

Proposta metodológica de auxílio à decisão para seleção de alternativas ecoeficientes para o amortecimento das águas pluviais em bacias urbanas em eventos críticos

Methodological proposal to decision aid for selecting eco-efficient alternatives for damping of rainwater in urban catchment during critical events

Propuesta metodológica para acompañar la decisión de selección de alternativas ecoeficientes para la captación de aguas pluviales en cuencas urbanas durante eventos críticos

Maria do Socorro Bezerra Lopes

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará (IFPA)

soclopes@gmail.com

Marco Valério de Albuquerque Vinagre

Universidade da Amazônia – UNAMA

valeriovinagre@gmail.com

Aline Maria Meiguins De Lima

Universidade Federal do Pará – UFPA

ameiguins@ufpa.br

Érico Gaspar Lisboa

Universidade da Amazônia – UNAMA

ericoglisboa@gmail.com

Resumo

As alterações na hidrologia urbana em bacias hidrográficas vêm ocorrendo, principalmente devido à impermeabilização do solo, aumento no volume e velocidade do escoamento superficial, tornando as populações mais expostas a inundações, agravado pelas alterações climáticas. Neste contexto, adotar técnicas compensatórias para o controle de inundações adotar técnicas compensatórias para o controle de inundações tem sido uma prática recorrente. Entretanto, diante de várias técnicas disponíveis, selecionar a que mais se aproxime do paradigma de sustentabilidade é um complexo problema decisório com pontos de vistas contraditórios. Neste contexto, desenvolver metodologias que envolvam análises de preferências entre critérios econômicos, socioambientais e técnicos é uma importante contribuição. Concebido para representar bacias em situações de eventos críticos, a metodologia considerou a avaliação de quatro técnicas: bacia de retenção, de detenção aberta e fechada, e, ainda a reservação em lote. Pelo método multicritério PROMETHEE, a metodologia foi aplicada em quatro bacias urbanas na cidade de Belém/PA. Os resultados apontaram que, em função da importância entre os critérios, a bacia de retenção e detenção fechada foram as mais preferidas, e a reservação em lote a menos preferida. Assim, a metodologia se apresentou como importante auxílio à decisão para selecionar técnicas compensatórias de controle a inundações sustentáveis em bacias urbanas.

Palavras-chave: Drenagem Urbana, Análise multicritério, PROMETHEE, Inundações.

Abstract

Changes in urban hydrology have been occurring, mainly due to soil impermeability, increase in the volume and speed of surface runoff, making populations susceptible to flooding, aggravated by

climate change. Therefore, this work proposes to develop a methodology based on multicriteria decision support methods, which overcomes such limitations and is capable of selecting efficient flood control measures, which are suitable for an urban microbasin. PROMETHEE was chosen because it is the most suitable for this proposal. The methodology was organized in four stages, seeking to represent microbasins in situations of critical events after the implementation of different alternatives, combined or not, for damping rainwater. A ranking of the best alternative was then obtained, among those studied (retention, open detention, closed detention and batch reservation), considering the criteria and respective indicators. With the results obtained, it was considered that the developed methodology can support decision-making in the management of rainwater, in order to subsidize managers in the face of possible limitations, whether due to political commitment, investments in the sector, instruments available for flood control or their technical training.

Keywords: Urban Drainage, Multicriterial analysis, PROMETHEE, Flooding

Resumen

Los cambios en la hidrología urbana han venido ocurriendo, principalmente por la impermeabilidad del suelo, aumento en el volumen y velocidad de escorrentía superficial, tornando a las poblaciones susceptibles a inundaciones, agravadas por el cambio climático. Por lo tanto, este trabajo propone desarrollar una metodología basada en métodos de apoyo a la decisión multi criterio, que supere tales limitaciones y sea capaz de seleccionar medidas eficientes de control de inundaciones, que sean adecuadas para una microcuenca urbana. Se eligió PROMETHEE porque es el más adecuado para esta propuesta. La metodología se organizó en cuatro etapas, buscando representar microcuenca en situaciones de eventos críticos luego de la implementación de diferentes alternativas, combinadas o no, para el amortiguamiento del agua de lluvia. Luego se obtuvo una clasificación de la mejor alternativa, entre las estudiadas (retención, detención abierta, detención cerrada y reserva de lotes), considerando los criterios y los respectivos indicadores. Con los resultados obtenidos se consideró que la metodología desarrollada puede apoyar la toma de decisiones en la gestión del agua de lluvia, con el fin de subsidiar a los gestores ante posibles limitaciones, ya sea por compromiso político, inversiones en el sector, instrumentos disponibles para inundaciones control o su formación técnica.

Palabras clave: Drenaje Urbano, Analisis Multicriterio, PROMETHEE, Inundaciones

INTRODUÇÃO

A gestão das águas pluviais urbanas é colocada em segundo plano no desenvolvimento das cidades, posto que os maiores investimentos são destinados ao tratamento de água e esgoto, impulsionados pela busca da maximização dos lucros das companhias de saneamento e pelas exigências da sociedade, produzindo significativas consequências para gestão das águas pluviais (MENDONÇA; LEITÃO, 2008).

Além da questão acima referida, importante ressaltar que o manejo das águas pluviais deve ser tratado em conjunto com o ordenamento urbano, posto que, desta forma, se é capaz de gerar um conjunto de práticas denominadas tecnologias alternativas ou compensatórias, cujo objetivo de compensar os efeitos negativos que o escoamento superficial pode causar ao ambiente (CÔRTES, 2009).

Entretanto, diante de várias técnicas compensatórias disponíveis, selecionar a que mais se aproxime de um paradigma de sustentabilidade é um complexo problema decisório e com pontos de vistas contraditórios. Da análise dos aspectos relevantes no processo de decisão tais como os aspectos

sociais, econômicos, ambientais, políticos e culturais, dentre outros, depende o sucesso das iniciativas de controle e mitigação dos impactos das inundações nas comunidades. Nesse sentido, a decisão sobre a adoção de qualquer conjunto de medidas deve atender a múltiplos critérios, e em muitos casos, dependendo da análise, de múltiplos decisores, que por sua vez podem ter interesses conflitantes e visões distintas acerca do planejamento do controle de inundações (CÔRTES, 2009).

No processo de tomada de decisão, é importante considerar informações relevantes para fazer uma recomendação final sustentável. Além disso, os tomadores de decisão devem estar abertos à inclusão de novas alternativas, o que exige uma reavaliação dos critérios e a possível inclusão de outros (PEREIRA, 2017).

Mendes e Mendiondo (2007), Valério e Fragoso Junior (2015), Barros, Rocha-Barreira e Magalhães (2013) e Vacario (2018) desenvolveram pesquisas consolidadas sobre inundações e alterações climáticas. Castro, Baptista e Netto (2004), Mendonça e Souza (2019), Brito (2006), Ellis *et al.* (2006) e Araújo (2016), pesquisaram métodos multicritério. No entanto, não há na literatura pesquisada uma associação entre a problemática das inundações urbanas e as alterações climáticas, nem uma metodologia que dê suporte aos tomadores de decisão na escolha da melhor alternativa para uma bacia.

