

Dinâmica espacial das inundações periódicas do rio Cauamé na Área de Expansão Urbana da cidade de Boa Vista, Roraima**Spatial dynamics of periodic flooding of the Cauamé river in the Urban Expansion Area of the city of Boa Vista, Roraima**Paulo Eduardo Barni¹Robson Oliveira de Souza²Lúcio Keury Almeida Galdino³**Resumo**

Informações sobre a dinâmica espacial do ciclo hidrológico em áreas urbanas são essenciais para tomadas de decisões que visam evitar e/ou mitigarem impactos ambientais. O estudo teve por objetivo determinar os impactos relacionados à dinâmica do ciclo hidrológico na Área de Expansão Urbana-AEU da cidade de Boa Vista tomando como base a grande enchente de 2011. Foram mapeados 22,1 km² de matas ciliares e 35,6 km² de Áreas de Proteção Permanentes-APP, em ambas as margens do rio Cauamé. As APPs sobrepõem 8,5 km² (30,6%) de áreas de matas ciliares. Valores médios estimados apontam que uma enchente semelhante à grande cheia de 2011 inundaria 24,6 km² da bacia do rio Cauamé, sendo 18,85 km² (76,0%) na margem esquerda e 5,96 km² (24,0%) na margem direita. A soma da precipitação anual dos meses de março, abril e maio (Boa Vista) explicaram 58,9% na variação dos valores das cotas altimétricas e 49,2% na variação dos valores de área inundada no período 2000-2021. Os resultados servem como subsídio a políticas públicas e futuros trabalhos visando o entendimento da dinâmica hidrológica do rio Cauamé e seus impactos ambientais na AEU da cidade de Boa Vista antecipando seu crescimento para além da calha do rio.

Palavras-Chave: Áreas de Proteção Permanentes; Expansão urbana; Impacto ambiental.

Abstract

Information on the spatial dynamics of the hydrological cycle in urban areas is essential for decision-making aimed at avoiding environmental impacts. The study aimed to determine the impacts

- 1 Universidade Estadual de Roraima – UERR, *Campus Rorainópolis*. Av. Senador Hélio Campos, s/nº. 69375-000, Rorainópolis, Roraima, Brasil. pebarni@uerr.edu.br / ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7868-8691>
- 2 Universidade Estadual de Roraima – UERR, *Campus Rorainópolis*. Av. Senador Hélio Campos, s/nº. 69375-000, Rorainópolis, Roraima, Brasil. robson.oliveirarr@uerr.edu.br / ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8398-484X>
- 3 Universidade Estadual de Roraima – UERR, *Campus Boa Vista*. R. Sete de Setembro, 231 – Canarinho, CEP: 69306-530. Boa Vista – Roraima, Brasil. luciokeury@uerr.edu.br / ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8166-9002>

related to the dynamics of the hydrological cycle in the Urban Expansion Area-UEA of the city of Boa Vista, based on the great flood of 2011. 22.1 km² of riparian forests and 35.6 km² of Permanent Protection Areas (PPA) were mapped, on both banks of the Caumé River. PPAs overlap 8.5 km² (30.6%) of riparian forest areas. Estimated average values indicate that a flood similar to the great flood of 2011 would flood 24.6 km² of the Cauamé river basin, with 18.85 km² (76.0%) on the left bank and 5.96 km² (24.0%) on the right bank. The sum of the annual precipitation in the months of March, April and May (Boa Vista) explained 58.9% in the variation in the values of the altimetric elevations and 49.2% in the variation in the values of the flooded area in the period 2000-2021. The results serve as a subsidy for public policies and future works aimed at understanding the hydrological dynamics of the Cauamé River and its environmental impacts on the UEA of the city of Boa Vista, anticipating its growth beyond the river channel.

Keywords: Permanent protection areas; urban expansion; environmental impact.

Introdução

A modelagem da dinâmica ambiental é uma ferramenta importantíssima para, por exemplo, oferecer suporte à decisão e desenho de políticas públicas (BEDFORD; COOKE, 2001; SABATIER, 2007), também para identificar causas e consequências de mudanças ambientais (BARNI et al., 2020a, 2021; RAIHAN et al., 2022) e para a previsão e mitigação de catástrofes naturais (MARCELINO, 2008; FERRIER et al., 2016). Neste sentido e com o avanço excepcional das geotecnologias, a partir de modelos computacionais, se constroem uma série de cenários alternativos que oferecem excelentes insights para leigos, profissionais, técnicos e pesquisadores ligados à área ambiental.

Atualmente os modelos vêm ganhando maior importância com o advento das mudanças climáticas globais causadas pela exacerbação do efeito estufa natural da terra através do aumento das emissões antropogênicas de carbono para a atmosfera. Nessa abordagem são traçados cenários futuros de aquecimento do planeta considerando vários níveis de emissões de Gases do Efeito Estufa – GEE (LEE et al., 2021; CHAGAS et al., 2022).

Em estudos de emissões de GEE pelo desmatamento da Amazônia brasileira frequentemente são utilizados modelos explícitos de mudanças de uso e cobertura da terra. Com base nas taxas anuais de desmatamento pretérito e mapas de classes de uso da terra, esses modelos simulam a área desmatada anualmente e traçam cenários futuros de emissão para toda a

Amazônia (p. ex. SOARES-FILHO et al., 2006) ou para apenas uma determinada região (p. ex. BARNI et al., 2015, 2020a).

É importante mencionar que para a modelagem da dinâmica ambiental de qualidade é necessário um grande conjunto de informações referentes / pertinentes aos locais a serem estudados. Considerando a bacia do rio Cauamé, que intersecta a Área de Expansão Urbana – AEU de Boa Vista, Roraima (nossa área de estudo), podemos destacar trabalhos realizados em alguns temas específicos como, por exemplo, hidrologia (SANDER et al., 2008; CARVALHO, 2018), inundações / enchentes (SANDER et al., 2012; ALMEIDA; SANDER, 2013; CARVALHO, 2018; LIRA et al., 2020), impactos ambientais e expansão urbana (OLIVEIRA; CARVALHO, 2014; FALCÃO et al., 2015; ARAÚJO JÚNIOR; TAVARES JÚNIOR, 2018; FALCÃO; OLIVEIRA, 2021), que nos ajudam a entender melhor a dinâmica do local estudado e o nosso objeto de estudo. Neste caso, a modelagem da dinâmica espacial das inundações periódicas do rio Cauamé na área de expansão urbana da cidade de Boa Vista, Roraima, de 2000 a 2021.

Para Marcelino (2008), inundações, juntamente com secas / estiagens e incêndios florestais, se enquadram em um tipo de desastre natural de origem hidrológica. Ainda, segundo o autor (p. 13), desastres naturais “... são aqueles disparados pela intervenção direta de um fenômeno natural de grande intensidade. Exemplo: fortes chuvas – inundação e escorregamentos, fortes ventos – vendaval, tornado e furacão, etc.”.

De acordo com Tucci (2003), as enchentes podem ocorrer devido às condições naturais ou geradas pelo uso antrópico do solo como urbanização ou obras hidráulicas. Quando a precipitação é intensa e a quantidade de água que chega simultaneamente ao rio excede a capacidade de drenagem da sua calha normal, resultam em inundação das áreas ribeirinhas.

Os problemas e eventuais prejuízos causados pela enchente dependem do grau de ocupação da várzea pela população e da frequência com a qual ocorrem as inundações. O zoneamento dessas áreas seria útil para informar para a população sobre a intensidade do risco que ela estaria sujeita (TUCCI, 2003; CARVALHO, 2018; LIRA et al., 2020).

