

OTÁVIO FERREIRA SANTOS

**BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO SOB A INFLUÊNCIA DO
DESMATAMENTO E MINERAÇÃO NA REGIÃO DO AQUÍFERO
ALTER DO CHÃO, AMAZÔNIA BRASILEIRA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Michel Castro Moreira

Coorientadores: Demetrius David da Silva
Aziz Galvao da Silva Junior

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2023**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

S237b
2023

Santos, Otávio Ferreira, 1993-

Balanço hídrico climatológico sob a influência do desmatamento e mineração na região do aquífero Alter do Chão, Amazônia brasileira / Otávio Ferreira Santos. – Viçosa, MG, 2023.

1 dissertação eletrônica (72 f.): il. (algumas color.).

Texto em português e inglês.

Orientador: Michel Castro Moreira.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Agrícola, 2023.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2023.703>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Aquíferos - Alter do Chão (AM). 2. Solo - Uso - Aspectos ambientais. 3. Evapotranspiração - Alter do Chão (AM). 4. Minas e mineração - Alter do Chão (AM) - Aspectos ambientais. 5. Minas e mineração - Alter do Chão (AM) - Aspectos sociais. 6. Indígenas da América do Sul - Alter do Chão (AM). I. Moreira, Michel Castro, 1980-. II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola. Mestrado em Engenharia Agrícola. III. Título.

CDD 22. ed. 551.49


OTÁVIO FERREIRA SANTOS

**BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO SOB A INFLUÊNCIA DO
DESMATAMENTO E MINERAÇÃO NA REGIÃO DO AQUÍFERO
ALTER DO CHÃO, AMAZÔNIA BRASILEIRA**


Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 28 de junho de 2023.

Assentimento:

Documento assinado digitalmente
 **OTAVIO FERREIRA SANTOS**
Data: 09/11/2023 13:28:19-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Otávio Ferreira Santos
Autor

Documento assinado digitalmente
 **MICHEL CASTRO MOREIRA**
Data: 07/11/2023 18:48:19-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Michel Castro Moreira
Orientador

*A Deus, minha família, minha
esposa, meus amigos e a todos
que contribuíram para a
realização deste trabalho.*

AGRADECIMENTOS

A presente dissertação de mestrado não poderia ter acontecido sem o apoio de várias pessoas. Em primeiro lugar, não posso deixar de agradecer ao meu orientador, Michel e ao meu coorientador Demetrius, por toda a paciência, empenho e sentido prático com que sempre me orientaram neste trabalho e em todos aqueles que realizei que me permitiram chegar aqui. Muito obrigado por me ter corrigido quando necessário sem nunca me desmotivar.

Também gostaria de agradecer a minha esposa Ana, que desde o início não poupou esforços para me incentivar a encarar este desafio, e durante todo esse tempo foi e continua sendo meu porto seguro. Agradeço à minha família que me forneceu uma base sólida para que eu pudesse me desenvolver.

Agradeço a todos meus professores, desde meu início escolar, vocês atuaram como fonte de conhecimento e inspiração. Vocês me ensinaram a ter curiosidade, a confrontar meus ensinamentos e buscar sempre mais.

A Deus, pela dádiva da vida e por me permitir realizar tantos sonhos nesta existência. Obrigado por me permitir errar, aprender e crescer.

À Universidade Federal de Viçosa, pela oportunidade de realizar a pós-graduação.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 e da FAPEMIG.

Por fim, a todos aqueles que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização desta dissertação, o meu sincero muito obrigado.

RESUMO

SANTOS, Otávio Ferreira, Universidade Federal de Viçosa, junho de 2023. **Balanco hídrico climatológico sob a influência do desmatamento e mineração na região do aquífero Alter do Chão, Amazônia brasileira.** Orientador: Michel Castro Moreira. Coorientadores: Demetrius David da Silva e Aziz Galvao da Silva Junior.

Importante a nível regional, global e detentora de uma riqueza inigualável, a Floresta Amazônica se destaca por influenciar o clima em diversas regiões do planeta. Além de toda a sua riqueza em águas superficiais, nela encontra-se o aquífero Alter do Chão, maior reservatório de água subterrânea do planeta, com cerca de 86 mil km³ de água potável em volume armazenado. A exploração da riqueza mineral da região do aquífero é fator que preocupa, por afetar a sua recarga e também pelos seus impactos socioambientais. Além de riquezas naturais, a região possui grande riqueza cultural, uma vez que nela há 424 aldeias indígenas catalogadas. Diante disso, este trabalho objetivou analisar o efeito das mudanças no uso e cobertura da terra no balanço hídrico climatológico entre 2000 e 2019, juntamente com a evolução do processo de mineração e suas consequências para o meio ambiente e para os povos indígenas no aquífero Alter do Chão, na região amazônica brasileira. A precipitação e a evapotranspiração foram estimadas para calcular o balanço hídrico climatológico. Os dados do uso e cobertura da terra foram obtidos do projeto MapBiomass. A partir do Sistema de Informações Geográficas da Mineração (SIGMINE), e também do MapBiomass, foram obtidos os dados de mineração na região. No período de estudo, a redução de 2,88% (0,90 milhões de hectares) da área florestal podem ter impactado a precipitação, a evapotranspiração e, conseqüentemente, seu balanço hídrico climatológico. Foi detectado um aumento de 2,44% (0,76 milhões de hectares) da agricultura na região. Embora a precipitação média total da região não tenha apresentado mudanças significativas, por meio da análise espacial, constatou-se que, mesmo em regiões com alta pluviosidade, déficits hídricos podem ser encontrados. Essas descobertas alertam para um risco futuro para a região em relação ao meio ambiente, economia e necessidades de consumo humano. Observou-se um aumento de mais de oito vezes na área total minerada na região do aquífero Alter do Chão, cerca de 1.714.299 ha. Através dos testes estatísticos Pettitt e Spearman, observou-se uma forte tendência de crescimento da extração mineral, tendo 2009 como ano de destaque. Com esse forte crescimento, povos indígenas sofrem com a falta de alimentos, aumento de doenças e contaminações provenientes de resíduos minerais. Salienta-se que o processo de mineração se encontra em crescimento, uma vez que há áreas em processo

de licenciamento, pesquisa ou liberação, que correspondem a mais que o dobro das atuais mineradas.

Palavras-chave: Evapotranspiração. Modelagem hídrica. Uso e cobertura da terra.

ABSTRACT

SANTOS, Otávio Ferreira, Universidade Federal de Viçosa, June, 2023. **Climatological water balance under the influence of deforestation and mining at the Alter do Chão Aquifer region, Brazilian Amazon.** Adviser: Michel Castro Moreira. Co-advisers: Demetrius David da Silva and Aziz Galvao da Silva Junior.

Important at a regional and global level and home to unparalleled wealth, the Amazon Forest stands out for affecting the climate in different regions of the planet. In addition to its abundance of surface water, it contains the Alter do Chão aquifer, the largest underground water reservoir on the planet, with around 86 thousand km³ of drinking water in stored volume. The exploitation of the mineral wealth of the aquifer is concerning, as it affects its recharge and causes socio-environmental impacts. The region has great cultural richness, as there are 424 cataloged indigenous tribes. This work aimed to analyze the effect of changes in land use and land cover on the climatological water balance between 2000 and 2019, along with the evolution of the mining process and its consequences for the environment and indigenous peoples in the Alter do Chão aquifer, in the Brazilian Amazon region. Rainfall and evapotranspiration were estimated to calculate the climatological water balance. Land use and land cover data were obtained from the MapBiomas project. Mining data in the region was obtained from the Mining Geographic Information System (SIGMINE), and also from MapBiomas. The forest area reduced by 2.88% (0.90 million hectares) which may have impacted rainfall, evapotranspiration, and, consequently, its climatological water balance. An increase of 2.44% (0.76 million hectares) in agriculture was detected. Although the region's average total rainfall did not show significant changes, the spatial analysis found water deficits even in regions with high rainfall. These findings warn of a future risk for the region in relation to the environment, economy, and human consumption needs. The mined area in the Alter do Chão aquifer region increased more than eight times, about 1,714,299 ha. Using the Pettitt and Spearman statistical tests, a strong growth trend in mineral extraction was observed, 2009 stood out. With this strong growth, indigenous peoples suffer from a lack of food, an increase in diseases and contamination from mineral waste. It should be noted that the mining process is growing, as there are areas in the process of licensing, research or release, which correspond to more than twice the number currently mined.

