Revista Brasileira de Climatologia
Brazilian Journal of Climatology
OPEN ACCESS

CONDICIONANTES DA DETONAÇÃO DE EVENTOS HÍDRICOS ADVERSOS NA BACIA DO CANAL DO MANGUE – RIO DE JANEIRO

Conditions for triggering adverse water events in the Canal do Mangue basin – Rio de Janeiro

Condiciones de detonación de eventos hídricos adversos en la cuenca del Canal do Mangue – Rio de Janeiro

Aline Riccioni de Melos
Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET-RJ)
aline.melos@cefet-rj.br

Felipe Abdala Rumanos de Castro
Departamento de Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)
abdalitefelipe@gmail.com

Julia Barbosa Komarov
Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e do Meio Ambiente, Universidade Federal Fluminense (UFF)
juliakomarov@gmail.com

Resumo: As inundações, enchentes e alagamentos urbanos - aqui referidos como eventos hídricos adversos (EHAs), geralmente relacionados a eventos de chuva intensa (ECIs) - constituem um problema crônico na região compreendida pela bacia do Canal do Mangue (BCM). A bacia drena bairros densamente ocupados da cidade do Rio de Janeiro, nos quais foram empreendidas obras de macrodrenagem urbana entre 2012 e 2019, com a finalidade de conter os desastres associados a casos de EHAs recorrentes na área. Nesse sentido, o objetivo deste artigo foi realizar uma análise comparativa dos EHAs entre os períodos anterior e posterior à instalação das referidas obras. Para tanto, foram coletados e processados dados de precipitação de três estações pluviométricas, dados de cota do nível do rio Maracanã de uma estação linimétrica localizada no baixo curso do rio e dados de maré de uma estação localizada no exutório da bacia, além de cartas sinóticas e imagens de satélite da América do Sul entre os anos de 1997 e 2021. Como resultados, foi observada a recorrência de fenômenos meteorológicos de escala sinótica na detonação de ECIs; a influência diminuta da maré na detonação de EHAs; além da elevação do limiar detonador de EHAs entre os períodos anterior e

posterior às obras de macrodrenagem urbana. No entanto, foi constatado que a ocorrência dos EHAs permanece frequente na área de estudo considerada.
Palavras-chave: Alagamentos. Eventos de chuva intensa. Clima urbano.

Abstract: Floods, inundations and urban flooding, referred to here as Adverse Water Events(AWEs), are generally related to heavy rainfall events (HREs) and constitute a chronic problem in the Mangue Channel (Canal do Mangue) basin (MCB) region. In the city of Rio de Janeiro, the basin drains densely populated neighborhoods and between 2012 and 2019 urban macro-drainage works were undertaken to contain the disasters associated with recurrent AWEs. Given this context, the objective of this article is to relate the results of a comparative analysis of AWEs prior to and after the works were undertaken. For this article, we collected and processed five types of data: rainfall data from three rainfall stations, Maracanã River level quota data from a linimetric station located in the lower course of the river, tidal data from a station located at the basin outlet as well as synoptic charts and satellite images of South America from 1997 to 2021. The results we observed were the recurrence of synoptic scale meteorological phenomena in triggering HREs; the tiny influence of the tide on AWE triggering, as well as an increase in the triggering threshold of AWEs between the periods before andafter the urban macro-drainage works. However, we found that the occurrence of AWEs remains frequent in the area considered for this study.
Keywords: Urban flooding. Heavy rain events. Urban climate.

Resumen: Las inundaciones y anegamientos urbanos, mencionados aquí como eventos hídricos adversos (EHAs), son generalmente relacionados con eventos de lluvia intensa (ELIs). Constituyen un problema crónico en la región de la cuenca del Canal del Mangue (CCM). La cuenca drena barrios densamente poblados de la ciudad de Rio de Janeiro, en los que se realizaron obras de macrodrenaje urbano ente 2012 y 2019, con el fin de contener los desastres asociados a los EHAs recurrentes en la zona. En ese sentido, el objetivo de este artículo es realizar un análisis comparativo de los EHAs entre los períodos anterior y posterior a la realización de estas obras. Para ello, se recopilaron y procesaron datos de precipitación de tres estaciones pluviométricas, datos sobre la cota de nivel del río Maracanã de una estación limnimétrica ubicada en el curso bajo del río y datos de mareas de una estación ubicada en la desembocadura de la cuenca, además de cartas sinópticas e imágenes satelitales de América del Sur entre los años 1997 y 2021. Como resultado se observó la recurrencia de fenómenos meteorológicos de escala sinóptica en la detonación de ELIs; la ínfima influencia de la marea en la detonación de los EHA; además de elevar el umbral de activación de las EHA entre los periodos anterior y posterior a las obras de macrodrenaje urbano. Sin embargo, se constató que la ocurrencia de EHA sigue siendo frecuente en el área de estudio considerada.
Palabras-clave: Anegamientos. Eventos de lluvia intensa. Clima urbano.

Submetido em: 17/04/2022
Aceito para publicação em: 06/01/2023
Publicado em: 10/01/2023

1. INTRODUÇÃO

Enchentes e inundações são fenômenos naturais dos cursos fluviais, que, durante séculos, foram considerados extremamente benéficos, pois aportavam material rico em nutrientes para a área de agricultura de várzea. Somente quando o homem se apropria, com formas estáticas e inapropriadas, do espaço natural de inundação e/ou enchente do rio é que esse processo natural e até benéfico passa a ser considerado um evento catastrófico, devido aos problemas sociais e econômicos causados (PINHEIRO, 2007).

O entendimento dos fatores contribuintes para a ocorrência desse evento natural é essencial para prevenção e mitigação de danos causados, ou seja, fundamental para o planejamento de áreas próximas aos cursos d'água. Todavia, a previsão da ocorrência de inundações é um processo complexo, envolvendo diversos fatores como apontado por Amaral e Ribeiro (2009): a intensidade e distribuição da precipitação, a taxa de infiltração de água no solo, o grau de saturação do solo e as características morfométricas da bacia de drenagem. Gontijo (2007) generaliza esses fatores ao condicionar a hidrologia de uma determinada região a seus padrões climáticos e fatores físicos (topografia, geologia e cobertura vegetal).

Apesar da importância das chuvas, apontado por Gontijo (2007) e Pinheiro (2007), assim como de sua inter-relação com outros componentes do ciclo hidrológico para a ocorrência de enchentes e inundação, as alterações antrópicas exercem papel crucial, modificando significativamente as componentes do ciclo hidrológico numa bacia de drenagem, que podem agravar ou reduzir a magnitude desses processos naturais. Ainda segundo os mesmos autores, as principais alterações feitas pelo homem estão ligadas ao processo de urbanização e consequentemente, à impermeabilização do solo, que gera um aumento do escoamento superficial na bacia, ou seja, a água da chuva chega mais rapidamente ao canal fluvial. Dessa forma, até chuvas curtas, mas intensas, têm a capacidade de gerar um transbordamento do nível do canal, tendo em vista que a quantidade de água drenada é superior à sua capacidade de escoamento.