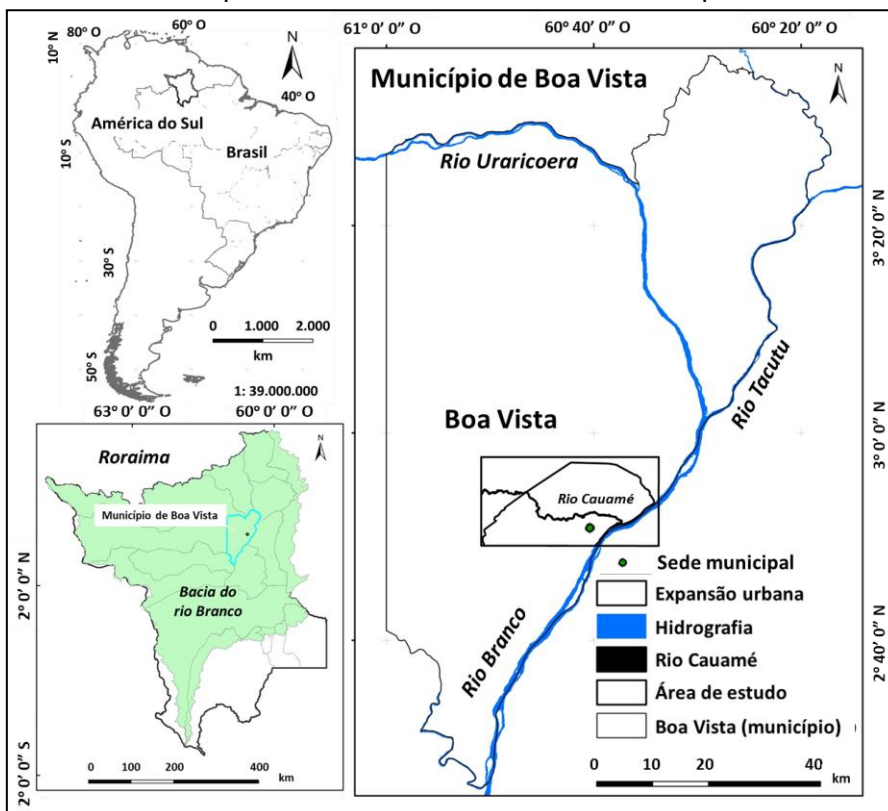
Desta forma, o estudo teve por objetivo determinar os impactos relacionados à dinâmica do ciclo hidrológico (cheias e vazantes) na Área de Expansão Urbana da cidade de Boa Vista tomando como base a grande enchente de 2011.

Metodologia

Área de estudo

A área de estudo abrange a zona norte da cidade de Boa Vista e engloba parte da Área de Expansão Urbana – AEU da capital e 37,2 km do rio Cauamé, medido pela sua margem esquerda (Figura 1). A precipitação média anual medida na estação meteorológica de Boa Vista pelo Instituto Nacional de Meteorologia – INMET (BRASIL-INMET, 2022) é de 1.653 mm (n=45 anos).

Figura 1 – Localização da área de estudo em relação a América do Sul, ao Brasil, ao Estado de Roraima e ao município de Boa Vista. A largura do Rio Cauamé foi exagerada para conferir destaque entre os outros elementos do mapa.



Fonte: Elaborado pelos autores a partir da base de dados de Brasil-IBGE, (2020).

Processo de Urbanização e criação a AEU de Boa Vista

Ao contrário do que se observa na Amazônia brasileira como um todo, onde os núcleos urbanos nascem e cresce “espontaneamente”, a cidade de Boa Vista, capital do estado de Roraima, teve um planejamento e reordenamento urbano que foi implantado entre os anos de 1943 e meados de 1960 (SILVA, 2007; VERAS, 2009). No entanto, atualmente, Boa Vista experimenta um crescimento rápido e desordenado da população e do espaço urbano iniciado com o êxodo rural e o fechamento dos garimpos de ouro e diamantes nos anos de 1990 (SILVA, 2007; VERAS, 2009; GALDINO, 2017). Para conter o avanço desordenado da ocupação do espaço urbano e atendendo ao disposto na Lei Federal 10.257 de 10 de julho de 2001, que regulamenta a política urbana nacional, a Prefeitura Municipal de Boa Vista reformula o Plano Diretor da Cidade (PDC) e instituí a Área de Expansão Urbana – AEU de Boa Vista, através da Lei nº 926, de 29 de novembro de 2006 (VERAS, 2009).

Banco de dados

O conjunto de dados foi composto por imagens *raster* do sensor SENTINEL-2, de 19 de fevereiro de 2021, com 10 m de resolução espacial e imagens *raster* de altitude (m) do *Shuttle Radar Topographic Mission* – SRTM, com 30 m de resolução espacial (BRASIL-INPE, 2022a). Dados vetoriais (Mapas do Estado e do município) foram baixados do site do *TerraBrasilis* (BRASIL-INPE, 2022b). Os mapas vetoriais da área de estudo, como de estradas, do Rio Cauamé, dos igarapés (pequenos cursos d’água) e lagos e das Áreas de Preservação Permanentes – APP, foram criados de forma manual, diretamente das imagens *raster* em ambiente de Sistema de Informações Geográficas – SIG do *software* Quantum Gis (QGis) Desktop 2.18.15 (QGIS, 2022). O mapa da Área de Expansão Urbana – AEU de Boa Vista foi obtido do estudo de Araújo Júnior e Tavares Júnior (2018). Todos os mapas foram convertidos para o sistema de coordenadas projetadas Universal Transversa de Mercator – UTM, Zona 20 norte, na projeção do Sistema Geográfico Mundial (*World Geographic System* – WGS 1984). Dados pontuais (vetor) de altitude (m), demarcando o Limite Médio das Enchentes Ordinárias – LMEO do rio Branco, foram obtidos de material impresso forne-

cido pelo Ministério Público Estadual – MPE no âmbito do inquérito civil – Nº 025A/11/PJMA/2ºTIT/MP/RR, Vol. III e foram utilizados como referência para a modelagem dos mapas de altitude derivados do SRTM. Dados anuais das cotas máximas do rio Branco foram obtidos diretamente do portal do Sistema de Informações Hidrológicas – SIH na rede mundial de computadores sob responsabilidade da Agência Nacional de Águas – ANA (HIDROWEB, 2022). Dados mensais de precipitação (mm mês^{-1}) foram baixados a partir do portal do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET na internet (BRASIL-INMET, 2022) e do HIDROWEB.

Delimitação da área de estudo

A Área de Estudo (AE) foi criada considerando a abrangência dos limites mais extremos ao norte e a oeste da AEU de Boa Vista e a foz do rio Cauamé, no rio Branco. Na delimitação da parte sul da AE foi considerada a inclusão da estação meteorológica e fluvial, pertencentes à Companhia de Águas e Esgotos de Roraima – CAER, localizada na margem direita do Rio Branco. Neste caso somente a parte da AEU que intersecta a AE foi considerada para as análises.