Desta forma, este trabalho objetiva desenvolver uma metodologia capaz de auxiliar a seleção de alternativas ecoeficientes de amortecimento das águas pluviais para o controle de inundações urbanas, como ferramenta para o planejamento urbano em eventos críticos.

PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

A metodologia aplicada será de caráter exploratório e descritivo em relação aos objetivos, visando obter o maior número de informações e proporcionar maior grau de ligação com o tema, utilizando-se de uma abordagem quali-quantitativa.

O desenvolvimento da proposição metodológica foi baseado, ainda, em um pressuposto de sustentabilidade para que uma alternativa de amortecimento de águas pluviais possa ser implantada e operacionalizada em bacias urbanas. O referido pressuposto, que remete ao conceito de ecoeficiência, é alcançado pela definição de critérios ambientais, técnicos, econômicos e socioambientais.

A presente pesquisa tem como recorte territorial, o município de Belém, no estado do Pará, região norte do Brasil, foram selecionadas bacias hidrográficas urbanas que se caracterizam por serem extensamente antropizadas e de ocupação irregular, integrando uma parte da área continental do município, que se encontra em cotas inferiores a 4 m em relação ao nível do mar e sob influência de

marés, impondo-lhes uma condição de terrenos alagados ou sujeitos a inundações (permanente ou de maneira intermitente). Sendo estas, a saber: Estrada Nova, Una, Tucunduba e Murucutum.

Para melhor entendimento do percurso metodológico definido para alcançar os objetivos específicos, foram estabelecidas 4 etapas:

Etapa 1: Definição das alternativas ecoeficientes de amortecimento das águas pluviais, como medidas de controle de inundações para bacias urbanas.

Etapa 2: Definição de indicadores alinhados aos critérios ambientais, técnicos, econômicos e socioambientais.

Visando mensurar o avanço urbanizacional nas bacias estudadas e o respectivo **coeficiente de urbanização** (C_{urb}), como indicador do critério ambiental, no período entre 1984 e 2021, imagens de satélite foram geoprocessadas para diferenciar a malha urbana de outros elementos naturais.

Foram utilizadas imagens LANDSAT5/TM (27/07/1984) e LANDSAT8/OLI (11/08/2021) (NASA, 2021), georreferenciadas com base no banco de dados cartográfico da CODEM (2000) no sistema plano UTM zona 22 - DATUM SIRGAS 2000, com base em 20 pontos de controle. Na metodologia da classificação supervisionada (software ENVI versão 4.0), cada pixel foi definido como urbanizado ou não, conforme Pellizzaro *et al.* (2008).

O coeficiente de urbanização (C_{urb}) foi determinado então, em função da área urbanizada (A_{urb}), pela área total (A_{total}) de cada bacia, conforme Equação 1.

$$C_{urb} = A_{urb} / A_{total} \quad \text{Eq. 1}$$

Como indicadores do critério técnico foram determinados o **coeficiente de escoamento superficial** (C) e a **vazão específica** (Q_{esepc}).

Levou-se em consideração os dados do Plano Municipal de Saneamento Básico de Belém (BELÉM, 2020), que identificou o coeficiente de escoamento para cada uma das bacias hidrográficas. O mapeamento do uso do solo serviu de base para o cálculo, levando em conta diretamente o percentual de impermeabilização da bacia e as características das superfícies.

A vazão específica (Q_{espec}) segundo Azevedo Neto (2018) irá variar em função da relação entre a vazão concentrada (Q_{conc}) e a área total da bacia a ser estudada, conforme apresentado na equação 2, onde Q_{conc} é a vazão concentrada e A , a área da bacia.

$$Q_{espec} = Q_{conc}/A \quad \text{Equação 2,}$$

A vazão concentrada (Q_{conc}) foi calculada a partir de um canal principal de descarga, baseado em Azevedo Neto (2018), que estabelece a Equação 3:

$$Q_{conc} = (C \cdot i \cdot A) / T \quad \text{Equação 3}$$

Onde A é a Área da bacia; C é o coeficiente de escoamento superficial; i é a intensidade de precipitação ocorrida em um intervalo de tempo e t é o tempo em segundos.

Foram novamente utilizados os dados do Plano de Saneamento (BELÉM, 2020), sendo estabelecido o horizonte do estudo de 25 e 50 anos. Para cada bacia foi adotado o seu respectivo coeficiente de escoamento superficial.

Na análise do critério econômico, optou-se como indicador, o coeficiente econômico, a partir dos custos de implantação e operação, que segundo Brito (2006), são amplamente utilizados em projetos de drenagem.

Para o cálculo dos custos de implantação e manutenção das estruturas selecionadas (Retenção, Detenção Aberta, Detenção Fechada e Reservação em Lote) para cada bacia (Una, Estrada Nova, Tucunduba e Murucutum), foram feitas algumas determinações prévias:

$$Q_{arm} = Q_{conc} - Q_{rio} \quad \text{Equação 4}$$

Onde Q_{arm} a vazão de armazenamento; Q_{conc} é a vazão de concentração e Q_{rio} a vazão do rio.

A vazão do rio principal para cada bacia foi estabelecida a partir de pesquisa bibliográfica, conforme **Erro! Fonte de referência não encontrada.1**.

Tabela 1: Vazão do rio principal das bacias estudadas.

Bacias Estudadas	$Q_{rio} (\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$
Una	21,00
Estrada Nova	9,17
Tucunduba	22,54
Murucutum	8,00

Fonte: Autora (2023), adaptado de Lima *et al.* (2020), Santos e Rocha (2014) e Dias *et al.* (2021).

O volume a ser **armazenado** (V_{arm}), foi calculado pela Equação 5, de acordo com Azevedo Neto (2018):

$$V_{arm} = Q_{arm} \times T_{arm} \quad \text{Equação 5}$$

Onde V_{arm} é o volume de armazenamento; Q_{arm} é a vazão de armazenamento e T_{arm} é o tempo de armazenamento, definido em 2h, tomado por base Belém (2021).

Para o cálculo do custo de Implantação das estruturas por bacia a ser estudada foram empregados dados dos custos unitários por m^3 de implantação e manutenção (MENDONÇA, 2019) e atualizados para junho de 2022, segundo o Índice Nacional de Custos (INCC), com correção de 149,37%. A unidade de medida é dada por R\$. m^{-3} de volume.

Os custos de implantação das alternativas selecionadas para cada bacia foram calculados pelo produto do custo de implantação por metro cubico pelo volume a ser armazenado para cada bacia.

Para os custos de manutenção se considerou Nakazone (2005), que estabelece que estes devam ser calculados com base em 1 a 2% dos valores dos custos de implantação. Foi adotado o valor de 1,5%, obedecendo à média de vida útil de 30 anos. Os custos de operação foram considerados desprezíveis.

Por fim, para o cálculo do coeficiente econômico (C_e) levou-se em consideração a relação do custo total (C_t), determinado neste estudo pela somatória do custo de implantação (C_i) e manutenção (C_m), pela área de cada bacia (A) (Equação 6).

$$C_e = C_t / A \quad \text{Eq. 6}$$

Sobre os critérios socioambientais, Cortes (2009) aponta que devem ter por objetivo avaliar o comportamento do conjunto de medidas propostas em relação aos efeitos da sua inserção diretamente sobre a população e o meio.

