² e estimativa de 2.669.342 habitantes para 2019, Fortaleza possui área territorial de 312,353 km² (IBGE, 2019).

Por ser uma cidade litorânea, Fortaleza tem altas temperaturas e pouca amplitude térmica. Com um clima tropical chuvoso, caracterizado por Köppen como do tipo “Aw”, o município apresenta temperatura média acima dos 25°C, com umidade relativa do ar bastante elevada e poucas variações (AGUIAR *et al.*, 2004).

De acordo com a Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME, 2023), a precipitação média anual é de 1.444,6 mm, com chuvas irregulares durante todo o ano, sendo abril o mês mais chuvoso e outubro o mês de menor precipitação. Fortaleza tem altitude média de 16 metros, acima do nível do mar, sendo a capital brasileira mais próxima da Europa.

As bacias analisadas neste estudo tiveram como critério de escolha o tamanho, devido à limitação do método racional, no máximo até 3 km², e, também, a escolha de pelo menos uma microbacia de cada bacia hidrográfica do município de Fortaleza/CE, como exibe a Fig.3

Figura 3 – Mapa de localização das bacias



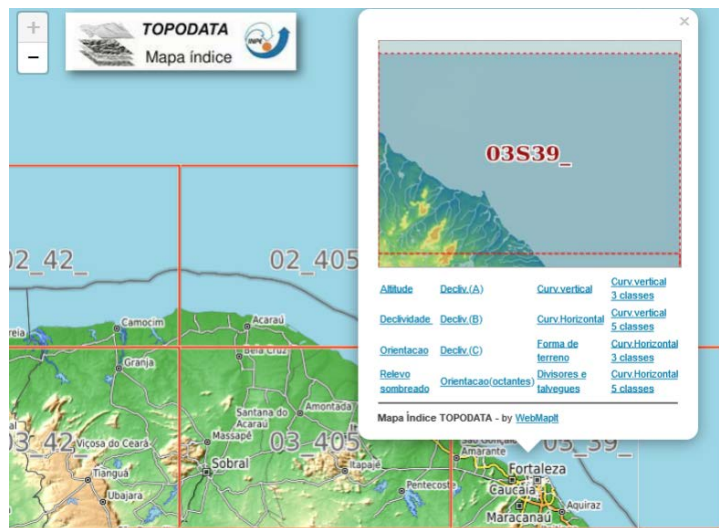
Fonte: Elaborado pelos autores, 2020.

2.2 Aplicação do geoprocessamento

O geoprocessamento utilizado no presente trabalho fez uso dos arquivos de dados de quatro bacias hidrográficas já delimitadas e do programa computacional ArcGIS® (Licença Unifor).

Em seguida, foi obtido em TOPODATA – Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil, do site do Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE, 2020), o Modelo Digital de Elevação (MDE) da cidade de Fortaleza, que possibilitou a geração das curvas de nível das áreas de interesse, como mostrado na Fig.4.

Figura 4 – MDE de Fortaleza/CE



Fonte: INPE, 2020.

Com o programa ArcGIS®, foi feito um tratamento dos dados do MDE para corrigir possíveis erros altimétricos e definir projeções, a fim de extrair as curvas de nível e a rede de drenagem idealizada das bacias hidrográficas em análise. Além disso, algumas áreas significativas que não estavam disponíveis inicialmente nos arquivos obtidos no site da Prefeitura de Fortaleza tiveram que ser vetorizadas, a fim de obter um valor de vazão mais próximo possível da realidade, e, por fim, ainda por meio do programa ArcGIS®, foram levantados todos os dados necessários para o cálculo das vazões de pico nas quatro bacias hidrográficas.

2.3 Estimativa da vazão de escoamento

A vazão máxima de escoamento superficial nas bacias hidrográficas em estudo foi determinada pelo método racional, por ser muito difundido e bastante prático para o cálculo da vazão de pico em pequenas bacias, com área inferior a 3 km².

Segundo Miguez, Rezende, Veról (2015), o método racional adota uma simplificação, que relaciona a intensidade da chuva precipitada sobre a área de drenagem com a vazão escoada, descontadas as perdas relativas aos demais processos do ciclo hidrológico em uma parcela única, ou seja, considera como um percentual da chuva total, a chuva efetiva, definido por um parâmetro denominado coeficiente de escoamento superficial, ou coeficiente de runoff. A aplicação desse coeficiente na fórmula serve para reduzir o valor da vazão de pico, visto que nem toda a vazão gerada pela precipitação é transformada em escoamento superficial, principalmente devido à interceptação das plantas, infiltração e retenções superficiais.

A formulação para o cálculo da vazão de pico é dada pela Eq. (1):

$$Q = \frac{C \times i \times A}{360} \quad (1)$$

Em que Q é a vazão máxima de escoamento superficial (m³/s), C é o coeficiente de escoamento superficial, i é a intensidade máxima de precipitação para uma duração igual ao tempo de concentração da bacia (mm/h) e A é a área da bacia de contribuição (ha).

Os princípios desta metodologia são: a) considerar a duração da precipitação intensa de projeto igual ao tempo de concentração da área (t = tc); b) adotar um único parâmetro de perdas (coeficiente de escoamento superficial), calculado com base nas características da bacia; c) não avaliar o volume da cheia e a distribuição temporal das vazões, assim, não são consideradas as variações de intensidade da chuva durante o tempo de precipitação.

É de fundamental importância o conhecimento das características da bacia, dado que elas incidem diretamente sobre a geração do tipo de onda de cheia, para representar o processo de transformação de

precipitação pluviométrica em vazão. Os fatores essenciais na quantificação da vazão por meio do método racional são: área de drenagem (A), coeficiente de escoamento superficial (C), intensidade da chuva de projeto (i), tempo de concentração (tc) e tempo de retorno (T).