Modelagem das enchentes anuais (km^2) na área de estudo

O mapa de distribuição de altitude foi obtido do *raster* original do SRTM com valores contínuos variando entre a **Altitude Mínima Virtual** do rio Cauamé – AMVC de 56,802 m e máxima de 222 m Acima do Nível do Mar (ANM). A AMVC foi obtida transferindo-se a Cota Limnimétrica – CL mínima de 56,15 m, observada na estação fluviométrica (Estação 14620000: ANA, 2021) da Companhia de Águas e Esgotos de Roraima – CAER (SANDER et al., 2012), somando-se a diferença de 0,652 m observada entre a Cota Altimétrica – CA de 65,973 m ANM, demarcando o LMEO implantada no bairro Caçará com a CA de 65,321 m da LMEO medida nas proximidades da estação fluviométrica da CAER no rio Branco a, aproximadamente, 5 km abaixo da foz do Rio Cauamé. Neste trabalho a transformação da $CL_{(rB)}$ em $CA_{(rC)}$ foi dada por: $CA_{(rC)} = CL_{(rB)} + 56,802$ m, onde rB é a CL observada no rio Branco e rC é a CA virtual correspondendo aos valores do nível da cheia observada em um determinado ano nas proximidades da foz do rio Cauamé no arquivo *raster* do SRTM (Tabela 1). Neste caso foram modeladas as cheias observadas de 2000 a 2021 ($n=22$), considerando um número de observações suficientes para gerar uma curva de normalidade a partir dos

dados. Esses procedimentos foram realizados na calculadora *raster* do *software* considerando todos os valores de altitude fora do intervalo entre a AMVC e $CA_{(rc)}$ como NoData (sem dados). A área de cheia (km^2) de cada ano foi calculada multiplicando-se a área do pixel ($900 m^2$) pelo número de pixel gerado na modelagem dentro da AEU de Boa Vista, menos a área da calha do rio Cauamé ($\sim 3km^2$).

Tabela 1 – Valores utilizados na calculadora *raster* do *software* para a modelagem das enchentes anuais do rio Cauamé na Área de Expansão Urbana – AEU de Boa Vista. CL = Cota Limnimétrica; AMVC = Altitude Mínima Virtual do rio Cauamé; CA = Cota Altimétrica.

Ano	CL	CL média	AMVC	CA (CL + AMVC)	CA média
2000	7,25	7,06	56,802	64,052	63,862
2001	5,4	7,06	56,802	62,202	63,862
2002	7,8	7,06	56,802	64,602	63,862
2003	5,2	7,06	56,802	62,002	63,862
2004	6,94	7,06	56,802	63,742	63,862
2005	7,38	7,06	56,802	64,182	63,862
2006	8,88	7,06	56,802	65,682	63,862
2007	7,78	7,06	56,802	64,582	63,862
2008	7,72	7,06	56,802	64,522	63,862
2009	5,66	7,06	56,802	62,462	63,862
2010	7,69	7,06	56,802	64,492	63,862
2011	10,28	7,06	56,802	67,082	63,862
2012	6,88	7,06	56,802	63,682	63,862
2013	6,14	7,06	56,802	62,942	63,862
2014	4,39	7,06	56,802	61,192	63,862
2015	5,13	7,06	56,802	61,932	63,862
2016	6,94	7,06	56,802	63,742	63,862
2017	8,66	7,06	56,802	65,462	63,862
2018	8,3	7,06	56,802	65,102	63,862
2019	6,54	7,06	56,802	63,342	63,862
2020	7,05	7,06	56,802	63,852	63,862
2021	8,57	7,06	56,802	65,372	63,862

Fonte: Agência Nacional de Águas (ANA, 2021), estação 14620000.

Impactos em matas ciliares e Área de Preservação Permanentes – APP

A análise dos impactos das cheias do rio Cauamé em matas ciliares e Área de Preservação Permanentes – APP foi realizada a partir da extração das maiores áreas de enchente

modeladas no intervalo entre 2000 e 2021. Neste caso, a condição para a seleção dessas áreas considerou a área de cheia média + um (1) Desvio Padrão – DP. Após a seleção, os mapas modelados foram cruzados com mapas de matas ciliares e de APP, registrando-se as áreas de intersecção e seus percentuais em relação ao todo e às duas margens do rio Cauamé. No presente estudo essas áreas de intersecção com os mapas das enchentes modeladas foram consideradas como área de impacto das cheias na AEU de Boa Vista (p. ex., VERAS et al., 2018).

Análise estatística

A análise estatística compreendeu testes de normalidade (Lilliefors), Análise de Correlação de Pearson (ACP: r) e Análise de Regressão Linear Simples (ARLS: R^2) no nível de 95% de confiança estatística (Erro tipo I: $\alpha = 0,05$). A ACP serviu para indicar o nível de associação entre as variáveis do banco de dados. Correlações com valor de $r \geq 0,5$ foram consideradas como possuindo forte associação entre as variáveis (COHEN, 1988). As variáveis com maior associação entre si foram submetidas a ARLS para prever o nível de explicação das variáveis dependentes (y) pelas variáveis independentes (x). Nessa análise as variáveis representando o nível das cheias ($m \text{ ano}^{-1}$) e as áreas das enchentes ($\text{km}^2 \text{ ano}^{-1}$) foram consideradas variáveis dependentes. A variável precipitação total (mm ano^{-1}), precipitação total (mm ano^{-1}) nos trimestres Março, Abril e Maio (MAM); Abril, Maio e Junho (AMJ) e Maio, Junho e Julho (MJJ), tomadas na estação pluviométrica de Boa Vista, foram consideradas independentes. A soma do trimestre Março, Abril e Maio na Colônia do Taiano (Taiano (mm)), soma do trimestre Março, Abril e Maio na Terra Indígena Boqueirão (Boqueirão (mm)) e soma do trimestre Março, Abril e Maio na Maloca do Contão (Contão (mm)) considerando o intervalo de 2000 a 2021 ($n=22$), tomadas nas estações pluviométricas daquelas localidades, a montante da bacia do rio Cauamé, também foram consideradas variáveis independentes. As análises foram realizadas no *software* R versão 3.6.0 (R PROJECT, 2022).