Keywords: Evapotranspiration. Hydrological modeling. Land use and land cover.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figure 3-1. Alter do Chão Aquifer, Brazilian Amazon region.	21
Figure 3-2. Forest, non-forest, and water body area in the Alter do Chão aquifer between 2000 and 2019.	25
Figure 3-3. Mining areas in the Alter do Chão aquifer in 2020; A: Mine overview; B: Focused view of the mines.	26
Figure 3-4. Land use and land cover for the Alter do Chão Aquifer in 2019.	27
Figure 3-5. Areas occupied by water bodies in the Alter do Chão aquifer over the years.	28
Figure 3-6. Average total annual rainfall over the years for the Alter do Chão aquifer.	29
Figure 3-7. Total Annual Rainfall distribution in Alter do Chão Aquifer for (A) 2008 and (B) 2015.	30
Figure 3-8. Evapotranspiration over the years for the Alter do Chão aquifer area.	31
Figure 3-9. Climatological Water Balance over the years in the Alter do Chão aquifer.	32
Figure 3-10. Climatological water balance for the Alter do Chão aquifer in 2008 (A) and 2019 (B).	34
Figura 4-1. Localização do Aquífero Alter do Chão.	46
Figura 4-2. Áreas com atividade de mineração e as possíveis de serem mineradas segundo dados do SIGMINE.	51
Figura 4-3. Área total de mineração: a) Mapbiomas (extração em processo); e b) SIGMINE (área documentada em processo de extração e a ser extraída) no aquífero Alter do Chão.	53

Figura 4-4. Variação anual, em hectares, da área minerada entre 1985 e 2020 para o aquífero Alter do Chão, segundo dados do MapBiomias.	55
Figura 4-5. Área de mineração industrial de alumínio na região do aquífero Alter do Chão entre os anos de 1985 a 2020 segundo dados do MapBiomias.....	56
Figura 4-6. Mineração de ouro na região do aquífero Alter do Chão, segundo dados do SIGMINE.....	57
Figura 4-7. Área de mineração do ouro dentro do Aquífero Alter do Chão de 1955 a 2023 segundo dados do SIGMINE.....	58
Figura 4-8. Balanço Hídrico Climatológico para regiões mineradas dentro do Aquífero Alter do Chão, segundo MapBiomias.....	59
Figura 4-9. Balanço Hídrico Climatológico para regiões mineradas dentro do Aquífero Alter do Chão, segundo SIGMINE.....	60
Figura 4-10. Balanço Hídrico Climatológico com base nos dados do SIGMINE para os anos de 2000 e 2015	62
Figura 4-11. Aldeias indígenas na região do Aquífero Alter do Chão.....	63

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL	12
2	OBJETIVOS	14
2.1	Geral.....	14
2.2	Específicos	14
	REFERÊNCIAS	15
3	CAPÍTULO 1	18
3.1	ABSTRACT:.....	18
3.2	INTRODUCTION	19
3.3	MATERIAL AND METHODS	20
3.3.1	Study area	20
3.3.2	Land use and land cover	21
3.3.3	Climatological Water Balance.....	22
3.3.4	Statistical Analysis	24
3.4	RESULTS AND DISCUSSION	24
3.4.1	Land use and land cover	24
3.4.2	Rainfall	28
3.4.3	Evapotranspiration.....	31
3.4.4	Climatological water balance	32
3.5	CONCLUSIONS.....	35
	REFERENCES	36
4	CAPÍTULO 2	42
4.1	RESUMO:.....	42
4.2	ABSTRACT:.....	43
4.3	INTRODUÇÃO	44
4.4	MATERIAL E MÉTODOS	45
4.4.1	Área de estudo	45
4.4.2	Base de dados	47
4.4.3	Análise metodológica	48
4.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
4.5.1	Mineração no Aquífero Alter do Chão	51
4.5.2	Análise do Balanço Hídrico Climatológico.....	58

4.5.3	Análise do impacto da mineração sobre os povos indígenas considerando-se uma revisão bibliográfica.....	62
4.6	CONCLUSÕES	64
	REFERÊNCIAS	66
5	CONCLUSÃO GERAL	72

1 INTRODUÇÃO GERAL

A Floresta Amazônica se destaca pelo importante papel regional e global no ciclo climático, influenciando os períodos de chuvas e de seca (CELENTANO et al., 2017; FINER et al., 2018; PENG et al., 2020), bem como por sua riqueza, tanto em fauna quanto em flora, concentrando cerca de 10% a 15% da biodiversidade de todo o planeta (HUBBELL et al., 2009).

Além de toda a riqueza presente e de fácil visualização superficialmente, há na região Amazônica uma riqueza subterrânea de grande porte (GASPAR; CAMPOS; CADAMURO, 2007). Nessa região, o aquífero Alter do Chão se destaca por ser o maior reservatório de água subterrânea do planeta, com cerca de 86 mil km³ de água potável em volume armazenado e por possuir muitos recursos minerais (BORGES, 2021; DE BAKKER et al., 2021; DE AZEVEDO; CAMPOS, 2021; PECHTA; VASCONCELOS, 2022).

Ocorre que o desmatamento crescente na região do aquífero Alter do Chão vem causando preocupação, uma vez que com a retirada da cobertura vegetal há a redução do processo de infiltração e o aumento do escoamento superficial (SALACK et al., 2018). Além do desmatamento, o crescimento de centros urbanos na região aumenta a demanda por recursos minerais, como por exemplo por areia, haja vista o crescimento do setor de construção civil (DA SILVA et al., 2020; DAN GAVRILETEA, 2017).

A exploração de recursos minerais de forma inadequada propicia o aumento do desmatamento, contribuindo com o aumento de processos como a erosão e a contaminação dos recursos hídricos por agentes químicos (DA SILVA et al., 2020). Um grande exemplo dessa contaminação é a presença de mercúrio nas águas superficiais proveniente, principalmente, do garimpo de ouro, afetando diretamente a rede alimentar urbana e indígena (GARRETT et al., 2021). Segundo RAISG (2020), havia em 2020 mais de 120 locais com mineração ilegal operando na região Amazônica Brasileira, sendo, em sua maioria, operações de extração de ouro.

Esse processo de desmatamento advindo do aumento das áreas de pastagem, de agricultura e dos garimpos compromete, diretamente, a recarga dos aquíferos (CHEN et al., 2019; DA ROCHA et al., 2021; JANNIS et al., 2021; TADESSE et al., 2017), prejudicando, inclusive, a posterior utilização de suas reservas hídricas, haja vista a possibilidade de sua contaminação (CAMBRAIA NETO; RODRIGUES, 2020).

Outro impacto do desmatamento na região do aquífero Alter do Chão, decorrente das implicações das mudanças climáticas, é a ocorrência de secas mais prolongadas e chuvas mais

concentradas e intensas (BATALHA et al., 2018). Esses fenômenos contribuem para o agravamento dos problemas relacionados aos recursos hídricos e geram preocupação em termos ecossistêmicos (BONG et al., 2018; LIU, 2018).

Nesse contexto, o presente estudo foi dividido em dois capítulos, a fim de elucidar e compreender a região amazônica, mais precisamente a região do aquífero Alter do Chão, no que diz respeito aos recursos hídricos subterrâneos. No Capítulo 1 apresenta-se o estudo sobre a recarga hídrica do aquífero, utilizando-se como ferramenta de análise o Balanço Hídrico Climatológico (BHC) (ABATZOGLOU et al., 2018; UFV; UFMG; RENOVA, 2018; VICENTE-SERRANO; BEGUERÍA; LÓPEZ-MORENO, 2010), levando-se em consideração características como evapotranspiração, precipitação e mudanças no uso e ocupação da terra sobre o aquífero como parâmetros de entrada e o armazenamento de água como parâmetro de saída.

No Capítulo 2 há uma análise do desenvolvimento do processo de mineração na região amazônica, utilizando-se como banco de dados o projeto MAPBIOMAS (MAPBIOMAS, 2023a) e o projeto SIGMINE, mais precisamente na região do aquífero em questão, realizando-se um paralelo das consequências dessas extrações para o ambiente em si e nas consequências para os povos indígenas, haja vista as possíveis interferências e contaminações.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Analisar os impactos socioambientais do desmatamento e da mineração na região do Aquífero Alter do Chão, na Amazônia Brasileira.

2.2 Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho foram:

- Analisar os efeitos das mudanças no uso e cobertura do solo sobre o Balanço Hídrico Climatológico ao longo de uma série histórica de 20 anos (2000 a 2019) na região do aquífero Alter do Chão, localizado na Amazônia brasileira; e
- Analisar o processo de mineração entre 1985 e 2020, sua influência sobre o Balanço Hídrico Climatológico, suas consequências para o meio ambiente e para os povos indígenas da região do aquífero Alter do Chão.

REFERÊNCIAS

ABATZOGLOU, J. T. et al. Terra Climate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958-2015. *Scientific Data*, v. 5, p. 1–12, 2018.

ALWATHAF, Y.; MANSOURI, B. EL. Assessment of Aquifer Vulnerability Based on GIS and ARCGIS Methods: A Case Study of the Sana'a Basin (Yemen). *Journal of Water Resource and Protection*, v. 03, n. 12, p. 845–855, 2011.

BATALHA, M. S. et al. Effect of temporal averaging of meteorological data on predictions of groundwater recharge. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, v. 66, n. 2, p. 143–152, 2018.

BONG, C. P. C. et al. The role of smart waste management in smart agriculture. *Chemical Engineering Transactions*, v. 70, p. 937–942, 2018.

CAMBRAIA NETO, A. J.; RODRIGUES, L. N. Evaluation of groundwater recharge estimation methods in a watershed in the Brazilian Savannah. *Environmental Earth Sciences*, v. 79, n. 6, 2020.