2.4 Definição dos parâmetros do método racional

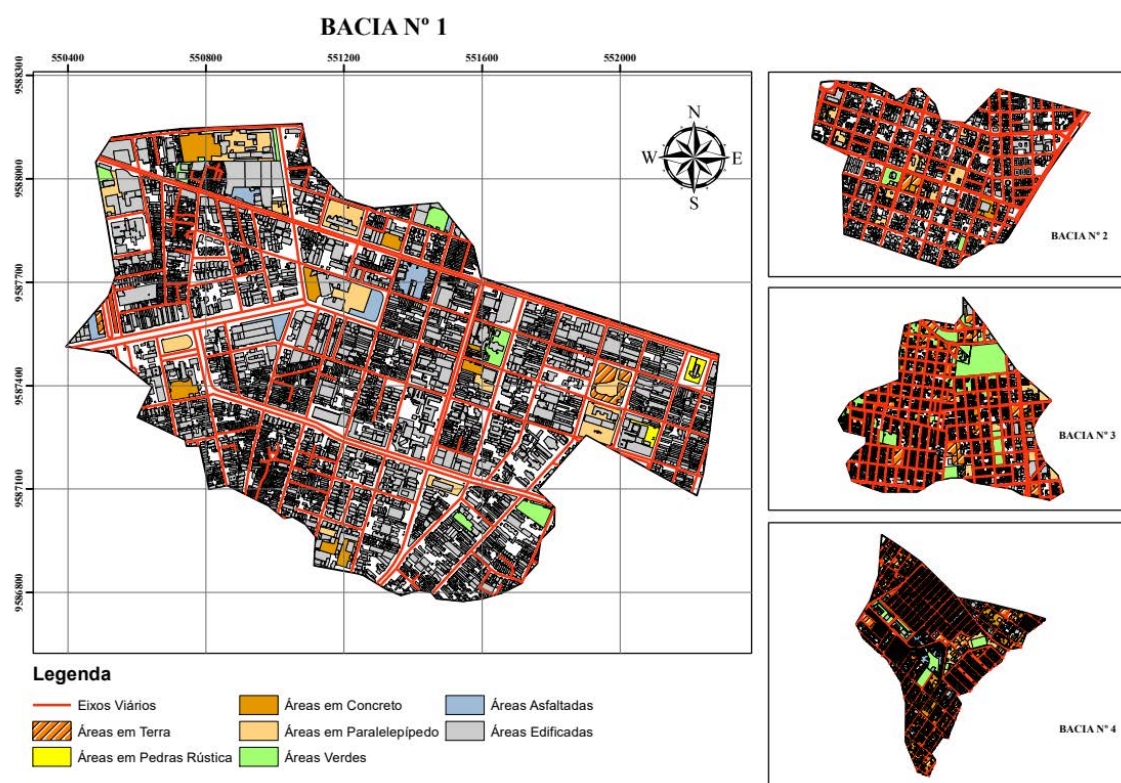
2.4.1 Área de drenagem (A)

Área de drenagem de uma bacia hidrográfica é a superfície, em projeção horizontal, delimitada pelos divisores de águas que confinam e definem a bacia, em que as águas precipitadas que ocorrem sobre essa região contribuem para o mesmo sentido de escoamento e fluem para um ponto de saída denominado exutório (MIGUEZ; REZENDE; VERÓL, 2015).

O mapa de uso e ocupação do solo é essencial para os estudos hidrológicos, especificamente para o cálculo da vazão, uma vez que auxiliam na compreensão de áreas suscetíveis a inundações e também nos estudos de adensamento urbano.

A Figura 5 exibe o uso e ocupação do solo de cada bacia hidrográfica utilizada neste trabalho.

Figura 5 – Mapa de uso e ocupação do solo das bacias



Fonte: Elaborado pelos autores, 2020.

A seguir, pode-se observar na Tab.(1) a descrição das áreas contribuintes para o cálculo da vazão nas bacias.

Tabela 1 – Distribuição de áreas das bacias hidrográficas 1, 2, 3 e 4

Distribuição	Bacia Nº 1		Bacia Nº 2		Bacia Nº 3		Bacia Nº 4	
	%	Área (m ²)	%	Área (m ²)	%	Área (m ²)	%	Área (m ²)
Vias asfaltadas	23,88	350.400,69	26,60	274.590,55	18,10	368.668,99	21,77	222.003,08
Vias em paralelepípedo	1,03	15.051,26	0,60	6.208,79	4,29	87.400,74	3,39	34.585,28
Áreas edificadas	61,84	907.517,53	42,62	439.987,90	30,59	622.856,97	40,22	410.115,98
Áreas em asfalto	1,30	19.077,91	0,00	0,00	0,00	0,00	2,87	29.259,87
Área em concreto	1,56	22.907,32	0,74	7.609,23	1,28	25.990,69	4,80	48.919,34
Áreas em paralelepípedo	3,25	47.729,09	4,31	44.481,30	4,97	101.242,69	2,29	23.366,34
Áreas em terra	0,62	9.078,04	0,77	7.979,85	7,86	160.122,14	12,34	125.873,37
Áreas verdes	1,15	16.925,30	0,94	9.699,03	12,85	261.618,95	4,98	50.730,92
Áreas remanescentes	5,37	78.835,29	23,42	241.715,43	20,06	408.496,40	7,33	74.776,98
Área total	100	1.467.522,43	100	1.032.272,08	100	2.036.397,57	100	1.019.631,16

Fonte: Elaborado pelos autores, 2020.

Algumas considerações sobre a tipologia adotada para as áreas levantadas precisam ser feitas:

a) A área verde considerada foi caracterizada como toda e qualquer região gramada, arborizada ou com vegetação rasteira (mato);

b) A área em terra trata-se de superfícies em solo exposto;

c) As áreas asfaltadas são consideradas regiões de estacionamento ou pátios em asfalto que diferem de vias asfaltadas, onde nesta última foi considerado avenidas, ruas, travessas etc. A mesma linha de pensamento explica a diferença entre áreas em paralelepípedo e vias em paralelepípedo; e

d) A área não classificada dentro dos demais tipos foi considerada impermeável, sendo asfaltada ou concretada, visto que o coeficiente de escoamento superficial adotado para ambas é o mesmo.

Para o levantamento dessas áreas, exceto as edificadas, foi necessário fazer o processo de vetorização por meio da técnica de fotointerpretação utilizando o programa ArcGIS®, tomando como base as imagens de satélite referente ao ano 2018 do programa Google Earth, visto que os arquivos retirados do site da Prefeitura de Fortaleza não possui 100% dos espaços caracterizados, o que contribui para uma estimativa da vazão de escoamento mais precisa.

2.4.2 Coeficiente de escoamento (C)

O coeficiente de escoamento gerado pela bacia representa a parcela total escoada em eventos chuvosos e varia à medida que a precipitação aumenta e com a urbanização da bacia hidrográfica, sendo definido como a relação entre a quantidade total de água escoada numa determinada seção e a quantidade de água total precipitada na bacia hidrográfica contribuinte (TUCCI, 2000).

