



Revista Brasileira de Geografia Física

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



Efeitos dos Fatores Antrópicos e Climáticos na Variação do Nível d'água do Aquífero Boa Vista na Bacia do rio Cauamé, Roraima

Luzinete Vilanova da Silva Gomes¹, Pedro Aurélio Costa Lima Pequeno², Fábio Luiz Wankler³.

¹Doutoranda. UFRR (Universidade Federal de Roraima) – Programa de Pós- Graduação em Recursos Naturais - Campus Paricarana. Av. Cap. Ene Garcez, nº 2413. Bairro Aeroporto. Cep: 69310-000. Boa Vista. Roraima. (95) 3621-3100. Email: luzavilanova@yahoo.com.br ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-3918-190X>.

²Prof. Visitante - UFRR (Universidade Federal de Roraima) – Programa de Pós- Graduação em Recursos Naturais - Campus Paricarana. Av. Cap. Ene Garcez, nº 2413. Bairro Aeroporto. Cep: 69310-000. Boa Vista. Roraima. (95) 3621-3100. Email: pacolipe@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7350-0485>

³Prof. Associado - UFRR (Universidade Federal de Roraima) – Programa de Pós- Graduação em Recursos Naturais - Campus Paricarana. Av. Cap. Ene Garcez, nº 2413. Bairro Aeroporto. Cep: 69310-000. Boa Vista. Roraima. (95) 3621-3100 Email: fabio.wankler@ufrr.br ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3965-6723>

Artigo recebido em 04/10/2024 e aceito em 06/05/2025

RESUMO

A bacia hidrográfica do rio Cauamé (BHRC) localiza-se nos municípios de Alto Alegre e Boa Vista (capital) em Roraima, Brasil e tem relevante importância social, econômica e ambiental regional. Nas últimas décadas, seu aquífero está sob efeito fenômenos climáticos devido ao aquecimento global e o acelerado crescimento populacional e agroindustrial. Este estudo investiga a influência das ações antrópicas e mudanças climáticas na variação do nível d'água do aquífero. Para tal, usou-se os dados do MapBioma de 1985 a 2022 do uso do solo, pluviométricos de 2011 a 2023 e do nível de água do aquífero de dois poços (P₁ e P₂) monitorados (área rural e urbana) de 2011 e 2022, analisando a evolução espaço temporal do uso do solo combinada com análise estatística (regressão múltipla) do comportamento do nível de água no período de 2011 a 2022. Os resultados mostram que a redução percentual das Classes Floresta Natural e Savana se relaciona com a expansão de área das Classes Agricultura e Pastagem que se acentua a partir de 2000, coincidindo com a introdução da agricultura ligada à cultura de soja em Roraima. As análises estatísticas demonstraram que na área urbana (poço P₁) o impacto no nível de água está fortemente relacionado às alterações climáticas, enquanto na área rural (P₂) apresenta tanto a influência do clima como o crescimento da atividade agropastoril. Conclui-se que, nos últimos 37 anos, as mudanças espaço-temporais do uso e ocupação do solo somado aos efeitos das mudanças climáticas influenciaram na variação do nível d'água na BHRC.

Palavras-chave: Águas subterrâneas; Mudanças Climáticas; Demanda Hídrica; Desmatamento na Amazônia; Estatística Multivariada.

Effects of Anthropogenic and Climatic Factors on Water Level Variation in the Boa Vista Aquifer in the Cauamé River Basin, Roraima

ABSTRACT

The Cauamé River Basin (BHRC) is located in the municipalities of Alto Alegre and Boa Vista (capital) in Roraima, Brazil, and has significant regional social, economic and environmental importance. In recent decades, its aquifer has been affected by climate phenomena due to global warming and accelerated population and agro-industrial growth. This study investigates the influence of human actions and climate change on the variation of the aquifer's water level. For this purpose, data from MapBioma from 1985 to 2022 on land use, rainfall from 2011 to 2023 and the water level of the aquifer of two wells (P₁ and P₂) monitored (rural and urban areas) from 2011 and 2022 were used, analyzing the spatial-temporal evolution of land use combined with statistical analysis (multiple regression) of the behavior of the water level in the period from 2011 to 2022. The results show that the percentage reduction of the Natural Forest and Savannah Classes is related to the expansion of the area of the Agriculture and Pasture Classes that has been accentuated since 2000, coinciding with the introduction of agriculture linked to soybean cultivation in Roraima. Statistical analyses demonstrated that in the urban area (well P₁) the impact on the water level is strongly related to climate change, while in the rural area

(P₂) it presents both the influence of the climate and the growth of agropastoral activity. It is concluded that, over the last 37 years, spatial-temporal changes in land use and occupation, combined with the effects of climate change, have influenced the variation in water levels in the BHRC.

Keywords: Groundwater; Climate Change; Water Demand; Amazon Deforestation; Multivariate Statistics.

Introdução

A demanda mundial por água aumentou consideravelmente nas últimas décadas devido ao crescimento populacional, ações antrópicas, poluição das águas superficiais e consumo insustentável das águas subterrâneas. Segundo Silva et al., (2021), tal situação no Brasil é agravada por questões geográficas, adensamento populacional e poluição das águas subterrâneas. Deste modo, o grande desafio para a gestão é proporcionar para as futuras gerações água em quantidade e qualidade, considerando os efeitos antrópicos e as mudanças climáticas.

Como salienta Jasechko et al. (2024), a retirada excessiva de água subterrânea em regiões com extensas terras agrícolas, pode causar o declínio dos níveis d'água, devido os efeitos das ações antrópicas no planeta.

Manzione et al. (2020) destacam ainda que, uma análise da disponibilidade hídrica não pode considerar somente os fatores antrópicos, pois os níveis freáticos das bacias hidrográficas são afetados por uma combinação de fatores antropogênicos e naturais, como por exemplo as mudanças climáticas.

A bacia hidrográfica do rio Cauamé (BHRC) é afluente do rio Branco, abrangendo os municípios de Alto Alegre e Boa Vista (capital) do estado de Roraima, Brasil (Sander et al. 2024). Seu regime hidrológico é marcado pela sazonalidade pluviométrica, com períodos secos (outubro a março) e chuvosos (abril a setembro) que determinam a profundidade do nível d'água do Aquífero Boa Vista (ABV), durante o ano hidrológico (Wankler et al., 2022; Lima & Vital, 2022).

No estado de Roraima, a bacia hidrográfica do rio Cauamé possui relevante importância social, econômica e ambiental para a sociedade. O consumo de água subterrânea na região vem aumentando ao longo dos anos, com destaque para o abastecimento urbano e rural, dessedentação animal indústria e agricultura irrigada (ANA, 2024). Nas últimas décadas, o elevado crescimento populacional e significativa expansão da área rural para plantio de grãos, em especial da soja, tem aumentado significativamente a exploração hídrica subterrânea na BHRC (Oliveira e Carvalho, 2014; Lima e Vital, 2022).

O constante crescimento da agricultura mecanizada, da agropecuária com expansão da pastagem e da área urbana na Amazônia vem gerando a diminuição da vegetação nativa (Savana e Floresta Natural) (MapBioma, 2024). Esses fatores antrópicos causam o aumento dos efeitos climáticos, com ocorrências de eventos extremos (aumento da temperatura, seca, inundações, ondas de calor e outros), ocasionando perdas na biodiversidade e comprometendo os ecossistemas (Salazar et al., 2015; Eloy et al., 2023; Falcão e Souza, 2022).

A relevância desse assunto se apoia na crescente importância das águas subterrâneas na BHRC, devido seus usos múltiplos para as diversas esferas da sociedade que ali vivem, pois é uma área de elevado crescimento populacional e de atividades agroindustriais em Roraima, mas que consome um volume significativo de recursos hídricos, podendo influenciar na variação do nível d'água subterrânea. O entendimento das reservas hidrogeológicas atende ao grande desafio da atualidade para o cumprimento dos objetivos do desenvolvimento sustentável (ODS, 2024), que é proporcionar às populações urbanas e rurais água em quantidade e de qualidade, considerando os impactos regionais e locais causados pelas atividades antrópicas e mudanças climáticas.

Sendo assim, a conjunção de um regime pluviométrico sazonal em uma região com franco crescimento dos problemas socioambientais, pode resultar num aquífero com significativa insegurança hídrica, com dificuldade para atender as crescentes necessidades de exploração de água subterrânea de forma sustentável. Para tal, analisamos as seguintes questões: (1) Como ocorreu a transformação dos diferentes usos e ocupações do solo nas últimas três décadas na bacia? (2) Como os eventos ENOS afetaram o índice de precipitação neste período? (3) Como os fatores antrópicos e climáticos afetaram o nível d'água do aquífero?

Para responder estas perguntas, sobre o comportamento espaço-temporal da expansão antrópica, comportamento pluviométrico e dados hidrogeológicos foram analisados mapas e gráficos de regressão linear gerados usando a estatística multivariada com aplicação do software RStudio,

correlacionando a variável resposta *versus* as variáveis preditoras. Para a correlação das variáveis espaço-temporais que influenciam na variação do nível d'água subterrânea na BHRC, a abordagem estatística parece ser a mais eficaz no entendimento das variáveis dependentes e independentes, que são usadas em modelos hidrológicos e geológicos (Charnet et al., 1999; Gouveia et al., 2024). Neste sentido, o uso de modelos estatísticos em dados espaciais e temporais permite quantificar os fenômenos analisados (Kitanidis, 1997; Franca et al., 2018).

O objetivo deste estudo foi investigar os efeitos dos fatores antrópicos e climáticos na variação do nível d'água subterrânea no Aquífero

Boa Vista na Bacia do rio Cauamé, Roraima. Espera-se que os resultados deste trabalho contribuam para garantir a sustentabilidade da extração e abastecimento de água doce na bacia, meta prevista na ODS 6 - água potável e sustentabilidade.

Materiais e métodos

A Figura 1 apresenta o fluxograma metodológico desenvolvido neste trabalho. Os métodos utilizados são o exploratório e descritivo, com uma abordagem qualitativa e quantitativa das características hidrogeológicas da área de estudo.

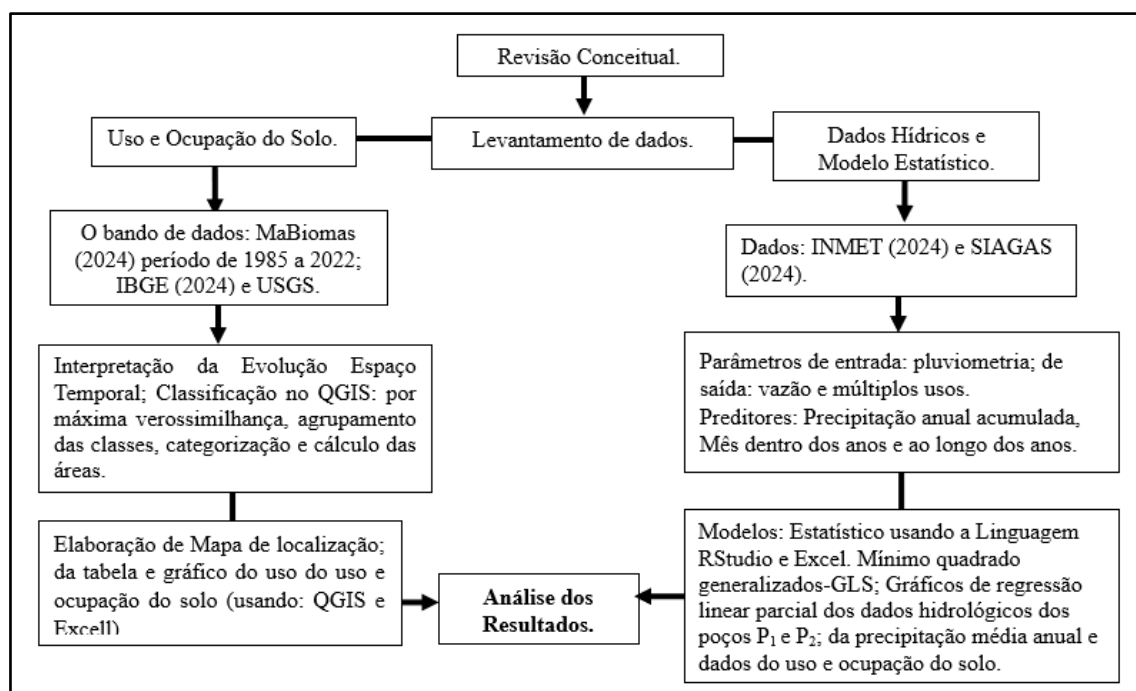


Figura 1: Fluxograma das etapas metodológicas. Fonte: Autores (2024).