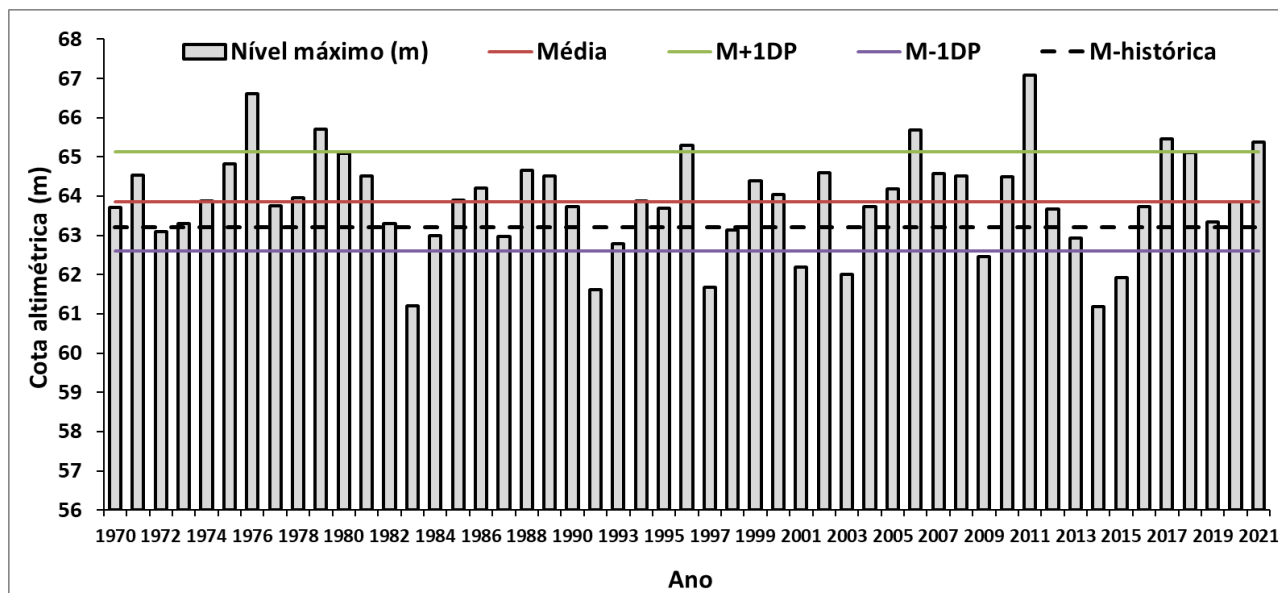
Resultados e discussões

Transferência de cotas do rio Branco para o rio Cauamé

No intervalo entre 1970 e 2021 (n=51 anos) aconteceram sete (7) grandes cheias no rio Branco registradas na estação fluvial de Boa Vista, igualando ou ultrapassando a marca da cheia média (63,21 m) + um (1) desvio padrão – 1DP = 1,26 m. Por outro lado, os menores índices de cheia observados foram registrados nos anos de El Niño de 1983 (SILVA et al., 2015), alcançando a cota limnimétrica de 4,40 m correspondendo à cota altimétrica de 60,55 m e no ano de El Niño de 2014 (BARNI et al., 2020b), alcançando a cota limnimétrica de 4,39 m, correspondendo à cota altimétrica de 60,54 m ao nível do mar (Figura 2). Essas cotas ficaram abaixo da média menos dois (2) DP. A figura 2 apresenta o resultado da transferência dos valores de cota anuais registradas no rio Branco (valores virtuais de cotas) correspondendo aos valores assumidos para as proximidades da foz do rio Cauamé. A cota média virtual foi registrada em 63,862 m, também com DP = 1,26 m.

As enchentes de 1976 (65,95 m) e de 2011 (66,43 m) foram excepcionalmente grandes, ultrapassando a marca da média (63,21 m) + dois (2) DP (65,73 m) (Figura 2). De acordo com Sander et al., (2012) essas duas grandes cheias teriam a probabilidade de se repetir a cada 21 anos (1976) e a cada 42 anos, no caso da enchente de 2011 em Boa Vista.

Figura 2 – Nível máximo das enchentes observadas na estação fluviométrica da Companhia de Águas e Esgotos de Roraima – CAER, no rio Branco, transferida para o rio Cauamé de 1970 a 2021 (n=51). $M \pm 1DP$ = é a média mais ou menos um (1) desvio padrão. M-histórica é a cota média histórica (63,21 m) do rio Branco observada na CAER.



Fonte: Agência Nacional de Águas (ANA, 2021).

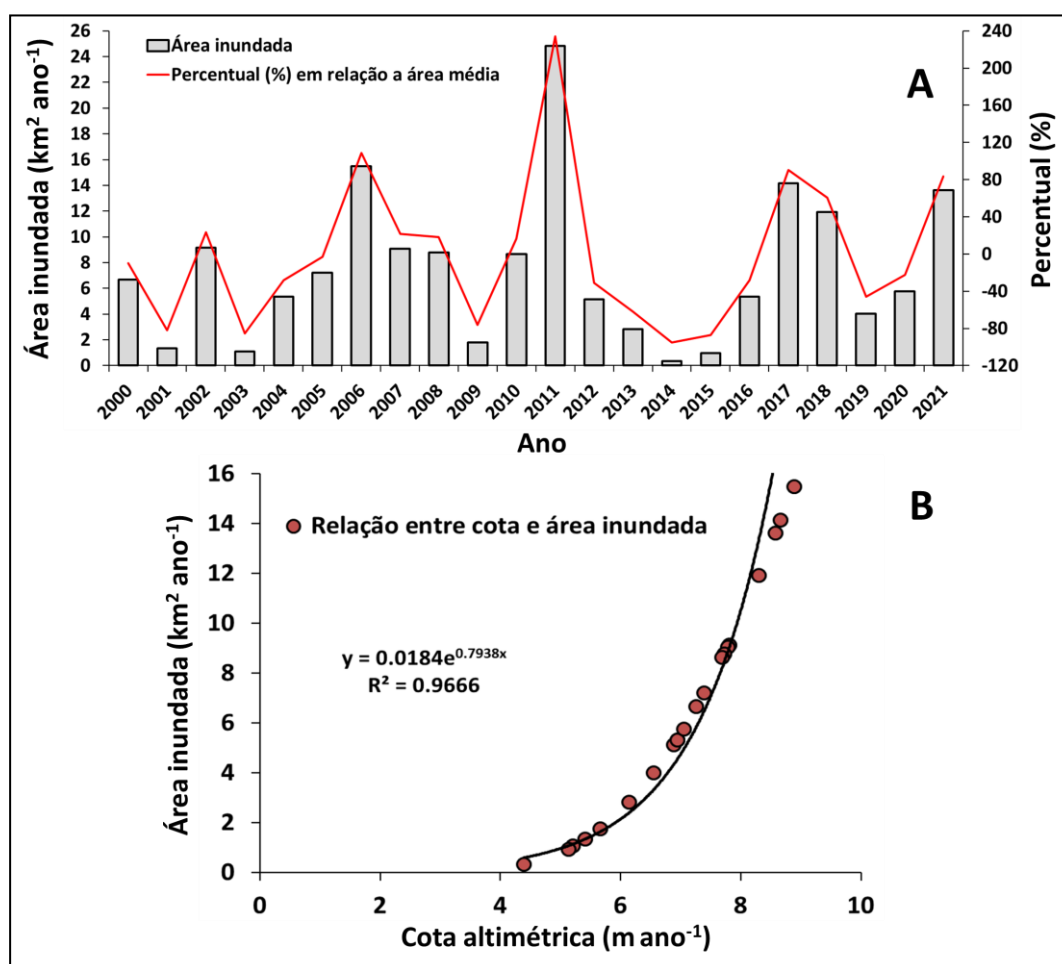
Modelagem das enchentes anuais (km²)

A modelagem das áreas inundadas provocadas pelas cheias anuais no rio Cauamé / rio Branco de 2000 a 2021 geraram uma área de enchente média de $7,44 \pm 5,8$ km² ou $744 \pm 500,8$ ha. A maior área alagada foi modelada para o ano de 2011 alcançando a área de 24,81 km² (2.481 ha) considerando as duas margens do rio Cauamé dentro da AEU de Boa Vista. Apenas a título de comparação, a área alagada em 2011 foi 233,5% maior do que a área alagada média no intervalo estudado. Por outro lado a menor área modelada foi referente à cheia de 2014 (0,36 km² ou 36 ha), correspondendo ao percentual de -95,1%, ou seja, abaixo da área média das enchentes modeladas no período analisado (Figura 3A). Os níveis de cotas anuais explicaram 94,3% ($R^2=0,9427$; $p<0,0000$; $N=22$) da variação de área inundada anualmente na bacia do rio Cauamé dentro da AEU de Boa Vista. A área inundada em 2011 foi um ponto fora da curva do modelo (exponencial), sendo considerado um evento hidrológico excepcional (SANDER et al., 2012). Retirando os dados do

ano de 2011 do modelo (Figura 3B), considerando os dados desse ano como *outlier*, o modelo resultante melhora o poder de explicação em 2,5% ($R^2=0,9666$; $p<0,0000$; $N=21$).