CELENTANO, D. et al. Towards zero deforestation and forest restoration in the Amazon region of Maranhão state, Brazil. *Land Use Policy*, v. 68, n. July, p. 692–698, 2017.

CHEN, Z. et al. Land-use change from arable lands to orchards reduced soil erosion and increased nutrient loss in a small catchment. *Science of the Total Environment*, v. 648, p. 1097–1104, 2019.

DA ROCHA, N. S. et al. Potential impacts of air temperature rise in the hydric balance of Brazilian Pampa biome. *Acta Geophysica*, v. 69, n. 4, p. 1427–1445, 2021.

DA SILVA, E. F. et al. Environmental impacts of sand mining in the city of Santarém, Amazon region, Northern Brazil. *Environment, Development and Sustainability*, v. 22, n. 1, p. 47–60, 2020.

DAN GAVRILETEA, M. Environmental impacts of sand exploitation. Analysis of sand market. Sustainability (Switzerland), v. 9, n. 7, 2017.

DE BAKKER, L. B. et al. Economic impacts on human health resulting from the use of mercury in the illegal gold mining in the Brazilian Amazon: A methodological assessment. International Journal of Environmental Research and Public Health, v. 18, n. 22, 2021.

FINER, B. M. et al. Combating deforestation: From satellite to intervention. Science, v. 360, n. 6395, p. 1303–1305, 2018.

GASPAR, M. T. P.; CAMPOS, J. E. G.; CADAMURO, A. L. DE. Condições de infiltração em solos na região de recarga do sistema aquífero Urucuia no oeste da Bahia sob diferentes condições de usos. Revista Brasileira de Geociências, v. 37, n. 3, p. 542–550, 2007.

HAJ-AMOR, Z. et al. Impacts of climate change on irrigation water requirement of date palms under future salinity trend in coastal aquifer of Tunisian oasis. Agricultural Water Management, v. 228, n. June 2019, p. 105843, 2020.

HENRICH DE AZEVEDO, J.; GUIMARÃES CAMPOS, J. E. Flow patterns and aquifer recharge controls under Amazon rainforest influence: The case of the Alter do Chão aquifer system. Journal of South American Earth Sciences, v. 112, n. June, 2021.

HUBBELL, S. P. et al. How many tree species are there in the Amazon and how many of them will go extinct? In the Light of Evolution, v. 2, p. 107–126, 2009.

JANNIS, E. et al. Climate change effects on groundwater recharge and temperatures in Swiss alluvial aquifers. Journal of Hydrology X, v. 11, p. 100071, 2021.

KARIMI, V.; KARAMI, E.; KESHAVARZ, M. Climate change and agriculture: Impacts and adaptive responses in Iran. Journal of Integrative Agriculture, v. 17, n. 1, p. 1–15, 2018.

LIU, Y. Introduction to land use and rural sustainability in China. *Land Use Policy*, v. 74, n. January, p. 1–4, 2018.

PENG, W. et al. The ongoing cut-down of the Amazon rainforest threatens the climate and requires global tree planting projects: A short review. *Environmental Research*, v. 181, p. 108887, 2020.

RUSSO, A. et al. Complex interactions of extreme events in Southern Europe and Brazil : a compound event perspective. p. 4–5, 2022.

SALACK, S. et al. Scales for rating heavy rainfall events in the West African Sahel. *Weather and Climate Extremes*, v. 21, n. May, p. 36–42, 2018.

TADESSE, L. et al. Land use and land cover changes and Soil erosion in Yezat Watershed, North Western Ethiopia. *International Soil and Water Conservation Research*, v. 5, n. 2, p. 85–94, 2017.

UFV; UFMG; RENOVA, F. Metodologia de priorização: definição de critérios de priorização de áreas para recuperação ambiental na bacia do rio Doce. Produto 3.2. Universidade Federal de Viçosa, 2018.

VICENTE-SERRANO, S. M.; BEGUERÍA, S.; LÓPEZ-MORENO, J. I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, v. 23, n. 7, p. 1696–1718, 2010.

3 CAPÍTULO 1

IMPACTS FROM CHANGES IN LAND USE AND LAND COVER ON THE CLIMATOLOGICAL WATER BALANCE OF THE AQUIFER ALTER DO CHÃO IN THE BRAZILIAN AMAZON

3.1 ABSTRACT:

The use of water from aquifers for economic purposes has been increasing. Therefore, aquifer recharge is an extremely important issue that is influenced by geology, land use and land cover, climatological water balance, temperature, among others. Thus, this work aimed to analyze the effect of changes in land use and land cover on the climatological water balance between 2000 and 2019 in the Alter do Chão aquifer in the Brazilian Amazon region. Rainfall and evapotranspiration were used to estimate the water balance. The land use and land cover used were from the MapBiomas project. Areas of water deficit and surplus were identified as well as changes in land use and land cover. During the study period, the reduction of 2.88% (0.90 million hectares) of the forest area along with climate change may have impacted rainfall, evapotranspiration, and, consequently, the climatological water balance. The analysis detected an increase of 2.44% (0.76 million hectares) of agriculture in the region. Although the total average rainfall in the region did not show significant changes, through the spatial analysis it was found that even in regions with high rainfall, water deficits could be found. These findings warn about a future risk for the region regarding the environment, economy, and human consumption needs.

KEYWORDS: Deforestation; Agriculture; Climate changes; Potential Recharge; Water resources.

3.2 INTRODUCTION

The Amazon is the largest tropical forest on the planet. Recognized worldwide for its importance in preserving biodiversity, the Amazon forest hosts around 10 to 15% of all terrestrial biodiversity, but deforestation is pressuring the Amazon rainforest, possibly destabilizing the forest-climate system (HUBBELL et al., 2009; STAAL et al., 2020). In addition to its ecological importance, the Amazon forest regulates the water cycle and regional and national climate (CELENTANO et al., 2017).

The increasing exploitation of natural resources directly affects the sustainability of the environment, which has generated concerns about the ecosystems (BONG et al., 2018; LIU, 2018). A study carried out by Aguiar et al. (2016) estimates that 649,000 km² were deforested between 1960 and 2014 in the Brazilian Amazon. Recently, in 2018, Jair Bolsonaro was elected with an anti-environmental discourse (TOLLEFSON, 2018), consequently deforestation areas increased and exceeded 10,000 km² in 2019 (INPE, 2020).

Within the Amazon region, groundwater is abundant. Aquifers are water resources fundamental for the maintenance of minimum streamflow of watercourses (GASPAR; CAMPOS; CADAMURO, 2007) and important sources to meet water demands especially due to regional climate change and/or low availability or quality of surface water (ALWATHAF; MANSOURI, 2011).

In the Brazilian Amazon region there is the aquifer Alter do Chão. The Aquifer System covers parts of the Amazonas, Pará, and Amapá states in the northwestern. This aquifer is considered the largest groundwater reservoir on the planet, in terms of stored volume, with approximately 86 thousand km³ of drinking water (BORGES, 2021). Approximately 59% of the urban areas, in northern Brazil, are supplied exclusively by groundwater (DE AZEVEDO; CAMPOS; GOMES, 2020).

De Azevedo, Campos, Gomes (2020) indicated that deforestation has reduced the recharge of the Alter do Chão aquifer in the Brazilian Amazon region. Furthermore, GARRETT et al. (2021) indicated that degradation has continued to increase even during periods of decreased deforestation. Also the use of aquifers in agricultural processes, mainly crop irrigation, has increased due to the quality of surface waters (CAMBRAIA NETO; RODRIGUES, 2020; DE AZEVEDO; CAMPOS; GOMES, 2020; HAJ-AMOR et al., 2020), however, in the study region, the use of groundwater has increased for urban consumption.

Another aggravating factor to potential groundwater recharge is climate change. Climate change is responsible for more concentrated and intense rainfall (BATALHA et al., 2018) that when combined with the lack of vegetation cover, reduces infiltration and consequently increases runoff (SALACK et al., 2018) and compromises groundwater recharge (CHEN et al., 2019; JANNIS et al., 2021; TADESSE et al., 2017).

Besides increasing runoff, erosion, and directly interfering with rainfall regimes, climate change is also expected to cause temperature-related impacts in different regions of the globe (KARIMI; KARAMI; KESHAVARZ, 2018). According to estimates, the temperature will gradually increase up to 4.8°C until the end of the 21st century (HAJ-AMOR et al., 2020), which could increase the natural evapotranspiration process of the surrounding vegetation.

The Climatological Water Balance (CWB) allows to analyze the water availability of a location (UFV; UFMG; RENOVA, 2018). In its simplified version, the CWB considers the difference between rainfall and evapotranspiration (ABATZOGLOU et al., 2018; VICENTE-SERRANO; BEGUERÍA; LÓPEZ-MORENO, 2010). Evapotranspiration is a phenomenon dependent on temperature, land use, wind, moisture, and radiation, among others (MCCABE; WOOD, 2006). In this way, changes in land use land cover can affect CWB.