Na etapa descritiva para a análise do nível d'água subterrânea, foram utilizados dados pluviométricos da estação Boa Vista, do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2024) no intervalo de 2011 a 2023 e de dois poços tubulares P_1 e P_2 monitorados, localizados na área urbana (P_1) e rural (P_2) dentro da BHRC, no intervalo de 2011 a 2022 (SIAGAS, 2024). Os resultados obtidos foram analisados através de gráficos de regressão linear gerados no software RStudio.

O método exploratório para a construção do mapa de localização (Figura 2), os dados foram adquiridos de imagens georreferenciadas do satélite Landsat8 com resolução de 30 m. Para a geração do gráfico e tabela do uso e ocupação do solo na BHRC, os dados foram baixados da

Plataforma MapBioma, coleção 7, versão 5.0, com resolução espacial de 30 m (MapBioma, 2024) no intervalo de 1985 a 2022 e manipulados no ambiente do software QGIS (3.34.12 Prizren) e confeccionado na Excel.

Caracterização da Área de Estudo

A bacia hidrográfica do rio Cauamé (BHRC) ocupa a porção Centro-Norte do estado de Roraima (RR) numa área que abrange os municípios de Boa Vista e Alto Alegre (Figura 2), e bordejando a área urbana da cidade de Boa Vista (capital de Roraima), encontrando-se totalmente no hemisfério Norte, acima da linha do Equador (Buenafuente et al., 2023).

A hidrografia da BHRC é constituída por 1.942 canais que tributam um rio principal (Cauamé), cuja extensão é de 120 km, em uma área de drenagem de 3.159 km². Seu acesso é pelas rodovias BR-174, RR-342, RR-319 e RR-205,

essenciais para o deslocamento das pessoas, de animais, frutas e produtos agrícolas (Oliveira et al., 2014; Reis e Alamy Filho, 2018).

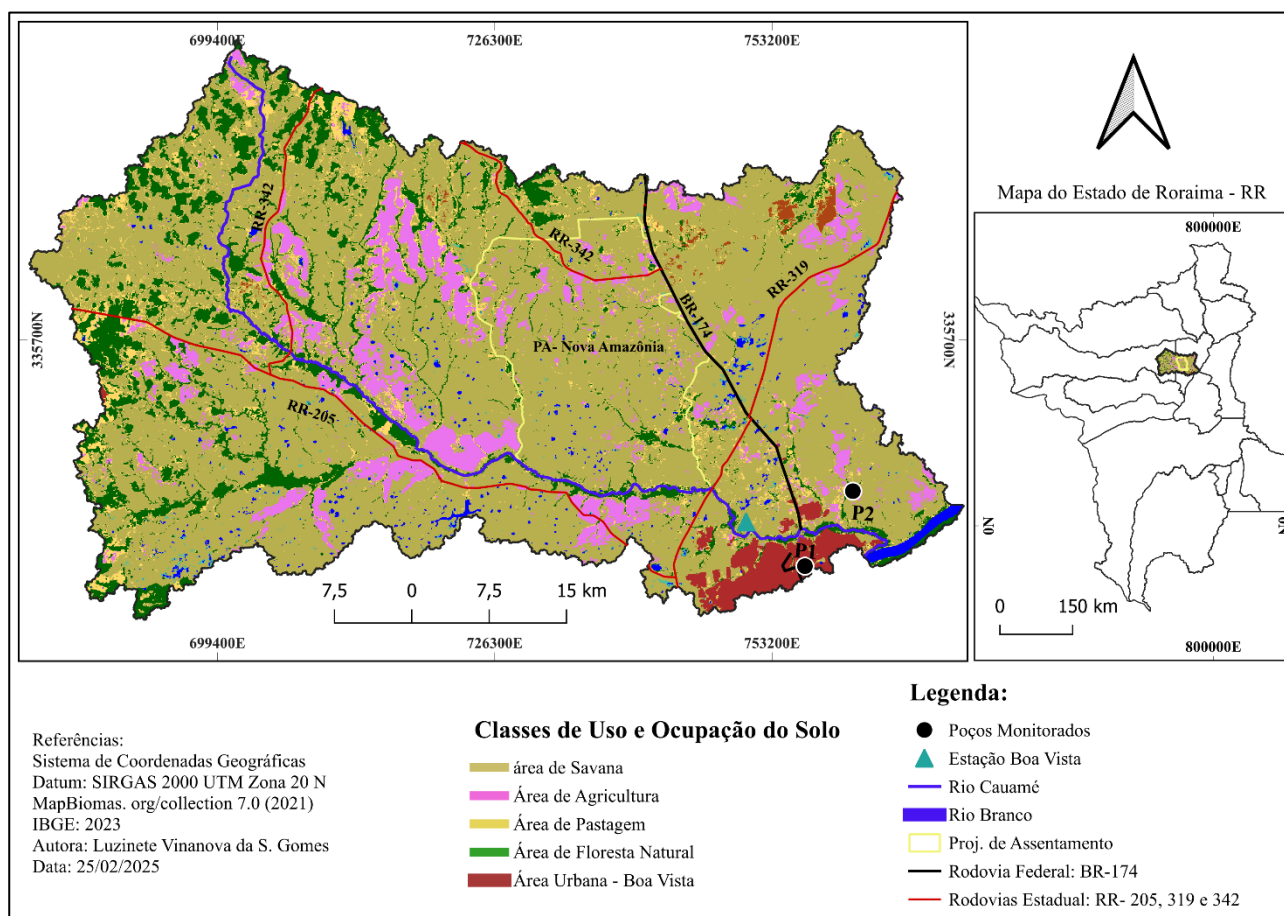


Figura 2: Mapa de Localização da BHRC, com as Classes de uso do solo, suas principais rodovias (BR-174, RR-319 e RR-205), estação Boa Vista e os dois poços P₁ e P₂ monitorados no intervalo de 2011 a 2022. Fonte: Autores (2024).

Aspectos fisiográficos e antrópicos

A região está incluída na zona climática Tropical chuvoso, do subtipo Aw, segundo a classificação Köpper-Geiger (Lima et al., 2023; Araujo et al., 2024), com temperatura média anual variando de 26°C a 35°C (Barbosa e Campos, 2011), com precipitação pluviométrica média anual variando entre 1.600 a 1.800mm com duas estações bem definidas, uma seca (outubro a março) e outra chuvosa (abril a setembro), com maior índice de precipitação nos meses de maio a julho (Barni et al., 2020; Buenafuente et al., 2023).

A geologia da região é estruturada por rochas metamórficas do Grupo Cauarane, ígneas vulcânicas da Formação Apoteri, como unidade geológica amplamente predominante, a cobertura

sedimentar da Formação Boa Vista. (Reis e Alamy Filho, 2018). A geomorfologia da BHRC apresenta distintos domínios geológicos e geomorfológicos, reflexo do relevo e geologia com diferentes características (Galdino, 2018; Sander et al., 2024).

O relevo da BHRC é considerado plano a suave ondulado e suas cotas variam de 60 a 400 m, coberto por Savana (regionalmente, chamado de lavrado). No entanto, no extremo oeste da bacia o relevo é classificado como fortemente ondulado a montanhoso, com cotas variado de 110 a 350 m, formando um conjunto de serras e morros testemunhos cobertos por uma floresta do tipo Montana (Carvalho et al., 2022).

Essa fisiografia da BHRC, proporcionou ao reservatório subterrâneo um lençol freático bastante raso, com nível estático variando de (0.5 a

12.0 m) aproximadamente, de profundidade o que facilita uma exploração intensa, visto que a perfuração dos poços tem custos relativamente baixos, além de possuir alta capacidade de infiltração, maior porosidade efetiva e permeabilidade, favorecendo a recarga da bacia (Santos et al., 2022).

A expansão agrícola na região foi privilegiada, devido a BHRC estar localizada perto do principal centro populacional de Roraima, a capital Boa Vista, agregando vantagens econômicas, sociais e ambientais, no uso e ocupação do solo. Por outro lado, essas características fazem com que o aquífero Boa Vista, fique vulnerável à contaminação das águas subterrâneas por esgotos domésticos e defensivos agrícolas (Carvalho et al., 2016; Carvalho & Morais, 2022; Santos et al., 2022; Wankler et al., 2022).

Historicamente a região da BHRC, era uma área pouco ocupada pela agricultura devido à baixa fertilidade dos solos (Schaefer & Vale Júnior, 1997; Landau et al., 2020). Contudo, nas últimas décadas, a região vem sendo afetada com o avanço da agricultura mecanizada com uso de irrigação, nos plantios de arroz, milho, soja, entre outros (Lima & Vital, 2022). Esse efeito, somado ao aumento da população residente, principalmente imigrantes venezuelanos e de outros países, levaram a expansão da urbanização e atividades agropastoril, causando o desmatamento da vegetação nativa (Souza et al., 2020; Souza & Oliveira, 2024).

Uso e ocupação do solo

Os dados do uso e ocupação do solo foram gerados do intervalo de 1985 a 2022. O ano de 1985 foi escolhido para o início das análises, devido às características da ferramenta MapBioma, pois foi o ano que começou a disponibilizar os dados de satélite Landsat na plataforma MapBioma. O ano de 2022 foi escolhido por ser o período mais atualizado em operação, apresentando uma série temporal bastante significativa, adequada para o entendimento do espaço temporal das mudanças ocorridas na área de estudo.

O software QGIS (3.34.12 Prizren) foi utilizado para baixar as imagens raster (MapBioma) e vetoriais, fazendo os processos de tratamento e manipulação de dados espaciais extraídos da série temporal de 1985 a 2022, da plataforma MapBioma, coleção 7.0 e versão 5 (MapBioma, 2024). O gráfico e a tabela das

Classes de uso e ocupação do solo foram gerados no Excel.

Utilizou-se também, imagens raster e vetoriais georreferenciadas da área de estudo, manipuladas no QGIS. Para o tratamento das imagens raster, usou-se o método de classificação supervisionada por máxima verossimilhança no DZetsaka, com as seguintes etapas: as imagens raster foram recortadas por camadas máscara utilizando o limite da BHRC, obtida através da manipulação do modelo digital de elevação da bacia; usou-se a poligonização para transformar as imagens raster para vetorial e depois, foi feito o agrupamento dos Id's de classes semelhantes para fazer a categorização (simbologia); em seguida, foi feito o "dissolver dos polígonos" (agregar Id's em uma única feição); por fim, realizou-se os cálculos de áreas das classes de uso e cobertura em quilômetros quadrados (km²), hectares (ha) e porcentagens (%).

Para análise e interpretação dos resultados foram gerados gráficos e tabela no Excel sobre o uso e ocupação do solo no intervalo de 1985 a 2022, usando QGIS e o aplicativo Excel.

Dados hidrológicos e modelo estatístico

As informações sobre o índice de precipitação no período de 2011 a 2023, foram retirados da série histórica da estação pluviométrica (Estação Boa Vista), do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2024) e da Agência Nacional das Águas e Saneamento (ANA, 2022). Para o gráfico do índice pluviométricos, usou-se o Excel.

Os dados hidrogeológicos foram gerados a partir de informações de dois poços tubulares P₁ e P₂ em monitoramento dentro da BHRC. Sendo localizados um na área urbana de Boa Vista (P₁) e o outro na área rural (P₂), a partir das informações do Sistema de Informações de águas Subterrâneas (SIAGAS, 2024) no intervalo de 2011 a 2022.

A interpretação dos resultados sobre a variação do nível d'água, gráficos de regressão linear múltipla foram gerados com os dados dos poços monitorados usando o software RStudio.

Para a análise dos resultados de cada poço, utilizou-se as precipitações como variável de entrada e a exploração com seus múltiplos usos como sendo as variáveis de saída, para determinar a variação do nível d'água subterrânea no período estudado.

Na modelação das variabilidades espaço-temporais da oscilação dos níveis d'água na

BHRC, considerou-se a sazonalidade pluviométrica da região (estiagem ou enchentes). Para a análise dos dados foi utilizado a estatística multivariada. Essa técnica reduz os efeitos relacionados à coleta de dados (custo, tempo, entre outros) e proporcionando análises espaciais e temporais, com sentido físico na área de estudo (Monteiro et al., 2024; Correia de Oliveira, et al., 2025).