Os níveis de cheias muito abaixo da média das enchentes do período estão relacionados a influencia de anos de El Niño e os níveis maiores do que a média, estariam relacionados a anos de influencia de La Niña na região. Essas anomalias climáticas interferem muito fortemente no extremo norte da Amazônia brasileira representado, principalmente, pelo estado de Roraima (SILVA et al., 2015; BARNI et al., 2020b; 2021).

Figura 3 – Área inundada ($\text{km}^2 \text{ano}^{-1}$) e percentual de inundação (%) em relação à área de cheia média ($7,44 \text{ km}^2$) considerando as cotas altimétricas virtuais transferidas para o rio Cauamé de 2000 a 2021 ($n=22$) (A). Em (B) relacionamento exponencial entre níveis de cota (m ano^{-1}) e área ($\text{km}^2 \text{ano}^{-1}$) inundada anualmente dentro da Área de Expansão Urbana – AEU de Boa Vista.



Fonte: elaborado pelos autores.

Impactos em matas ciliares e APP na AEU de Boa Vista

As áreas de matas ciliares na AEU somaram 22,07 km² considerando as duas margens do rio Cauamé. Na grande enchente de 2011 foram afetados 5,89 km² de matas ciliares na margem esquerda do rio Cauamé, representando 45,9% da área total (12,83 km²) de vegetação nesta margem. Por outro lado, as matas ciliares da margem direita afetadas nessa enchente foram da ordem de 2,0 km², representando 21,6% da área total (9,24 km²) de vegetação dessa margem (Figura 4; Tabela 2).

Considerando as APP estas somaram 35,61 km² dentro da AEU de Boa Vista levando em conta as duas margens do rio Cauamé. Na margem esquerda as APPs atingidas ou afetadas pela grande enchente de 2011 somaram 4,95 km², representando 21,2% do total (23,28 km²) de APPs contabilizadas nesta margem. Considerando as APPs da margem direita estas somaram 12,33 km², das quais 1,8 km² ou 14,6% foram alagados na grande cheia de 2011 (Figura 5; Tabela 2).

As áreas de matas ciliares em APPs alagadas em 2011 dentro da AEU somaram 8,52 km² considerando as duas margens do rio Cauamé. A maior sobreposição (1,42 km²) foi registrada na margem esquerda e representou 28,7% das áreas sobrepostas (4,96) nesta margem. Por outro lado, na margem direita a sobreposição de matas ciliares em APPs alagadas em 2011 somou 0,83 km² e representou 23,3% do total (3,56 km²) das áreas em sobreposição nesta margem.

Figura 4 – Vista parcial do alcance das cheias de 2006, 2011, 2017, 2018 e 2021 ao longo do rio Cauamé, dentro da Área de Expansão Urbana de Boa Vista – AEU BV. LLTM é a sigla para Linha Limite dos Terrenos Marginais.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Tabela 2 – Impactos das cheias de 2006, 2011, 2017, 2018 e 2021 em matas ciliares (vegetação) e em Áreas de Proteção Permanentes – APP dentro da área de expansão urbana de Boa Vista. Veget_APP = matas ciliares sobrepondo APP.

Ano	Cheia (km²)	Cheia AEU (km²)	%	Vegetação (km²)	%	APP (km²)	%	Veget_APP (km²)	%
2006	15,50	12,46	80,4	2,78	21,7	3,22	13,8	0,64	12,9
2011	24,81	18,85	76,0	5,89	45,9	4,95	21,2	1,42	28,7
2017	14,17	11,51	81,2	2,42	18,8	2,96	12,7	0,53	10,7
2018	11,93	9,85	82,6	1,84	14,3	2,49	10,7	0,37	7,4
2021	13,63	11,12	81,5	2,26	17,6	2,84	12,2	0,48	9,7
Subtotal				12,83	100,0	23,28	100,0	4,96	100,0
2006	15,50	3,04	19,6	1,01	10,9	1,10	8,9	0,48	13,4
2011	24,81	5,96	24,0	2,00	21,6	1,80	14,6	0,83	23,3
2017	14,17	2,66	18,8	0,90	9,8	1,00	8,1	0,44	12,5
2018	11,93	2,08	17,4	0,72	7,8	0,84	6,8	0,37	10,4
2021	13,63	2,52	18,5	0,86	9,3	0,96	7,8	0,43	12,1
Subtotal				9,24	100,0	12,33	100,0	3,56	100,0
Total				22,07		35,61		8,52	

Fonte: Elaborado pelos autores.

Avaliação da modelagem

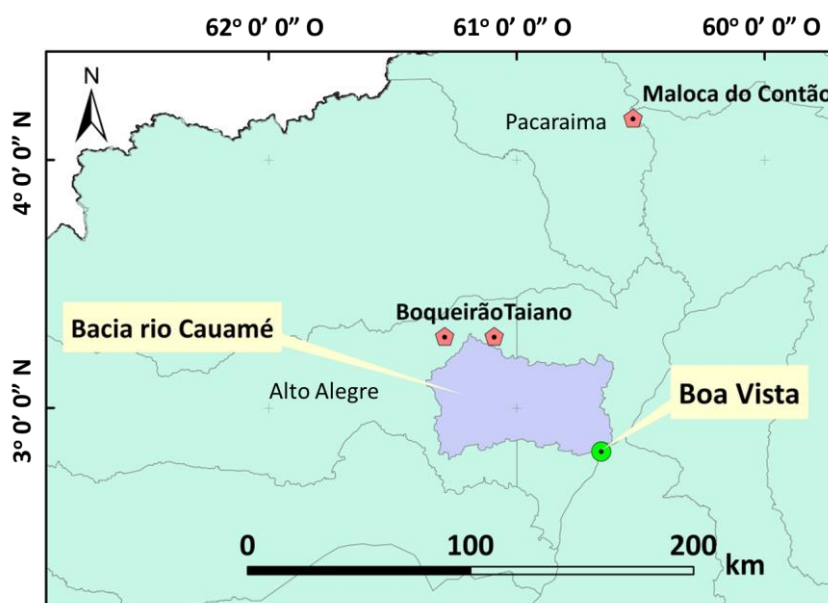
A simulação e mapeamento da maior enchente registrada em Boa Vista nos últimos 56 anos, realizada por este estudo (5,96 km²), ficou apenas 3,35% (0,2 km²) abaixo do valor de 6,16 km² apontado por Sander et al., (2012) estudando as cheias provocadas pelo rio Branco que afetaram a área urbana da cidade. Este cálculo leva em consideração apenas as áreas alagadas na margem direita do rio Cauamé (Tabela 2), correspondendo à margem direita do rio Branco que foi modelada por Sander et al., (2012). Notem que na modelagem a nossa área de estudo está restrita, em seu limite sul, pelas proximidades da estação pluviométrica / fluviométrica da CAER (Figura 2), enquanto que o estudo de Sander et al., (2012) abrangeu também toda área alagada na orla da margem direita do rio Branco mais ao sul dos limites da nossa área estudada. Este fato pode ser considerado um bom indicativo da precisão alcançada em nossa análise no cálculo das áreas alagadas como um todo aplicando o método de transferência de cotas do rio Branco para o rio Cauamé.