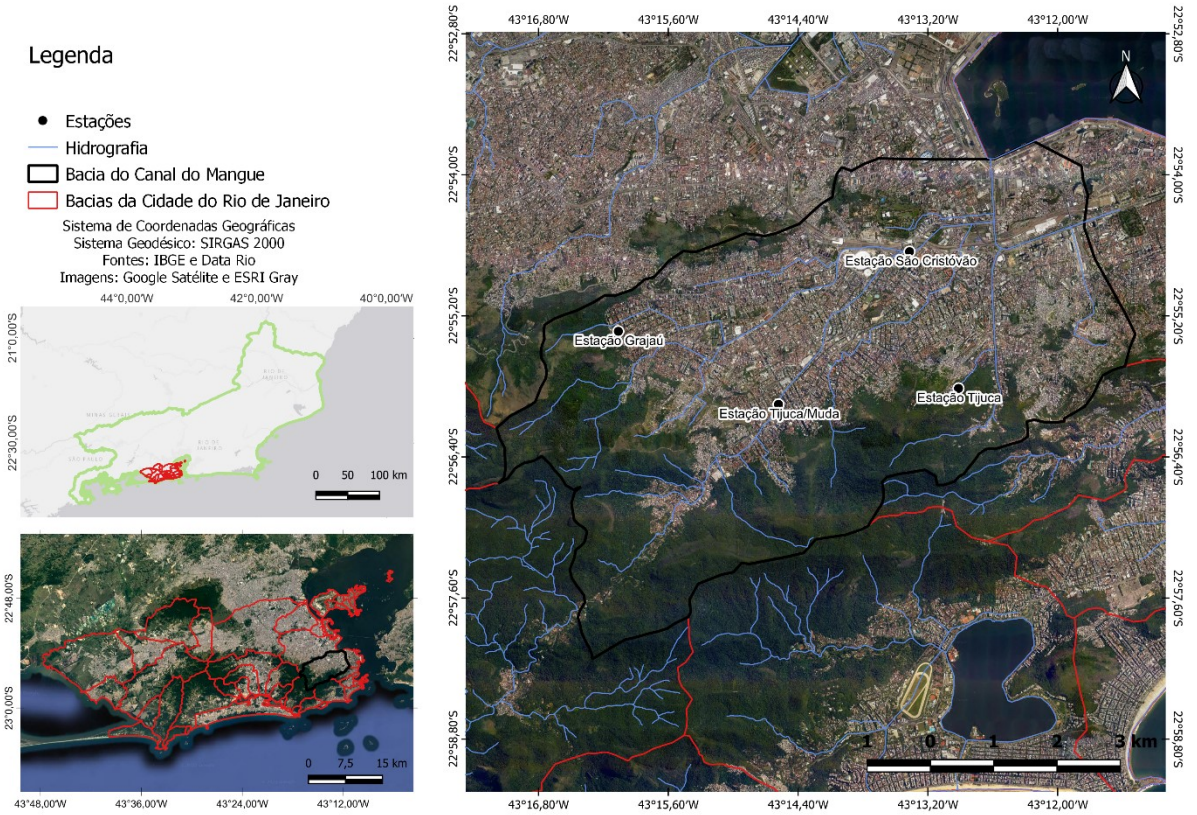
Todavia, também é verificada, nas bacias urbanas, a ocorrência de alagamentos, definido pelo Ministério das Cidades/IPT (2007) como sendo o acúmulo momentâneo de águas em determinados locais por deficiência no sistema de drenagem. Portanto, esse fenômeno não depende do transbordamento de rios e canais, mas da não adequação dos

sistemas de drenagem em relação às chuvas que ocorrem em determinada área. Esse último tipo de fenômeno pode ocorrer de forma concomitante ou separada no tempo e no espaço das inundações e enchentes. Ou seja, é possível que um evento pluviométrico gere respostas de diferentes gêneses na bacia, as quais podem ser agrupadas como eventos hídricos adversos. Para Monteiro e Pinheiro (2012), esses fenômenos naturais passam a ser classificados como desastres naturais quando afetam o homem e suas atividades, de forma direta ou indireta. Logo, esses eventos hídricos adversos são agrupados como desastres hidrológicos pelo COBRADE (BRASIL, 2012) quando geram impactos ao homem.

1.1. Área de Estudo

A bacia do Canal do Mangue (Figura 1), com uma área de aproximadamente 45 km², está localizada no Município do Rio de Janeiro e drena os seguintes bairros: Catumbi, Cidade Nova, Estácio, Rio Comprido, Santa Teresa, Mangueira, São Cristóvão, Praça da Bandeira, Alto da Boa Vista, Tijuca, Vila Isabel, Andaraí, Grajaú, Maracanã, Gamboa, Santo Cristo e Centro. Possui como limites o maciço da Tijuca a oeste, a Baía de Guanabara a leste, a bacia do Canal do Cunha ao norte e a bacia do Centro ao sul. Os principais cursos d'água componentes da bacia são os rios Maracanã, Joana, Trapicheiros, Comprido e Papa-Couve, que convergem para o Canal do Mangue e, por fim, desaguam na Baía de Guanabara.

Figura 1 - Mapa da Bacia do Canal do Mangue/RJ



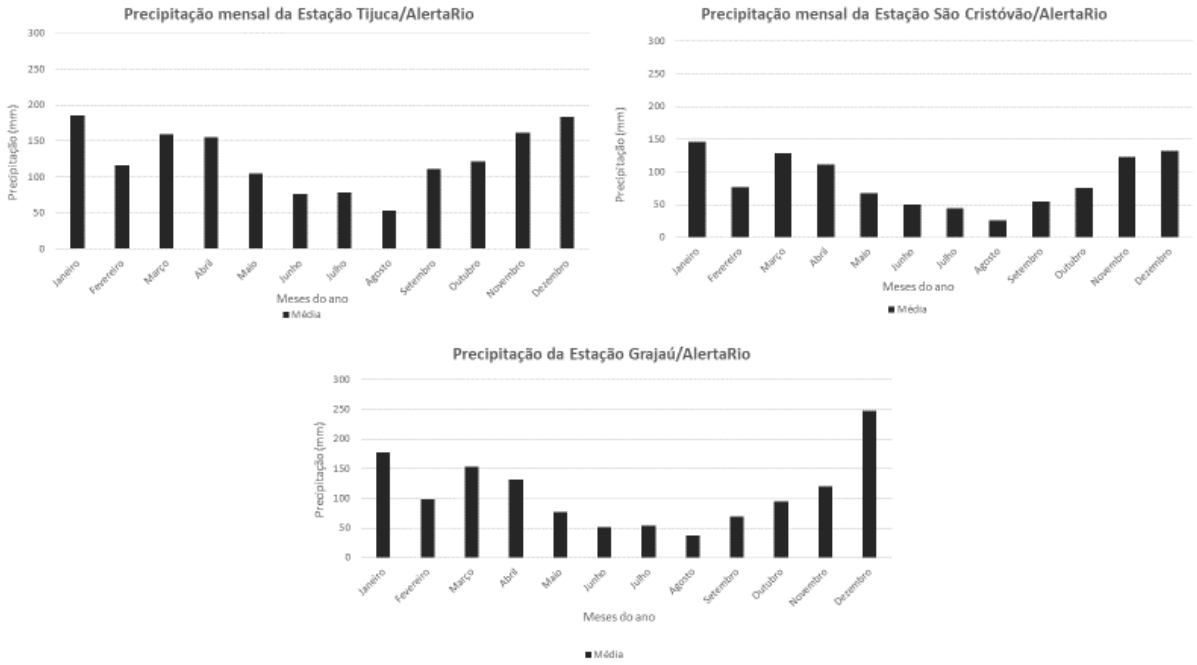
Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

Na BCM, é observado um comportamento tipicamente sazonal da pluviosidade, com uma estação chuvosa marcada entre os meses de novembro e abril e uma estação seca marcada entre os meses de maio e outubro (Figura 2). As características pluviométricas são típicas do clima tropical úmido (ou tropical litorâneo), que, segundo Mendonça e Danni-Oliveira (2009) e Nimer (1989), é dominante no Rio de Janeiro, sendo caracterizado pelas elevadas temperaturas durante o verão - por influência da massa tropical atlântica (mTa) - e temperaturas amenas durante o inverno - por influência da massa polar atlântica (mPa) -, e pluviosidade abundante, com sazonalidade bem delimitada em uma estação relativamente mais seca e uma estação mais chuvosa.