Ainda, segundo Tucci (2000), o coeficiente de escoamento de uma bacia que contém superfícies modificáveis pode ser previsto pela ponderação do coeficiente de superfícies distintas. Considerando uma bacia urbana onde podem existir duas ou mais superfícies de diversas tipologias, faz-se uma média ponderada para obtenção do coeficiente de escoamento, como expressada abaixo pela Eq. (2):

$$C = \frac{(C_1 \times A_1 + C_2 \times A_2 + \dots + C_n \times A_n)}{A} \quad (2)$$

Sendo C o coeficiente de escoamento superficial da microbacia, Ci o coeficiente de escoamento superficial da subárea da microbacia, Ai a subárea da microbacia (m²) e A a área total da microbacia (m²).

Na Tabela 2 são apresentados os coeficientes que serão aplicados.

Tabela 2 – Valores de coeficiente de escoamento (C) para superfícies urbanas

Tipo de Área	Faixa de Variação	Valor Adotado
Vias asfaltadas	0,85 – 0,90	0,88
Vias em paralelepípedo	0,70 – 0,85	0,78
Áreas edificadas	0,70 – 0,95	0,83
Áreas em asfalto	0,85 – 0,90	0,88
Área em concreto	0,85 – 0,90	0,88
Áreas em paralelepípedo	0,70 – 0,85	0,78
Áreas em terra	0,01 – 0,20	0,11
Áreas verdes	0,05 – 0,20	0,13
Áreas remanescentes	0,85 – 0,90	0,88

Fonte: Mattos e Villela (1980 *apud* GAROTTI; BARBASSA, 2010).

Os picos de vazão, no caso das coberturas verdes, dependem da inclinação do telhado, espessura do substrato e do tipo de vegetação a ser cultivada. De acordo com Kolb (2003), após a saturação do sistema de telhados verdes com espessura de 10 cm e de pequenos declives, houve um amortecimento dos picos de escoamento na ordem de 75%, onde foi encontrado um coeficiente de deflúvio igual a 0,25. Já para Khan (2001 *apud* TOMAZ, 2003), o valor do coeficiente de escoamento superficial médio para telhados verdes é igual a 0,27.

O coeficiente de escoamento superficial em um telhado com cobertura verde pode ser bastante variável, devido à sua inclinação e espessura do substrato, conforme apresentado na Tab. (3).

Tabela 3 – Coeficiente de escoamento para telhado verde de acordo com sua espessura e inclinação

Espessura - e (cm)	Coeficiente de Runoff para telhado verde	
	Inclinação até 15°	Inclinação acima de 15°
$e \geq 50$	0,1	-
$25 \leq e < 50$	0,2	-
$15 \leq e < 25$	0,3	-
$10 \leq e < 15$	0,4	0,5
$6 \leq e < 10$	0,5	0,6
$4 \leq e < 6$	0,6	0,7
$2 \leq e < 4$	0,7	0,8

Fonte: FLL (2002 *apud* OHNUMA JÚNIOR, 2008).

Nos estudos de Moruzzi, Moura e Barbassa (2014), em telhados verdes extensivos, constatou-se que a umidade antecedente do solo e a inclinação são decisivas no volume de água escoada. Coberturas verdes com menores inclinações contribuem para uma maior redução do escoamento superficial gerado.

Baseado em estudos de Laar *et al.* (2001), foram supostos dois tipos de telhados verdes extensivos à espécie de vegetação conhecida como “onze horas”, visto que esta é uma das mais adequadas para o clima tropical e requer baixo investimento em manutenção. Em concordância com FLL (2002 *apud* OHNUMA JÚNIOR, 2008), foi escolhido um telhado com inclinação de até 15° e uma espessura de 0,20 cm, e outro com inclinação acima de 15° e espessura de 0,12 cm. Considerando a Tabela 3, os coeficientes de escoamento aplicados para as coberturas verdes foram 0,3 e 0,5, respectivamente.

2.4.3 Intensidade máxima de precipitação (i)

De acordo com Pereira, Duarte e Sarmiento (2017), a intensidade máxima da chuva de um ponto em uma bacia hidrográfica relacionada com a sua duração no tempo, é determinada por meio das curvas do tipo Intensidade-Duração-Frequência (IDF).

Adotou-se a equação que representa as curvas IDF da cidade de Fortaleza (Eq. 3), estudo baseado na análise de 30 anos de registros pluviográficos (1970-1999) da estação climatológica da Universidade Federal do Ceará, proposta por Silva, Palácio Júnior e Campos (2013),

$$i = \frac{2.345,29 \times T^{0,173}}{(t + 28,31)^{0,904}} \quad (3)$$

Onde i é a intensidade máxima de chuva (mm/h), T é o período de retorno (anos) e t é o tempo de duração da chuva (min).

Vale ressaltar, como um dos princípios básicos do método racional, que o tempo de duração da precipitação intensa de projeto é igualado ao tempo de concentração da bacia.

2.4.4 Período de retorno (T)

O tempo de retorno é definido como o inverso da probabilidade de um evento ser igualado ou ultrapassado em um ano qualquer; em outras palavras, é um intervalo (em anos) onde estima-se que um determinado evento seja superado ou igualado. Esta variável está diretamente relacionada com o grau de proteção da população e dos usuários daquela determinada obra, apontando o risco aceitável e adotado ao projeto. Assim, caso esse dano seja pequeno e afete poucas pessoas, teremos períodos de retornos menores; ou seja, à medida que esse dano cresce, os períodos de retorno também aumentam. Não temos como escolher risco zero a um projeto porque ele não existe, além do mais, a obra ficaria com um custo altíssimo.

Os períodos de retornos utilizados neste estudo foram de 5, 10 e 20 anos.

2.4.5 Tempo de concentração (tc)

Bertoni e Tucci (2007, p.394) define tempo de concentração como “[...] o tempo necessário para a água precipitada no ponto mais distante da bacia deslocar-se até o exutório da bacia. Esse tempo é definido também entre o fim da precipitação e o ponto de inflexão do hidrograma”.

O tempo de concentração ainda pode ser observado como o somatório do tempo de equilíbrio, tempo necessário para ordenamento e consolidação do escoamento superficial, e o tempo de viagem definido como o tempo de deslocamento no rio principal até o exutório da bacia (MIGUEZ; REZENDE; VERÓL, 2015).

Para as bacias urbanas analisadas, segundo estudos de Silveira (2005), a fórmula mais recomendada para o cálculo do tempo de concentração na qual apresentou resultados satisfatórios em um maior número de bacias foi desenvolvida por Carter (Eq. 4) :

$$tc = 0,0977 \times L^{0,6} \times S^{-0,3} \quad (4)$$

Em que tc é o tempo de concentração (h), L é o comprimento do rio, canal ou talvegue principal (Km) e S é a declividade média (m/m).