Etapa 3: Classificação das Medidas Ecoeficientes de Controle de Inundações para as Bacias Urbanas

A classificação das medidas ecoeficientes para o controle de inundações em bacias urbanas iniciou com a definição de indicadores e critérios que irão compor a metodologia proposta, apresentada na Tabela 2 com os respectivos pesos atribuídos de acordo com pesquisa bibliográfica.

Tabela 2: Resumo dos indicadores e de suas respectivas importâncias (pesos).

Critérios	Indicadores	Sigla	Peso.
Ambiental	Coeficiente de Urbanização	C1	0,10
Técnico	Coeficiente de Escoamento Superficial	C2	0,15
Econômico	Vazão Específica	C3	0,15
Social Ambiental	Coeficiente Econômico	C4	0,20
	Percentual de Área Alagável	C5	0,15
	Densidade Populacional	C6	0,25

Fonte: Autora (2023).

Para a construção da matriz de avaliação levou-se em consideração a Tabela 2 e definiu-se perguntas norteadoras que auxiliassem na avaliação das alternativas e indicadores disponíveis.

A avaliação das alternativas com relação aos critérios e respectivos indicadores foi feita inicialmente tomando por base a literatura e caracterização das bacias, utilizando julgamentos subjetivos que foram convertidos em escala numérica, a saber, Excelente (5), Muito Bom (4), Bom (3), Regular (2) e Baixo (1).

Desta forma, a matriz de avaliação, apresenta o resumo do problema de decisão, com as alternativas: Bacia de Retenção (A1); Bacia de Detenção Aberta (A2); Bacia de Detenção Fechada (A3) e Reservação em Lote (A4) versus critérios, para cada bacia estudada.

Este trabalho considera que o processo de seleção de uma alternativa ecoeficiente para o amortecimento das águas pluviais em bacias urbanas (AMPURB) é um problema de decisão multicritério não compensatório, em que se adequa a concepção do método PROMETHEE (BRANS; VINCKE, 1985). O procedimento deste método leva em consideração o cumprimento de duas etapas básicas: a construção de uma matriz de decisão e a definição das funções de preferência, associadas a cada um dos critérios considerados.

A seleção da função de preferência para cada critério foi feita de forma global, ou seja, para um dado critério, escolheu-se a mesma função e os mesmos parâmetros p (Preferência) e q (indiferença) para representar as funções de preferência dos decisores.

Para os critérios C1 a C6, foi considerado que a preferência do decisior por uma alternativa em relação a outra é unívoca e exclusiva, ou seja, se eu escolho uma opção, uma alternativa é totalmente preferível a outra, ou seja, critério de preferência Tipo I.

Três fluxos de sobre-classificação são definidos, a saber, Fluxo de saída $\Phi^+_{(a)}$, quando o fluxo mensura a força de sobreclassificação de “a” sobre as outras n-1 alternativas; Fluxo de entrada $\Phi^-_{(a)}$, onde o fluxo mede a força de sobre-classificação das outras n-1 alternativas sobre “a”; e Fluxo líquido Φ , que é o resultado da diferença entre o fluxo de saída (Φ^+) e entrada (Φ^-) da alternativa “a”.

O PROMETHEE-II fornece um ranking completo, que se baseia no contrapeso dos dois fluxos de preferência (ou fluxo global), sendo este selecionado para este trabalho, de forma adaptada a planilha eletrônica para facilitar o uso do gestor na tomada de decisão.

Etapa 4: Prospecção de Cenários para Combinação Sustentável de Alternativas de Amortecimento.

Para a aplicação da metodologia proposta, foi considerado como cenário, um sistema tradicional com adoção estanque de uma alternativa estrutural definida neste trabalho com redução da área das bacias e extremos climáticos levando em consideração o cruzamento das condições naturais da maior maré já registrada a partir da série histórica da Marinha do Brasil, com os dados de elevação do nível do mar prevista pelo IPCC (2021) (+1,34 cm), buscando representar situações de eventos críticos.

Para tanto, elaborou-se um mapa de prospecção de áreas inundáveis nas bacias estudadas de acordo com o Painel Internacional de Mudanças Climáticas - IPCC. Utilizou-se o software QGIS, tendo como dados de entrada o arquivo vetorial das bacias hidrográficas urbanas e o Modelo Digital de Elevação (MDE) elaborado a partir as imagens ALOS/PALSAR (de 09/09/2009), resolução

espacial de 12,5m. Na definição da área (mancha) de inundação, levou-se em consideração dados de elevação do nível do mar projetados pelo IPCC (2021) e dados maregráficos, baseados na série histórica de 1948 a 2021, provenientes da Marinha do Brasil, responsável pelo monitoramento do nível maregráfico nacional (CENTRO DE HIDROGRAFIA DA MARINHA, 2021), incluindo a estação n. 10520 (Porto de Belém).

RESULTADOS

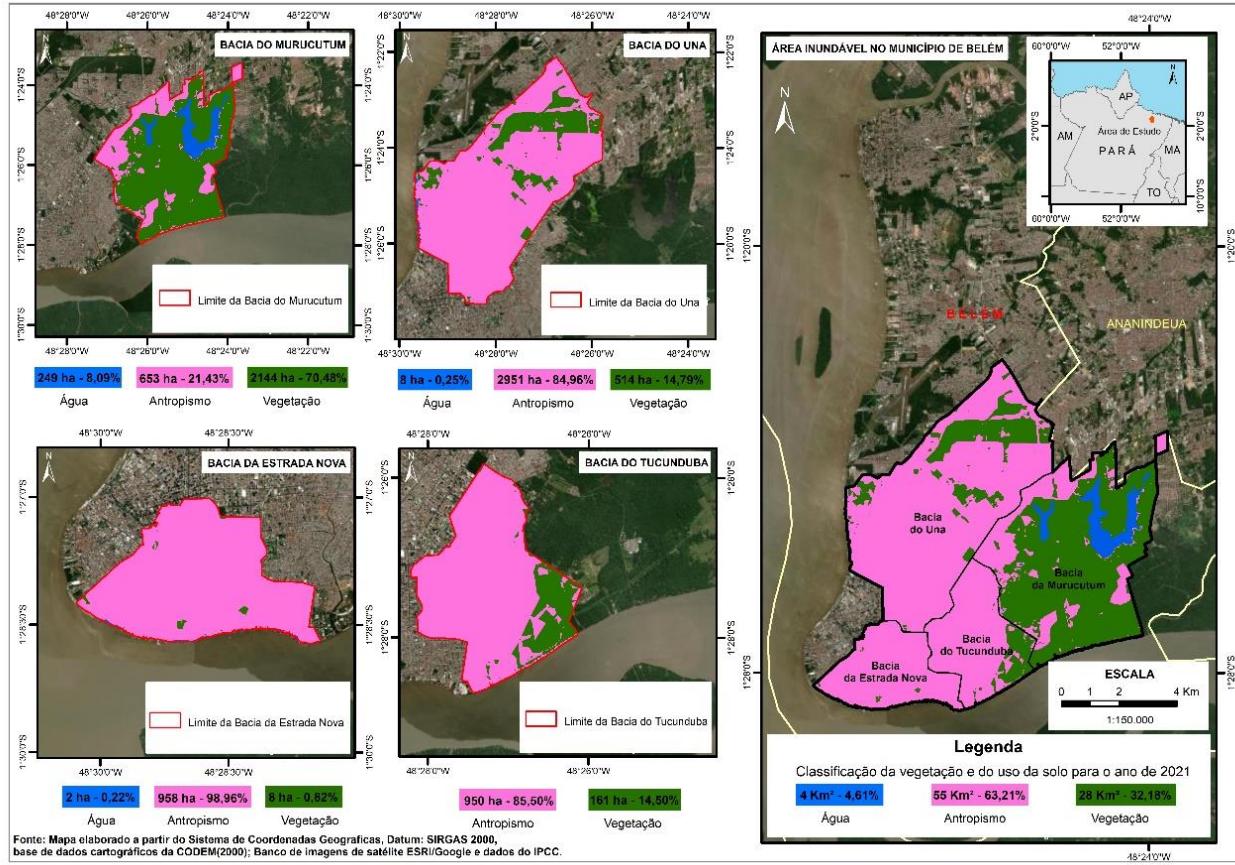
A definição das alternativas de amortecimento das águas pluviais levou em consideração diversos fatores como a característica hidrológica local e das bacias, a integração ao planejamento urbanístico, a manutenção do sistema e os seus respectivos custos, buscando garantir a segurança da população contra inundações sendo estas a saber: Bacia de Retenção, Bacia de Detenção Aberta, Bacia de Detenção Fechada e Reservação em Lote.