Conforme apontam Gan *et al*. (2004) e Garcia e Kayano (2009), o comportamento sazonal da pluviosidade é modulado sobretudo pela atuação do Sistema Monçônico da América do Sul (SMAS). Contudo, o SMAS não é resultado da reversão na direção dos ventos tropicais de baixos níveis – como ocorre com a monção do Sudeste Asiático –, em função de fatores como a estreiteza do continente sul-americano na faixa extratropical, que limita a área

de formação de sistemas estacionários de altas polares e baixas quentes; e o fenômeno persistente da ressurgência do oceano Pacífico Sul na costa oeste do continente, que mantém a temperatura da superfície do mar mais baixa que a temperatura do ar durante o ano.

Figura 2 - Gráficos de precipitação mensal para as estações pluviométricas Tijuca, Grajaú (série histórica: 1997 a 2016) e São Cristóvão (série histórica: 2001 a 2016).



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Segundo Melos *et al.* (2018), o relevo da bacia apresenta acentuados desníveis nas regiões oeste e sudoeste, onde está localizado o maciço da Tijuca, seguida por uma grande região urbanizada situada em áreas quase totalmente planas. De acordo com Dereczynski *et al*. (2009), os maciços geológicos do Rio de Janeiro funcionam como barreiras orográficas na produção de nebulosidade e deflagração de chuvas intensas, ao mesmo tempo em que, segundo Armond (2014), aparecem como centros dispersores de águas pluviais convergindo para os fundos de vale.

A BCM caracteriza-se, segundo Carneiro e Ribeiro (2003), por sua alta densidade demográfica e elevada densificação de construções. De acordo com Diniz (2019), o processo de ocupação urbana na região compreendida pela bacia foi iniciado ainda no final do século XVI, evoluindo conforme o desenvolvimento dos ciclos econômicos históricos do projeto colonizador português. A dinâmica de urbanização da região foi acelerada com a transferência

da Corte portuguesa para o Rio de Janeiro no início do século XIX, guiada pelas novas concepções urbanísticas trazidas da Europa, envolvendo o aterramento de grandes alagadiços antes existentes na área da bacia.

Ainda de acordo com a autora, o Saco de São Diogo, antiga morfologia litorânea do Rio de Janeiro extensamente coberta por formação vegetal típica de manguezais e pântanos, foi aterrado e os tributários da bacia, antigos afluentes com desembocaduras independentes na Baía de Guanabara, foram retificados e canalizados a partir da construção do Canal do Mangue entre os anos de 1857 e 1876. Com as reformas urbanísticas implementadas pelo governo imperial, a ocupação da área de drenagem da bacia permitiu a ampliação das áreas dominadas pelas atividades econômicas predominantes na época - inicialmente, o cultivo da cana-de-açúcar e, posteriormente, do café -, corroborando na expansão da malha urbana carioca.

Nesse sentido, essa configuração geomorfológica e topográfica de elevada declividade, quando combinada à situação geográfica da bacia favorável à ocorrência de chuvas orográficas, contribui aumentando a energia do fluxo dos rios em seu alto curso e reduzindo o escoamento dos canais em seu baixo curso, o que, em último caso, resulta em enchentes e inundações nas áreas planas. Devido à condição costeira da cidade, com o exutório da bacia situado na Baía de Guanabara, região de encontro da drenagem fluvial com o litoral oceânico, a situação de suscetibilidade à ocorrência de enchentes e inundações fica sujeita à influência da maré, que pode dificultar ou não o escoamento dos rios. Somado a isso, de acordo com Diniz (2019), estão fatores de ordem antrópica como a ocupação das baixadas e áreas de várzea, resultando no estreitamento das partes destinadas ao sistema viário; a ocupação das encostas na forma de assentamentos urbanos precários, resultando no incremento ao acúmulo de sedimentos e no assoreamento dos rios; e o modelo de expansão urbana baseado no aterramento de alagadiços litorâneos e nas obras de retificação e canalização do curso dos rios.

A recorrência dos eventos de enchente nesta bacia, com inúmeras perdas materiais e não-materiais, transformou-a numa área crítica para a gestão, culminando em diversas intervenções no sistema de drenagem desta área. Dessa forma, no ano de 2012, o governo municipal deu início, junto ao governo federal, ao Programa de Controle de Enchentes da Grande Tijuca, implementando obras de engenharia sob responsabilidade da Fundação Instituto das Águas do Município do Rio de Janeiro (Rio-Águas), custeadas pelo Programa de

Aceleração do Crescimento (PAC 2), cujo objetivo era evitar novas inundações e enchentes na região da Grande Tijuca (PREFEITURA DA CIDADE DO RIO DE JANEIRO, 2015).

Segundo Souza e Ottoni (2015), as intervenções previam o desvio de parte da vazão do rio Maracanã para o rio Joana, a restituição do curso do rio Joana para seu exutório natural na Baía de Guanabara e a canalização de um trecho do rio Trapicheiros, além da implantação de quatro reservatórios de amortecimento de grande porte (popularmente conhecidos como "piscinões"). Todavia, Knaack (2012 *apud* SOUZA e OTTONI, 2015) já advertia que essas intervenções estruturais deveriam vir acompanhadas de medidas complementares, pois correriam o risco de se mostrarem ineficientes, como observado em outras cidades brasileiras, a exemplo de São Paulo/SP.

Portanto, o objetivo da pesquisa é avaliar a eficácia dos projetos de engenharia instalados na Bacia do Canal do Mangue (BCM) na contenção de enchentes urbanas na região, através da caracterização dos eventos anteriores e posteriores à instalação dos equipamentos.

2. METODOLOGIA

2.1. Definição dos Períodos de Análise

A fim de atingir o objetivo proposto, o trabalho foi dividido em duas partes: na caracterização de eventos de inundação anteriores e posteriores à instalação de equipamentos. A análise do período pré-instalação de obras de engenharia objetiva estabelecer as condições anteriores às atuais modificações na BCM. Para tanto, foi necessário compreender o regime climático e de condições de maré, assim como seu rebate nas cotas linimétricas e na ocorrência de inundações na bacia.

Por isso, para a definição do período de análise, foi feito um levantamento, junto ao sistema Alerta Rio, das estações pluviométricas existentes na área de estudo, assim como de suas séries históricas e seus respectivos anos de início de atividade, a saber: Tijuca (EPT) e Grajaú (EPG) - 1997 e São Cristóvão (EPSC) - 2001 (Figura 1). Logo, foi definido o período para análise das condições iniciais de 1997 a 2013, visto que o primeiro "piscinão" foi entregue em dezembro de 2013, o período de análise após o início das instalações se deu de 2014 a 2021.

A tabulação, o tratamento e o processamento gráfico dos dados de precipitação pluviométrica foram feitos através do *software Microsoft Office Excel®*.