2.4.6 Declividade do talvegue (S)

A diferença de cotas entre os limites do curso d’água principal, dividida pelo comprimento deste talvegue, é a maneira mais simples de calcular a declividade, conforme Eq. (5). Esta grandeza atua diretamente sobre a velocidade dos escoamentos. Quanto maior a velocidade do escoamento, mais inclinado é o curso d’água (MIGUEZ; REZENDE; VERÓL, 2015).

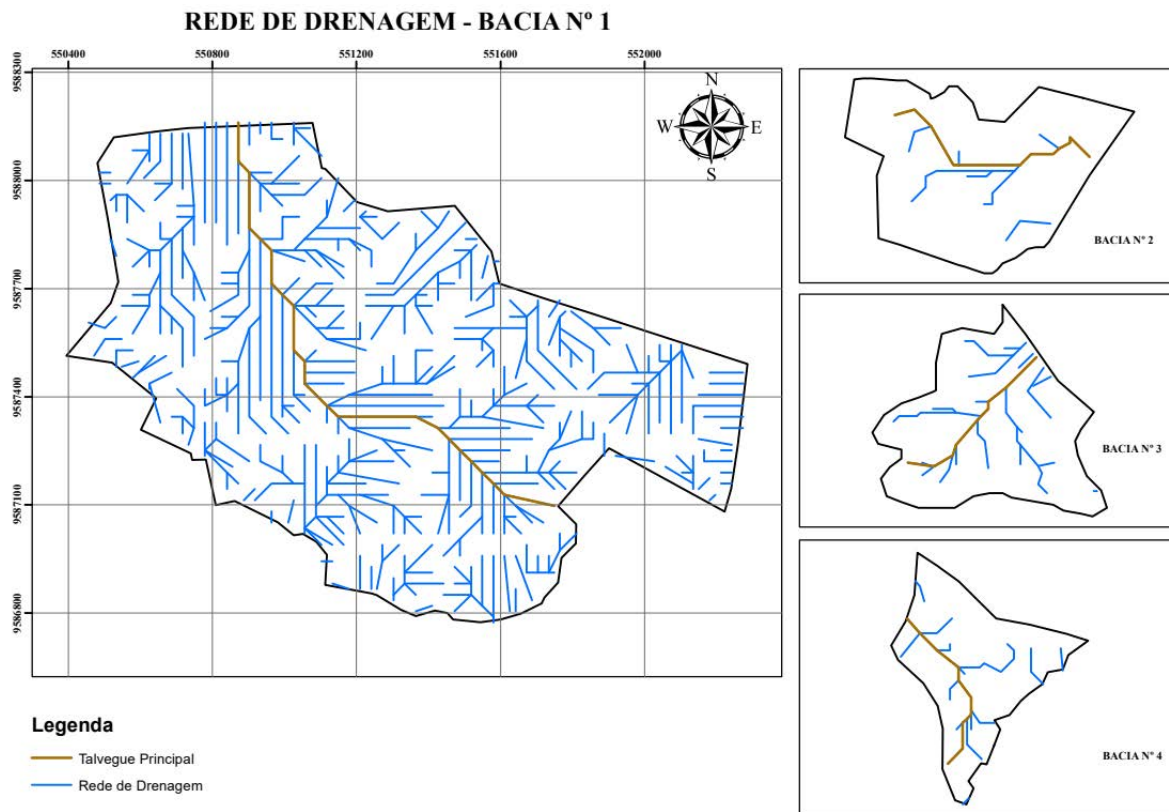
$$S = \frac{\Delta Z}{L} \quad (5)$$

Sendo S a declividade (m/m), ΔZ a diferença de cotas ao longo do talvegue considerado (m) e L o comprimento do trecho em planta (m).

Uma vez que não há corpo hídrico nas áreas em estudo, foi gerada, através do programa ArcGIS®, uma rede de fluxo para cada bacia à partir do MDE do município de Fortaleza/CE, conforme apresentado na Fig.6. O traçado da rede de drenagem a partir de MDE é um traçado idealizado que se baseia na adoção de um limiar

de área mínima de drenagem para denotar o início da rede de drenagem, de forma que os *pixels* com área contribuinte igual ou maior ao valor adotado são considerados integrantes da rede de drenagem e os *pixels* com área inferior são desconsiderados. Neste trabalho, o tamanho do *pixel* utilizado para gerar esta rede de drenagem a partir do fluxo acumulado levou em consideração a precisão do MDE que tem 30 m x 30 m.

Figura 6 – Rede de drenagem das bacias



Fonte: Elaborado pelos autores, 2020. Os comprimentos dos talvegues e suas respectivas diferenças de cotas estão indicados na Tab. (4):

Tabela 4 – Dados de declividade das bacias

Dados	Bacia Nº 1	Bacia Nº 2	Bacia Nº 3	Bacia Nº 4
Comprimento do talvegue principal (m)	1.619,57	1.331,20	1.513,67	1.306,65
Cota mais alta do talvegue principal (m)	35,00	35,00	24,00	40,00
Cota mais baixa do talvegue principal (m)	21,00	19,00	12,00	28,00
Diferença de cotas (m)	14,00	16,00	12,00	12,00
Declividade (m/m)	0,00864	0,01202	0,00793	0,00918

Fonte: Elaborado pelos autores, 2020.

2.5 Construção de cenários

Em termos de simulação, foram estabelecidos quatro cenários para estimar a vazão de escoamento superficial.

Cenário 1 – As bacias hidrográficas são caracterizadas de acordo com a situação atual, considerando todos os telhados existentes como sendo do tipo convencional e as demais áreas divididas de acordo com as características descritas no item 2.4.

Cenário 2 – As bacias hidrográficas seguem as mesmas características do cenário 1, entretanto 60% dos telhados convencionais são substituídos por coberturas verdes com espessura do substrato de 20 cm e uma inclinação de até 15°.

Cenário 3 – Segue as características do cenário 2, porém o telhado verde utilizado possui espessura do substrato de 12 cm e inclinação superior a 15°.

Cenário 4 – Segue, também, as particularidades de espessura do substrato e inclinação do cenário 2, porém, cerca de 20% dos telhados convencionais são substituídos por coberturas verdes.

As características propostas nos cenários 2 e 3 foram baseadas nos estudos de Korzenieski (2016), onde as coberturas verdes ocupariam somente 60% da área dos telhados convencionais, o que ainda é muito, visto que os proprietários pelas edificações optem pela não adesão dessa prática. Fundamentado no pensamento anterior e no princípio de análise de gestão de projetos no qual verifica-se que 80% dos problemas são geralmente causados por 20% dos fatores, foi proposto o cenário 4, onde somente cerca de 20% dos telhados convencionais são trocados por telhados verdes, buscando representar uma simulação possivelmente mais condizente com a adesão desta prática para a realidade atual.