Isto significa que a modelagem das cheias considerando os impactos nas matas ciliares e APPs da margem esquerda do rio Cauamé, até então inédita na literatura científica local estudando a área urbana de Boa Vista e arredores (p. ex., ALMEIDA; SANDER, 2013; ARAÚJO JÚNIOR; TAVARES JÚNIOR, 2017, 2018; FALCÃO et al., 2015; FALCÃO; OLIVEIRA, 2021; OLIVEIRA; CARVALHO, 2014; LIRA et al., 2020; RODRIGUES et al., 2019; SANDER et al., 2012; VERAS et al., 2018), podem servir como subsídio para estudos futuros que visem a análise dos impactos da expansão urbana de Boa Vista para além da calha do rio Cauamé. Atualmente a expansão urbana naquela margem se faz sentir de forma rápida, porém de modo ainda controlado representado pelo estabelecimento de galpões de grandes empresas comerciais e condomínios considerados de médio a alto padrão de construção em meio à zona rural ainda predominante ao redor. Vale destacar que as matas ciliares ao longo da calha do rio Cauamé, dentro da AEU de Boa Vista, estão ainda relativamente bem preservadas.

Relação entre precipitação e níveis de cotas e áreas inundadas no período 2000 a 2021

Na avaliação da relação entre a precipitação e níveis de cotas e de área inundada foram realizadas análises envolvendo dados de precipitação obtidos nas estações meteorológicas de Boa Vista (código: 8260005; lat. 2,83° N e long. -60,66° O) (a jusante da bacia do rio Cauamé), da Colônia do Taiano (código: 8361004; lat. 3,29° N e long. -61,09° O) e da Terra Indígena Boqueirão (código: 8361001; lat. 3,29° N e long. -61,29° O) em Alto Alegre e da Maloca do Contão (código: 8360000; lat. 4,17° N e long. -60,53° O), localizada no município de Pacaraima. Essas três, a montante da bacia do rio Cauamé (Figura 5). Esse procedimento foi necessário visto que não foram encontradas estações meteorológicas dentro da bacia do rio Cauamé, especificamente, a partir do HIDROWEB na internet (p. ex., HIDROWEB, 2022).

Figura 5. Localização das três estações meteorológicas utilizadas na análise estatística, a montante da bacia do rio Cauamé.



Fonte: elaborado pelos autores.

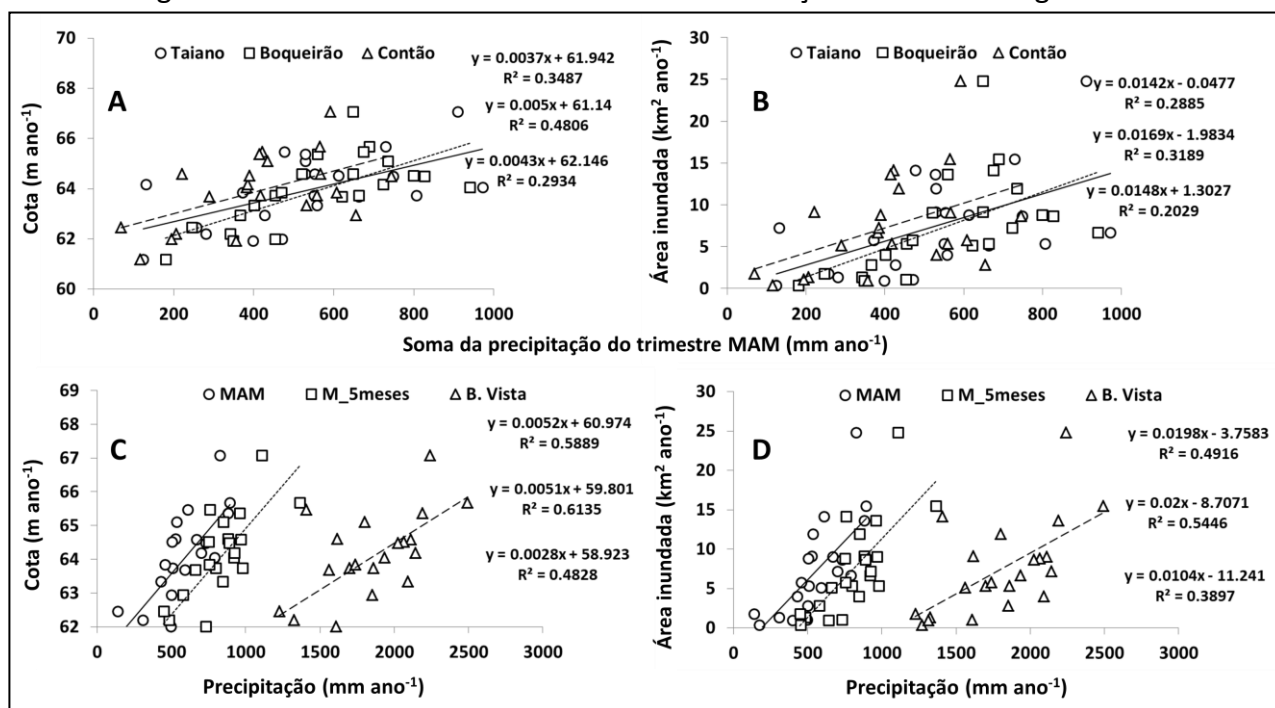
Dessas três estações os dados que melhor representaram a variação da cota e da área inundada no rio Cauamé foi a soma da precipitação do trimestre março, abril e maio (MAM) na Terra Indígena Boqueirão, explicando 48,1% ($R^2= 0,4806$; $p= 0,0003$) da variação da cota e 31,9%

($R^2= 0,3189$; $p= 0,006$) da variação na área inundada no período da análise (Figura 6A e 6B). Neste caso, uma rede de pluviômetros instalada na bacia do rio Cauamé, provavelmente, melhoraria o poder de previsão das cheias anuais dentro da AEU de Boa Vista.

Considerando os dados da estação meteorológica de Boa Vista a análise de correlação de Pearson demonstrou uma forte relação entre a precipitação anual que atinge a bacia do rio Branco e os níveis de cota e a área afetada pelas enchentes experimentadas ao longo do rio Cauamé dentro da AEU de Boa Vista a partir da sua foz. Nesse caso, apesar de a média de precipitação dos cinco meses estudados (M-5meses: março, abril, maio, junho e julho) apresentarem maior correlação com os níveis de cota ($r=0,783$) e a área inundada anualmente ($r=0,738$), o melhor indicador de enchente no rio Cauamé seria a soma da precipitação dos três primeiros meses da série estudada (MAM: março, abril e maio). Embora exibindo um índice menor de correlação ($r=0,701$) a vantagem desse indicador reside no fato que se pode prever a cheia no rio Cauamé com pelo menos um (1) mês de antecedência.

Por exemplo, a análise de regressão simples utilizando a soma da precipitação desses três meses (MAM) corroborou com esse resultado e apontou que esse indicador explica 58,9% ($R^2= 0,5889$; $p<0,00000$) nos níveis de cota e 49,2% ($R^2= 0,4916$; $p=0,0002$) na variação das áreas inundadas pelas enchentes no rio Cauamé no período analisado (Figura 6C e 6D). Esse índice também ficou ligeiramente abaixo do índice apresentado pela média dos cinco meses (M-5meses) de precipitação em Boa Vista para a cota ($R^2=0,6135$; $p<0,00000$) e para a área inundada anualmente ($R^2=0,5445$; $p=0,00008$) no período analisado (Figura 6C e 6D).