2.2. Eventos Hídricos Adversos (EHAs)

No momento seguinte, foi feita uma busca pelos casos de inundação registrados na área compreendida pela BCM durante o período de 1997 a 2021, utilizando-se como fontes reportagens veiculadas em portais de notícias na internet e trabalhos acadêmicos. De posse dessas informações, foram selecionados no total trinta e oito eventos de inundação para análise, de modo a tentar compreender a relação entre as variáveis precipitação, cota do nível do rio e altura da maré, além de tentar entender qual o papel dos sistemas meteorológicos no desencadeamento das chuvas intensas responsáveis pelos eventos de inundação. Desses eventos, dez ocorreram antes da instalação dos equipamentos de contenção de enchentes, e vinte e oito, após o início das instalações.

2.3. Cota do Rio Maracanã

Na BCM, há somente um ponto de medição de cota linimétrica, que fica no rio Maracanã, próximo à estação de metrô de São Cristóvão (Figura 1), no trecho final do rio. Os dados de cota foram obtidos no site do INEA – Instituto Estadual do Ambiente para o período de 2012 a 2016. A tabulação, o tratamento e o processamento gráfico dos dados de cota foram feitos através do *software Microsoft Office Excel®*.

2.4. Precipitação e Clima Urbano

Com o objetivo de entender a origem dos eventos de chuva associados aos respectivos casos de inundação, foi preciso realizar uma análise sobre a situação da atmosfera em escala sinótica, de modo a buscar saber os sistemas meteorológicos atuantes na área de estudo antes e durante a ocorrência da precipitação. Para tal, foram adquiridas dez cartas sinóticas da América do Sul confeccionadas e disponibilizadas gratuitamente na plataforma on-line da Diretoria de Hidrografia da Marinha do Brasil (DHN); e as respectivas imagens digitais da América do Sul captadas pelo satélite GOES-16 no canal infravermelho, disponibilizadas

gratuitamente na plataforma on-line do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC/SP).

2.5. Maré

Para o estudo da influência da maré na região, foram obtidos os dados de maré a partir do ponto do Porto do Rio de Janeiro (Ilha Fiscal), fornecido pela Marinha do Brasil, para o período de 2005 a 2016. Foi feita a identificação das marés de sizígia e de quadrante em todo o período analisado, com base nas fases da Lua. Foi feita a identificação das marés mais acentuadas selecionadas a partir das 25% maiores marés dos anos analisados (2012 a 2016), ou seja, marés astronômicas ou meteorológicas maiores ou iguais a 1,3 metros que ocorreram em dias com precipitação inferior a 5 mm. A partir da delimitação dos dias e horários de análise, foi feita a caracterização do comportamento linimétrico do canal próximo à foz da BCM, buscando-se identificar influência da maré no aumento da cota do nível do rio Maracanã. A tabulação, o tratamento e o processamento gráfico dos dados de maré foram feitos através do *software Microsoft Office Excel®*.

2.6. Comparação de Limiares Detonadores de EHAs

Para avaliação dos limiares pluviométricos detonadores, foi utilizado o mesmo pressuposto de Melos *et al*. (2018), os quais entendem que a definição da intensidade mínima de chuva associada à ocorrência de inundações deve ser pautada na compreensão de que todas as estações representam áreas da BCM que contribuem para a ocorrência de transbordamentos de rios e canais, assim como de alagamentos no seu baixo curso. Dessa forma, para o estabelecimento do limiar detonador de eventos hídricos adversos na bacia, é considerado o menor valor entre as maiores intensidades horárias de precipitação em cada evento. Com base na obtenção e comparação dos limiares para os dois períodos propostos, foi possível avaliar o efeito das obras de macrodrenagem na BCM.

3. RESULTADOS

3.1. Caracterização Pluviométrica e Climática

Segundo Dereczynski *et al*. (2009), a ocorrência de eventos de chuva intensa no município do Rio de Janeiro está frequentemente associada à atuação de alguns fenômenos meteorológicos ao longo do ano e, sobretudo, durante a estação chuvosa, que dura de novembro a março, quando o grau de convecção atmosférica - calor e umidade - está mais elevado, favorecendo a formação de nebulosidade e a ocorrência de precipitação pluviométrica.

O estado do Rio de Janeiro permanece sob atuação constante da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), sistema estacionário responsável por manter condições de céu claro ou com pouca nebulosidade e ventos de intensidade fraca. Contudo, essa situação de estabilidade sofre interrupção quando sistemas transientes de origem polar ou subtropical penetram na região, intensificando a velocidade dos ventos e provocando a formação de nebulosidade, que ocasiona precipitação de moderada a alta intensidade (FIDERJ, 1978 *apud* DERECZYNSKI *et al*., 2009; AYOADE, 1996; NIMER, 1989).

Segundo os mesmos autores, os fenômenos meteorológicos mais frequentes são os Sistemas Frontais (SF), tidos como zonas de perturbação atmosférica produzidas pelo choque entre massas de ar com características - termométricas, barométricas, higrométricas, anemométricas - distintas. Em seguida, está a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), extensa banda de nebulosidade de caráter semi-estacionário, orientada no sentido noroeste-sudeste, localizada entre o sul da região amazônica e a porção central do oceano Atlântico Sul, resultante da intensificação do calor e da umidade provenientes do encontro de massas de ar quentes e úmidas da Amazônia (massa equatorial continental - mEc) e do Atlântico Sul (massa tropical atlântica - mTa).

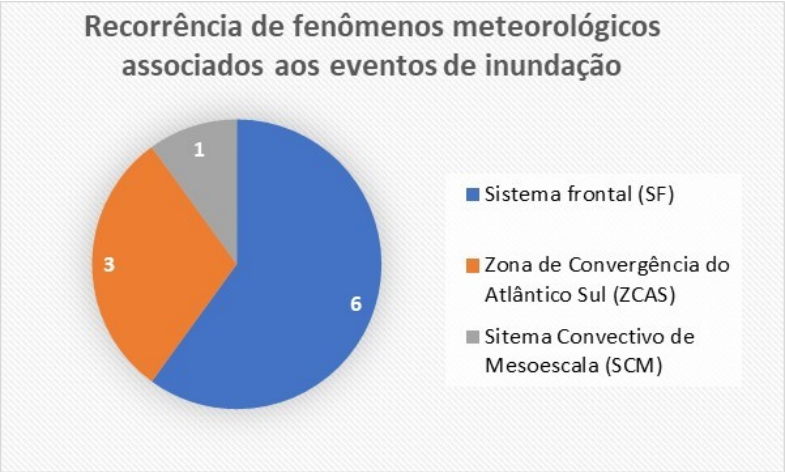
Logo após, ainda segundo os autores, está a influência dos Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM), definidos como sendo aglomerados de nuvens convectivas associados ao aquecimento e umidificação diferenciais produzidos pelos limites continente-oceano, pelas ilhas oceânicas e/ou topografia local. Por fim, vem a circulação marítima (CM), assim denominada para representar o sistema de circulação atmosférica periódico das brisas, que pode ocasionar chuva orográfica devido ao encontro da umidade trazida do oceano com

encostas de relevo encontradas ao longo de todo o litoral carioca, considerando-se a topografia acidentada do terreno compreendido pelo município do Rio de Janeiro.