As bacias de detenção e retenção são previstas no Plano Municipal de Saneamento Básico de Belém (PMSB, 2020), com a finalidade de controlar o assoreamento e escoamento superficial, minimizando o efeito da urbanização sobre os picos de cheia, devendo estar como elementos integrados ao sistema de macrodrenagem, visando diminuir o risco hidrológico dos dispositivos existentes, sem a necessidade de ampliar a capacidade das redes e canais para contenção de cheias.

A seleção de indicadores esteve alinhada aos critérios ambientais, técnicos, econômicos e socioambientais. Para este estudo optou-se como indicador, pelo coeficiente de urbanização (C_{urb}). O aumento de áreas impermeáveis com o efeito da urbanização reduz a infiltração das águas. Isso resulta em um maior volume de escoamento superficial e, portanto, eleva a frequência de inundações (EKMEKCIOLU *et al.*, 2021).

Gerou-se a classificação não supervisionada para o período entre 1984 e 2021 (37 anos), contendo três classes: água, antropismo e vegetação (Figura 1). Os resultados obtidos indicam que a ocupação espacial de Belém já se encontrava consolidada em 1984, avançando apenas nas áreas de proteção ambiental. Portanto, é possível perceber uma discreta evolução nas áreas antropizadas (6%) em detrimento da vegetação, o que reforça o comprometimento do meio ambiente como um todo.

Figura 1: Mapa da evolução da ocupação urbana entre os anos de 1984 – 2021 nas bacias estudadas.



Fonte: Autora (2023).

A bacia do Murucutum é destacada, pois é em grande parte uma área de proteção ambiental, com cursos d'água importantes que abastecem a Região Metropolitana de Belém (RMB). Pelos valores obtidos a partir do mapa de evolução da ocupação urbana das bacias estudadas, obteve-se o coeficiente de urbanização (C_{urb}), com valores descritos na Tabela 4.

Tabela 4: Critério e indicadores ambientais.

Bacias Estudadas	CRITÉRIO AMBIENTAL/INDICADORES	Área Total (ha)	Área Urbanizada (ha)	Coeficiente de Urbanização (%)
Una		3.467,54	2.951,00	85
Tucunduba		1.109,39	950,00	86
Estrada Nova		966,31	958,00	99
Murucutum		3.041,17	653,00	21

Fonte: Autora (2023).

Observa-se que a bacia da Estrada Nova se encontra urbanizada quase em sua totalidade, seguida pelas bacias do Tucunduba e Una. A Murucutum do contrário, mantém grande parte de sua vegetação preservada, o que era esperado pela área de proteção ambiental, existente em sua área.

Para o critério técnico, conforme mencionado anteriormente, optou-se pelo coeficiente de escoamento superficial (C) e a vazão específica (Q_{espec}). A vazão específica (Q_{espec}) é em função da vazão concentrada. O volume precipitado (V_{prec}) utilizado para determinação da vazão concentrada (Q_c) decorreu da chuva de 177 mm por 14 horas, ou seja, 12,64 mm.h⁻¹ (BELÉM, 2020).

O coeficiente de escoamento superficial (C) pode ser determinado pela relação entre o volume escoado superficialmente e volume precipitado, variando entre 0 e 1. Quanto mais próximo de 1, maior será o escoamento superficial, ou seja, a água infiltra menos e a superfície é considerada impermeável, resultando em mais água direcionada ao sistema de drenagem. Valores do coeficiente mais próximo de 0 infere que grande parte da água é infiltrada no solo, retida na vegetação e somente uma pequena parte é escoada, aliviando a pressão sobre a drenagem (BELÉM, 2020).

Para uma melhor análise a respeito da viabilidade econômica das alternativas de drenagem, o coeficiente econômico (C_e) de cada alternativa para as bacias estudadas, tomando por base os custos de implantação (C_i) e manutenção (C_m) das estruturas, seria mais relevante, levando em consideração o cenário estabelecido.

Os custos de implantação (C_i) estão relacionados aos materiais, mão de obra, serviços gerais, preparação e instalação de canteiro de obra, movimentação de terra e instalação de máquinas e equipamentos específicos, quando necessários para a execução de medidas de controle previstas. Os custos de manutenção (C_m) são necessários para conservar o funcionamento eficiente da ação, podendo ser obras, utilização de equipamentos ou uma combinação dos dois. Como indicadores dos critérios socioambientais foram selecionados o Percentual de Área Alagável e a Densidade Populacional (Tabela 5).

Tabela 5: Critérios e indicadores socioambientais.

Bacias Estudadas	Percentual de Área Alagável (%)	Densidade Populacional (hab.ha ⁻¹)
Una	19	119,00
Estrada Nova	55	269,33
Tucunduba	62	296,38
Murucutum	29	27,56

Fonte: Autora (2023), adaptado Belém (2020) e Cruz (2018).

A respeito do percentual de área alagável identificado, importa mencionar que a população que habita ou trabalha em uma zona inundável sofre diretamente os seus efeitos. Isso sem contar os subsequentes danos materiais e psicológicos. Este aspecto, embora difícil de ser abordado em qualquer análise, não pode deixar de ser considerado, na expectativa que haja assim, redução da severidade das inundações sobre a população traduzindo-se pela redução na área afetada, dos incômodos gerados, e também na melhoria das condições de convívio social (CÔRTES, 2009).

Sobre a densidade populacional, Lawrence (2012) aponta que elevados valores deste indicador podem até mesmo provocar efeitos significativos sociopsicológicos em indivíduos, requerendo modos específicos de interação interpessoal e na organização social e espacial do meio.