3 Resultados e discussão

3.1 Vazão de escoamento superficial

Primeiramente, para obtenção das vazões em cada cenário proposto foram calculados os valores de tempos de concentrações (tc) e intensidades máximas de precipitação (i) para cada bacia hidrográfica, mediante aplicação das Equações 4 e 3, respectivamente e, que estão reproduzidos na Tab. (5):

Tabela 5 – Dados de declividade das bacias

	tc(min)	i (TR = 5 anos)	i (TR = 10 anos)	i (TR = 20 anos)
Bacia Nº 1	32,56	75,51	85,13	95,98
Bacia Nº 2	26,22	83,41	94,03	106,01
Bacia Nº 3	32,09	76,05	85,74	96,66
Bacia Nº 4	28,11	80,88	91,18	102,80

Fonte: Elaborado pelos autores, 2020.

Nas Tabelas 6, 7, 8 e 9, representadas a seguir, encontram-se o resumo dos cálculos e o valor do coeficiente de escoamento para cada bacia nos cenários criados.

Tabela 6 – Valores de C estimados para o cenário 1 nas bacias

	Bacia Nº 1	Bacia Nº 2	Bacia Nº 3	Bacia Nº 4
$\sum (C_i \times A_i)$ (m ²)	1.220.081,76	867.912,27	1.422.514,41	736.003,77
Área (m ²)	1.467.522,43	1.032.272,08	2.036.397,57	1.019.631,16
C	0,83	0,84	0,70	0,72

Fonte: Elaborado pelos autores, 2020.

Tabela 7 – Valores de C estimados para o cenário 2 nas bacias

	Bacia Nº 1	Bacia Nº 2	Bacia Nº 3	Bacia Nº 4
$\sum (C_i \times A_i)$ (m ²)	931.491,19	727.996,12	1.224.445,89	605.586,89
Área (m ²)	1.467.522,43	1.032.272,08	2.036.397,57	1.019.631,16
C	0,63	0,71	0,60	0,59

Fonte: Elaborado pelos autores, 2020.

Tabela 8 – Valores de C estimados para o cenário 3 nas bacias

	Bacia Nº 1	Bacia Nº 2	Bacia Nº 3	Bacia Nº 4
$\sum (C_i \times A_i)$ (m ²)	1.040.393,29	780.794,67	1.299.188,73	654.800,81
Área (m ²)	1.467.522,43	1.032.272,08	2.036.397,57	1.019.631,16
C	0,71	0,76	0,64	0,64

Fonte: Elaborado pelos autores, 2020.

Tabela 9 – Valores de C estimados para o cenário 4 nas bacias

	Bacia Nº 1	Bacia Nº 2	Bacia Nº 3	Bacia Nº 4
$\sum (C_i \times A_i)$ (m ²)	1.119.528,09	820.900,46	1.354.205,97	695.338,27
Área (m ²)	1.467.522,43	1.032.272,08	2.036.397,57	1.019.631,16
C	0,76	0,80	0,67	0,68

Fonte: Elaborado pelos autores, 2020.

Aplicando a Equação 2 para cada uma das bacias, obtiveram-se os valores de coeficientes de escoamento superficial ponderados (C) para cada cenário gerado.

Dispondo das grandezas de coeficientes de escoamento superficial ponderados, intensidades máximas de precipitação e áreas de drenagem, é possível obter, utilizando-se a Equação 1, a vazão estimada para cada cenário exposto.

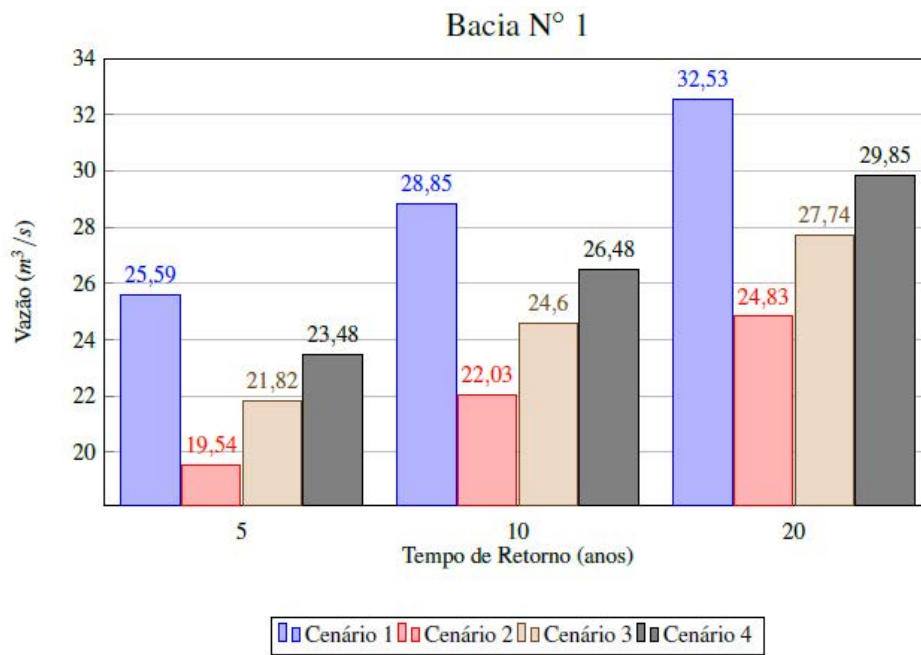
A Tabela 10 e os gráficos subsequentes exibem os resultados encontrados.