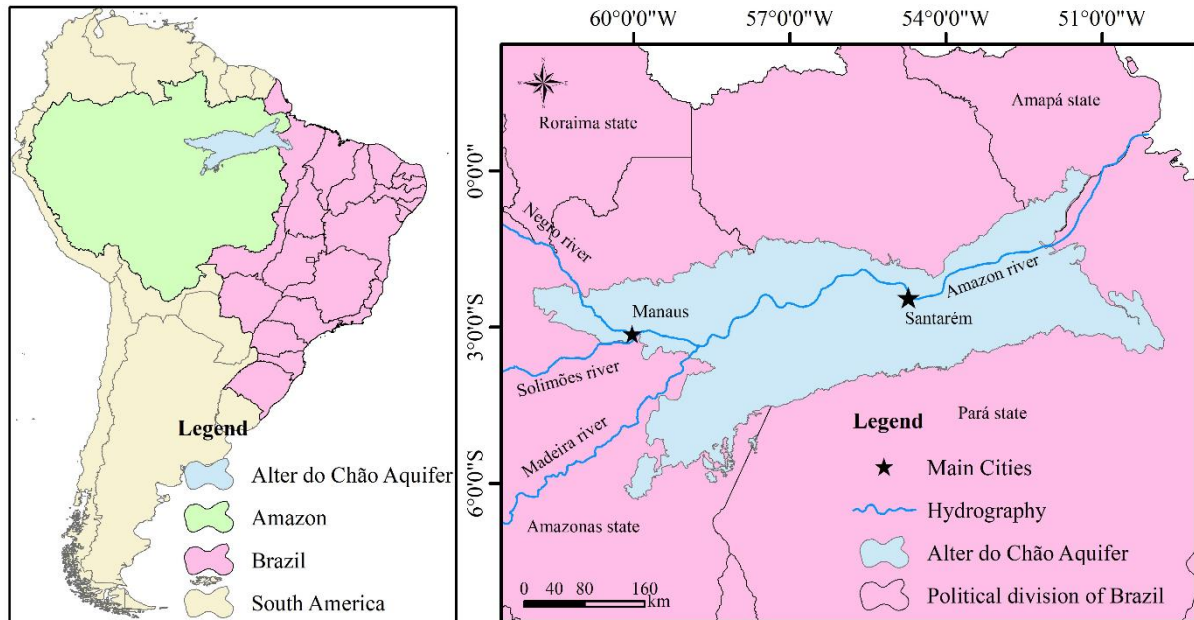
Since Alter do Chão is second-largest aquifer of Brazil in area is in the Amazon region, with a huge importance for climate control and has been suffering with changes in land use and land cover, this study aimed to analyze the effect of land use and land cover changes on the climatological water balance over twenty years (2000 to 2019) in the Alter do Chão Aquifer, in the Brazilian Amazon region.

3.3 MATERIAL AND METHODS

3.3.1 Study area

The Alter do Chão Aquifer (Figure 3-1) is in the Brazilian Amazon region. With an area of about 437.5 thousand km² (BORGES, 2021), Alter do Chão extends through the States of Amazonas, Pará, and Amapá.

Figure 3-1. Alter do Chão Aquifer, Brazilian Amazon region.



Source: author

The soil of the study area is composed of sedimentary rocks with a large volume of intrusions, consisting of clays, silts and sands, with a predominance of sandstones, generally tabular, with fluted cross lamination and cross lamination (PITA et al., 2018).

Alter do Chão is considered the largest groundwater reservoir on the planet, in terms of stored volume, with approximately 86 thousand km³ of drinking water. In its upper part, it has a free composition with a depth of up to 50 meters and it is also formed by a closed system with a depth of 430 meters (BORGES, 2021). Furthermore, it is under a terrain composed mostly of sandy soil, favoring infiltration (ANA, 2019). The majority of the aquifer is composed of Yellow, Red-Yellow Latosols, and Red-Yellow Argisol (PITA et al., 2018).

Around 40% of the water supply of the Manaus, Amazonas state capital, comes from the Alter do Chão aquifer (BORGES, 2021). However, water volume withdrawn represents a small amount given the low population density.

3.3.2 Land use and land cover

The land use and land cover (LULC) was obtained through the MAPBIOMAS PROJECT collection 5 (MAPBIOMAS, 2019) from the Brazilian Ministry of the Environment. MAPBIOMAS images are derived from the Landsat satellite and are available in 30x30 m resolution. LULC data were obtained used for each studied year (2000-2019), period with better

data, to make it possible to assess the changes in LULC over time and their impact on the climatological water balance (CWB). To analyze these changes, the ArcGis 10.3 software was used.

To aid the analysis, some LULC classes were grouped based on evapotranspiration patterns. Three classes of use were used: forest area, non-forest area, and water body. The forest area was the sum of: forest formation, savanna formation, forest plantation, wetland, and grassland formation. Non-forest area was the sum of: pasture, urban infrastructure, other non-vegetated areas, mining, soybean, and other temporary crops. Water body area was the sum of river and lake.

3.3.3 Climatological Water Balance

The CWB is a balance between the inflows and outflows of water in a given system (UFV; UFMG; RENOVA, 2018). Rainfall was considered as input and evapotranspiration as output, as better described below. Areas with positive values are considered to have water surplus, which means they have the potential to recharge the aquifer and produce streamflow in water bodies. Areas with negative values represent water deficit, which means that rainfall is incapable of meeting the evapotranspiration demand.

Equation 1 represents the Climatological Water Balance:

$$\text{CWB} = \text{R} - \text{ET} \quad (1)$$

in which:

CWB = Climatological Water Balance (mm year⁻¹);

R = Rainfall (mm year⁻¹); and

ET = Evapotranspiration (mm year⁻¹).

Two remote sensing products, described below, were used to calculate the CWB.

3.3.3.1 Rainfall

The rainfall used was obtained from the *Tropical Rainfall Measuring Mission – TRMM* (2000 - 2015) and later from the *Global Precipitation Measurement – GPM* (2015 - 2019). The TRMM/GPM rainfall data were obtained using the product 3B43 with the support of Google

Earth Engine. Product 3B43 is the monthly intensity of rainfall on a 25x25 km scale. Despite the small spatial resolution, Pinto et al. (2021), when carrying out an analysis of the TRMM/GPM data, detected a strong correlation between TRMM/GPM and surface measurement data, and considered TRMM/GPM as representative. A similar result was also found by Soares, da Paz, and Piccilli (2016); De Almeida et al., (2015); Collischonn; Collischonn; Tucci, (2008).

The conversion of these data into annual total precipitation occurred in the free *software* Rstudio (R CORE TEAM, 2021), in which the data for the months 2000 to 2019 were multiplied by the number of hours in each month and, later, accumulated to obtain annual total rainfall in mm/year.

3.3.3.2 Evapotranspiration

The evapotranspiration data was from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) product MOD16A3 V006 with a pixel of 500x500 m. The MODIS data underwent a pre-processing for the removal of areas that did not have evapotranspiration data, such as exposed soil, urban area, and water body. After this pre-processing, it was necessary to make a scale correction using a scale factor provided by MODIS for the product used. For this product, the scale factor is 0.1. MODIS provides evapotranspiration data in $\text{kg m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ which corresponds to mm year^{-1} , so no measurement units conversion was necessary.

3.3.3.3 Resample

Since the databases have different resolutions, an initial standardization of the data was necessary (ACHU; REGHUNATH; THOMAS, 2020; DAS; PAL, 2019; SHARMA; SINGH, 2017). This standardization was done by resizing the pixels to a common working scale (ABIJITH et al., 2020; KHOSRAVI et al., 2019). In this work, a 2.5 x 2.5 km pixel was adopted. The resizing was carried out using the nearest neighbor assignment methodology, since this is the fastest of the interpolation methods.

By using these data, it is possible to understand the groundwater recharge and its relation with land use and land cover changes. It is possible to know the strong points, like high average rainfall, and the weaknesses, like deforestation, and illegal mining. Observing what is necessary to solve the problems that are destroying or affecting the potential Alter do Chão recharge,

measures could be taken to prevent its aggravation, since this region is important for society in general.

3.3.4 Statistical Analysis

The detection of tendency in rainfall, evapotranspiration, climatological water balance, forest areas, non-forest areas, and water bodies series is important for the management of water resources. It can be done through non-parametric statistical tests. To analyze a possible tendency and correlation in the data series, Pettitt (PETTITT, 1979) and Spearman (HALL; SANFORD; TITCHENER, 1898) test were used, respectively.

The Pettitt teste was carried out using two variables, years and the variable of interest, to verify the possible tendency between then and the year it might have happened, the possible point break. The adopted significance level was 5%.

ULIANA et al. (2014) studied a climate series data and carried out a Pettitt test to verify a possible tendency in these series. RIZZO et al., (2020) used a Pettitt test to analyze a possible tendency in series of rainfall and water yield in the Amazon region.

The Spearman test measures the strength of the relationship between two variables. It ranges from +1 to -1. The closer the correlation is to ± 1 the stronger it is. Positive values mean increasing tendency whereas negative values mean decreasing tendency (MYERS; SIROIS, 2006).