Cruz (2018) considera que as bacias hidrográficas situadas em áreas de baixada na Região Metropolitana de Belém (RMB), apresentam níveis elevados de adensamento populacional e construtivos devido à precariedade infraestrutural e às características morfológicas e climáticas da região, e que sua elevação pode agravar esse cenário, inclusive, no que se refere às condições de salubridade locais.

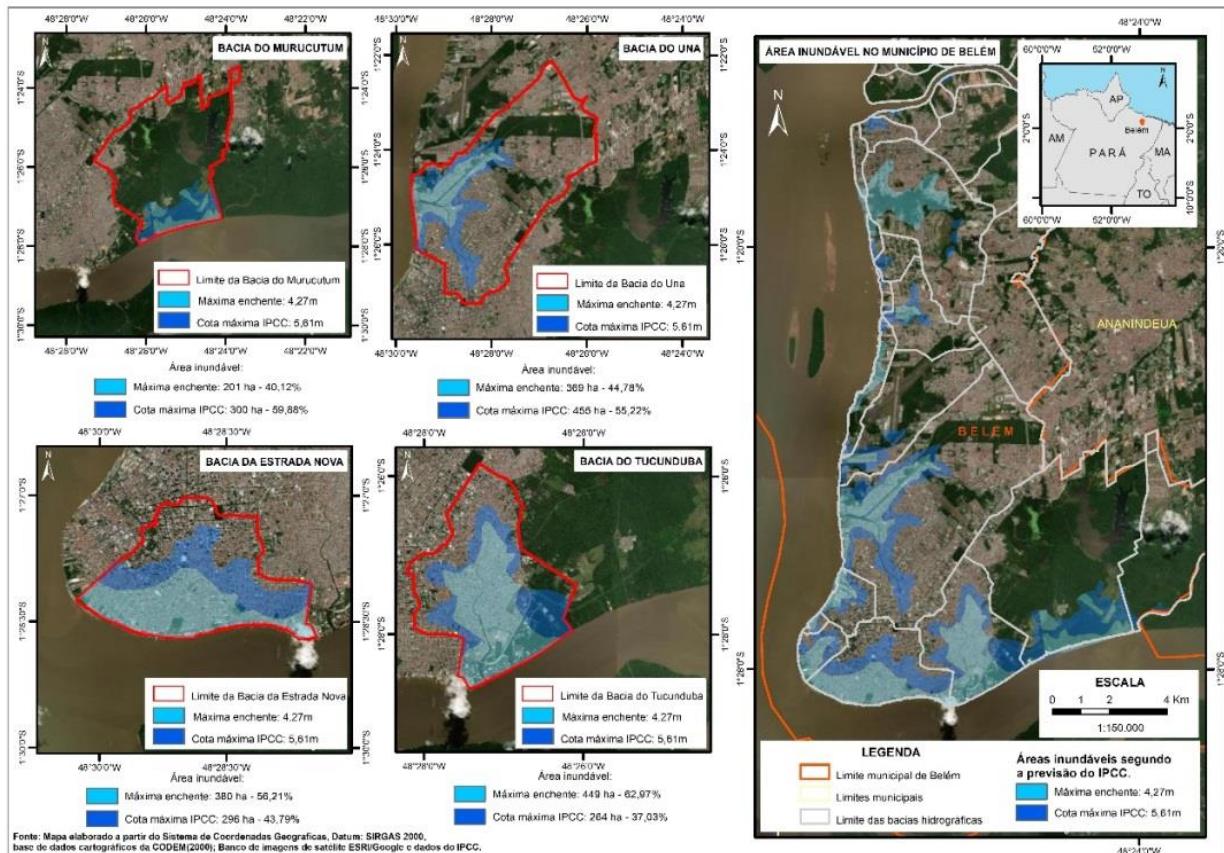
As etapas 3 e 4 estabelecidas na metodologia foram desenvolvidas concomitantemente pois são interdependentes. A matriz de suporte à decisão, elaborada com base no método PROMETHEE (Etapa 3), permitirá a seleção da alternativa mais ecoeficiente no cenário estabelecido (Etapa 4), com a finalidade de fornecer aos gestores tomadores de decisão um leque de opções e a versatilidade da metodologia de seleção de alternativas para o amortecimento das águas pluviais em bacias urbanas.

Para subsidiar a análise de cenários foi realizada a prospecção de áreas inundáveis nas bacias estudadas devido às alterações climáticas. O levantamento das áreas passíveis de inundação nas bacias estudadas considerou tanto a maré quanto a elevação do nível do mar devido às alterações climáticas, conforme previsto na metodologia.

Para melhor visualização do crescimento da maré, nível do mar e enchentes urbanas, plotou-se os níveis obtidos no mapa topográfico de Belém (BELÉM, 2021), com resolução centesimal, importado para programa de geoprocessamento (QGis) e gerado raster (sistema plano UTM zona 22, DATUM: SIRGAS 2000) as duas áreas de inundação em base, a saber, elevação do nível do mar e maré máxima. O raster foi sobreposto a uma imagem Landsat TM8+. Ao analisar a maré que influencia a capital paraense, verifica-se que existe uma constância de nível, não ultrapassando **4,00m**. No entanto, em 2020, ocorreu uma leitura de **4,27m**.

Conforme 6º relatório do IPCC (2021), situações de caos à população causado pela combinação forte chuvas e elevação de maré, podem ficar piores e recorrentes, visto que a previsão de elevação do nível do mar para o Porto de Belém pode ser de **1,34m** até 2150. A Figura 2 mostra as áreas atingidas por uma cota de **5,61m**, compreendendo a maior registro de maré (**4,27m**) e a previsão de crescimento do nível do mar em Belém (**1,34m**).

Figura 2: Mapa de inundação das sub-bacias de estudo em Belém, com os níveis de elevação do IPCC e Maré maximum maximorum.



Fonte: Autora (2023).

O cenário proposto levou em consideração a influência desses extremos climáticos (com a elevação do nível do mar e maré *maximum maximorum* em Belém), acarretando na diminuição das áreas disponíveis nas bacias (Tabela 6).

Tabela 6: Área das bacias levando em consideração as cheias.

Bacias Estudadas	Área Total (m ²)	Área Total pós-cheia (m ²)	Redução (%)
Una	34.675.407	26.437.300	24
Estrada Nova	9.663.075	2.990.900	69
Tucunduba	11.093.941	3.956.700	64
Murucutum	30.411.658	25.405.600	16

Fonte: Autora (2023).

Considerou-se a área total das bacias após a cheia e o volume precipitado (V_{prec}) de 12,64 mm.h⁻¹, os valores de coeficiente de escoamento superficial foram definidos pela literatura e vazão concentrada e específica para cada bacia, obedeceram as equações 3 e 2 respectivamente (Tabela 7).

Tabela 7: Critério e indicadores técnicos selecionados.