Tabela 10 – Vazão de escoamento de cada bacia para os diferentes cenários

TR (anos)	Vazão (m ³ /s)				Redução do pico de vazão (%)		
	Convencional (Q1)	60% Verde $\geq 15^\circ$ (Q2)	60% Verde $> 15^\circ$ (Q3)	20% Verde $\geq 15^\circ$ (Q4)			
Bacia Nº 1							
5	25,59	19,54	21,82	23,48	23,65	14,73	8,24
10	28,85	22,03	24,60	26,48			
20	32,53	24,83	27,74	29,85			
Bacia Nº 2							
5	20,11	16,87	18,09	19,02	16,12	10,04	5,42
10	22,67	19,02	20,39	21,44			
20	25,56	21,44	22,99	24,17			
Bacia Nº 3							
5	30,05	25,87	27,44	28,61	13,92	8,67	4,80
10	33,88	29,16	30,94	32,25			
20	38,19	32,88	34,88	36,36			
Bacia Nº 4							
5	16,54	13,61	14,71	15,62	17,72	11,03	5,53
10	18,64	15,34	16,59	17,61			
20	21,02	17,29	18,70	19,86			

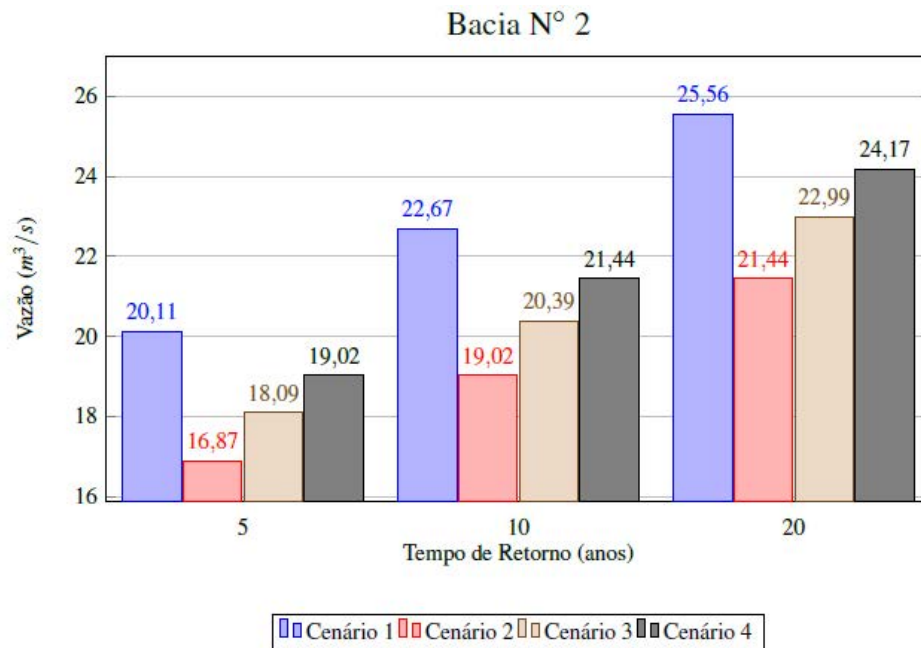
Fonte: Elaborado pelos autores, 2020.

Figura 7 – Gráfico de vazões da Bacia N° 1



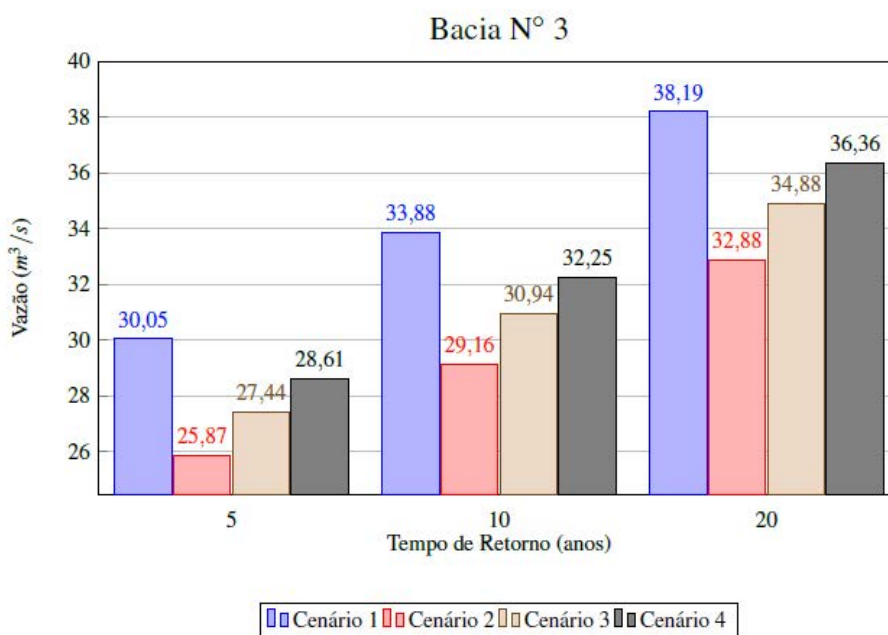
Fonte: Elaborado pelos autores, 2020.

Figura 8 – Gráfico de vazões da Bacia N° 2



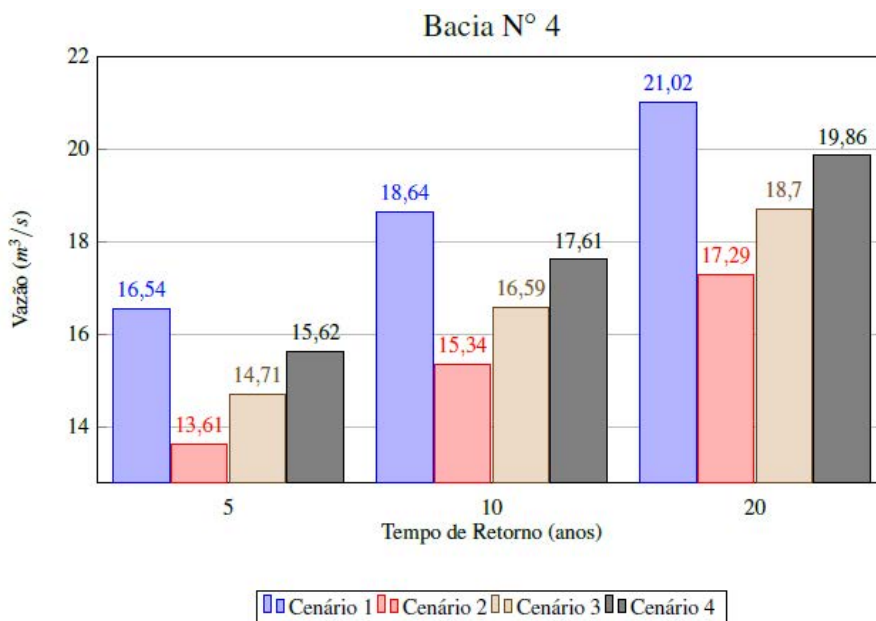
Fonte: Elaborado pelos autores, 2020.

Figura 9 – Gráfico de vazões da Bacia N° 3



Fonte: Elaborado pelos autores, 2020.

Figura 10 – Gráfico de vazões da Bacia N° 4



Fonte: Elaborado pelos autores, 2020.