Para a determinação dos principais preditores da mudança do nível d'água, dois modelos estatísticos foram criados, um para cada poço com aplicação do software RStudio (R PROJECT, 2023). Os modelos foram estimados usando Mínimos Quadrados Generalizados, o que permite descontar a autocorrelação temporal geralmente encontrada em séries temporais (Zuur et al., 2009; Breheny & Burchett, 2017).

Para isso, cada modelo assumiu uma estrutura autorregressiva de primeira ordem, como parâmetro. A profundidade do nível d'água foi modelada em função de três preditores: precipitação mensal acumulada, precipitação mês dentro do ano e precipitação mês ao longo dos anos. Sendo que, para levar em conta as possíveis relações curvilíneas entre profundidade do nível d'água e os preditores, termos quadráticos e cúbicos de cada preditores foram incluídos no modelo original para determinar sua significância estatística ($P < 0,05$) e, então excluídos os casos que não tenham sido apoiados estatisticamente (Montgomery et al., 2021; Monteiro et al., 2024).

Para levar em conta os possíveis atrasos (tempo resposta) do efeito da precipitação pluviométrica sobre a profundidade do lençol freático na BHRC, modelos alternativos foram criados usando a precipitação com atraso de um a seis meses em relação ao mês de medição da profundidade do nível d'água, o atraso com maior apoio estatístico foi determinado como aquele tendo o menor Critério de Informação de Akaike.

Para visualizar as relações estimadas, usou-se gráficos de regressão múltipla, para mostrar a relação entre a variável resposta (profundidade do nível d'água) e cada preditor, descontando os demais fatores incluídos no modelo.

Análise dos resultados hidrológicos

Para o entendimento dos resultados da variável resposta (profundidade do nível d'água do aquífero), utilizou-se a gráficos de regressão linear múltipla. O entendimento da profundidade do nível

d'água em (m), sendo explicada por três variáveis preditoras: precipitação no mês anterior (mm); precipitação mês dentro do ano (para capturar padrões sazonais) e precipitação mês ao longo dos anos (para capturar tendências de longo prazo).

O método aplicado foi dos mínimos quadrados generalizados (*Generalized Least Squares*, GLS), para definir esses parâmetros (precipitação, nível d'água, entre outros), sempre buscando definir e construir a estimativa geral para a reta de regressão, minimizando a soma dos quadrados da distância dos valores reais das amostras ($n_1 = 122$ e $n_2 = 113$) e comparando com os valores da reta estimadas (Gouveia et al., 2024; Monteiro et al., 2024; Correia de Oliveira, et al., 2025). Modelos GLS permitem descontar a autocorrelação temporal, geralmente encontrada em séries temporais, e assumindo uma estrutura autorregressiva de primeira ordem como parâmetro (Monteiro et al., 2024).

Assim, o método GLS serviu para definir se a reta, os coeficientes angulares e o intercepto se encontram, garantindo que a reta obtida é aquela na qual se tem as menores distâncias entre os valores observados e a própria reta. (Montgomery et al., 2021; Monteiro et al., 2024; Correia de Oliveira, et al., 2025).

Segundo Stock e Watson (2002), estimadores de mínimos quadrados ordinários escolhem os coeficientes de modo que a linha de regressão estimada que ficam o mais próximo possível dos dados observados.

Para analisar a qualidade do ajuste do modelo estatístico foram utilizados os coeficientes de determinação (R^2), consistindo na proporção da variabilidade dos valores observados explicada pelo modelo, com o intervalo entre (0 e 1), quanto mais próximo de (1) melhor será o ajuste do modelo considerado e a significância estatística (Gouveia et al., 2024; Monteiro et al., 2024).

Na correlação entre a profundidade do nível d'água (m) versus a precipitação no mês anterior; precipitação mês dentro do ano e precipitação mês ao longo do ano, nos dois poços P_1 e P_2 monitorados, considerou-se o intervalo de janeiro de 2011 a dezembro de 2022 para o poço P_1 e de janeiro de 2012 a dezembro de 2021 para o poço P_2 .

A variação do nível d'água (m) nos dois poços tubulares P_1 e P_2 monitorados, foi modelada em função de três preditores: precipitação mensal acumulada (mm) de 0.0 a 450 mm, precipitação mês dentro do ano (foi representado como uma variável numérica de 1 a 12) e a precipitação mês

ao longo dos anos, representado como variável numérica os anos de 2012 a 2022, correspondente ao número de anos da série temporal.

Para visualizar as relações estimadas, gráficos de regressão parcial foram gerados, os quais mostraram a relação entre a variável resposta (profundidade do nível d'água), relacionando com cada preditor descontando os demais fatores incluídos no modelo (Breheny & Burchett, 2017; Monteiro et al., 2024; Correia de Oliveira, et al., 2025).

Segundo Correia de Oliveira et al., (2025), com a caracterização estatística de séries históricas de dados de precipitação e monitoramento do nível d'água em poços tubulares, pode-se determinar a precipitação provável com uma determinada probabilidade de ocorrência da variação desses eventos, em diferentes escalas de tempo. Essas informações sobre a variação de eventos extremos e rebaixamento do nível d'água subterrânea, contribuem para a tomadas de decisões e planejamento de atividades agrícolas e do meio urbano, por exemplo (Matsunaga et al., 2024).

Resultados e discussão

Evolução do uso e ocupação do solo

A expansão urbana e agropecuária na BHRC, no intervalo de 1985 a 2022, causou a sistemática redução da cobertura vegetal. Analisando a Figura 3, observa-se uma regressão na área das Classes (Floresta Natural e Savana), foi influenciada pelo crescimento das áreas ocupadas pelas Classes Agricultura e Pastagem. Nota-se também, que a área Urbana, apresentou um crescimento mais discretos quando comparado com a Classe Agricultura e Pastagem. Sendo assim, o cenário constatado na BHRC é o aumento das atividades antrópicas, devido ao desenvolvimento agropecuário.

As Florestas Naturais na BHRC em 1985 ocupavam uma área de 535,65 km² representando (16,77%) da BHRC. Entre 1990 a 1995 aconteceu uma lenta redução deste valor, passando para 521,26 km² (16,32%) e 496,78 km² (15,55%) em 1995. Em 2000, a Classe Floresta Natural apresentou um pequeno aumento de área ocupada, chegando a 498,35 km² (15,60%) e voltando a mostrar uma tendência de diminuição nos anos seguintes, de 490,05 km² (15,34%) em 2005; 467,99 km² (14,65%) em 2010; 438,19 km² (13,72%) em 2015 e 397,70 km² (12,44%) em 2022.

Constata-se que, em 1985 a Classe Savana ocupava uma área de 2508,39 km² representando (78,51%) da BHRC, com um leve aumento de áreas nos anos de 1990 e 1995, passando para 2522,01 km² (78,94%) e 2536,83 km² (79,40%).

Mas, de 2000 a 2005, ocorre uma redução da área, passando de 2419,22 km² (75,72%) para 2381,89 km² (74,55%). Entre 2010 e 2015 a área de Cerrado se expande de 2384,10 km² (74,62%) para 2410,05 km² (75,44%). No entanto, em 2022 percebe-se uma redução bem expressiva de área da Classe Savana, representando apenas 2236,03 km², ou seja, (69,99%) da área da BHRC (MapBioma, 2024).

A influência da tecnologia agrícola parece explicar a evolução da área da Classe Agricultura, sem representatividade até 1995, com uma ocupação da BHRC de apenas 0,02%. A partir de 2000, verifica-se sua expansão da área plantada, passando para 81,86 km² (2,56%) em 2005. No entanto, de 2005 a 2010 aconteceu uma redução passando para 64,21 km² (2,01%) em 2010. Somente de 2015 em diante, constata-se um aumento exponencial na ocupação da área plantada, passando de 142,73 km² (4,47%) em 2015 para 263,03 km² (8,23%) em 2022, ou seja, um aumento de quase 100% nesse intervalo de apenas sete anos.

Comparativamente, a atividade pastoril, historicamente importante e representada pela Classe de Pastagem, ficou estagnada em todos esses anos, um crescimento lento até 2005, representando apenas 13,14 km² (0,41%) de área ocupada por pastagem em 1985. Somente 1990 em diante, observa-se um pequeno aumento da área de pastagem, passando para 36,68 km² (1,15%) 1990; 48,34 km² (1,51%) em 1995; 55,41 km² (1,73%) em 2000 e para 60,27 km² (1,89%) em 2005.

Sendo assim, a partir de 2000, nota-se uma relação direta entre o crescimento da Classe Agricultura (principal) e Pastagem ao mesmo tempo, ou seja, um acelerado encolhimento da área ocupada pela Classe Floresta Natural e Savana.

Este cenário, coincide com a expansão da superfície dedicadas ao plantio da soja em Roraima (Smiderle & Gianluppi, 2005; Eloy et al., 2023). Pois, a produção de soja nos municípios de Boa Vista e Alto Alegre região onde a BHRC se localiza, mostraram um crescimento de 6,5 km² em 2001 para 46,4 km² em 2003. Apresentando um aumento de 713% da área plantada (Smiderle & Gianluppi, 2005). Isso mostra que, o cultivo mecanizado de soja foi uma das maiores

contribuições para crescimento de áreas antropizadas na bacia.

Com relação a Classe Pastagem foi verificado que a variação de sua área aumentou conforme a redução das áreas das Classes Floresta Natural e Savana e a expansão da Classe Agricultura. De 1985 a 1995 a área de pastagem cresceu de 13,14 km² para 48,34 km². Isso coincide com a expansão da pastagem plantada em Roraima, que de 1985 a 1995 cresceu 201% (Salazar et al., 2015; Souza et al., 2020; Souza & Oliveira, 2024; Landau et al., 2020).

Desse modo com o aumento da pecuária intensiva e a expansão da soja em Roraima, ocorre uma redução das áreas de pastagem. De 2010-2015, a Classe Pastagem passou de 82,04 km² (2,57%) para 66,23 km² (2,07%) ao mesmo tempo que ocorreu a redução das Classes Savana e

Floresta Natural e o crescimento da Classe Agricultura.

Cabe destacar que a agricultura mecanizada na BHRC, utiliza a irrigação em grande volume no período da estação seca, devido à necessidade de águas para manutenção destas culturas. Esta prática pode gerar um déficit hídrico deste período, implicando em um aumento na exploração das águas subterrâneas na bacia, devido a irrigação e dessedentação animal.

Salazar et al. (2015), constataram que a substituição da cobertura vegetal de Savana por pastagem e/ou agricultura acarreta uma série de transformações da paisagem que causa o desequilíbrio do balanço hídrico natural.

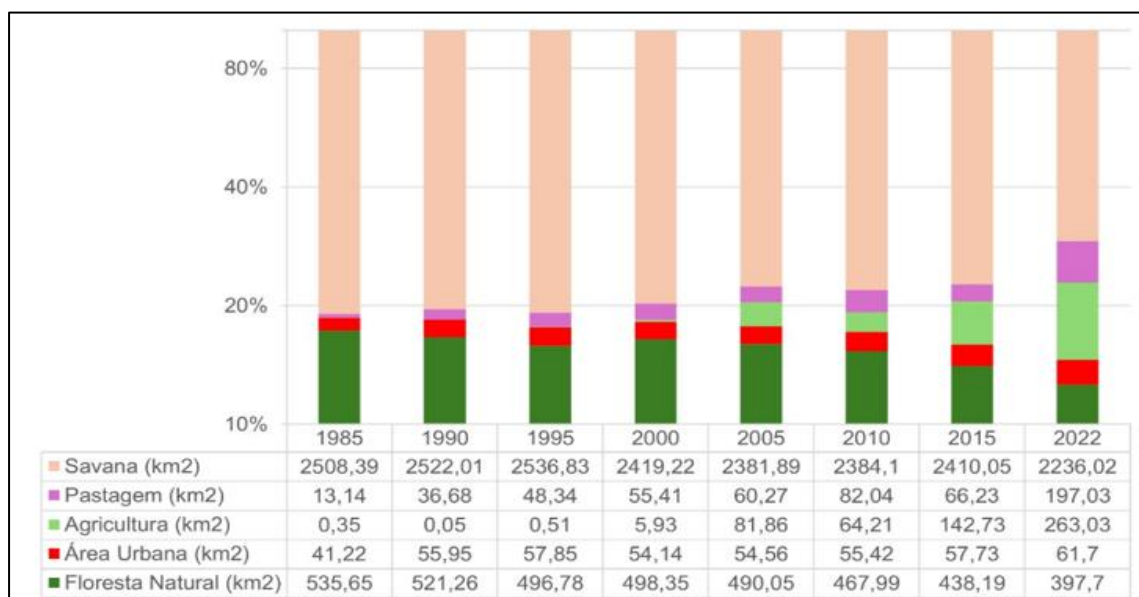


Figura 3: Gráfico e Tabela das Classes de uso e ocupação de solo da BHRC em % e área em km², respectivamente, no intervalo de 1985 a 2022. Fonte: Adaptado do MapBioma (2024).