Neste trabalho, optou-se por não utilizar um limiar prévio para a definição de evento de chuva intensa (ECI) como feito por inúmeros estudos como Liebmann *et al*. (2001), Santos *et al*. (2016), Silva *et al*. (2020) e Pristo *et al*. (2018). Pois, como apontam Pereira e Nunes (2018), a definição de eventos de chuva intensa varia de acordo com as características físicas, geomorfológicas, hipsometria, cobertura vegetal, hidrografia, socioespaciais, grau de urbanização, mudanças no uso e ocupação do solo de cada localidade. Logo, o critério aqui adotado para definir eventos de chuva intensa se baseia na ocorrência de inundações urbanas, que são acompanhadas de transtornos sociais e/ou danos materiais e/ou humanos como feito por Silva e Nunes (2011), Nunes e Silva (2013) e Pereira e Nunes (2018). Ou seja, avalia-se a intensidade de um fenômeno meteorológico através dos impactos gerados às atividades humanas (CAMBRA e COELHO NETTO, 1997).

Dentre os dez casos de eventos de chuva intensa associados a eventos hídricos adversos na BCM analisados, foram identificados três principais fenômenos meteorológicos deflagradores da precipitação. Em ordem decrescente de recorrência, estão os Sistemas Frontais, a Zona de Convergência do Atlântico Sul e os Sistemas Convectivos de Mesoescala (Figura 3). Nesse sentido, como apontam Dereczynski *et al*. (2009) e Lima e Armond (2022), fica notável a participação expressiva dos sistemas de escala sinótica – com escala espacial variando de metros a quilômetros e escala temporal variando de horas a dias – na configuração da dinâmica de grande escala e na detonação de eventos de chuva intensa associados aos eventos hídricos adversos ocorridos na região.

Figura 3 – Frequência de ocorrência de fenômenos meteorológicos associados aos eventos hídricos adversos na bacia do Canal do Mangue/RJ (série histórica: 1997 a 2016).

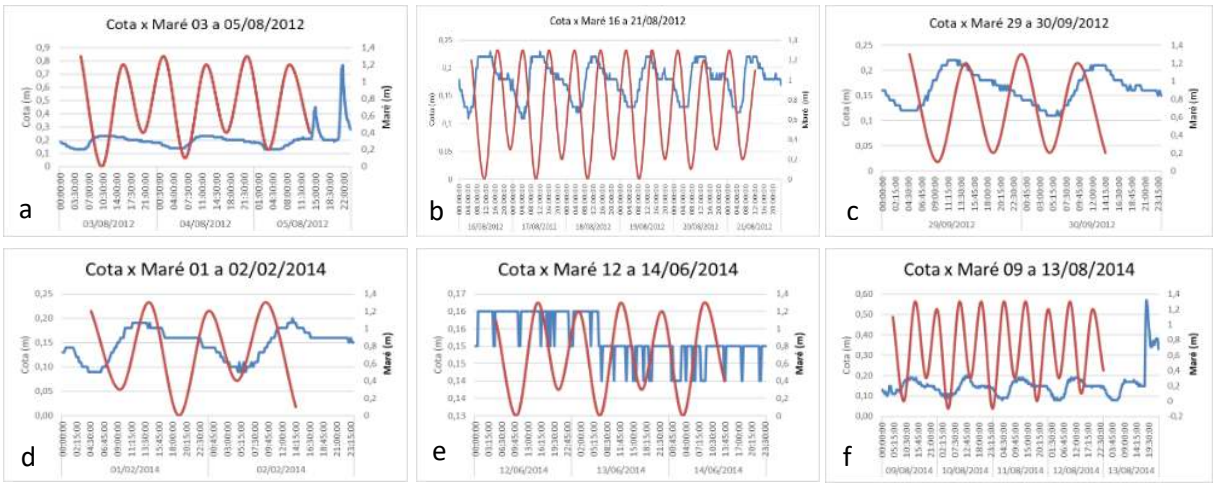


Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

3.2. Caracterização da Maré

A análise das 25% maiores marés não correspondeu somente à ocorrência da maré de sizígia, como preconizado inicialmente, mas também foi observado que marés de quadrante podem apresentar altos valores de amplitude devido a fatores atmosféricos. Esses valores de amplitude da maré não dependem somente de sua classificação astronômica (de quadrante ou de sizígia), mas também das oscilações de marés meteorológicas, a exemplo dos valores superiores ou iguais 1,3 m registrados em dias de maré de quadrante (Figura 4 a-f).

Figura 4 – Gráficos de cota do nível do rio Maracanã na estação São Cristóvão/INEA e maré na estação Porto do Rio de Janeiro (Ilha Fiscal)/Marinha do Brasil. As variáveis estão representadas, respectivamente, por linhas de cor azul e vermelha.



Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

Foi observada uma variação maior de 10 a 13 cm nos gráficos a, b, c , d, f, enquanto que o gráfico e mostrou uma variação menor de aproximadamente 1 cm (Figura 4). Na Figura 4a, verificou-se um aumento na cota em 60 cm, com uma precipitação de 0,8 mm na ESC, todavia, essa chuva não seria capaz de provocar tamanho efeito no nível do rio. Logo, apesar de não terem sido considerados para análise eventos com precipitação maior ou igual a 5 mm, é importante ressaltar que o ponto de coleta de dado de cota reflete não somente a chuva ocorrida naquela estação, mas sim toda a precipitação ocorrida na bacia, por isso os aumentos de cota acentuados em todos os gráficos da Figura 4.

De acordo com os gráficos apresentados, foi possível indicar que o nível habitual da cota do rio fica em torno de 15 cm e a maior variação de cota gerada pela maré foi de 15 cm. É importante ressaltar que a cota de transbordamento do rio na estação em questão é de 3,35 m. Também foi constatado que a oscilação na cota do nível do rio em função da oscilação na altura da maré apresenta um atraso variável de algumas horas, o que ocorre devido ao fato de a estação fluviométrica não estar localizada na foz da BCM.

3.3. Análise dos EHAs

No período anterior às intervenções públicas de drenagem urbana na região, foram encontrados registros de dez eventos hídricos adversos afetando bairros compreendidos pela BCM coincidentes com a ocorrência de eventos de chuva intensa. Na Tabela 1, foi constatado que o antigo limiar detonador de inundações na bacia equivalia a uma intensidade de 14,1 mm/h.

Tabela 1 – Descrição dos eventos de chuva intensa associados a eventos hídricos adversos no período anterior às intervenções públicas na bacia do Canal do Mangue – RJ.

Data	Intensidade máxima do ECI (mm/h)			Limiar detonador do EHA (mm/h)
	EPT	EPSC	EPG	
15/01/1999	14,1	Sem dados	13,7	14,1
27/01/2006	64,6	63,4	61,8	64,6
18/04/2006	30,6	15,0	23,6	30,6
15/12/2006	15,8	10,0	40,2	40,2
06/03/2010	58,4	32,2	48,6	58,4
15/03/2010	27,0	42,2	28,8	42,2
07/04/2010	40,4	46,6	49,2	49,2
27/10/2010	23,4	12,2	15,2	23,4
05/12/2010	49,6	58,2	29,2	58,2
25/04/2011	60,4	55,8	67,4	67,4

Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

No período posterior às intervenções públicas de drenagem urbana na região, foram encontrados registros de vinte e oito eventos hídricos adversos afetando bairros compreendidos pela BCM, coincidentes com a ocorrência de eventos de chuva intensa. Na Tabela 2, foi constatado que o novo limiar detonador de inundações na bacia equivale a uma intensidade de 19,6 mm/h.