Em concordância com os estudos de Moruzzi, Moura e Barbassa (2014), onde foi verificado que quanto menor a inclinação do telhado verde maior será sua efetividade em mitigar o escoamento superficial, constata-se que em todas as bacias hidrográficas analisadas houve uma maior redução da vazão de pico no cenário 2, cujo percentual de cobertura verde é de 60% com menor inclinação do telhado.

Observa-se que a maior redução do pico de escoamento nas bacias de estudo, ocorre de Q1 para Q2, com um abatimento máximo de 23,65% e mínimo de 13,92%. Estes percentuais estão relacionados com a caracterização das diversas superfícies existentes nas bacias. Constata-se, então, que o maior percentual pertence à bacia cuja área tinha praticamente todas as suas superfícies classificadas, quer seja em asfalto, concreto, paralelepípedo e etc.

Verifica-se, ainda, que o cenário 4, no qual contempla aplicação de somente 20% de telhado verde, apresenta uma redução máxima do pico de vazão de 8,24%, correspondendo em um abatimento de pouco mais de um terço em comparação ao cenário mais favorável.

Apesar da não caracterização total das áreas analisadas, obteve-se um percentual significativo na redução do escoamento superficial demonstrando a eficiência de adoção dessa medida compensatória, contribuindo, assim, para mitigação das inundações causadas nos centros urbanos devido à crescente impermeabilização do solo e diminuindo a quantidade de água lançada nas galerias pluviais das cidades.

O uso dos telhados verdes como forma de resgatar características de uma bacia não urbanizada que permite uma maior infiltração das águas precipitadas e reduz o escoamento superficial já é uma realidade em várias cidades do planeta. Compete ao poder público definir diretrizes que fomentem o uso desta técnica como uma das diversas soluções para um dos principais problemas dos grandes centros urbanos, as enchentes.

No Brasil, ainda não temos normas técnicas para a implantação de um telhado verde, apesar de alguns estados aderirem normas e leis que promovem incentivos fiscais, como descontos no Imposto Predial e Territorial Urbano (IPTU), compensações ambientais e obrigatoriedade no uso de sistemas de naturezação; é de fundamental importância a criação de leis que incentivem o uso de técnicas compensatórias em drenagem urbana para reduzir o excesso de vazão decorrente da urbanização nas grandes cidades, fazendo com que os projetos ajam com uma maior responsabilidade em relação à sustentabilidade ambiental.

4 Conclusão

Além dos diversos benefícios evidenciados por vários autores citados neste trabalho, a utilização do sistema de naturezação alcançou seu principal objetivo, demonstrando ser uma opção de escolha para mitigar o escoamento superficial direto e amenizar os impactos decorrentes da impermeabilização do solo resultante do desenvolvimento não sustentável da humanidade.

Para as bacias hidrográficas localizadas em Fortaleza – CE, o uso de telhados verdes em 60% das coberturas das construções podem reduzir o pico de vazão em 23,65%, quando adota-se telhados com 20 cm de espessura da camada de substrato e até 15° de inclinação e em 14,73% para telhados com 12 cm de espessura do substrato e mais de 15° de inclinação, de acordo com os cenários analisados.

Apesar do cenário mais favorável apresentar 60% de telhados verdes, o mais indicado à implementação, devido à falta de recursos financeiros para instalação na maioria dos domicílios, é aquele no qual as coberturas verdes chegam a 20%, pois podem ser instalados em grandes áreas, como supermercados, centros comerciais, hospitais, entre outros.

De acordo com os cenários analisados para as bacias hidrográficas em estudo, foi evidenciado que a utilização das coberturas verdes como forma de reter o escoamento superficial produzido está relacionado diretamente com a inclinação do telhado e a espessura da camada de substrato. Atendendo especificamente aos objetivos deste trabalho comprovou-se que tais fatores influenciam de maneira decisiva na eficiência dessa técnica compensatória e no volume de água escoada.

Concluindo, com as medições de vazões adquiridas e com o auxílio do geoprocessamento onde a utilização do programa ArcGIS® mostrou-se extremamente válida, pois foi possível a obtenção dos dados levantados de maneira mais rápida e acessível; constatou-se o esperado, a cobertura verde contribui realmente por meio de mecanismos de armazenamento e evapotranspiração para a redução do pico de vazão e retenção do escoamento superficial produzido, alcançando-se credibilidade na análise desenvolvida.

Referências

- AGUIAR, M. J. N. *et al.* **Dados climatológicos:** estação de Fortaleza. Fortaleza: Embrapa, 2003. (Documentos, 75). Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPAT/7897/1/doc75.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2023.
- CEARÁ. Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME). **Calendário das chuvas no estado do Ceará.** Fortaleza, 2023a. Disponível em: <http://www.funceme.br/app-calendario/annual/municipios/media/2023>. Acesso em: 15 mar. 2023.