Esses desequilíbrios, geram a redução do índice de precipitação em até 20%, aumento da temperatura (albedo) em 50% e da evapotranspiração em até 50% (Tucci, 2009).

Estas transformações, embora possam trazer benefícios socioeconômicos a curto prazo para a região, a longo prazo poderão contribuir para a perda da biodiversidade, afetando a sustentabilidade das pessoas que ali reside, redução do nível d'água subterrânea, afetar a disponibilidade hídrica e os ecossistemas. Os efeitos socioambientais observados na BHRC neste trabalho são condizentes e recorrentes em regiões que apresentaram rápido crescimento socioeconômico, e comprometimento da

disponibilidade hídrica na região (Oliveira et al., 2021; Barcelos et al., 2022; Souza et al., 2020; Souza & Oliveira, 2024).

Segundo Salazar et al. (2015) no Brasil a área de cerrado teve uma perda de 52% de sua vegetação natural, sendo transformada em lavouras (agricultura) e pastagem no período de 2000 a 2012.

Vera et al., (2023) realizaram estudo na BHRC, identificaram a presença de um forte processo de mudança no uso e ocupação do solo, principalmente pela retirada das Savanas, substituídas por cultivos e edificações, sendo que, em 1988 as Savanas ocupavam 72,27% da área

total da bacia, diminuindo para 60,47% da área total em 2023, com uma perda de 37.556 ha.

No contexto do bioma Amazônia, estudos realizados por Barbosa de Souza et al. (2023), sobre a dinâmica do uso e cobertura do solo ao longo do tempo, no período de 1985 e 2014. Os resultados mostraram que a classe Formação Florestal ocupava 3.844.800,75 km² (91,20%) em 1985, e em 2014, houve redução para 3.452.129,25 km² (81,89%). A classe Pastagem tinha uma área inicial de 71.046,50 km² (1,69%), e em 2014, houve aumento expressivo para 437.670,00 km² (10,38%). E a projeção para 2044 é que haverá uma redução ainda mais significativa da formação florestal, devido aumento da pastagem.

Dias e Gonçalves (2025) ao realizar seus estudos sobre o uso e ocupação do solo, identificaram que os principais problemas estavam relacionados, com: a) desmatamento, uso de defensivos agrícolas e perda da fertilidade do solo; b) uso intensivo de recursos naturais, poluição do ar, água e solo, c) disposição final de resíduos sólidos e esgotos não tratados e d) comprometimento da disponibilidade hídrica.

Portanto, preservar as Savanas e as Florestas Naturais na BHRC é fundamental, para garantir a preservação da biodiversidade, a sustentabilidade dos recursos hídricos e o bem estar dos ecossistemas.

Outro efeito na disponibilidade hídrica é o consumo humano. A classe área Urbana da BHRC, nos anos analisados, apresentou uma lenta expansão de área, com um aumento de apenas 0,21%. Em 1985 p.e., a área ocupada pela urbanização era de 41,22 km² (1,29%) e em 2022 chegou a 61,70 km² (1,93%).

Se considerarmos apenas a área de expansão urbana na BHRC, o seu impacto é pouco significativo com relação as Classes Savana e Floresta Natural. Por outro lado, se analisarmos o crescimento populacional nas últimas décadas, este efeito foi bem representativo. A população urbana do município de Boa Vista em 1985 era de apenas 66.357 habitantes, passando para 284.258 habitantes em 2010. O que representa um aumento de 428% e em 2021 a população saltou para 432.591 habitantes, a maioria de imigrantes (IBGE, 2024).

O aumento de demanda hídrica causado pelo crescimento demográfico pode causar o rebaixamento do nível d'água subterrânea, devido a exploração para o abastecimento (urbano e rural). Por exemplo, o abastecimento público para atender toda essa população é predominantemente

subterrâneo. Mais de 70% da água consumida em Boa Vista vem de poços tubulares localizados dentro da BHRC (Oliveira, & Carvalho, 2014; Santos et al., 2022).

Desse modo, não obstante o pequeno crescimento da Classe área Urbana, a expansão populacional impactou no consumo dos recursos hídricos subterrâneos de forma significativa na bacia.

Dados históricos das precipitações na BHRC

A precipitação é um fenômeno que faz parte do ciclo hidrológico. Sua variação espacial e temporal, condiciona as tomadas de decisões mais sustentáveis no gerenciamento dos recursos hídricos (Correia de Oliveira et al., 2025).

O regime de chuvas e as incertezas climáticas interferem na variação do nível d'água do aquífero na BHRC e estão relacionados ao ciclo hidrológico, tais como: precipitação, infiltração, evapotranspiração e ao escoamento superficial que, por sua vez, são controladas pelo relevo, vegetação e padrões de variabilidade temporal e espacial climático (Barni et al., 2020).

O Aquífero Boa Vista, na BHRC é um aquífero granular, livre e que tem sua recarga através da precipitação em toda a sua extensão. As variações de recarga do aquífero ao longo do tempo, contudo, refletem a disponibilidade hídrica resultante do clima tropical do tipo Aw dominante na BHRC.

Oliveira e Carvalho (2014), constataram que as oscilações do volume hídrico disponível do aquífero impactam o abastecimento público e as atividades produtivas, em especial esta última, que dependem de um grande volume de água subterrânea para manter a produtividade das culturas e dos rebanhos na estação seca.

Sendo assim, configura-se a importância econômica e socioambiental no entendimento do padrão de chuvas e dos efeitos do El Niño e La Niña na distribuição da precipitação e na recarga de água subterrânea disponível na BHRC. Pela análise da série histórica no intervalo de 2011 a 2023 da BHRC (Figura 4), identificou-se precipitações tanto abaixo como acima da média histórica de 1600 mm.

A amplitude da precipitação entre as máximas e mínimas observada foi de aproximadamente 200 mm e refletem o regime de chuvas sazonal que domina na BHRC, onde quase toda a precipitação se concentra em um período de

abril a setembro, denominado de estação chuvosa (Araújo et al., 2024).

Wankler e Sander (2022), identificaram que na estação chuvosa, ocorre 80% aproximadamente do total anual (1.700 mm) de precipitação na região de Boa Vista. Verificaram também, que no período de redução da precipitação, ocorre o aumento da temperatura e da evapotranspiração real (deficiência hídrica), se iniciando no começo da estação seca (setembro) e vai se mantendo do mês de março até abril, quando inicia a estação chuvosa na BHRC.

Araújo et al. (2024), enfatizam que no período de 1991-2020, a evapotranspiração real na cidade de Boa Vista foi de 1077,2 mm, apresentando uma deficiência hídrica (DEF) de 399,8 mm no período de setembro a abril e um excedente hídrico (EXC) de 649 mm de maio a agosto.

Sendo assim, nos meses de outubro a março, não só tem uma redução significativa na pluviosidade, mas um elevado déficit hídrico com uma perda significativa de água para atmosfera, refletindo na oscilação do nível d'água subterrânea do Aquífero Boa Vista. Silva et al. (2015), constataram que a profundidade dos níveis das águas subterrâneas nos poços tubulares, na BHRC podem variar de 0,52 m na estação chuvosa a 7,64 na estação seca.

Na Figura 4, percebe-se que a precipitação total anual apresenta picos de máximas e mínimas. As maiores (máximas) de precipitações totais anuais acumuladas, foram registradas nos anos de 2011 com 2140 mm, em 2021 com 2152 mm e em 2022 com 2248 mm. As menores (mínimas) de precipitações totais anuais acumuladas, ocorreram nos anos de 2014 com 1215 mm, em 2015 com 1316 mm e 2017 com 1494 mm. Estes picos observados na Figura 4, parecem estar relacionados ao efeito de eventos ENOS no estado de Roraima (Sander et al., 2018; Silva et al., 2015), com uma crescente elevação da precipitação total nas últimas décadas.

Segundo Sampaio e Robrine (2024), os mecanismos oceânicos que atuam nos extremos climáticos (intensificação de máximos e mínimos) é o El Niño Oscilação Sul (ENOS) com ocorrência dos eventos de El Niño (com temperatura maior que 0,5 °C na superfície do mar) e La Niña (com temperatura menor que -0,5 °C).

Estudos recentes na região da BHRC, têm demonstrado que esta oscilação da precipitação, parece estar relacionado ao efeito das mudanças climáticas, ocasionando o aumento na temperatura

e a diminuição da pluviometria em Roraima, fenômenos relacionados com o aumento de intensidade e frequências dos eventos ENOS (El Niño Oscilação Sul), que alteram a distribuição e volume de chuvas.

Araújo et al. (2024), verificaram que o aumento da temperatura e a variação da pluviosidade, foi consequência das ações antrópicas e das mudanças climáticas, que afetaram o clima vigente na região onde se localiza a BHRC.

Sendo que, nos anos associados ao fenômeno El Niño de forte intensidade, aconteceram uma redução de 21,58% na pluviosidade média. No período de média e baixa intensidade do El Niño no estado de Roraima, ocorreu um decréscimo médio das chuvas de até 13,08% (Silva et al., 2015). Enquanto que, a recarga, a produção de excedentes hídricos e a disponibilidade hídrica na bacia, estar relacionado ao fenômeno La Niña (Barni et al., 2020; Wankler & Sander, 2022).

A sazonalidade da precipitação da BHRC é um fenômeno, que em si, pode levar a riscos hidrológicos durante a estação seca, se o volume hídrico do aquífero for comprometido. Pereira e Rodriguez (2022), área do semiárido tem ausência de sistemas aquíferos sedimentares e de rios perenes, possui áreas classificadas como de alto risco hídrico, com ocorrência de chuvas anuais inferiores a 700 mm, déficit hídrico e secas prolongadas.

Os eventos extremos de precipitação podem ser caracterizados, como aqueles de ocorrências de chuvas em que os índices e valores pluviométricos se distanciam muito da média sazonal, podendo causar desastres na vida das pessoas, tais eventos (anômalos) podem acontecer em escala nacional, regional ou local (Petrucchi, & Azevedo., 2024). Segundo Galindo Mousinho e outros (2024), em se tratando dos recursos hídricos subterrâneos, a ocorrência de eventos climáticos alteraram os índices de precipitação, caracterizando a escassez hídrica em algumas regiões, p.e., nas regiões semiáridas ou de savanas, propensas ao declínio do nível d'água.

Portanto, a principal ameaça ao planejamento dos recursos hídricos subterrâneos na BHRC é o cenário de incertezas climáticas. Segundo Manzione et al. (2020), a resposta dos aquíferos quanto ao armazenamento da água subterrânea é caracterizada em função da vulnerabilidade climática (eventos extremos), das características hidrogeológica da bacia e do uso e ocupação do solo. Deste modo, a variabilidade

observada na Figura 4, se não for monitorada, pode criar dificuldades a aplicação dos modelos

matemáticos pré-existent já em uso (Kløve et al., 2014; Gharbia et al., 2018).