Tabela 2 – Descrição dos eventos de chuva intensa associados a eventos hídricos adversos no período posterior às intervenções públicas na bacia do Canal do Mangue – RJ.

Data	Intensidade máxima do ECI (mm/h)			Limiar detonador do EHA (mm/h)
	EPT	EPSC	EPG	
31/01/2015	41,2	27,2	36,4	41,2
12/03/2016	86,4	49,8	84,4	86,4
13/12/2016	14,6	31,4	23,2	31,4
20/06/2017	28,6	25,2	15,2	28,6
15/02/2018	56,8	58,6	12,6	58,6
23/02/2018	15,4	37,0	22,4	37,0
07/11/2018	15,0	29,2	32,0	32,0
10/10/2018	14,0	19,2	21,8	21,8
24/12/2018	24,8	63,6	27,0	63,6
25/01/2019	23,4	13,2	24,8	24,8
12/02/2019	15,0	34,2	38,8	38,8
13/02/2019	32,2	22,8	42,6	42,6
17/02/2019	20,0	38,2	20,4	38,2
01/03/2019	33,6	35,2	30,2	35,2
03/03/2019	40,2	43,6	15,2	43,6
08/04/2019	41,4	8,2	12,6	41,4
09/04/2019	23,4	17,4	22,4	23,4
07/05/2019	19,6	12,4	14,4	19,6
03/01/2020	19,4	29,4	5,2	29,4
30/01/2020	36,6	36,8	24,0	36,8
22/08/2020	72,8	27,2	38,2	72,8
22/09/2020	57,6	22,6	33,2	57,6
08/12/2020	32,6	38,0	39,6	39,6
25/12/2020	47,2	52,2	69,0	69,0
05/02/2021	57,0	49,2	50,2	57,0
07/05/2021	40,6	21,4	28,6	40,6
17/12/2021	63,0	48,2	42,8	63,0
30/12/2021	34,0	37,4	65,0	65,0

Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

Em comparação à situação da região no período anterior às intervenções públicas, apesar do maior número de eventos registrados, houve aumento de 39% no valor do limiar detonador de inundação na BCM. Esse aumento do limiar detonador também é coerente com as modelagens feitas por Souza *et al*. (2020), que mostraram que as obras de macrodrenagem na bacia geraram uma diminuição da altura dos alagamentos, apesar de não serem capazes

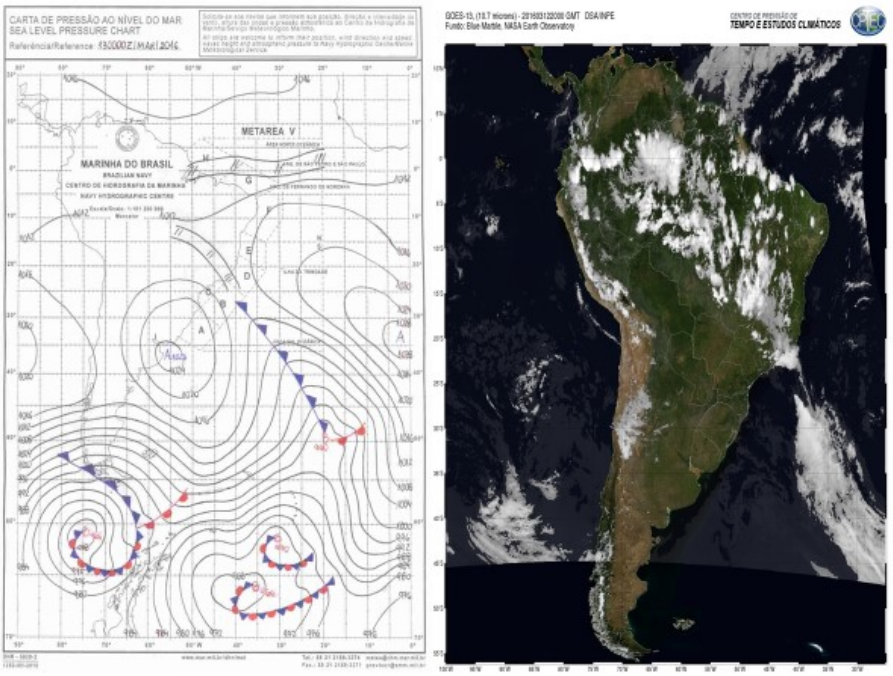
de impedi-los completamente. Leitão *et al*. (2021) também indicam que não houve mudança significativa no regime de chuvas antes e após a implementação dos equipamentos urbanos e que a amplificação das alterações no uso e cobertura da terra na região é apontada então como a principal causa potencial para a recorrência atual de episódios de inundações.

É importante também ressaltar que o aporte de notícias veiculadas nos meios digitais sobre os casos de enchentes, inundações e alagamentos na região é mais escasso para os episódios anteriores às obras públicas de drenagem - mais antigos - em relação aos episódios concomitantes e posteriores à implementação das obras públicas de drenagem - mais recentes.

3.4. Estudo de Caso: EHA de 12 de março de 2016

No dia 12 de março de 2016, houve um EHA na região compreendida pela BCM, afetando o funcionamento dos serviços urbanos na Grande Tijuca nos dias subsequentes ao ocorrido. A detonação desse evento é explicada pela situação de intensa instabilidade atmosférica, que foi capaz de produzir um acumulado pluviométrico muito elevado em um curto período de tempo, resultando no rápido transbordamento do rio Maracanã e na ocorrência de vários pontos de alagamento na região, em função também da insuficiência do sistema de drenagem pluvial urbano identificada por Souza *et al*. (2020).

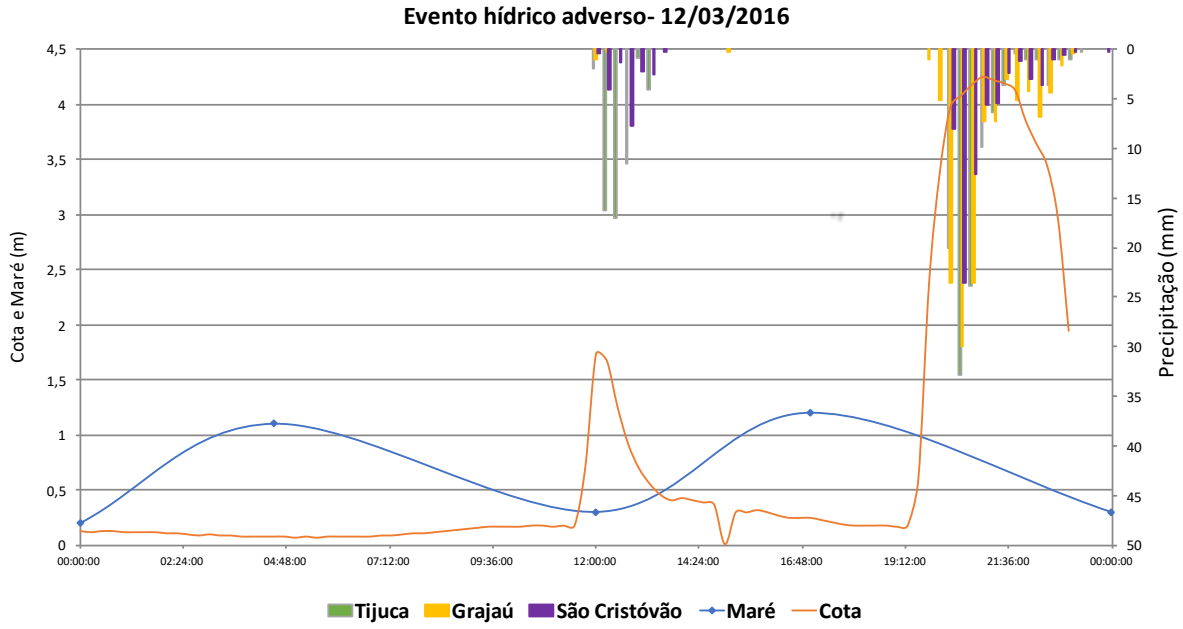
Figura 5 - Carta sinótica do dia 13 de março de 2016 às 00 HMG (12 de março de 2016 às 21h no fuso horário local) à esquerda e imagem BM (fundo *Blue Marble*) colorida artificialmente do satélite GOES-13 do dia 12 de março de 2016 às 20h à direita.