Both tests were carried out by the R Project for Statistical Computing software using the packages “*readxl*”(WICKHAM et al., 2019), “*trend*”(WICKHAM et al., 2019), “*kendall*”(WICKHAM et al., 2019), and “*dplyr*”(WICKHAM et al., 2019) (R, 2023). It uses is free and compiles and runs a greater variety of data on different platforms.

3.4 RESULTS AND DISCUSSION

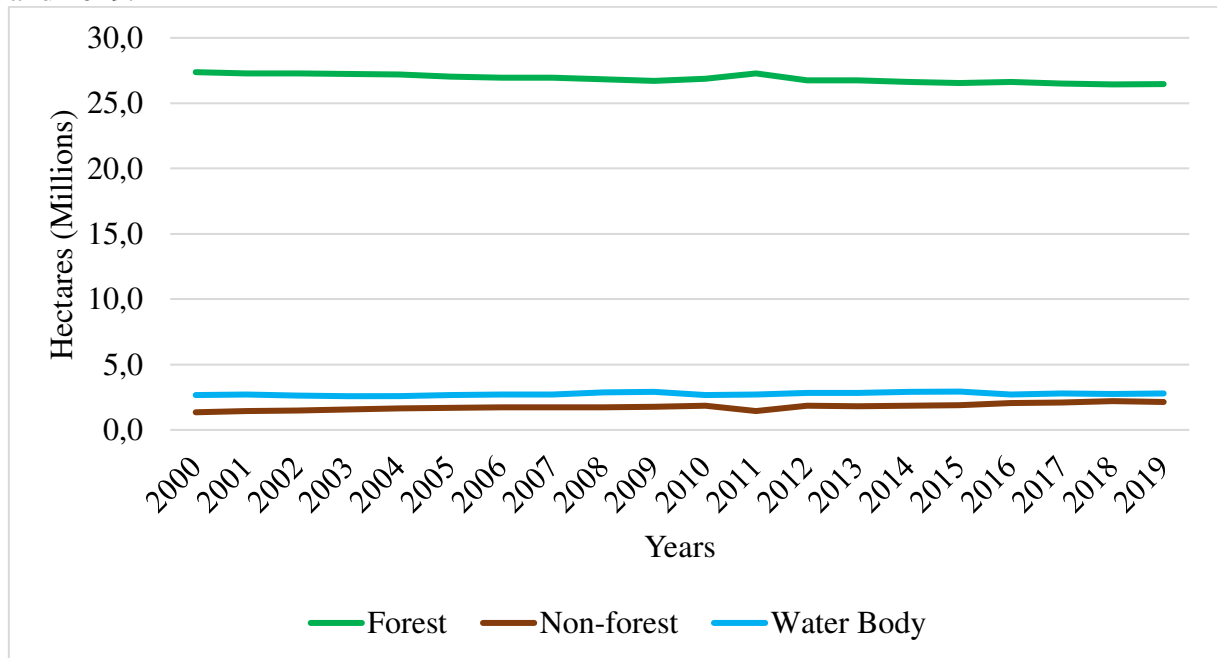
3.4.1 Land use and land cover

The analysis of LULC throughout the historical series (2000 – 2019) showed a tendency to increase non-forest areas, decrease forest areas, and increase water bodies (Figure 3-2), according to Pettitt and Spearman test.

The Pettitt p-value for forest areas was 0.004736, for non-forest areas was 0.006142, and for water bodies was 0.01844. All values were below 0.05, the significance level adopted in the Pettitt test. The Spearman test value was -0.9021823 for forest areas showing a reduction tendency, 0.9036872 for non-forest areas showing an increasing tendency, and 0.6538753 for water bodies showing a medium increasing tendency.

These observations representing a future concern for society. Similar results were also found by Zemp et al. (2017) and Staal et al. (2020). Staal et al. (2020) point out that the vegetation cover, mainly forest, is the main responsible for the high rate of evapotranspiration in dry periods, which contributes to the precipitation along with other factors such as climate modulators and synoptic/atmospheric systems. With the reduction of forest cover, there is a reduction in evapotranspiration which, in turn, reduces precipitation in a vicious cycle.

Figure 3-2. Forest, non-forest, and water body area in the Alter do Chão aquifer between 2000 and 2019.

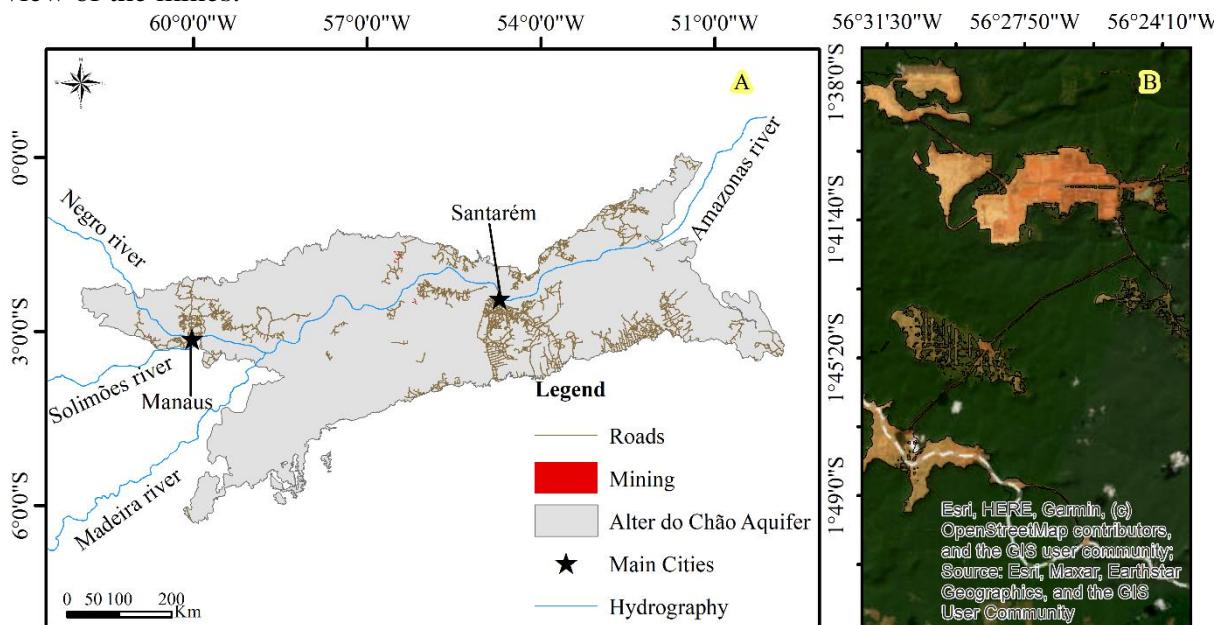


Source: author

Analyzing the LULC data in 2000, around 87.2% of the aquifer area was composed of forest, 8.5% of water bodies, and 4.3% of non-forest areas. Non-forest areas are the sum of: pasture, urban infrastructure, other non-vegetated areas, mining, soybean, and other temporary crops. For the year 2019, around 84.32% of the aquifer area was composed of forest. This increase in the non-forest area has been observed in the Amazon region as a whole, according to studies by Hubbell et al. (2009) and Probst et al. (2020).

According to Gopel et al. (2018), the forest areas in unprotected places have been converted into agriculture and pasture. There was also an increase of mining areas, especially after 2000, with gold mining (GARRETT et al., 2021). De Bakker et al. (2021) alert to the dangers of illegal mining due to the contamination of water bodies by mercury, for example. The data about mines were gathered from MAPBIOMAS, (2023). Figure 3-3 shows the mining areas in the Alter do Chão aquifer in 2020.

Figure 3-3. Mining areas in the Alter do Chão aquifer in 2020: A) mine overview; B) focused view of the mines.