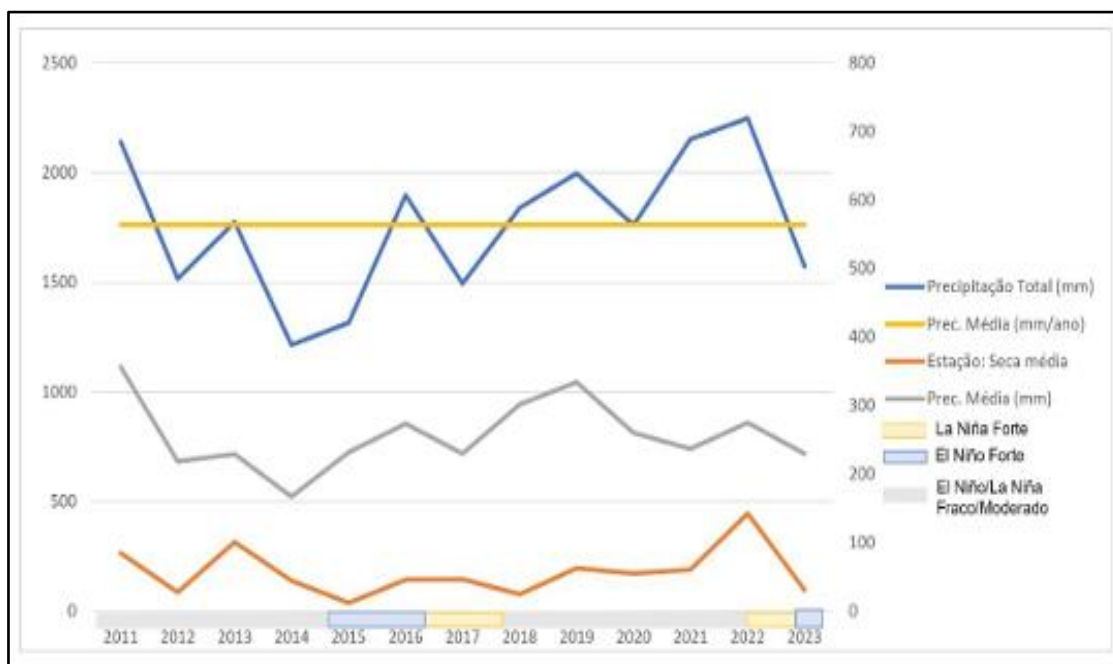


Figura 4: Gráfico da distribuição de precipitação média mensal, total, máximas, mínimas e os eventos ENOS no intervalo de 2011 a 2023. Fonte: Adaptado do INMET (2024).

Variabilidades da oscilação do nível de água subterrânea

O termo vulnerabilidade tem sido utilizado com mais frequência nos últimos anos, devido os efeitos das mudanças climáticas sobre a sociedade, com relação ao setor econômico e social (Silva & Vivas, 2024).

No contexto da BHRC, a análise da variação do nível d'água, foi realizada em dois poços tubulares em monitorados localizados, respectivamente, um na área urbana (P_1) e outro na área rural (P_2), mas que têm proximidades entre si e com o exultório da bacia, ou seja, compartilham dos mesmos efeitos da variação de precipitação ao longo do tempo (Figura 2).

A altimetria e a profundidade dos dois poços são equivalentes, com cotas altimétricas de 80 m e a profundidade dos poços de aproximadamente 40 m, a rocha do reservatório de ambos tem permeabilidade e porosidade similares, com areias médias a siltitos inconsolidados (SIAGAS, 2024).

As diferenças existentes entre os dos poços, estão relacionadas com o uso e ocupação do solo, onde foram perfurados e o perfil dos usuários. O poço (P_1) localiza-se na área urbana, com exploração da água para o abastecimento (público e privado), nas indústrias e comércios.

O poço (P_2), estar localizado na área rural com intensa atividades agrícolas mecanizadas e que utiliza a irrigação nos plantios de soja e outras culturas, abastecimento rural, dessedentação animal e piscicultura (Falcão & Souza, 2022).

Desse modo, considerando que os dois poços compartilham do mesmo nível freático, das mesmas características hidrogeológicas, isto refletirá predominantemente nas mesmas variações dos parâmetros de recarga (artificial como natural). Por outro lado, a descarga no poço P_1 é influenciada pelo abastecimento urbano, com 70% da população de Boa Vista consumindo água subterrânea explotada e no poço P_2 a retirada de maior relevância é para a irrigação e dessedentação animal.

Desta forma, optou-se por analisar os resultados dos dois poços P_1 e P_2 nos gráficos de regressão parcial múltipla de forma agrupada, da relação da profundidade mensal (m) *versus* a precipitação no mês anterior (mm), da profundidade mensal (m) *versus* precipitação Mês dentro do ano e da relação entre a profundidade mensal (m) *versus* precipitação mês ao longo dos anos.

Os resultados do monitoramento dos dois poços tubulares (P_1 e P_2), estão representados nas figuras 5a, 5b, figuras 6a e 6b e na Figura 7. Analisando os resultados das Figuras 5a, Figura 6a

e Figura 7 para o poço P₁ localizado na área urbana, constatou-se que o coeficiente de determinação (R^2) do poço P₁ é de 0,80, ou seja, o modelo prevê uma correlação de 80% da variação da profundidade do nível d'água.

No entanto, para o poço P₂, representado nas Figuras 5b e Figura 6b, os resultados mostraram que o coeficiente de determinação (R^2) é igual 0,50, ou seja, prevê 50% da variação da profundidade do nível d'água.

Portanto, ambos os poços apresentam uma boa correlação entre as variáveis, no entanto, o poço P₁ na área urbana apresenta uma correlação de maior intensidade entre as variáveis profundidade mensal *versus* as precipitações no mês anterior, precipitação Mês dentro do ano e precipitação mês ao longo dos anos (quando

comparado com o poço P₂), pois, o poço P₂ na área rural apresentou uma correlação moderada entre as variáveis profundidade mensal *versus* as precipitações no mês anterior e precipitação Mês dentro do ano (Tabela 1).

Assim, parece que a descarga artificial que possa interferir no volume de água do reservatório não é significativa, não obstante a presença de diversos poços de exploração de água subterrânea próximos a P₁.

Por outro lado, estes resultados sugerem que o poço P₂ está sendo influenciado por alguma variável relacionada com a recarga ou a descarga da água subterrânea, que não foi observado no poço P₁, tendo em vista que, em ambos os poços apresentam controles hidrológicos equivalentes, mais com exploração para fins diferentes.

Tabela 1: Resultados numéricos das regressões múltiplas da profundidade do nível d'água (variável dependente) para os poços P₁ e P₂ monitorados e estudados em Boa Vista, Roraima.

Área do Poço	R^2	Preditor	Coefficiente	P
Urbano (P₁)	0,80	Intercepto	2,402	-
		Precipitação um mês antes	-0,003	< 0,001
		Mês dentro do ano	0,871	< 0,001
		Mês dentro do ano ²	-0,208	< 0,001
		Mês dentro do ano ³	0,011	< 0,001
		Mês entre anos	0,019	0,0268
		Mês entre anos ²	0,0001	0,0058
Rural (P₂)	0,50	Intercepto	7,759	-
		Precipitação um mês antes	-0,001	< 0,001
		Mês dentro do ano	0,537	< 0,001
		Mês dentro do ano ²	-0,116	< 0,001
		Mês dentro do ano ³	0,006	< 0,001
		Mês entre anos	-0,006	0,3305

Fonte: Autores (2024).

Na Figura 5a e b consta-se dois gráficos de dispersão parcial da regressão múltipla de dois poços monitorados, sendo que, (a) representa o poço P₁ na área urbana e em (b) poço P₂ na área rural na BHRC, relacionando a profundidade mensal do nível d'água (m) *versus* a precipitação no mês anterior (mm). Analisando a Figura 5a para o poço P₁, percebe-se uma correlação negativa (reta decrescente) e muito forte na estação seca, entre a profundidade mensal do nível d'água e a precipitação no mês anterior. A variação do nível d'água no poço P₁ foi de 1,5 m de profundidade e a

precipitação variou de 0.0 a 450 mm aproximadamente.

O poço P₁ Figura 5a está localizado em uma área de solos poroso e inconsolidado, o que facilita a infiltração da água no solo. Percebe-se também, que o nível d'água varia significativamente e de forma síncrona com a variação da precipitação. Tais características são coerentes de um aquífero livre de boa porosidade e permeabilidade, com água com boa viscosidade, permitindo um baixo tempo de residência (Melo & Wankler, 2015; Freeze, 2017; Wankler et al. 2022).

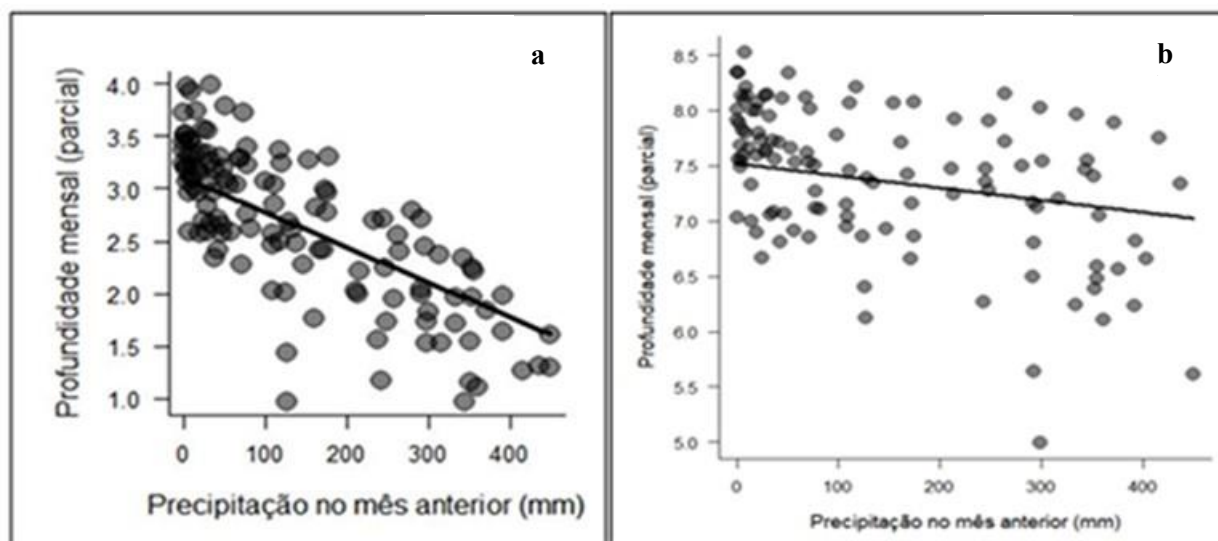


Figura 5: Gráficos de regressão linear parcial, relacionando a profundidade mensal (m) *versus* a precipitação no mês anterior (mm). Em (a) poço P₁, área urbana e em (b) poço P₂ área rural. O nível d'água dos dois poços foi monitorada no intervalo de 2011 a 2022. Fonte: Autores (2024).

Na Figura 5b para o poço P₂, constata-se uma correlação moderada e negativa. Os pontos de dispersão ficaram mais agrupados na estação (seca), depois vão ficando mais dispersos na estação chuvosa, com uma variação do nível d'água de 0,5 m de profundidade com relação a precipitação no mês anterior e sua precipitação variando de 0.0 a 450 mm. Isso significa que a prevalência de declínio do nível das águas subterrâneas aparenta estar relacionada não só dos fatores climáticos, mas efeitos do uso e ocupação da terra (uso da água pela agricultura), com a recarga artificial sendo uma variável influente no resultado.

A Figura 6a e b apresenta dois gráficos de dispersão parcial da regressão múltipla para os poços P₁ e P₂, relacionando a profundidade mensal do nível d'água (m) *versus* a precipitação no Mês dentro do ano (mês).

Na Figura 6a do poço P₁ (área urbana), nota-se uma correlação muito forte entre a profundidade mensal do nível d'água (m) *versus* a

precipitação no Mês dentro do ano (mês). Essa relação sugere que este poço é influenciado pela sazonalidade da precipitação da região. No mês de janeiro p.ex., devido à estação seca, a profundidade do nível d'água que era de 3,0 m, vai aumentando até o mês de março, final da estação seca, chegando a 3,5 m.

Do mês de abril a setembro a profundidade do o nível d'água vai reduzindo chegando a 2,0 m de profundidade, estação chuvosa.

Na Figura 6b do poço P₂ (área rural), verifica-se uma correlação moderada entre a profundidade mensal do nível d'água (m) *versus* a precipitação no Mês dentro do ano. Há uma tendência da diminuição da profundidade do nível d'água ao longo do ano, ou seja, a relação entre as variáveis (resposta e preditoras) é altamente previsível, de acordo com as análises dos gráficos anteriores. Portanto, a profundidade dos poços é maior no mês de março e menor no final do mês de setembro (sazonalidade).