Fonte: DHN/Marinha do Brasil (esquerda) e DSA/CPEC/INPE (direita), 2016.

Na Figura 5, a carta sinótica indica uma situação atmosférica de forte instabilidade sobre a porção central e litorânea do Brasil em função da combinação de uma ZCAS de intensidade moderada com a passagem de um sistema frontal em deslocamento preferencialmente zonal no oceano Atlântico Sul. A atuação de ambos os sistemas meteorológicos, sobretudo da zona de convergência pelo seu caráter persistente na atmosfera, instaurou as condições ideais para a formação de uma extensa e duradoura banda de nebulosidade convectiva sobre a região observada na imagem de satélite. O tipo de nebulosidade formado por esse sistema de escala sinótica é tipicamente associado à ocorrência de chuvas convectivas, caracterizadas por sua intensidade muito elevada e sua duração breve (MENDONÇA *et al*., 2009).

Figura 6 - Gráfico de precipitação de 12 de março de 2016 nas estações pluviométricas Tijuca, Grajaú e São Cristóvão/AlertaRio; cota do nível do rio Maracanã na estação linimétrica São Cristóvão/Inea; e maré na estação do Porto do Rio de Janeiro (Ilha Fiscal)/Marinha do Brasil.



Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

Na Figura 6, são observados dois picos de precipitação que caracterizam o ECI, acompanhados por dois picos de elevação da cota do nível do rio Maracanã, que desencadearam o EHA do dia 12 de março de 2016, durando de 12h até 23h do mesmo dia.

No primeiro pico de precipitação, iniciado próximo às 12h, a intensidade máxima horária registrada foi equivalente a 46,8 mm/h (EPT), a cota máxima do nível do rio Maracanã alcançada foi de aproximadamente 1,75 metros e a maré estava em sua oscilação mínima, com uma altura de aproximadamente 0,3 metros. Já no segundo pico de precipitação, iniciado próximo às 19h, a intensidade máxima horária registrada foi equivalente a 86,4 mm/h (EPT), a cota máxima do nível do rio Maracanã alcançada foi de aproximadamente 4,25m e a maré estava na transição entre suas oscilações máxima e mínima, com uma altura de aproximadamente 1 metro. O total de precipitação acumulada no evento foi superior a 155 mm, o que corresponde ao total pluviométrico esperado para todo o mês de março na BCM (Figura 2).

Apesar da ocorrência de dois picos de precipitação, somente no segundo momento do evento de chuva intensa e distribuída por toda bacia que foi verificado transbordamento do canal do rio Maracanã, já que sua cota máxima corresponde a 3,35 m no baixo curso. A

variação diária da maré não pode ser considerada o gatilho responsável pela detonação do EHA, todavia, pode contribuir contendo a vazão do rio Maracanã no exutório da BCM, potencializando assim o processo de transbordamento em seu baixo curso.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base na análise realizada a partir dos dez estudos de caso selecionados, foi constatado que os fenômenos meteorológicos de escala sinótica, sobretudo os sistemas frontais, são os principais responsáveis na detonação de eventos de chuva intensa na Bacia do Canal do Mangue.

A oscilação na altura da maré exerce influência limitada na variação registrada da cota do nível do rio Maracanã na estação São Cristóvão/INEA. Contudo, em dias de maré elevada combinada com precipitação intensa, as marés podem contribuir para um transbordamento do rio no ponto em questão.

Após as obras de macrodrenagem urbana realizadas na Bacia do Canal do Mangue, houve aumento do limiar pluviométrico detonador de eventos hídricos adversos, todavia, as referidas obras não foram capazes de extinguir os eventos gerados por chuvas intensas típicas da região.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelas bolsas de Iniciação Científica – Ensino Médio e ao CEFET-RJ pelo apoio institucional ao projeto.

Um agradecimento especial ao Professor Dr. Felipe das Neves Roque da Silva pela atenção e auxílio na interpretação das cartas sinóticas.

REFERÊNCIAS

AMARAL, R.; RIBEIRO, R.R. Inundações e enchentes. *In*: TOMINAGA, L.K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. (org). **Desastres Naturais: conhecer para prevenir**. São Paulo: Instituto Geológico, 2009, p. 39-52.

ARMOND, N. B. **Entre Eventos e Episódios: As excepcionalidades das chuvas e os alagamentos no espaço urbano do Rio de Janeiro**. 2014. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Programa de Pós-Graduação em Geografia da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Presidente Prudente. 2014.

AYOADE, J. O. Sistemas produtores de tempo. *In*: AYOADE, J. O. **Introdução à Climatologia para os Trópicos**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1996. cap. 6, p. 98-128.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. **Classificação e codificação brasileira de desastres (Cobrade): categoria, grupo, subgrupo, tipo, subtipo**. Brasília: Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil, 2012.

CAMBRA, M. F. E. S.; COELHO NETTO, A. L. A Cidade do Rio de Janeiro e as chuvas de março/93: (des)organização urbana e inundações. **Anuário do Instituto de Geociências**, Rio de Janeiro, v. 20, p. 55-74, 1997. Disponível em: https://revistas.ufrj.br/index.php/aigeo/article/view/6183/4780. Acesso em: 15 mar. 2022.

CARNEIRO, C.G.; RIBEIRO, M.F. Análise das intervenções públicas municipais na bacia do rio Maracanã (RJ) quanto aos impactos de chuvas intensas e de enxurradas nos últimos vinte anos. *In*: X SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 2003, Rio de Janeiro. **Anais** [...], Rio de Janeiro, RJ, 2003.

SILVA, D.F. da; LIMA, M.J.S.; SOUZA NETO, P.F.; GOMES, H.B.; SILVA, F.D.S.; ALMEIDA, H.R.R.C.; COSTA, R.L.; PEREIRA, M.P.S. Caracterização de eventos extremos e de suas causas climáticas com base no índice padronizado de precipitação para o leste do Nordeste. **Revista Brasileira de Geografia Física.** v. 13, n. 2, p. 449-464, 2020. Disponível em: https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/243372/34824. Acesso em: 09 jan. 2023.

SILVA, G. C. da; NUNES, A. B. Análise de eventos extremos de precipitação no leste de Santa Catarina: Estudo de Tendência. **Ciência e Natura**, v. Micro., p. 251-254, 2011. Disponível em: https://periodicos.ufsm.br/cienciaenatura/article/view/9432/5583. Acesso em: 09 jan. 2023.