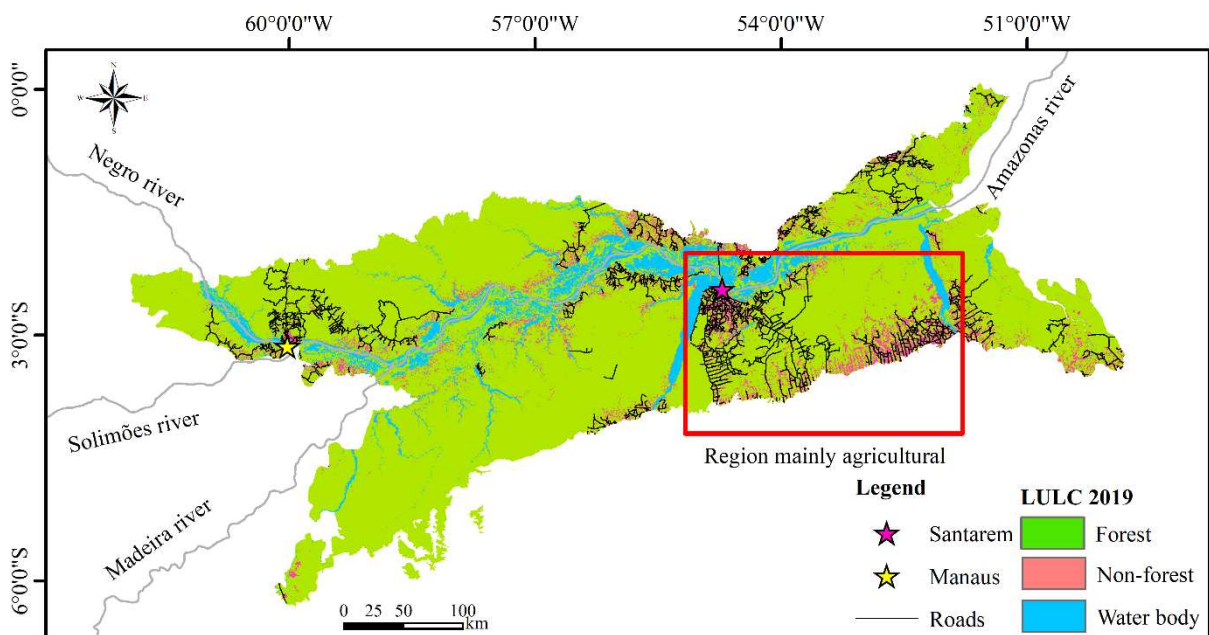
Source: author

In the Amazon, fires are also responsible for high rates of deforestation (INPE, 2020; SILVA et al., 2021; SODRÉ et al., 2018) and, in most cases, they are carried out to prepare or clean forest soil for livestock, to the point of Probst et al. (2020) indicate that deforestation in the region follows the price of the cattle and when this increases in the Brazilian market deforestation follows the same direction. The aforementioned factors, taken together, corroborate what was observed in the study, that economic factors, especially livestock, have directly interfered with the LULC of the region over the years. Cavalcante et al. (2019) also state that the acceleration of deforestation has political and economic influence.

Figure 3-4 shows soil 2019's LULC, highlighting the greater concentration of agricultural use and, consequently, greater deforestation over the years. Also, it is possible to observe a greater concentration of roads in the same area. Roads are associated with increases

in farm and nonfarm economic growth (ASHER; NOVOSAD, 2018). These changes may also be linked to factors favorable to the development of agricultural activities such as slope (AKINCI; ÖZALP; TURGUT, 2013; COSTA et al., 2019; GURUNG, 2019; LEPSCH et al., 2015; RIO GRANDE DO SUL, 1979; SCOPESEI et al., 2020), proximity to water bodies (JOSHI; ALI; BERRENS, 2017; RONDHI et al., 2018; SARTORI; DA SILVA; ZIMBACK, 2012), and roads (GURUNG, 2019; JOSHI; ALI; BERRENS, 2017; RONDHI et al., 2018). Aguiar, Câmara, and Escada (2007), Laurance et al. (2002), and Staal et al. (2020) state that the temporal and spatial distribution of deforestation in the Amazon is not random, but a combination of social, economic, and institutional factors.

Figure 3-4. Land use and land cover for the Alter do Chão Aquifer in 2019.

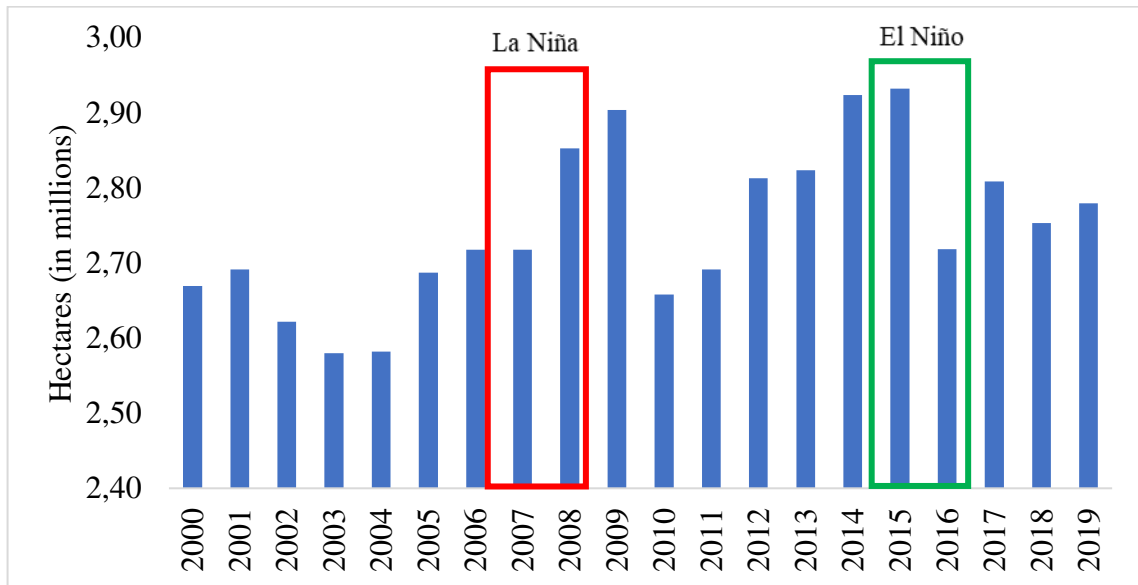


Source: author

Figure 3-5 shows the change in the area occupied by water bodies within the Alter do Chão aquifer region. According to Qu et al. (2020), the increase in the area occupied by water bodies comes from a series of climatic factors and events as a consequence of changes in the hydrological pattern of the region. In the data series studied, these climatic events may be associated with the La Niña and El Niño phenomena which change, significantly, the rainfall volume and, consequently, the area occupied by water bodies. La Niña increases rainfall in the region, while El Niño causes a severe drought (ÁVILA; SOUZA; PINHEIRO, 2013), hence,

the increase in water bodies between 2007-2008 (La Niña) and the strong reductions in the periods 2009-2010 (El Niño) and 2015-2016 (El Niño).

Figure 3-5. Areas occupied by water bodies in the Alter do Chão aquifer over the years.

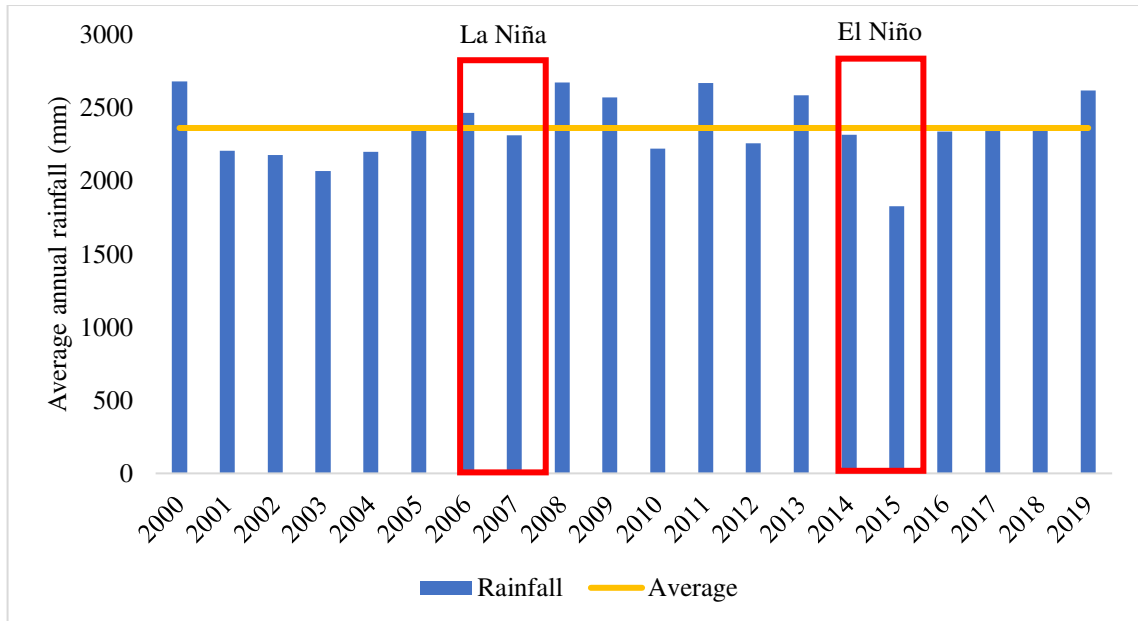


Source: author

3.4.2 Rainfall

Analyzing the rainfall data, obtained from the TRMM, for the Alter do Chão aquifer area (Figure 3-6), an average total annual rainfall between 2000 and 2500 mm per year could be observed.

Figure 3-6. Average total annual rainfall over the years for the Alter do Chão aquifer.