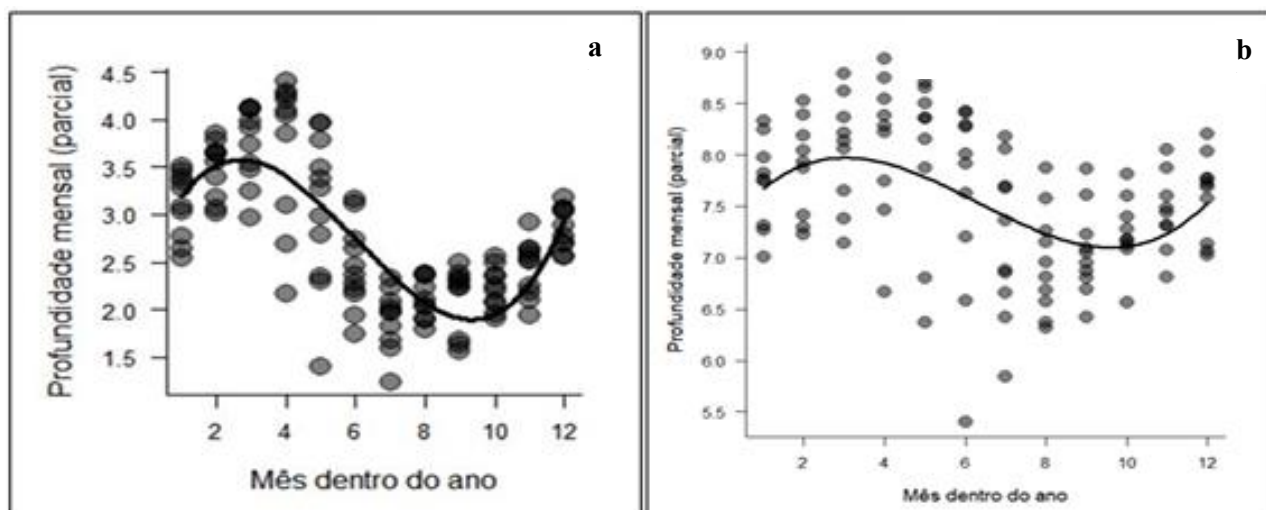


Figura 6: Gráficos de regressão múltipla parcial, relacionando a profundidade mensal (m) *versus* a precipitação no mês anterior (mm). Em (a) poço P₁, área urbana e em (a) poço P₂ área rural. O nível d'água dos dois poços foi monitorada no intervalo de 2011 a 2022. Fonte: Autores (2024).

Na Figura 7, o gráfico de regressão múltipla do poço P₁ (área urbana) relaciona a profundidade mensal *versus* a precipitação no Mês ao longo dos anos. Percebe-se uma correlação forte entre as variáveis profundidade mensal do nível d'água *versus* a precipitação no mês ao longo dos anos de 2012 a 2022, com uma tendência do aumento da profundidade do nível d'água nos anos de 2012 a 2017, variando sua profundidade em 0,5 m.

Como foi discutido anteriormente, período de 2012 a 2017, não é representativo em mudanças significativas causadas pela redução da paisagem natural em relação à expansão Urbana (Figura 3). No entanto, ao observar a Figura 4, constata-se que há uma tendência do aumento da média de precipitação total, talvez relacionada os efeitos dos fenômenos de La Niña e El Niño, que iniciaram no final de 2014 e seguiram até o final de 2017.

Neste caso, o nível de água aparenta ter sofrido influência de variações do volume de recarga causado pelas mudanças climáticas (La Niña). Os valores de descarga não foram afetados pela à expansão urbana, visto que o crescimento da Classe área Urbana foi de apenas 2,31% nesse intervalo.

No entanto, ao observar a Figura 7 no período de 2017 a 2022, percebe-se uma tendência de decréscimo do nível d'água na BHRC, apresentando uma variação do nível d'água de aproximadamente 1.0 m de profundidade.

Se compararmos, o gráfico da Figura 7 com o gráfico da Figura 4 sobre a distribuição de precipitação neste período, constata-se que a média

de precipitação total aumentou, a média das chuvas na estação chuvosa diminuíram e as chuvas na estação seca aumentaram, o que indica que a recarga não foi o fator que levou a reduzir o nível d'água subterrânea. Desse modo, deve-se considerar que este declínio no nível de água tão acentuada, mesmo com o aumento de precipitação neste período, pode ter outras variáveis que interferem no volume de água infiltrada e nas descargas artificiais.

Sendo assim, ao analisar a figura 3 das Classes de uso e ocupação de solo, os resultados mostram que no intervalo de 2015-2022 a Classe Agricultura aumentou sua área em 120,30% e a pastagem em 130,80%. Causando a redução, ou seja, a substituição da Floresta Natural e da Savana na BHRC, o que deve ter gerando a alteração dos valores de evapotranspiração, da infiltração e da temperatura (albedo), fatores que interferem no equilíbrio do balanço hídricos na bacia, reduzindo o volume de água infiltrada no subsolo.

Tal efeito já foi observado em área do Cerrado, em outras partes do Brasil e no mundo (Barcelos et al., 2022; Jasechko & Perrone, 2021; Gouveia et al., 2024). Este efeito pode comprometer a captação de água para os agricultores que usam poços rasos, pois à medida que o nível d'água subterrânea se torna mais profundo, os poços mais rasos podem secar na estação de seca, comprometendo a disponibilidade hídrica na região (Manzione et al., 2020; Jasechko & Perrone, 2021).

Portanto, podemos concluir sobre a análise dos gráficos das Figura 5a e b, Figura 6a e b e da

Figura 7 para os dois poços P₁ e P₂ monitorados, que o fluxo de água do subsolo não é constante e que o nível d'água subterrânea na BHRC é influenciado pelo ciclo hidrológico da região, mas

também está sofrendo influência ou outras variáveis relacionadas com o uso e ocupação do solo.

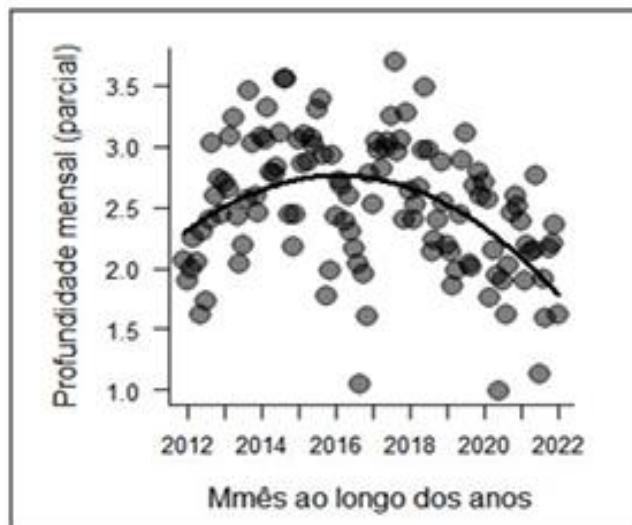


Figura 7: Gráfico de regressão parcial múltipla, relacionando a profundidade mensal do nível d'água (m) *versus* a precipitação no Mês ao longo dos anos do poço P₁, monitorado no intervalo de 2011 a 2022. Fonte: Autores (2024).

Na Figura 3 ficou demonstrado esta influência, pois nota-se que houve um aumento considerável das atividades agrícolas e pastagem, causando uma redução das Classes Savana e Floresta Natural e, que a população residente na área de estudo aumentou consideravelmente nos últimos anos. Desse modo, considerando os efeitos da demanda hídrica demonstrado pelos resultados deste trabalho e corroborados por estudos mais recentes (Jasechko & Perrone, 2021; Jasechko et al., 2024) o declínio do nível d'água subterrâneo tende a aumentar, devido à exploração insustentável de águas subterrâneas para abastecimento (público e privado), para as indústrias, para a dessedentação animal, irrigação das culturas temporárias e permanentes, entre outros e, as alterações na cobertura do solo e as mudanças climáticas.

Sendo assim, os impactos ambientais na BHRC são inevitáveis com as ações antrópicas e mudanças climáticas. As mudanças na paisagem, refletem nas oscilações dos níveis freáticos (d'água) das águas subterrâneas no Aquífero Boa Vista no estado atual de crescimento de sua exploração, em virtude dos impactos na evapotranspiração, nas taxas de infiltração e do consumo excessivo de água subterrânea e dos recursos hídricos em geral.

Na área urbana, embora não tenha mostrado uma influência significativa no poço P₁, o processo de urbanização e indústria altera significativamente as parcelas do ciclo hidrológico devido a impermeabilização do solo, com tendência da diminuição da infiltração e percolação da água subterrânea, aumentando o escoamento superficial, agravando as cheias e as secas extremas.

Jasechko et al. (2024), constataram que nas últimas décadas, houve uma redução do nível das águas subterrâneas em 30% em alguns aquíferos no mundo, correlacionado com o uso e ocupação do solo e os efeitos dos fatores climáticos, principalmente em regiões secas com extensas atividades de agricultura.

Por outro lado, há casos de diminuição da profundidade do nível das águas subterrâneas por redução nas captações das águas, alterações na cobertura do solo por reflorestamento, conservação das matas ciliares nas áreas de recarga e transferências de águas superficiais entre bacias (Tang et al., 2022).

Nesse contexto, a necessidade de o poder público fortalecer as ações de monitoramento da cobertura vegetal e dos níveis d'água superficial e subterrâneas são extremamente importantes para o planejamento da gestão pública e privada na BHRC. Tornando-se essencial promover uma

estruturação para a tomada de decisões, com a finalidade de facilitar o inventário dos níveis d'água, da exploração controlada e proteção dos recursos hídricos, garantindo a sustentabilidade econômico, ambiental e social para os usuários na bacia de acordo com os ODS (ANA, 2022; Souza & Silva, 2023; ODS, 2024).

Convém destacar que o monitoramento dos recursos hídricos e do uso e ocupação do solo, atua como suporte para uma adequada gestão dos recursos hídricos subterrâneos, e está referenciada em diversas legislações brasileiras (Dias & Gonçalves, 2025).

Conclusões

O objetivo deste estudo foi investigar os efeitos dos fatores antrópicos e climáticos na variação do nível d'água subterrânea no Aquífero Boa Vista nos últimos 37 anos, analisando: (1) como ocorreu a transformação dos diferentes usos e ocupações do solo nas últimas três décadas; (2) como os eventos ENOS interferiram nos índices de precipitação neste período; (3) Se os fatores antrópicos e climáticos têm o potencial de afetar nível d'água do aquífero.

Com relação ao primeiro ponto, as transformações dos diferentes usos e ocupações do solo nas entre 1985 a 2022 causaram uma redução da vegetal natural na BHRC. Este processo intensificou a partir de 2015, com uma expansão exponencial da área plantada, ocorrendo um aumento de quase 100% da área em sete anos. O cultivo mecanizado de soja teria sido uma das maiores contribuições para a aceleração da ocupação, em especial da Savana (Lavrado).

O impacto no reservatório deve-se ao uso de irrigação em grande volume, em especial no período de maior déficit hídrico, a estação seca. A expansão acelerada da área antropização da BHRC, com a substituição da Savana por pastagem e/ou agricultura, tem sido reconhecido em outras partes do mundo com um sério risco ao desequilíbrio no balanço hídrico. Esse desequilíbrio gera à redução da precipitação, da infiltração, da recarga do aquífero, aumenta a temperatura, a evapotranspiração, comprometendo a disponibilidade hídrica e o declínio do nível d'água subterrânea.

Os efeitos da urbanização na BHRC, definida pela expansão da área Classe área Urbana, mostra pequeno crescimento no período de 2015 a 2022. Contudo, o aumento populacional nas últimas décadas BHRC tem se mostrado

significativo. Destaca-se ainda, que o abastecimento público é dependente do aquífero Boa Vista, o que implica em crescente utilização do reservatório para atender a demanda. Isso, somado ao aumento de demanda da produção agropastoril BHRC, sugere um forte risco para segurança hídrica futura na região, caso não haja uma regulação do uso do reservatório.

Em relação ao segundo ponto, o potencial dos eventos ENOS, os picos de precipitações totais anuais acumuladas, registrados nos anos de 2011, em 2021 e 2022, relacionam-se a eventos de La Niña forte, enquanto as menores mínimas de precipitações totais anuais acumuladas que ocorreram nos anos de 2014, 2015 e 2017 relacionam-se ao efeito El Niño forte. O aumento da frequência dos eventos ENOS em Roraima foi interpretado como o efeito das mudanças climáticas. Como resultado, houve um aumento na temperatura e a diminuição da pluviometria em Roraima.