Bacias Estudadas	CRITERIO TÉCNICO		
	Coeficiente de Escoamento Superficial (%)	Vazão Concentrada ($m^3.s^{-1}$)	Vazão Específica ($m^3.s^{-1}.ha^{-1}$)
Una	67	62,19	0,024
Estrada Nova	74	7,77	0,026
Tucunduba	66	9,17	0,023
Murucutum	42	37,46	0,015

Fonte: Autora (2023), adaptado de Belém (2020)

Os valores do coeficiente de escoamento das bacias indicam sobrecarga no sistema de drenagem, com frequentes eventos de alagamento, exceto na bacia do Murucutum, que apresenta valor igual a 42%. Entretanto, tem histórico de sobrecarga e inundações em alguns pontos. Quanto maior o coeficiente de escoamento superficial, maior é a vazão gerada por unidade de área (vazão específica), e as bacias com Q_{espec} mais elevadas apresentam o parâmetro “C” acima de 50%.

Destaca-se que a bacia do Murucutum apresentou os menores valores de vazão específica e coeficiente de escoamento superficial. Isso pode ser justificado pela presença de uma APA em seus limites, que permite reter e infiltrar a água, ao invés de liberá-la para escoamento no exutório.

A vazão de armazenamento (Q_{arm}) para cada bacia, calculada a partir da Equação 4, pode ser descrita conforme Tabela 8.

Tabela 8: Vazão de armazenamento das bacias estudadas.

Bacias Estudadas	$Q_{conc} (m^3.s^{-1})$	$Q_{rio} (m^3.s^{-1})$	$Q_{arm} (m^3.s^{-1})$
Una	62,19	21,00	41,19
Estrada Nova	7,77	9,17	-1,40
Tucunduba	9,17	22,54	-13,37
Murucutum	37,46	8,00	29,46

Fonte: Autora (2023).

O volume a ser armazenado ($V_{arm/alt}$) para cada bacia foi calculado a partir da equação 5 (Tabela 9).

Tabela 9: Volume a ser armazenado nas bacias estudadas.

Bacias Estudadas	$Q_{arm} (m^3.s^{-1})$	T (s)	$V_{arm} (m^3)$
Una	41,19	7.200	296.584,72
Estrada Nova	-1,40	7.200	-10.072,64
Tucunduba	-13,37	7.200	-96.271,25
Murucutum	29,46	7.200	212.146,52

Fonte: Autora (2023).

O volume de armazenamento encontrado para as bacias da Estrada Nova e Tucunduba foram negativos, indicando que as vazões dos respectivos rios são capazes de escoar todo o volume gerado na bacia após a redução da área. Desta forma, não considerando as bacias que não demandam

alternativas de controle de águas pluviais, as Tabelas 10 a 13 apresentam o coeficiente econômico de cada medida estrutural para as bacias do Una e Murucutum.

Tabela 10: Coeficiente econômico da bacia de retenção.

Bacias	Custo de Implantação unitário (R\$.m ⁻³ de volume)	Volume a ser Armazenado (V _{arm}) (m ³)	Custo Final de Implantação (R\$)	Custo de Manutenção (R\$)	Custo Total (R\$)	Coef. Econômico (R\$.ha ⁻¹)
Una	134,49	296.584,72	39.887.678,64	598.315,18	40.485.993,82	15.313,96
Murucutum	134,49	212.146,52	28.531.858,45	427.973,78	28.959.559,23	11.398,89

Fonte: Autora (2023).

Tabela 11: Coeficiente econômico da bacia de detenção aberta.

Bacias	Custo de Implantação unitário (R\$.m ⁻³ de volume)	Volume a ser Armazenado (V _{arm}) (m ³)	Custo Final de Implantação (R\$)	Custo de Manutenção (R\$)	Custo Total (R\$)	Coef. Econômico (R\$.ha ⁻¹)
Una	166,03	296.584,72	49.241.960,62	738.629,41	49.980.590,03	18.905,32
Murucutum	166,03	212.146,52	35.222.686,68	528.340,30	35.751.026,98	14.072,10

Fonte: Autora (2023).

Tabela 12: Coeficiente econômico da bacia de detenção fechada.

Bacias	Custo de Implantação unitário (R\$.m ⁻³ de volume)	Volume a ser Armazenado (V _{arm}) (m ³)	Custo Final de Implantação (R\$)	Custo de Manutenção (R\$)	Custo Total (R\$)	Coef. Econômico (R\$.ha ⁻¹)
Una	556,57	296.584,72	165.070.156,14	2.476.052,34	167.546.208,48	63.374,89
Murucutum	556,57	212.146,52	118.074.388,52	1.771.115,83	119.845.504,35	47.172,87

Fonte: Autora (2023).

Tabela 13: Coeficiente Econômico da bacia de reservação em lote.

Bacias	Custo de Implantação unitário (R\$.m ⁻³ de volume)	Volume a ser Armazenado (V _{arm}) (m ³)	Custo Final de Implantação (R\$)	Custo de Manutenção (R\$)	Custo Total (R\$)	Coeficiente Econômico (R\$.ha ⁻¹)
Una	588,84	296.584,72	174.640.944,97	2.619.614,17	177.260.559,14	67.049,37
Murucutum	588,84	212.146,52	124.920.356,72	1.873.805,35	126.794.162,07	49.907,95

Fonte: Autora (2023).

A bacia do Murucutum apresentou os menores coeficientes econômicos em comparação a do Una, o que é esperado pelos valores obtidos dos volumes a serem armazenados que também foram os menores para todas as alternativas analisadas.

Para o cenário proposto entre as alternativas estudadas, a bacia de retenção obteve os menores valores de coeficiente econômico, seguido pela bacia de detenção aberta, detenção fechada e, por

último, reservação em lote. Observou-se que, quanto aos critérios ambientais e socioambientais, este cenário não alterou os indicadores analisados.

Para a construção da matriz de avaliação levou-se em consideração os critérios definidos na metodologia. Desta forma, a matriz de avaliação alternativa, das bacias do Una e Murucutum, encontram-se descritas respectivamente nas **Erro! Fonte de referência não encontrada.**¹⁴ e ¹⁵.

Tabela 14: Matriz de avaliação alternativa (bacia do Una).

Critérios Indicadores Objetivo	Ambiental C1 Min	Técnico C2 Máx	Econômico C3 Min	Socioambiental C5 Min	C6 Min
Alternativas	Retenção	3	4	4	4
	D. Aberta	3	4	3	4
	D. Fechada	4	2	5	3
	Lote	2	5	1	2

Fonte: Autora (2023).

Tabela 15: Matriz de avaliação alternativa (bacia do Murucutum).

Critérios Indicadores Objetivo	Ambiental C1 Min	Técnico C2 Máx	Econômico C4 Min	Socioambiental C5 Min	C6 Min
Alternativa	Retenção	2	3	3	4
	D. Aberta	2	3	3	4
	D. Fechada	3	4	4	3
	Lote	2	2	2	2

Fonte: Autora (2023).

Uma vez que o cenário de cheia reduziu consideravelmente a quantidade de áreas disponíveis para servirem como “Reservação em Lote”, esta alternativa é considerada como a de menor preferência em relação as demais.

Situação que ficou refletida na pontuação da alternativa na matriz de avaliação, especialmente nos indicadores C1 (coeficiente de urbanização) e C3 (vazão específica). Além disso, a detenção aberta também foi prejudicada devido aos maiores valores de C4 (coeficiente econômico).