Source: author

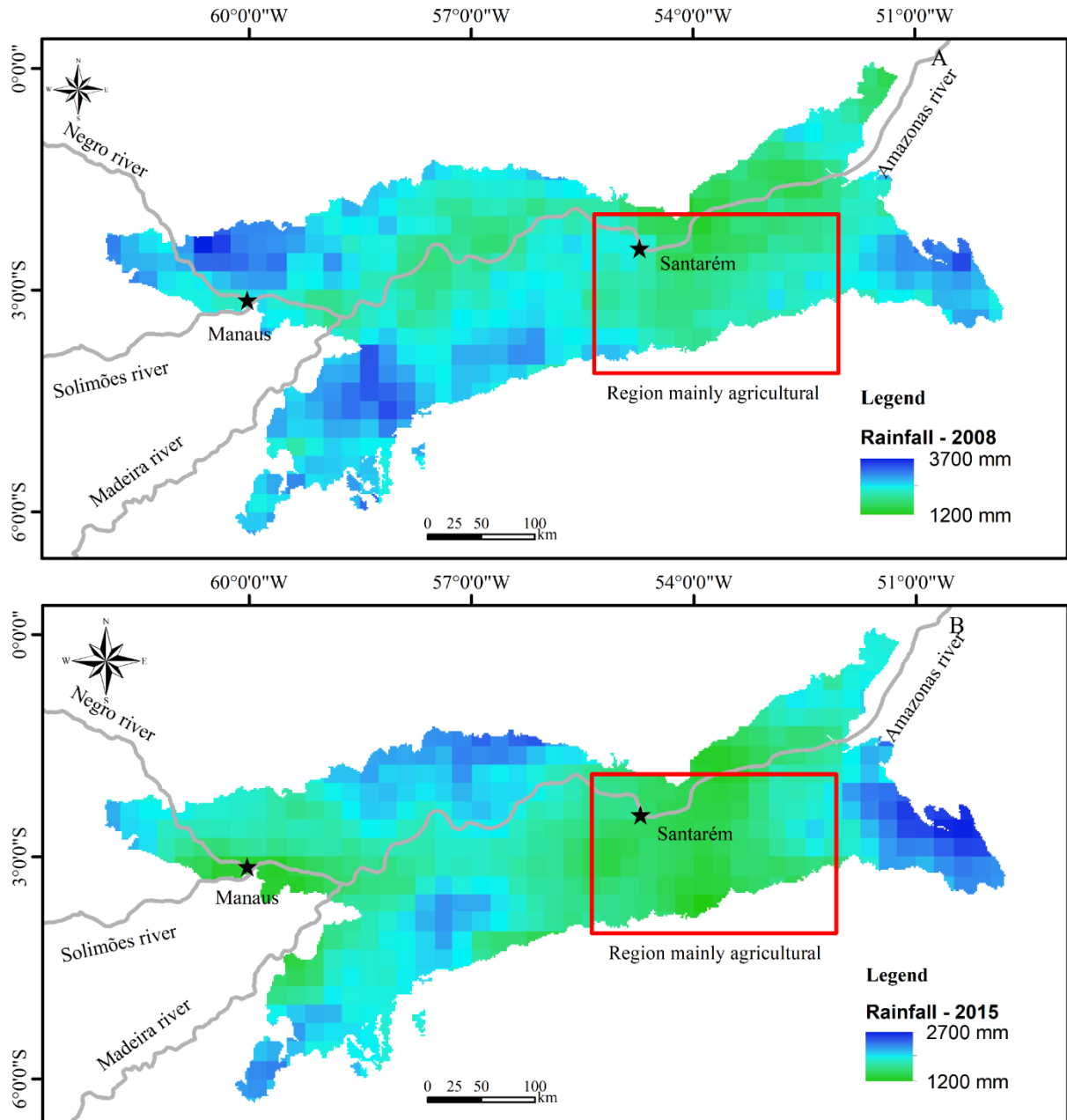
The maximum total annual rainfall was 3848 mm in 2006. The minimum total annual rainfall was 1264 mm in 2015. The months February, March, and April are the rainiest. Exceptional features can be noted in 2015 and 2008. These years suffered from the occurrence of the climatic phenomena mentioned before, something also investigated by Doughty et al. (2021). Azevedo et al. (2020) state that the annual totals did not change greatly over the years. This can be proved by the Pettitt test carried out. The p-value for average annual rainfall was 0.7522324, which means no tendency in the series.

In 2015, the lowest total annual rainfall was recorded, and the INPE's program for wildfire (Queimadas) detected 146,366 active wildfires in the Legal Amazon. On the other hand, in 2000, when rainfall had a high total annual, 66,125 active points were identified (INPE, 2021). These data show an increase in the occurrence of fires in years with less rainfall.

The spatial analysis of rainfall, pixel by pixel (Figure 3-7), allowed the visualization of the rainfall distribution in the aquifer region.

The Brazilian Amazon region is the rainiest place in South America (DE SOUZA et al., 2014). Knowing the spatial distribution of rainfall contributes to the understanding of several factors, such as investigations that associate droughts with deforestation and wildfires in the Amazon (ARAGÃO et al., 2007; BRANDO et al., 2020).

Figure 3-7. Total Annual Rainfall distribution in Alter do Chão Aquifer for (A) 2008 and (B) 2015.



Source: author

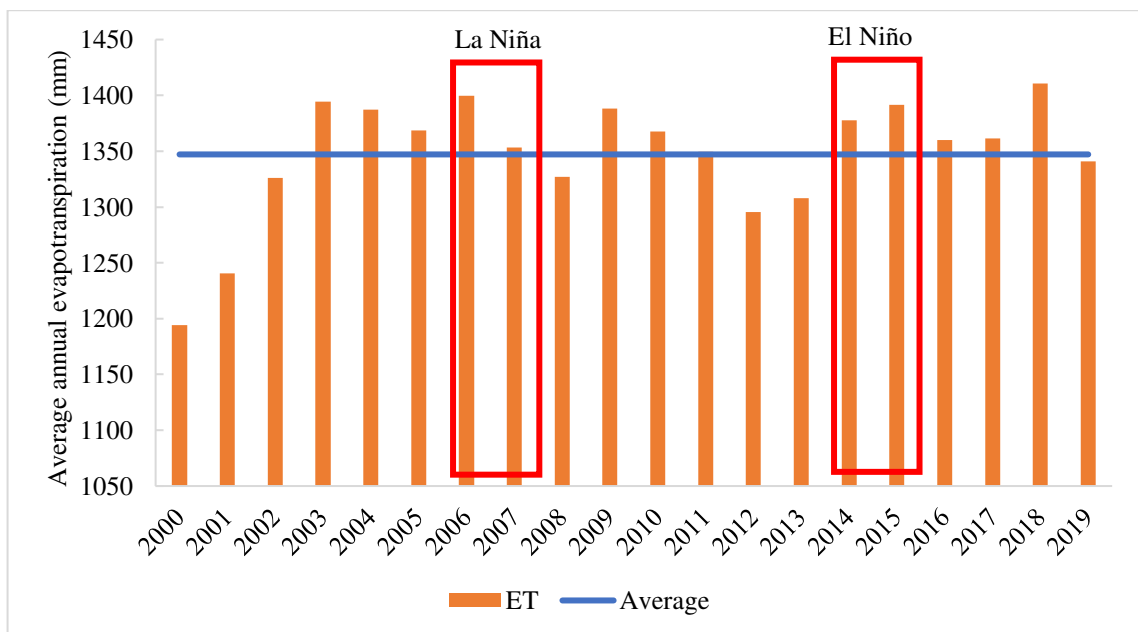
When comparing LULC with rainfall, it is noted that areas that concentrate non-forest areas, region mainly agricultural, have lower total annuals than forest areas. This result is in agreement with the study of Zemp et al. (2017), who noted a 20% reduction in rainfall in deforested areas in the Amazon. These changes are only noticed through the spatial analysis because as the watershed has more than 80% of its area covered with vegetation, the differences in the total annuals in deforested areas are masked in the average rainfall analysis of the aquifer

area. The 2008 period had high rainfall, practically, in the entire aquifer region, a fact already discussed in this study.

3.4.3 Evapotranspiration

Evapotranspiration (Figure 3-8) showed no tendency to increase during the study period, since the p-value, carried out by the Pettitt test, was 0.4128339, which means stability for the period. Staal et al. (2020) point out that forest cover, the main use in the study area, have a high rate of evapotranspiration in periods of drought, hence justifying the high evapotranspiration in 2015, whose total rainfall was the lowest. When analyzing the area occupied by water bodies, there was a large reduction in 2016, which can be explained by the reduction in rainfall combined with high evapotranspiration in 2015. Another aggravating factor for 2015 was the high number of fire outbreaks due to the lowest rainfall of the studied period, corroborating with Staal et al. (2020) who states that drier periods favor deforestation and wildfires.

Figure 3-8. Evapotranspiration over the years for the Alter do Chão aquifer area.