O fenômeno de rarefação pluviométrica na estação em fases de El Niño Forte favorece aos riscos hidrológicos. A atuação pode causar tanto à redução de precipitação na estação chuvosa, que compromete a recarga do aquífero ou a ausência de chuvas na estação seca, que aumenta a profundidade do nível de água. Com a tendência de expansão da demanda hídrica na BHRC, existe um grande potencial para afetar a vazão e o rebaixamento do nível de água dos poços na estação dos anos de maior dependência hídrica do abastecimento público e das atividades agropastoris, resultado uma crise hídrica.

O terceiro ponto, se os fatores antrópicos e climáticos têm o potencial de afetar nível d'água do aquífero, foi abordado pela análise estatística. Constatou-se que o fluxo de água do subsolo não é constante e que o nível d'água subterrânea na BHRC é influenciado pelas alterações do balanço hídrico, mas também está sofrendo influência do uso e ocupação do solo. Na área urbana (poço P₁) o impacto no comportamento do nível de água está fortemente relacionado às alterações climáticas, enquanto na área rural (P₂) apresenta efeitos das variações da precipitação como do crescimento da atividade agropastoril.

Conclui-se que as mudanças espaço-temporais do uso e ocupação do solo na BHRC, nos últimos 37 anos, foram fortemente influenciadas pela ampliação da agricultura mecanizada, da pastagem e o crescimento populacional na área urbana. Essas alterações, aliada com as mudanças climáticas influenciaram nas frequências dos

eventos ENOS e modificaram a distribuição da precipitação na região, contribuindo significativamente para o desequilíbrio do ciclo hidrológico na bacia.

Agradecimentos

Este trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal Nível Superior – Brasil (CAPES) e pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, através do (Proc. nº 510167/2020-00). Agradecemos também ao Programa de Pós-graduação em Recursos Naturais da Universidade Federal de Roraima (PRONAT/RR), pelo apoio técnico científico aportado até o momento e as contribuições da professora Dra. Maria Bárbara Magalhães Bethonico e dos revisores que avaliaram este manuscrito.

Referências

- ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. (2024). Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: informe anual/Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. - Brasília: ANA, 2024. 118 p. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/portal/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/conjunturainforme2023.pdf> Acesso: 27 jan. 2025.
- ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. (2022). ODS 6 no Brasil: visão da ANA sobre os indicadores / Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. – 2. ed. - Brasília: ANA, 2022. 112p. ISBN: 978-65-88101-25-4. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/c93c5670-f4a7-4de6-85cf-c295c3a15204>. Acesso: 15 dez. 2024.
- Araújo, F. W., Monteiro Neto, J. L. L., Sander, C., Albuquerque, A. A. de., Viana, T. V. de A., & Valero, M. A. M. (2024). Atualização da Classificação Climática de Boa Vista, Roraima, Brasil. *Nativa, Sinop*, v.12, n.2, p.236-240 (2024). Pesquisas Agrárias e Ambientais. DOI: <https://doi.org/10.31413/nat.v12i2.16202>.
- Barbosa de Souza, K., Rosa dos Santos, A., Macedo Pezzopane, JE, Machado Dias, H., Ferrari, JL, Machado de Oliveira Peluzio, T., Toledo, JV, Freire Carvalho, R. d. C., Rizzo Moreira, T., França Araújo, E., Gomes da Silva, R., Pósse Senhorelo, A., Azevedo Costa, G., Duarte Nader Mardeni, V., Horn Kunz, S., & Cordeiro dos Santos, E. (2023). Modeling Dynamics in Land Use and Land Cover and Its Future Projection for the Amazon Biome. *Florestas*, 14 (7), 1281. DOI: <https://doi.org/10.3390/f14071281>.
- Barbosa, R. I., & Campos, C. (2011). Detection and geographical distribution of clearing areas in the savannas (lavrado) of Roraima using the Google Earth web tool. *Journal of Geography and Regional Planning*. Vol. 4, p. 122-136 (2011). Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/228098136>. Acesso: 01 jan. 2024.
- Barcelos, A. S., Gomes, P. S., Ramalho, F. L., Cabral, J. B. P., & Rocha, H. M. (2022). Mapeamento do uso e ocupação das terras da bacia do reservatório da usina hidrelétrica de Espora-GO. *Revista Brasileira de Geografia Física* v.15, n.02 (2022) 682-693. Disponível em: <https://doi.org/10.26848/rbgf>. Acesso: 21 ago. 2023.
- Barni, P. E., Barbosa, R. I., Xaud, H. A. M., Xaud, M. R., & Fearnside, P. M. (2020). Precipitation in northern Amazonia: Spatial distribution in Brazil's state of Roraima. *Sociedade & Natureza*, v. 32, p. 439-456, 2020. <https://doi.org/10.14393/SN-v32-2020-52769>. Acesso em: 12 set. 2024
- Brehene, P., & Burchett, W. (2017). Visualization of regression models using visited. *The R Journal*, 9: 56-71.
- Buenafuente, S. M. F., Galdino, L. K. A., & Barbosa, R. (2023). Lavrado de Roraima: caracterização ecogeográfica e potencialidades socioeconômicas para os povos indígenas. *ACTA Geográfica, Boa Vista*, v. 17, n. 44, mai./ago. 2023. Pág. 78-97. DOI: 10.18227/2177-4307.acta.v17i44.7838.
- Carvalho, T. M., Maia, R., & Morais, R. (2022). Análise das Métricas dos Sistemas Lacustres não Fluviais do Lavrado, Região Nordeste do Estado de Roraima. *Revista Brasileira de Geomorfologia*. Vol. 23, p. 1569-1582 (2022). Disponível em: <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v23i3.1983>. Acesso: 25 jul. 2023.
- Carvalho, T. M., Carvalho, C. M., & Morais, R. P. (2016). Fisiografia da paisagem e aspectos biogeomorfológico do lavrado, Roraima, Brasil. *Revista Brasileira De Geomorfologia*, Vol.17, n.1, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.20502/rbg.v17i1.669> Acesso: 10 mai. 2024.

- Charnet, R., Freire, C. D. L., Charnet, E. M., & Bonvino, H. (1999). *Análise de modelos de regressão linear com aplicações*. Campinas: Unicamp.
- Correia de Oliveira, F., Sobucki, L., Venâncio Thomaz, D., Hister Giovanella, T., & Sandro da Rocha, A. (2025). Modelagem probabilística da precipitação pluvial em diferentes escalas temporais para Santa Helena, Paraná. *Revista Brasileira De Geografia Física*, 18(2), 1527–1542. Disponível em: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v18.2.p1527-1542>. Acesso: 22 fev. 2025.
- Dias, D. A. F., & Gonçalves, J. A. C. (2025). Avaliação temporal do uso e ocupação do solo e da disponibilidade hídrica do médio curso rio Piracicaba entre 2011 e 2020. *Revista Brasileira De Geografia Física*, 18(1), 109–131. Disponível em: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v18.1.p109-131>. Acesso em: 26 fev. 2025.
- Eloy, L., Senra, E. B., Silva, A. L. de, & Campos, C. (2023). A aceleração recente da produção de soja na Amazônia: uma história do desmonte ambiental “em prática” no estado de Roraima. *Nuevo Mundo*, (2023). Disponível em: <https://doi.org/10.4000/nuevomundo.93688>. Acesso: 24 mai. 2024.
- Falcão, M. T., & Souza, R. O. (2022). Aspectos da ocupação no entorno da Bacia do Igarapé Grande – Boa Vista/RR, Brasil. *Ambiente: Gestão e Desenvolvimento*, Vol. 15 nº 3. Set/Dez (2022). Disponível em: <https://doi.org/10.24979/ambiente.v15i3.1131>. Acesso: 08 jan. 2024.
- Franca, R. M. da, Gomes, M. da C. R., Silva, F. J. A. da, Lima, M. G. de S., & Frischkorn, H. (2018). Análise multivariada dos parâmetros de qualidade das águas subterrâneas em Juazeiro do Norte – CE (Brasil). *Águas Subterrâneas*, 32(1), 106–113. <https://doi.org/10.14295/ras.v32i1.28890>. Acesso: 05 fev. 2025.
- Freeze, Allan R. (2017). *Águas subterrâneas*/ Allan R. Freeze, & John A. Cherry, tradução de Everton de Oliveira ... [et al.], Everton de Oliveira (Coord.), – São Paulo (SP): Everton de Oliveira, 2017.
- Gharbia, S. S., Smullen, T., Gill, L., Johnston, P., & Pilla, F. (2018). Modelagem de evapotranspiração potencial distribuída espacialmente e projeções climáticas. *Ciência do Meio Ambiente Total*, Vol. 633, 571-592 (2018). Disponível em: <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.208>. Acesso: 10 mai. 2024.
- Galdino, L. K. A. (2018). *Roraima: da colonização ao Estado* (Tomo I). Boa Vista: Editora da UERR (2018). Disponível em: <https://edicoes.uerr.edu.br/index.php/inicio/catalog/book/8>. Acesso: 12 jan. 2024.
- Galindo Mousinho, F. H., Lima, J. M. dos S., Alves Pereira, M. M., Pessoa, J. O., Maciel Oliveira, L. M., Santos, S. M. dos, & Ribeiro de Paiva, A. L. (2024). Caracterização pluviométrica dos últimos 50 anos em Caruaru - PE, com análise de tendências, máximas diárias, Curvas IDF e distribuição Gumbel. *Revista Brasileira De Geografia Física*, 17(2), 958–973. Disponível em: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v17.2.p958-973>. Acesso em: 02 mar. 2025.
- Gouveia, J. R. F. de, Nascimento, C. R., Silva, H. C. da, Moura, G. B. de A., & Lopes, P. M. O. (2024). Influência de eventos climáticos extremos na ocorrência de queimadas e no poder de regeneração vegetal. *Revista Brasileira De Geografia Física*, 17(2), 1098–1113. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v17.2.p1098-1113>. Acesso: 12 set. 2024.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2024). *CIDADE IBGE - BOA VISTA*, Roraima. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rr/boa-vista/panorama>. Acesso: 24 mai. 2024.
- INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. (2024). *Sistema Nacional de Informações Hidro Meteorológicas - Médias mensais de precipitação período 1985 a 2023. – 1º Distrito de Meteorologia*. Manaus – 2024. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/>. Acesso: 15 mai. 2024.
- Jasechko, S., & Perrone, D. (2021). Poços de água subterrânea globais em risco de secar. *Science*, Vol. 372, págs. 418–421, (2021). DOI: 10.1126/science.abc2755.
- Jasechko, S., Seybold, H., Perrone, D., Fan, Y., Shamsudduha, M., Taylor, R. G., Fallatah, O., & Kirchner, J. W. (2024). Declínio rápido das águas subterrâneas e alguns casos de recuperação em aquíferos globalmente. *Nature*, Vol. 625, 715–721 (2024). Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06879-8>. Acesso: 10 ago. 2024.
- Kitanidis, P. K. (1997). *Introduction to geostatistics: applications to hydrogeology*.