Dessa forma, neste cenário, a retenção aberta, foi a melhor alternativa, devido à menor nota atribuída ao indicador C1 (coeficiente de urbanização), enquanto a detenção fechada foi a segunda melhor, por depender menos de área e afetar menos a área urbanizada remanescente (C1). Na bacia do Murucutum, ainda há preocupação em não avançar sobre as áreas de preservação, o que destaca a importância da detenção fechada, que é a alternativa que menos demanda espaço. A determinação da matriz de intensidade de preferência das bacias do Una e Murucutum seguiu ao estabelecido na metodologia e estão descritas nas tabelas 16 e 17, respectivamente.

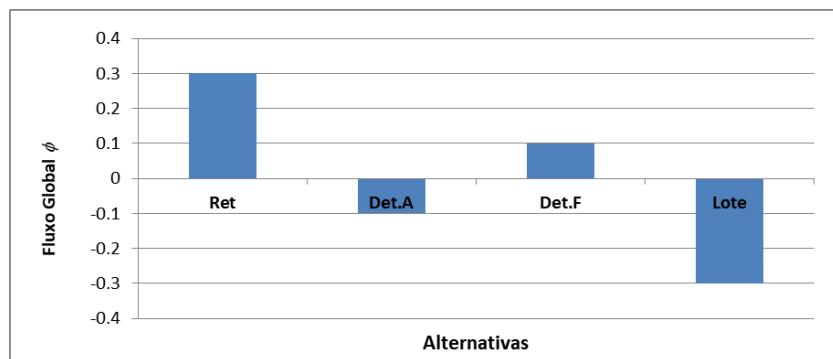
Tabela 16: Bacia do Una.

Alternativas	Cálculo dos Fluxos e Ordenação			Ordenação
	Negativo □⁻	Positivo □⁺	Fluxo Global □	
Retenção	0,95	1,25	0,30	1
Detenção Aberta	1,15	1,05	-0,10	3
Detenção Fechada	1,45	1,55	0,10	2
Lote	1,65	1,35	-0,30	4

Fonte: Autora (2023).

Para a bacia do Una, a alternativa de retenção foi a melhor, seguida de detenção fechada, detenção aberta e, por fim, reservação em lote (Figura 3).

Figura 3: Desempenho das alternativas para a bacia do Una.



Fonte: Autora (2023).

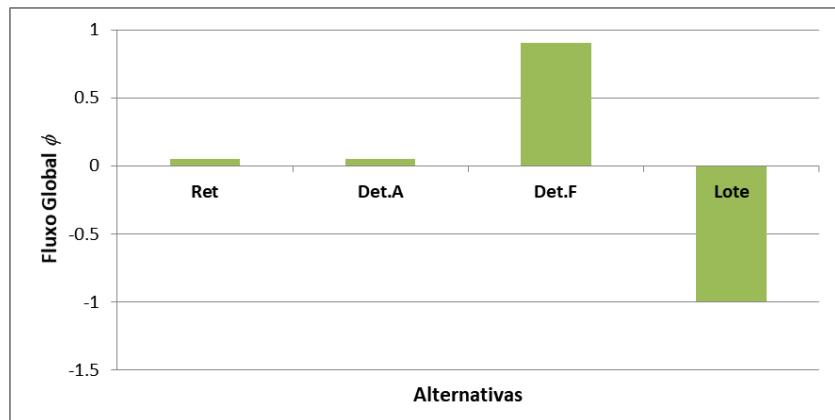
Para a bacia do Murucutum o melhor desempenho foi obtido pela detenção fechada. O pior desempenho foi para o lote, enquanto que a retenção e detenção aberta apresentaram fluxos e ordenações iguais observado na Tabela 17 e confirmado na Figura 4.

Tabela 17: Bacia do Murucutum.

Alternativas	Cálculo dos Fluxos e Ordenação			Ordenação
	Negativo □⁻	Positivo □⁺	Fluxo Global □	
Retenção	0,85	0,90	0,05	2
Detenção Aberta	0,85	0,90	0,05	2
Detenção Fechada	1,05	1,95	0,90	1
Lote	1,75	0,75	-1,00	4

Fonte: Autora (2023).

Figura 4: Desempenho das alternativas para a bacia do Murucutum.



Fonte: Autora (2023).

CONCLUSÕES

A metodologia proposta mostrou-se eficiente no auxílio da seleção de alternativas sustentáveis de amortecimento das águas pluviais para o controle de inundações urbanas podendo subsidiar o processo decisório, apresenta-se ainda como ferramenta simples, de fácil manuseio, aplicação e consistência, facilitando aos gestores na tomada de decisão, incluindo os não técnicos.

É importante salientar que na etapa de definição de critérios e alternativas, o tomador de decisão, deve participar ativamente, estando seguro, quanto aos objetivos a serem alcançados, o que fará com que os resultados propostos pelo modelo sejam comprehensíveis e mais exequíveis.

A representação matemática para classificação das medidas ecoeficientes de controle de inundações para bacias urbanas, utilizando o método multicritério PROMETHEE com o auxilio da planilha eletrônica, apresentou-se eficiente, com resultados satisfatórios e facilidade de aplicação e utilização pertinente no suporte à tomada de decisão.

Observa-se também que as bacias estudadas apresentam cotas inferiores a 4m, estando sob influencia de maré, com áreas naturalmente alagadiças, modificadas para atender aos processos de ocupação. Tal situação deve nos remeter a reflexão para aplicação de medidas que venham oportunizar o planejamento urbano sustentável social e ambientalmente, garantindo a população, condições dignas de moradia e saúde, respeitando também o meio ambiente e os recursos hídricos.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, D. C. **Metodologia para apoio à decisão na gestão das águas pluviais urbanas combinando métodos multicriterial e multidecisor.** Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Pernambuco. 2016. 207p. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/18668>’

AZEVEDO NETO, J. M. **Manual de hidráulica.** 9 ed. São Paulo: Blucher, 2018. 632p.

BARROS, K. V. S.; ROCHA-BARREIRA, C. A.; MAGALHAES, K. M. Ecology of brazilian seagrasses: is our current knowledge sufficient to make sound decisions about mitigating the effects of climate change?. *Iheringia, Série Botânica.*, v. 68, n. 1, p. 163-178, 2013. Disponível em: <https://isb.emnuvens.com.br/iheringia/article/view/45>

BELÉM. **Revisão do plano municipal de saneamento básico, prognóstico e alternativas para universalização dos serviços de drenagem urbana e manejo das águas pluviais.** Belém: Prefeitura Municipal de Belém do Pará. Relatório 4.3, Revisão 3, 2020. Disponível em: http://www.belem.pa.gov.br/arbel/?page_id=723

BELÉM. **Revisão do plano municipal de saneamento básico, do plano de gestão integrada de resíduos sólidos e respectivas políticas municipais. caracterização geral do município de Belém.** Belém: Prefeitura Municipal de Belém do Pará. Relatório 3.1, Revisão 1. 2021. Disponível em: http://www.belem.pa.gov.br/arbel/?page_id=723

BRANS, J.P.; VINCKE, P. Note—A preference ranking organisation method: (the PROMETHEE method for multiple criteria decision-making). *Management science*, v. 31, n. 6, p. 647-656, 1985. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-64765-0_6#:~:text=The%20Preference%20Ranking%20Organization%20Method,graph%2C%20i.e.%20reduce%20th

e%20incomparabilities.