Figura 6 – Análise de regressão simples considerando a cota (m) (A) e a área alagada (km²) (B) em função da precipitação (mm) (n=22). **Taiano** = soma da precipitação do trimestre Março, Abril e Maio registrado anualmente na estação meteorológica (cód. 8361004) da Colônia do Taiano (Alto Alegre); **Boqueirão** = soma da precipitação do trimestre Março, Abril e Maio registrado anualmente na estação meteorológica (cód. 8361001) da Terra Indígena Boqueirão (Alto Alegre); **Contão** = soma da precipitação do trimestre Março, Abril e Maio registrado anualmente na estação meteorológica (cód. 8360000) da Maloca do Contão (Pacaraíma). Análise de regressão simples considerando a Cota altimétrica (m) (C) e Área inundada (km²) (D) em função da precipitação (mm) (n=22). **MAM** = soma da precipitação dos meses de Março, Abril e Maio registrados anualmente na estação meteorológica de Boa Vista (Cód. 08260000); **Med_5mes** = valores médios dos meses de março, abril, maio, junho e julho; **B. Vista** = precipitação total anual registrada na estação meteorológica de Boa Vista. R² é o coeficiente de determinação da curva de regressão da análise.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Considerações finais

A forte correlação existente entre as áreas da enchente de 2011 modelada por este estudo (5,96 km²) e por Sander et al. (2012) (6,16 km²) oferece uma medida independente da precipitação do nosso mapeamento. Este fato serve como um bom indicativo para a validação do método utilizado de transferência das cotas limnimétricas observadas no rio Branco para as imediações da

foz do rio Cauamé, validando também o mapeamento dos impactos sofridos pelas matas ciliares e APPs na AEU durante as maiores enchentes ocorridas em Boa Vista nos últimos 22 anos.

Os resultados da modelagem podem servir como subsídio a futuros trabalhos visando o entendimento da dinâmica hidrológica do rio Cauamé e seus impactos na AEU de Boa Vista prevenindo seu crescimento para além da calha do rio nos próximos anos. Neste caso, outras variáveis podem ser estudadas, como por exemplo, a perda da vegetação de mata ciliar por ocupações ilegais / irregulares e a mensuração de danos causados em propriedades públicas / privadas sujeitas a enchentes dessa magnitude.

Por outro lado, embora os índices de precipitação utilizados por este estudo para prever a cota e a área de inundação em Boa Vista ofereçam um grau razoável de certeza, é indispensável a busca pela melhoria da rede de observação hidrológica, em especial, com o aumento na instalação de pluviômetros e fluviômetros em toda a bacia do rio Branco e do rio Cauamé. Esta medida é de suma importância para a melhoria da previsão e ganho precioso de tempo disponível para antecipar ações de prevenção e mitigação dos possíveis danos provocados pelas inundações na AEU de Boa Vista.

Agradecimentos

Agradecemos a Universidade Estadual de Roraima – UERR, pelo apoio institucional e ao Ministério Público Estadual – MPE, pela disponibilização de excelente material de apoio a esta pesquisa. Barbosa, R. I. e um revisor anônimo fizeram excelentes comentários ao manuscrito.

Referências

ALMEIDA, D.; SANDER, C. **Análise preliminar da dinâmica de inundação na cidade de Boa Vista – Roraima**. In: Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 13 a 18 de abril de 2013, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. Disponível em: <<http://marte2.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/marte2/2013/05.29.00.14.50/doc/p0983.pdf>>. Acesso em: 07 de Mai de 2021. 2013.

ANA - Agência Nacional de Águas. Rede Hidrometeorológica Nacional. Disponível em: <https://dadosabertos.ana.gov.br/datasets/8014bf6e92144a9b871bb4136390f732_0/data?geometry=-93.448%2C-7.226%2C-26.695%2C8.108>. Acesso em: 07 de Mai de 2021. 2021.

ARAÚJO JÚNIOR, A. C. R; TAVARES JÚNIOR, S. S. Uso e cobertura do solo para o planejamento urbano, Boa Vista, Roraima, Brasil. **Boletim Goiano de Geografia** (Online). Goiânia, v. 37, n. 1, p. 36-55. 2017. <https://doi.org/10.5216/bgg.v37i1.46242>.

- ARAÚJO JÚNIOR, Antônio Carlos Ribeiro; TAVARES JÚNIOR, Stélio Soares. Expansão urbana e fatores de risco à inundação em Boa Vista – RR. **Ra'eGa**. Curitiba, v.44, p. 139-153. 2018. <https://revistas.ufpr.br/raega/article/view/49680/35359>.
- BARNI, P. E.; FEARNside, P. M.; GRAÇA, P. M. L. A. Simulating deforestation and carbon loss in Amazonia: Impacts in Brazil's Roraima state from reconstructing Highway BR-319 (Manaus-Porto Velho). **Environmental Management**, 55(2), 259-278. 2015. <https://doi.org/10.1007/s00267-014-0408-6>.
- BARNI, P. E.; BARBOSA, R. I.; MANZI, A. O.; FEARNside, P. M. Simulated deforestation versus satellite data in Roraima, northern Amazonia, Brazil. **Sustentabilidade em Debate**, 11(2), 81-94. 2020a. <https://doi.org/10.18472/SustDeb.v11n2.2020.27493>.
- BARNI, P. E.; BARBOSA, R. I.; XAUD, H. A. M.; XAUD, M. R.; FEARNside, P. M. Precipitação no extremo norte da Amazônia: distribuição espacial no estado de Roraima, Brasil. **Sociedade & Natureza**, [S. l.], v. 32, p. 439–456, 2020b. <https://doi.org/10.14393/SN-v32-2020-52769>.
- BARNI, P. E.; REGO, A. C. M.; SILVA, F. C. F.; LOPES, R. A.; XAUD, H. A. M.; XAUD, M. R.; BARBOSA, R. I.; FEARNside, P. M. Logging Amazon forest increased the severity and spread of fires during the 2015–2016 El Niño. **Forest Ecology and Management**, v. 500, 119652. 15 pag. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119652>.
- BEDFORD, T.; COOKE, R., **Probabilistic Risk Analysis: Foundations and Methods**. Cambridge, Cambridge University Press. 414 p. 2001. https://www.academia.edu/42790263/Probabilistic_Risk_Analysis_Foundations_and_Methods.
- BRASIL-IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **IBGE divulga relação dos municípios na faixa de fronteira**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html?=&t=o-que-e>>. Acesso em: 21 de Mai. de 2022. 2020.
- BRASIL-INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. **Dados meteorológicos**. Disponível em: <<https://portal.inmet.gov.br/>>. Acesso em: 19 de Mai. de 2022. 2022.
- BRASIL-INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Topodata**. Disponível em: <<http://www.webmapit.com.br/inpe/topodata/>>. Acesso em: 10 de Mai. de 2022. 2022a.
- BRASIL-INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **TerraBrasilis**. Disponível em: <<http://terrabrasilis.dpi.inpe.br/downloads/>>. Acesso em: 10 de Mai. de 2022. 2022b.
- CARVALHO, A. A. **Modelagem hidrológica para extremos de inundações e secas para o município de Boa Vista em Roraima**. 2018. 75 f. il. color. Dissertação (mestrado em Gestão de Risco e Desastre na Amazônia) – Universidade Federal do Pará, Belém. <https://ppggrd.propesp.ufpa.br/index.php/br/teses-e-dissertacoes/dissertacoes/124-plano-de-trabalho-discentes-2016>.
- CHAGAS, V. B. P.; CHAFFE, P. L. B.; BLÖSCHL, G. Climate and land management accelerate the Brazilian water cycle. **Nature Communications**, 13, 5136. 2022. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-32580-x>
- COHEN, J. Statistical power analysis for the behavioral sciences. Hillsdale, NJ, USA: Erlbaum. Disponível em: <http://www.utstat.toronto.edu/~brunner/oldclass/378f16/readings/CohenPower.pdf>. Acesso em: 19 de Mai. de 2021. 1988.