- Cambridge; New York: Cambridge University Press, (1997).
- Kløve, B., Ala-Aho, P., Bertrand, G., Gurdak, J. J., Kupfersberger, H., Kværner, J., Muotka, T., Mykrä, H., Preda, E., Rossi, P., Uvo, C. B., Velasco, E., & Pulido-Velazquez, M. (2014). Climate change impacts on groundwater and dependent ecosystems. *Journal of Hydrology* [online] 518. Disponível em: <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.06.037> Acesso: 14 mai. 2024.
- Landau, E. C., Silva, G. A. da, Moura, L., Hirsch, A., & Guimaraes, D. P. (ed.). Afiliação: Elena Charlotte Landau, CNPMS, Gilma Alves da Silva, Larissa Moura, André Hirsch, Universidade Federal São João Del-Rei, Daniel Pereira Guimaraes (Eds.). (2020). *Dinâmica da produção agropecuária e da paisagem natural no Brasil nas últimas décadas: sistemas agrícolas, paisagem natural e análise integrada do espaço rural*: Brasília, DF: Embrapa, 2020. V 4. ISBN: 978-65-86056-99-0.
- Lima, R. F., Aparecido, L. E. O., Torsoni, G. B., & Rolim, G. S. (2023). Climate Change Assessment in Brazil: Utilizing the Köppen-Geiger (1936) Climate Classification. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 38, e38230001, 2023. Disponível em: DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0102-77863810001>. Acesso: 02 ago. 2024.
- Lima, M. F. S., & Vital, M. J. S. (2022). Distribuição Espacial e Perfil de Usos de Recursos Hídricos na Bacia Hidrográfica do rio Cauamé, RR. *A bacia hidrográfica do Rio Cauamé*. São Carlos - SP: Rima Editorial, 2022. 198 p.
- Manziane, R. L., Nava, A., & Sartori, M. M. P. (2020). Modelo híbrido de oscilação de níveis freáticos a partir de diferentes variáveis ambientais. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v.13 n.03, (2020). 1231-1247. DOI: 10.26848/rbgf.v13.3.p1231-1247.
- MapBiomass. (2024). Coleção 7 dos Mapas Anuais de Cobertura e Uso do Solo do Brasil (1985-2022). Dados do MapBiomass, V1. Disponível em: <https://doi.org/10.58053/MapBiomass/VJIJCL>. Acesso: 18 jan. 2024.
- Masullo, Y. A. G., & Rangel, M. E. S. (2012). Uso e ocupação do solo e alterações climáticas na ilha do maranhão. *Revista Geonorte*. Edição Especial 2, v. 2, n. 5, p. 663-674, (2012).
- Matsunaga, W. K., Sales, E. S. G., Júnior, G. C. A., Silva, M. T., Lacerda, F. F., de Paiva Lima, E., dos Santos, C. A. C., & de Brito, J. I. B. (2024). Application of ERA5-Land reanalysis data in zoning of climate risk for corn in the state of Bahia—Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, 155(2), 945–963. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00704-023-04670-3>. Acesso em: 01 mar. 2025.
- Mello, A. M. de, & Wankler, F. L. (2015). Caracterização físico química do aquífero Boa Vista, cidade de Boa Vista, RR. In: 1º Simpósio Internacional em Educação Ambiental, Boa Vista, Resumos expandidos, p. 288-291, (2015).
- Monteiro, R. M. L., Santos, F. A. dos, Rolim, P. A. M., Barreto, C. E. C., & Rocha, E. J. P. da. (2024). Modelagem Estatística Hidrológica na Bacia Hidrográfica do Rio Tocantins. *Revista Brasileira De Geografia Física*, 17(2), 1158–1173. Disponível em: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v17.2.p1158-1173>. Acesso: 20 mai. 2024.
- Montgomery, D. C., Peck, E. A., & Vining, G. G. (2021). *Introduction to linear regression analysis*. John Wiley & Sons.
- ODS - Objetivos do Desenvolvimento Sustentável. (2024). Agenda 2030 da ONU. Disponível em: <https://habitability.com.br/agenda-2030-da-onu-o-que-e-e-quais-os-seus-objetivos/> Acesso: 05 jan. 2024.
- Oliveira, T. G., Francisco, C. N., & Bohrer, C. B. A. (2021). Áreas de Preservação Permanente (APP) no topo de morros no estado do Rio de Janeiro: uma avaliação dos dispositivos legais em diferentes unidades geomorfológicas. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v.31, n.1, (2021). p.491-514. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/1980509832492>. Acesso: 06 dez. 2023.
- Oliveira, J. da. S., & Carvalho, T. M. de. (2014). 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 - RGA*, v.8, n.1, p. 61-80, (2014). Disponível em: <https://revista.ufr.br/rga/article/view/2984>. Acesso em: 20 set. 2022.
- Pereira, V. R., & Rodriguez, D. A. (2022). Vulnerabilidades da segurança hídrica no Brasil frente às mudanças climáticas. *Derbyana*, 43, e777. Disponível em: <https://doi.org/10.14295/derb.v43.777>. Acesso em: 05 mar. 2025.
- Petrucchi, E., & Azevedo, L. M. de. (2024). Análise dos eventos extremos de precipitação máxima no município de Cachoeira do Sul/RS, de 1987

- a 2020. *Revista De Geografia*, 40(3), 258–281. Disponível em: <https://doi.org/10.51359/2238-6211.2023.253447>. Acesso em: 28 fev. 2025.
- R PROJECT. (2023). The R Project for Statistical Computing. Disponível em: <http://www.r-project.org/>. Acesso: 12 mai. de 2024.
- Reis, A., & Alamy Filho, J. E. (2018). Desenvolvimento de um gerador estocástico de fraturas para modelagem de aquíferos fraturados – módulo I da ferramenta Fratcond. *Águas Subterrâneas*, 32(2), 181–190. Disponível em: <https://doi.org/10.14295/ras.v32i2.29106>. Acesso: 02 jan. 2025.
- Salazar, A., Baldi, G., Hirota, M., Syktus, J., & Clive McAlpine, C. (2015). Impactos das mudanças no uso e cobertura da terra no clima regional da América do Sul não amazônica: uma revisão. Volume 128, maio de 2015, p.103-119. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2015.02.009>. Acesso: 15 jun. 2024.
- Sampaio, R. D. S., & Robrini, M. E. (2024). Mudança de níveis de água (1995-2021) no Estuário Superior do rio Amazonas (Baixo Amazonas - Pará): possíveis fatores que afetam. *Revista Brasileira De Geografia Física*, 17(2), 882–894. Disponível em: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v17.2.p882-894>. Acesso em: 03 mar. 2025.
- Sander, C., Wankler, F. L., da Paz, J. D. S., & Carvalho, T. M. (2024). Evolução morfológica recente e controles atuantes no médio curso do sistema do Rio Branco, Roraima. *ACTA Geográfica, Boa Vista*, v. 18, n. 50, set.-dez. 2024. Pp. 22-46. Disponível em: <https://doi.org/10.18227/2177-4307.acta.v18i50.8232>.
- Sander, C., Wankler, F. L., & Carvalho, T. M. (2018). Uma análise primária sobre a variação espaço-temporal de chuvas e a atuação de episódios de El Niño e La Niña no Estado de Roraima. In: Beserra Neta, L.C; Holanda, E.C. (Ed.). *Geociências de Roraima*. Boa Vista: EDUFRR, 2018, v.1, p.191-216.
- Santos, C. V., Oliveira, A. F., & Ferreira Filho, J. B. S. (2022). Potential impacts of climate change on agriculture and the economy in different regions of Brazil. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, v. 60, n. 1, e220611, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1806-9479.2021.220611> Acesso: 02 jan. 2025.
- Santos, P. A. S. D., Wankler, F. L., & Sander, C. (2022). Hidrogeologia da Bacia do rio Cauamé, RR. A bacia hidrográfica do Rio Cauamé. São Carlos - SP: Rima Editorial, 2022. 198 p.
- Schaefer, C. E. R., & Vale Júnior, J. F. (1997). Mudanças Climáticas e evolução da paisagem em Roraima: uma Resenha do Cretáceo ao Recente. In: BARBOSA, R. I.; FERREIRA, E. J. G.; CASTELLÓN, E. G. (Ed.). *Homem, Ambiente e Ecologia no Estado de Roraima*. Manaus: INPA, 1997, p.231-265.
- SIAGAS - Sistema de Informações de Águas Subterrâneas. (2024). Disponível em: <https://siagasweb.sgb.gov.br/layout/>. Acesso: 31 mai. 2024.
- Silva, W. T. D. Castro, & Vivas, D. V. G. (2024). Vulnerabilidade e Mudanças Climáticas: Análise Socioambiental para o Estado de Sergipe. *Revista Brasileira De Geografia Física*, 17(2), 931–944. Disponível em: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v17.2.p931-944>. Acesso em: 05 jan. 2025.
- Silva, F. L. da Fushita, Ângela T., Cunha-Santino, M. B. da, Bianchini Júnior, I., & Veneziani Júnior, J. C. T. (2021). Gestão de recursos hídricos e manejo de bacias hidrográficas no Brasil: elementos básicos, histórico e estratégias. *Revista Brasileira De Geografia Física*, 14(3), 1626–1653. Disponível em: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.3.p1626-1653>. Acesso em: 01 mar. 2025.
- Silva, D. A., Sander, C., Araújo, JR, A. C. R., & Wankler, F. L. (2015). Análise dos ciclos de precipitação na região de Boa Vista – RR nos anos de 1910 a 2014. *Revista Geográfica Acadêmica*, 9, 35-49, 2015.
- Smiderle, O. J., Gianluppi, V., & Gianluppi, D. (2005). Comunicado Técnico, 09. ISSN 0102-099, dezembro, 2005. Boa Vista, RR. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/696037/1/cot092005custoprodsoja05smiderlerev.pdf>. Acesso: 12 jan. 2024.
- Souza, A. P. S. de, & Oliveira, R. V. (2024). Conflitos de uso e ocupação das terras em áreas de preservação permanente no município de São Félix, BA. *Revista Brasileira De Geografia Física*, 17(2), 974–993. Disponível em: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v17.2.p974-993>. Acesso: 20 fev. 2024.
- Souza, M. B. B. de, & Silva, J. I. A. O. (2023). Crise Climática e a Importância dos Planos Diretores e Setoriais de Mudanças Climáticas. *Boletim de Conjuntura (BOCA)*, Boa Vista, v. 16, n. 46, p. 118–140, 2023. DOI: 10.5281/zenodo.8408738. Disponível em:

- <<https://revista.ioles.com.br/boca/index.php/revista/article/view/2287>>. Acesso em: 7 nov. 2024.
- Souza Jr., C. M., Shimbo, J. Z., Rosa, M. R., Parente, L. L., Alencar, A. A., Rudorff, B. F. T., Hasenack, H., Matsumoto, M., Ferreira, L. G., Souza-Filho, P. W. M., Oliveira, S. W. de., Rocha, W. F., Fonseca, A. V., Marques, C. B., Diniz, C. G., Costa, D., Tingido, M., Rosa, E. R., Vélez-Martin, E., & Weber, E. J. (2020). Reconstruindo três décadas de mudanças no uso e cobertura da terra em biomas brasileiros com Landsat Archive e Earth Engine - Sensoriamento Remoto, Volume 12, Edição 17. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs12172735>. Acesso: 18 fev. 2024.
- Stock, J.H., & Watson, M.W. (2002). "Forecasting using principal components from a large number of predictors", *Journal of the American Statistical Association*, 97 (460), 1167-1179.
- Tang, W., Zhao, X., Motagh, M., Bi, G., Li, J., Chen, M., Chen, H., Liao, M. (2022): Subsidência e recuperação de terras na bacia de Taiyuan, norte da China, no contexto da transferência de água entre bacias e gestão de águas subterrâneas. - *Sensoriamento Remoto do Meio Ambiente*, 269, 112792. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112792>
- Tucci, C. E. M. (org.). (2009). *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. Segunda Edição. ABRH. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: Editora da Universidade. 2009. 944p.
- Vera, J. J. M., Tavares, S. S., & Bezerra Neta, L. C., (2023). Dinámica espacial y temporal de los cambios de coberturas de la tierra en la Cuenca hidrográfica del Río Cauamé (1988-2023), Estado de Roraima, Brasil. *Mercator*, Fortaleza, v. 22, e22028, 2023. ISSN:1984-2201. Disponível em: <https://doi.org/10.4215/rm2023.e22028>. Acesso em: 15 abr. 2024.
- Wankler, F. L., & Sander, C. (2022). *Clima*. Em: Rivas, A. A., Mendonça, A. L. A., 2022. Gonçalves, S. L. F. (Org.). *Diagnóstico dos Recursos Naturais*. Boa Vista: SEADI, 2022. v. 2p. 24.
- Wankler, F. L., Vital, M. J. S., Holanda, E. C., & Souza, V., (2022). A bacia hidrográfica do Rio Cauamé/ Fábio Luiz Wankler [et al]. - São Carlos, SP: RiMa Editorial, 2022. 196 p.
- Zuur, A. F., Ieno, E. N., Walker, N. J., Saveliev, A. A., & Smith, G. M. (2009). *Modelos de efeitos mistos e extensões em ecologia com R*, Springer, Berlim, Heidelberg (2009). ISBN 978-0-387-87457-9 524 pp. DOI: 10.1016/j.baae.2009.06.001.