- CEARÁ. Prefeitura de Fortaleza. **Fortaleza em Mapas: meio ambiente-microbacias hidrográficas**. Fortaleza, 2023b. Disponível em: <https://mapas.fortaleza.ce.gov.br/>. Acesso em: 15 mar. 2023.
- CRUZ, M. A. S.; TUCCI, C. E.; SILVEIRA, A. **Controle do escoamento com retenção em lotesurbanos**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, v. 3, n. 4, p. 19–31, out./dez. 1998. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/233482>. Acesso em: 15 mar. 2023.
- GAROTTI, L. M.; BARBASSA, A. P. Estimativa de área impermeabilizada diretamente conectada e sua utilização como coeficiente de escoamento superficial. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 15, n. 1, p. 19–28, jan./mar. 2010. Disponível em: [tada_e_sua_utilizacao_como_coeficiente_de_escoamento_superficial/link/02cd545d0cf2f49a781e0eeb/download](https://tada.e_sua_utilizacao_como_coeficiente_de_escoamento_superficial/link/02cd545d0cf2f49a781e0eeb/download). Acesso em: 15 mar. 2023.
- GARRIDO NETO, P. S. **Telhados verdes como técnica compensatória em drenagem urbana na cidade do Rio de Janeiro: estudo experimental e avaliação de sua adoção na bacia do rio Joana a partir do uso de modelagem matemática**. 2016. 321 f. Dissertação (Mestrado) — Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ, 2016.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Fortaleza. **Cidades e Estados**, Brasília, 2019. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/ce/fortaleza.html>. Acesso em: 15 mar. 2023.
- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **TOPODATA**: Mapa índice. ©OpenTopoMap. São José dos campos, SP: INPE, 2020. Banco de dados Geomorfométrico do Brasil. Disponível em: <http://www.webmapit.com.br/inpe/topodata/>. Acesso em: 15 mar. 2023.
- KOLB, W. Telhados de cobertura verde e manejo de águas pluviais. *In*: SIMPÓSIO CAPTAÇÃO E MANEJO DE ÁGUA DE CHUVA, 4., 2003, Petrolina. **Anais...** Petrolina: [S.n.], 2003. p. 6-10.
- KORZENIESKI, C. P. **Avaliação da influência do uso de telhados verdes no escoamento superficial em um loteamento de Pelotas-RS**. 61 f. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) — Centro de Engenharias, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, Rio Grande do Sul, 2016.
- LAAR, M. *et al.* Estudo de aplicação de plantas em telhados vivos extensivos em cidades de clima tropical. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO - ENCAC, 6., São Paulo. **Anais...** São Paulo: [S.n.], 2001.
- MIGUEZ, M.; REZENDE, O.; VERÓL, A. **Drenagem urbana: do projeto tradicional à sustentabilidade**. Rio de Janeiro: Elsevier Brasil, 2015.
- MORUZZI, R. B.; MOURA, C. C.; BARBASSA, A. P. Avaliação do efeito da inclinação e umidade antecedente na qualidade e quantidade das parcelas escoadas, percoladas e armazenada sem telhado verde extensivo. **Ambient. constr.**, Porto Alegre, v. 14, n. 3, p. 59–73, set. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1678-86212014000300005>. Acesso em: 15 mar. 2023.
- OHNUMA JÚNIOR, A. A. **Medidas não convencionais de reservação d'água e controle da poluição hídrica em lotes domiciliares**. 331 f. 2008. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18139/tde-13032009-093755/publico/TESE_Ohnuma_Jr_FINAL_APROVADA.pdf. Acesso em: 15 mar. 2023.
- PEREIRA, D. C.; DUARTE, L. R.; SARMENTO, A. P. Determinação da curva de intensidade, duração e frequência do município de Ipameri–Goáís. **REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, Goiânia, v. 13, n. 2, 2017. DOI: 10.5216/reec.v13i2.43330. Disponível em: <https://revistas.ufg.br/reec/article/view/43330>. Acesso em: 15 mar. 2023.
- SILVA, F. O. E.; PALÁCIO JÚNIOR, F. F. R.; CAMPOS, J. N. B. Equação de chuvas para Fortaleza-CE com dados do pluviógrafo da UFC. **Revista DAE**, São Paulo, v. 192, n. 1491, mai./ago. 2013. Disponível em:

http://revistadae.com.br/artigos/artigo_edicao_192_n_1491.pdf. Acesso em: 15 mar. 2023.

SILVEIRA, A. L. L. Desempenho de fórmulas de tempo de concentração em bacias urbanas e rurais. **RBRH: Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, RS, v. 10, n. 1, p. 5-23, jan./mar. 2005. Disponível em: <https://www.abrhidro.org.br/SGCv3/publicacao.php?PUB=1&ID=29&SUMARIO=896>. Acesso em: 15 mar. 2023.

STAHLHÖFER, I. S.; PEREIRA, M. F. B. Políticas públicas de implementação de coberturas verdes: O projeto de lei nº115/2009 da câmara de vereadores de São Paulo. **Revista Eletrônica do Curso de Direito da UFSM**, Santa Maria, v. 8, p. 386–398, 2013. Edição Especial (I Congresso Internacional de Direito Ambiental e Ecologia Política - UFSM). Tema: Simpósio 08: Direito Ambiental Urbanístico. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/revistadireito/article/view/8338>. Acesso em: 15 mar. 2023.

TOMAZ, P. **Aproveitamento de água de chuva: para áreas urbanas e fins não potáveis**. São Paulo: Navegar, 2003.

TUCCI, C. E. Coeficiente de escoamento e vazão máxima de bacias urbanas. **Revista Brasileira de recursos hídricos**, [S.l.], v. 5, n. 1, p. 61–68, jan./ mar. 2000. Disponível em: https://abrh.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/46/d59e1c5f69cd898ab9e9bce27bb6292d_70ec6dca6cec6b4e9e67dc36f9d48fcc.pdf. Acesso em: 15 mar. 2023.

TUCCI, C. E. M. (Org.) **Hidrologia: Ciência e aplicação**. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2007.

Sobre os autores

Lídia Nunes de Sousa

Possui graduação em Licenciatura Plena em Matemática pela Universidade Estadual do Ceará (2009) e em Engenharia Civil pela Universidade de Fortaleza (2020).

Anísio de Sousa Meneses Filho

Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Piauí (1986). Mestre em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Ceará (1991). Doutorando em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (incompleto). Diplomado pela Escola de Formação de Governantes do Ceará. Servidor público na carreira de Analista Judiciário. Engenheiro do Tribunal Regional do Trabalho da 7ª Região, exercendo atividades na Seção de Auditoria da Gestão Administrativa e Patrimonial, e atuando em auditorias de obras públicas. Foi membro da Comissão de Ética do TRT 7ª R. Foi membro do Núcleo de Gestão Estratégica do TRT 7ª R. Exerceu os cargos de Assistente Secretário (chefe do Setor de Engenharia) nessa instituição entre os anos de 2002 e 2008 e de Coordenador de Serviços (Chefe do Setor de Fiscalização e Obras de Engenharia entre os anos de 2010 e 2011). Consultor em Hidrologia e Drenagem Urbana. Foi professor da Universidade Estadual do Ceará (UECE), Departamento de Física e Química, entre os anos de 2000 a 2005. Foi professor de Física do Colégio Batista Santos Dumont entre 1999 e 2001. Desde 2010, professor colaborador dos cursos preparatórios Master Concursos e Prime Concursos, nas áreas de Engenharia Civil e auditoria de obras públicas. Desde 2012, professor do curso de Engenharia Civil, do Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade de Fortaleza (UNIFOR). Desde 2012, professor dos cursos de pós-graduação (Especialização) em Infraestrutura em Transportes e Rodovias, e de Gestão Portuária e Negócios Internacionais, promovidos pelo INBEC. Desde 2015, professor de pós-graduação (Especialização) em Engenharia de Obras de Infraestrutura da Universidade de Fortaleza (UNIFOR). Desde 2019, professor dos cursos de pós-graduação (Especialização) em Engenharia de Transportes: Rodovias, Portos e Ferrovias, e em Licitação e Gestão de Contratos Administrativos, promovidos pelo Instituto Navigare. Membro do Núcleo Docente Estruturante do curso de Engenharia Civil da Universidade de Fortaleza (UNIFOR) até junho de 2017.

Avaliado em: 26.04.2022

Aceito em: 26.04.2023