FALCÃO, M. T.; BURG, I. P.; COSTA, J. A. V. Expansão urbana de Boa Vista / RR e os reflexos sobre os recursos hídricos. **Revista Equador** (UFPI), v. 4, n. 2, p. 98–113. 2015. <https://ojs.ufpi.br/index.php/equador/article/viewFile/3208/2068>.

FALCÃO, M. T.; OLIVEIRA, S. K. S. Impactos na paisagem da microbacia do igarapé Carrapato decorrentes da ocupação, zona rural de Boa Vista – Roraima. **Ambiente: Gestão e Desenvolvimento**, v. 14, n. 1, p. 38-45. 2021. <https://periodicos.uerr.edu.br/index.php/ambiente/article/view/911>.

FERRIER, S.; NINAN, K. N.; LEADLEY, P.; ALKEMADE, R.; ACOSTA, L. A.; AKÇAKAYA, H. R.; BROTONS, L.; CHEUNG, W. W. L.; CHRISTENSEN, V.; HARHASH, K. A.; KABUBO-MARIARA, J.; LUNDQUIST, C.; OBERSTEINER, M.; PEREIRA, H. M.; PETERSON, G.; PICHES-MADRUGA, R.; RAVINDRANATH, N.; RONDININI C.; WINTLE B.A. (Eds.). **IPBES: The methodological assessment report on scenarios and models of biodiversity and ecosystem services**. Bonn, Germany. Secretariat of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, 348 pp. 2016. <https://ipbes.net/assessment-reports/scenarios>.

GALDINO, L. K. A. **Sociedade, política, cultura e meio ambiente: subsídios ao planejamento socioambiental à comunidade indígena Boca da Mata, na Terra Indígena São Marcos - Roraima**. 205 f. Tese (Doutorado em Geografia – Programa de Pós-Graduação em Geografia), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

HIDROWEB. Sistema de Informações Hidrológicas – SIH. **Séries Históricas de Estações**. Disponível em: <<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas?codigoEstacao=14620000>>. Acesso em: 20 de Mai. de 2022. 2022.

LEE, J. Y.; MAROTZKE, J.; BALA, G.; CAO, L.; CORTI, S.; DUNNE, J. P.; ENGELBRECHT, F.; FISCHER, E.; FYFE, J. C.; JONES, C.; MAYCOCK, A.; MUTEMI, J.; NDIAYE, O.; PANICKAL, S.; ZHOU, T. Future Global Climate: Scenario-Based Projections and NearTerm Information. 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** [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 553–672. 2021. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/chapter/chapter-4/>.

LIRA, G. M.; FALCÃO, M. T.; AMORIM, E. L.; FORTES, F. C. A.; SOUZA, L. M. Analysis of the Impact of Implementation of a Risk-Flood Retention Basin. **International Journal of Advanced Engineering Research and Science**, v. n. 1. p. 95-102. 2020. <https://dx.doi.org/10.22161/ijaers.71.12>.

MARCELINO, E. V. Desastres Naturais e Geotecnologias: Conceitos Básicos. Caderno Didático nº 1. Santa Maria, RS, Brazil: CRS, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 38 pp. 2008. <https://bit.ly.co/5JdF>.

OLIVEIRA, J. S.; CARVALHO, T. M. Vulnerabilidade aos impactos ambientais da bacia hidrográfica do rio Cauamé em decorrência da expansão urbana e uso para lazer em suas praias. **Revista Geográfica Acadêmica**, v.8, n.1. p. 61-80. 2014. <https://revista.ufrr.br/rga/article/view/2984/1721>.

QGIS. Quantum Gis. **A Free and Open Source Geographic Information System**. Disponível em: <<https://www.qgis.org/>>. Acesso em: 20 de Mai. de 2022. 2022.

RAIHAN, A. T.; BAUER, S.; MUKHOPADHAYA, S. An AHP based approach to forecast groundwater level at potential recharge zones of Uckermark District, Brandenburg, Germany. **Scientific Reports**, 12, 6365 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-10403-9>.

R PROJECT. **The R Project for Statistical Computing**. Disponível em: <<https://www.r-project.org/>>. Acesso em: 20 de Mai. de 2022. 2022.

RODRIGUES, A. S.; SANDER, C.; WANKLER, F. L. Vulnerabilidade natural à contaminação do Aquífero Boa Vista (ABV) na área urbana de Boa Vista, Roraima. In: TEIXEIRA, Sheila Gatinho; CHAVES, César Lisboa. (Orgs.). **Contribuições à geologia da Amazônia**. V. 11, p. 37-50. 2019. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/348789976_Contribuicoes_a_Geologia_da_Amazonia_Volume_11>. Acesso em: 22 de mai de 2022.

SABATIER, P. A. **Theories of the Policy Process**. Frst Edition. Boulder, Colorado, Westview Press. 350 p. 2007. <http://ruby.fgcu.edu/courses/twimberley/EVR2861/theorypolprocess.pdf>.

SANDER, C.; WANKLER, F. L.; TONELLO, M. F.; SOUSA, V. P. Levantamento hidrológico da bacia do igarapé Carrapato, Boa Vista, RR: dados preliminares. **Acta Geográfica**, v. II, nº3, p.119-129. 2008. <https://revista.ufrr.br/actageo/article/view/216>.

SANDER, C.; WANKLER, F. L.; EVANGELISTA, R. A. O.; MOROGA, C. H.; TEIXEIRA, J. F. S. Cheias do Rio Branco e eventos de inundação na cidade de Boa Vista, Roraima. **Acta Geográfica**, 6 (12): 41-57. 2012. <https://revista.ufrr.br/actageo/article/view/730>.

SILVA, D. A.; SANDER, C.; ARAÚJO, A. C. R.; WANKLER, F. L. Análise dos ciclos de precipitação na região de Boa Vista – RR nos anos de 1910 a 2014. **Revista Geográfica Acadêmica**, v.9, n.2, p. 35-49. 2015. <https://revista.ufrr.br/rga/article/view/3145/1815>.

SILVA, P. R. F. **Dinâmica territorial urbana em Roraima - Brasil**. 2007. 329 p. Tese (Doutorado em Geografia Humana) - Programa de Pós-Graduação em Geografia Humana da Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo.

TUCCI, C. E. M. Inundações e Drenagem Urbana. In: TUCCI, Carlos Eduardo Morelli; BERTONI, Juan Carlos (Org.). **Inundações Urbanas na América do Sul**. Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2003. pp. 45-129. <https://www.abrhidro.org.br/SGCv3/publicacao.php?PUB=4&LIVRO=123>.

VERAS, A. T. R. **A produção do espaço urbano de Boa Vista – Roraima**. 2009. 235 f. Tese (Doutorado em Geografia – Programa de Pós-Graduação em Geografia Humana), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

VERAS, A. T. R.; GALDINO, L. K. A.; OLIVEIRA JÚNIOR, Z. Ocupação do espaço urbano e evolução legal da APP's dos cursos d'água da lei nº 12.651/2012: reflexões temporais na cidade de Boa Vista – Roraima. **Revista de Direito da Cidade**, vol. 10, nº 3. p. 1761-1787. 2018. <https://doi.org/10.12957/rdc.2018.33199>.