DERECZYNSKI, C. P.; OLIVEIRA, J. S.; MACHADO, C. O. Climatologia da precipitação no Município do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**. Rio de Janeiro. v. 24, n. 1, p. 24-38, dez. 2009. Disponível em: https://www.scielo.br/j/rbmet/a/CFKyTRdyn3NHXFG3hQ9DsvR/?lang=pt&format=pdf. Acesso em: 09 jan. 2023.

DINIZ, T. B. **Análise do risco de inundação na Sub-bacia Hidrográfica do Canal do Mangue, Rio de Janeiro (RJ)**. 2019. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

GAN, M. A.; KOUSKY, V. E.; ROPELEWSKI, C. F. The South America Monsoon Circulation and Its Relationship to Rainfall over West-Central Brazil. **Journal of Climate**, [s. l.], v. 17, p. 47-66, 2004. Disponível em: http://mtc-m16b.sid.inpe.br/col/cptec.inpe.br/walmeida/2004/04.22.11.10/doc/Gan_The%20South%20America%20monsoon.pdf. Acesso em: 20 nov. 2022.

GARCIA, S. R.; KAYANO, M. T. Relação dos sistemas de monção com as variabilidades tropical interanual e multi-decenal. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos - SP, v. 24, n. 1, p. 69-86, 2009. Disponível em: https://www.scielo.br/j/rbmet/a/JM8D8ghyLrm5cvcT5nkKnYh/?format=pdf&lang=pt. Acesso em: 20 nov. 2022.

GONTIJO, N.T. **Avaliação das relações de freqüência entre precipitações e enchentes raras por meio de séries sintéticas e simulação hidrológica**. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

LEITÃO, C. T.; SANTOS, F. S. T.; CARDELES, V.; SOUZA, R. L. T. Uma análise sobre o índice pluviométrico e as obras de drenagem na região do canal do mangue (RJ). *In*: III SIMPÓSIO NACIONAL DE GESTÃO E ENGENHARIA URBANA: SINGEURB, 2021, Maceió. **Anais** [...] Porto Alegre: ANTAC, 2021. p. 169-179. Disponível em: https://eventos.antac.org.br/index.php/singeurb/article/view/864/1592. Acesso em: 20 nov. 2022

LIMA, S.S.; ARMOND, N.B. Chuvas na Região Metropolitana do Rio de Janeiro: caracterização, eventos extremos e tendências. **Sociedade e Natureza**., Uberlândia - MG, v. 34, p. 1-19, 2022. Disponível em: https://seer.ufu.br/index.php/sociedadenatureza/article/view/64770/34798. Acesso em: 20 nov. 2022.

LIEBMANN, B.; JONES, C.; CARVALHO, L. M. V. de. Interannual Variability of Daily Extreme Precipitation Events in the State of São Paulo, Brazil. **Journal of Climate**, [s. l.], v. 14, p. 208-218, 15 jan. 2001. Disponível em: https://journals.ametsoc.org/configurable/content/journals$002fclim$002f14$002f2$002f1520-0442_2001_014_0208_ivodep_2.0.co_2.xml?t%3Aac=journals%24002fclim%24002f14%24002f2%24002f1520-0442_2001_014_0208_ivodep_2.0.co_2.xml&tab_body=pdf. Acesso em: 31 mar. 2022.

MELOS, A. R.; CASTRO, F. A. R.; KOMAROV, J. B. Avaliação de condicionantes do processo de inundação na bacia do Canal do Mangue, Rio de Janeiro, no período de 1997 a 2016. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE DESASTRES, 1., 2018, Porto Alegre. **Anais** [...]. Porto Alegre, RS, 2018.

MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. Brasil: Aspectos Termopluviométricos e Tipos Climáticos. *In*: MENDONÇA, Francisco; DANNI-OLIVEIRA, Inês Moresco. **Climatologia: noções básicas e climas do Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. cap. 6, p. 139-182. ISBN 978-85-86238-54-3.

MINISTÉRIO DAS CIDADES/IPT. **Mapeamento de riscos em encostas e margens de rios**. Brasília: Ministério das Cidades e IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 2007.

MONTEIRO, J.B.; PINHEIRO, D.R.C. O desastre natural como fenômeno induzido pela sociedade: abordagens teóricas e metodologias operacionais para identificação/mitigação de desastres naturais. **Revista de Geografia – PPGEO**. v. 2, n. 1, p.1-9, 2012. Disponível em:

https://periodicos.ufjf.br/index.php/geografia/article/view/17910/9217. Acesso em: 17 abr. 2022.

NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE: Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, 1989. 422 p. ISBN 85-240-0282-4.

NUNES, A.B.; SILVA, G.C. da. Climatology of extreme rainfall events in eastern and northern Santa Catarina State, Brazil: present and future climate. **Revista Brasileira de Geofísica.** n.31, p.413-425, 2013. Disponível em: https://sbgf.org.br/revista/index.php/rbgf/article/view/314/115. Acesso em: 09 jan. 2023.

PEREIRA, R. S.; NUNES, A. B. Estudo climático dos eventos de precipitação associados a alagamentos urbanos no Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [s. l.], v. 11, n. 6, p. 2010-2017, 2018. Disponível em: https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/238137/31220. Acesso em: 15 mar. 2022.

PINHEIRO, A. Enchente e inundação. *In*: SANTOS, R.F. (org). **Vulnerabilidade ambiental: Desastres naturais ou fenômenos induzidos?** Brasília: MMA, 2007. p. 95-106.

PREFEITURA DA CIDADE DO RIO DE JANEIRO. **Plano Municipal de Saneamento Básico da Cidade do Rio de Janeiro: Drenagem e Manejo de Águas Pluviais Urbanas**. 2015. Disponível em: http://www.rio.rj.gov.br/dlstatic/10112/4282910/4152311/PMSB_DRENAGEMEMANEJODEAGUASPLUVIAIS.pdf. Acesso em: 15 mar. 2022.

PRISTO, M. V. de J.; DERECZYNSKI, C. P.; SOUZA, P. R.de; MENEZES, W. F. Climatologia de Chuvas Intensas no Município do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [s. l.], v. 33, n. 4, p. 615-630, 2018. Disponível em: https://www.scielo.br/j/rbmet/a/RsP5CT4MLXwVdXXnkNtSBXL/?lang=pt. Acesso em: 31 mar. 2022.

SANTOS, S. R.; SANSIGOLO, C.A.; SANTOS, A.P.P. Dinâmica temporal em múltiplas escalas de tempo dos eventos secos e chuvosos no Sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física.** v. 9, n. 5, p. 1292-1300, 2016. Disponível em: https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/233543/27176. Acesso em: 09 jan. 2023.

SOUZA, T.M.K.; OTTONI, A.B. Análise crítica das causas e soluções sustentáveis para o controle de enchentes urbanas: o caso prático da bacia hidrográfica da Praça da Bandeira (estudo de caso). **Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades**. v. 3, n. 17, p. 60-76, 2015. Disponível em: https://publicacoes.amigosdanatureza.org.br/index.php/gerenciamento_de_cidades/article/view/1009/1032. Acesso em: 09 jan. 2023.

SOUZA, M. M. de; OLIVEIRA, A. K. B. de; REZENDE, O. M.; RIBEIRO, L. B. de F.; JACOB, A. C. P.; MAGALHÃES, P. C. de; MIGUEZ, M. G. Diagnóstico das obras de macrodrenagem na bacia do Canal do Mangue, Rio de Janeiro. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE ÁGUAS URBANAS, 13., 2020, Porto Alegre. **Anais** [...]. Porto Alegre, RS, out. 2020.