BRITO, D. S. **Metodologia para seleção de alternativas de sistemas de drenagem.** Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília. 2006. 117p. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/3319>

CASTRO, L.; BAPTISTA, M. B.; NETTO, O. M. C. Análise multicritério para a avaliação de sistemas de drenagem urbana: proposição de indicadores e de sistemática de estudo. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 9, n. 4, p. 05-19, 2004. Disponível: https://abrh.s3.sa-east1.amazonaws.com/Sumarios/30/6f432d324627eb2288c1efc77f68ce95_3c2ad480b3655705a1b531f3c68c279f.pdf

CENTRO DE HIDROGRAFIA DA MARINHA. **Banco Nacional de Dados Oceanográficos - BNDO.** 2021. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/chm/bndo>

CODEM - **Companhia de Desenvolvimento e Administração da Área Metropolitana de Belém.** Cartografia digital da área urbana e expansão urbana. CD-ROM, 2000.

CÔRTES, J. M. **Sistemática de auxílio à decisão para a seleção de alternativas de controle de inundações urbanas.** Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília. 2009. 342p. Disponível: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/4599>

CPRM – Serviço Geológico do Brasil. **Imagen de satélite LandSAT TM 5 Folha AS-22.** Disponível em: <http://geosgb.cprm.gov.br/downloads/>

CRUZ, C. C. C. S. **Uso e ocupação do solo nas bacias hidrográficas da região metropolitana de Belém: uma análise urbanístico-ambiental.** Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós Graduação em Arquitetura e Urbanismo. Belém. 2018. Disponível em: <https://ppgau.propesp.ufpa.br/dissertacoes/2018/Disserta%C3%A7%C3%A3o%20Camila%20Cristina%20da%20Costa%20Santos%20Cruz.pdf>

DIAS, D. S. *et al.* Uso de pluviômetro artesanal como instrumento aplicado à modelagem de cheia em Belém-PA. **Geoambiente On-line**, n. 41, 2021. Disponível em: <http://www.revistas.ufg.br/geoambiente>.

EKMEKCIOĞLU, Ö. *et al.* Investigation of the low impact development strategies for highly urbanized area via auto-calibrated Storm Water Management Model (SWMM). **Water Science and Technology**, v. 84, n. 9, p. 2194-2213, 2021. Disponível em: <https://iwaponline.com/wst/article/84/9/2194/84443/>

ELLIS, J. B. *et al.* The DayWater decision support approach to the selection of sustainable drainage systems: A multi-criteria methodology for BMP decision makers. **Water Practice and Technology**, v. 1, n. 1, 2006. Disponível em: <https://iwaponline.com/wpt/article-abstract/1/1/wpt2006002/20884>

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. Summary for policymakers. contribution of working group to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. In: **Climate change 2021: the physical science basis. contribution of working group i to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change.** Cambridge University Press. In Press, 2021. Disponível em: <https://ci.nii.ac.jp/naid/10016705922/>

LAWRENCE, R. Health risks: overcrowding. In: International encyclopedia of housing and home. Susan J. Smith (Editor). Elsevier. 339-343p. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978008047163100549X>

LELIS, T. A. *et al.* Impactos causados pelas mudanças climáticas nos processos erosivos de uma bacia hidrográfica: Simulação de cenários. **Ambiente & Água-An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 6, n. 2, p. 282-294, 2011. Disponível: <https://www.redalyc.org/pdf/928/92819767019.pdf>

LIMA, A. C. M. *et al.* Urbanização e canais urbanos: avaliação da qualidade das águas da bacia hidrográfica do Una no Município de Belém, Brasil. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 7, p. e232973866-e232973866, 2020. Disponível em: <https://rsdjurnal.org/index.php/rsd/article/view/3866>

MENDES, H. C.; MENDIONDO, E. M. Histórico da expansão urbana e incidência de inundações: o caso da Bacia do Gregório, São Carlos-SP. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, n. 1, p. 17-27, 2007. Disponível em: https://abrh.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/21/8929ab216c275c4e6f0c83e08e1e2fbb_239069120256863bc9bc6df8ae5bcd86.pdf

MENDONÇA, E. C.; SOUZA, M. A. A. Uma metodologia multiobjetivo e multicritério para avaliação de desempenho de sistemas de drenagem urbana. **Ingeniería del agua**, v. 23, n. 2, p. 89-106, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.4995/Ia.2019.10214>

MENDONÇA, F.; LEITÃO, S. A. M. Riscos e vulnerabilidade socioambiental urbana: uma perspectiva a partir dos recursos hídricos. **GeoTextos**, v.4, n.1. 2008. Disponível em: <https://periodicos.ufba.br/index.php/geotextos/article/view/3300>

NASA. **Global climate change**. Vital signs of the planet. Disponível em: <https://climate.nasa.gov/vital-signs/sea-level/>

PELLIZZARO, P. C. *et al.* Urbanização em áreas de mananciais hídricos: estudo de caso em Piraquara, Paraná. **Cadernos Metrópole**, n. 19, 2008. Disponível em: <https://revistas.pucsp.br/metropole/article/view/8717>

PEREIRA, C. R. P. **Índice de risco de inundaçāo como ferramenta de planejamento urbano**. Dissertação (mestrado)- Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ/Escola Politécnica e Escola de Química/Programa de Engenharia Ambiental. Rio de Janeiro. 2017. 216p. Disponível em: <https://periodicos.ufes.br/simpurb2019/article/view/26769/19902>

SANTOS, F. A. A.; ROCHA, E. J. P. Alagamento e inundaçāo em áreas urbanas. Estudo de caso: cidade de Belém. **Revista GeoAmazônia**, v. 1, n. 02, p. 33-55, 2014. Disponível em: https://periodicos.ufpa.br/index.php/geoamazonia/article/download/12352/pdf_8

VACARIO, E. P. L. **Ribeirão Cambé: um estudo direcionado ao entendimento das enchentes urbanas em Londrina – PR**. Londrina. Dissertação (Mestrado em Geografia). Universidade Estadual de Londrina, Centro de Ciências Exatas, Programa de Pós-Graduação em Geografia. 2018. 63p. Disponível em: https://www.academia.edu/41216804/Ribeir%C3%A3o_Camb%C3%A9_um_estudo_direcionado_ao_entendimento_das_enchentes_urbanas_em_Londrina_PR_Ribeir%C3%A3o_Camb%C3%A9_a_study_directed_to_the_understanding_of_the_urban_floods_in_Londrina_PR_Autor_Ester_Paula_Leite_Vacario

VALÉRIO, E. L. S.; FRAGOSO JUNIOR, C. R. Avaliação dos efeitos de mudanças climáticas no regime hidrológico da bacia do rio Paraguaçu, BA. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 20, n. 4, p. 872-887, 2015. Disponível: <https://www.researchgate.net/publication/285925454/links/56646f2d08ae192bbf909d51/pdf>