Source: author

Deforestation reduces evapotranspiration (Zemp et al., 2017). Following this statement and analyzing only the reduction of vegetation cover, a reduction in evapotranspiration was expected. However, the evapotranspiration increased. A possible explanation is that as the data

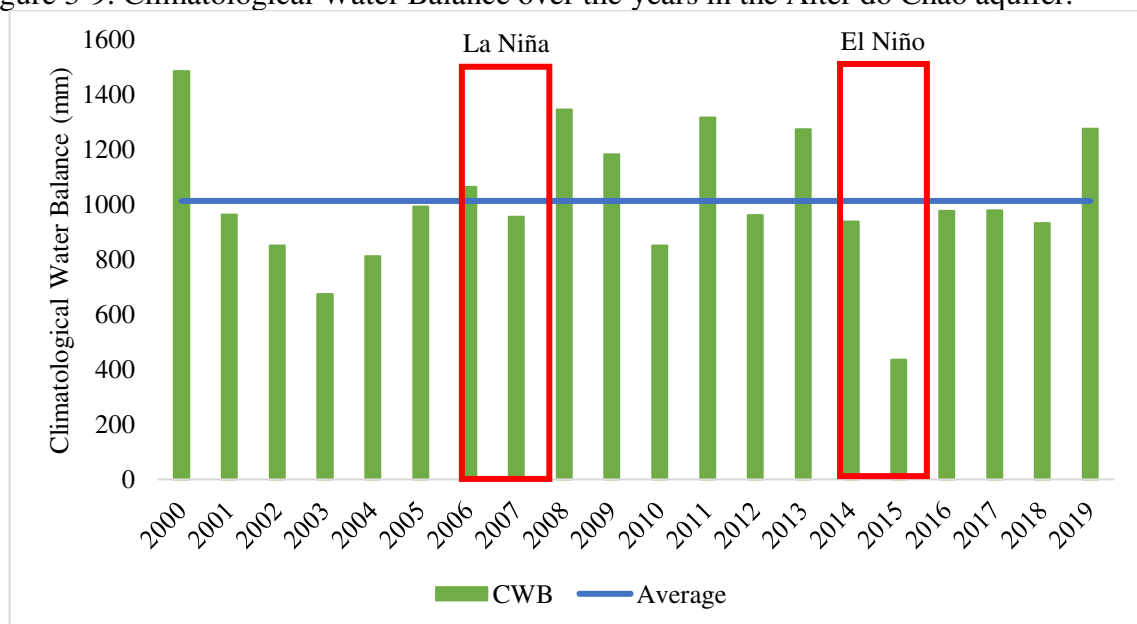
presented is an average for the entire watershed, the tendency towards a reduction in evapotranspiration may have been masked because, despite 0.9 million hectares having been deforested in the Alter do Chão aquifer region, this area corresponds to only 2.9% of the area.

Another factor to consider is that evapotranspiration also depends on temperature. According to Mhaweji; Fadel; Faour, (2020), evapotranspiration is directly related to solar radiation and, in drier periods with higher temperatures, the solar radiation is more intense and tends to promote greater evapotranspiration. For the studied area, according to Almeida et al. (2017), in the period from 1973 to 2013, there was an increase in the average temperature of around 0.6 °C with perspectives of continuity over the years. CHADDAD et al. (2022) established a relationship between mining and surface temperature, in the Amazon region, from 2005 to 2020. The results indicated an increase of 10 °C in the period. This increase has been attributed to possible climate change and is estimated at a global level by Haj-Amor et al. (2020).

3.4.4 Climatological water balance

In the historical series of the climatological water balance data (Figure 3-9), the positive peaks, the highest values, happened at the beginning of the series in 2000 and 2008. In this same period, the evapotranspiration was low along the aquifer, which contributed to the positive values for the CWB.

Figure 3-9. Climatological Water Balance over the years in the Alter do Chão aquifer.



Source: author

Comparing the CWB with the area occupied by water bodies, both increased in the period 2007-2008, which demonstrates the interaction between rainfall, flooded areas, and CWB. The same reasoning can be carried out for 2014-2015, which had the lowest CWB value, a considerable drop in the series that was also seen in water bodies and average rainfall.

When analyzing the initial year of the data series, 2000, the highest value for the climatological water balance is observed throughout the entire period. This value occurs as a result of the above, Figure 3-6 and Figure 3-8, in which the values of rainfall and evapotranspiration for the year under discussion were the highest and lowest, respectively, throughout the entire series.

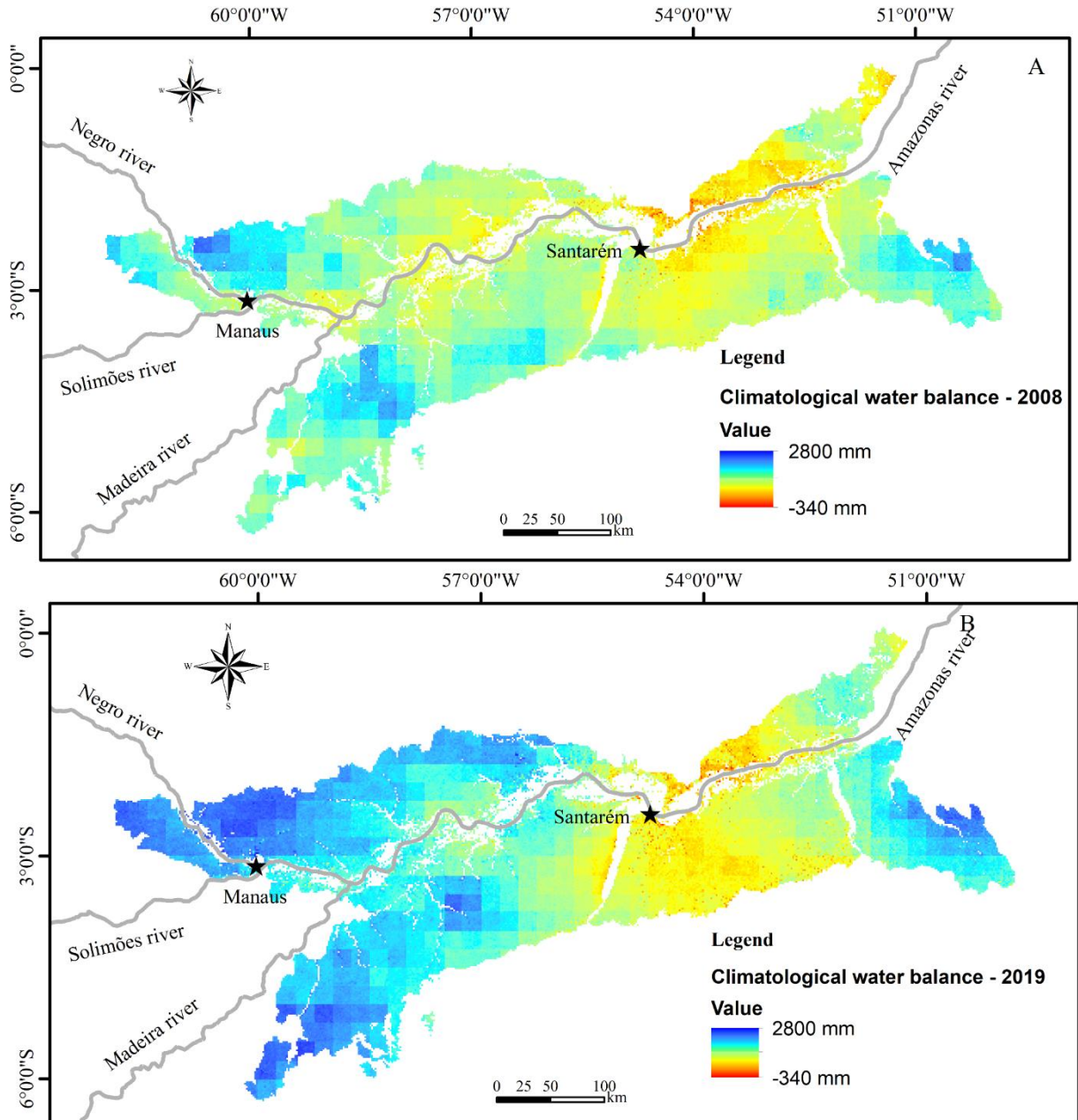
Overall, CWB showed no tendency over the years, since the p-value, carried out by the Pettitt test, was 1.0 considering the entire period studied. However, Azevedo et al. (2020) analyzed piezometers in the Alter do Chão aquifer and found a reduction in groundwater recharge in deforested areas.

Figure 3-10 shows the spatial distribution of CWB in the studied area for 2008 and 2019. Despite 2008 having high average rainfall due to the La Niña phenomenon, it had water deficits in specific regions, whose characteristics were previously mentioned. In 2019, there is a concentration of water surplus in some locations at the borders of the study area, these areas are occupied mainly by forests, which according to Carvalho; Dalbosco; Guerra (2020), and Moura et al. (2019), tend to positively affect aquifer recharge.

The regions with water surplus are covered by native forests and have the highest rainfall along the aquifer. On the other hand, regions with water deficits are identified by the LULC as agricultural areas, that is, non-forest. It is important to discuss that areas with water deficits are increasing and becoming more concentrated in a certain region inside Alter do Chão. As said above, these regions are mainly identified as agricultural, mining, pasture, urban areas, and soybean, that is, non-forest areas are increasing too in an important region for Brazil's climate.

The year 2019 had one of the highest average rainfall in the series and, even so, there were locations with water deficit, mainly at the center of the aquifer, which can be explained by the combination of increased evapotranspiration and deforestation. Huang et al. (2020), Wei et al. (2021), and Zhao et al. (2019) state that climate change, underlying surface conditions, and human activities affect the spatial and temporal distribution of water resources in watersheds. Da Silva et al. (2019) states that Brazil is vulnerable to the effects of climate change according to the 4th IPCC report on projections of global climate change.

Figure 3-10. Climatological water balance for the Alter do Chão aquifer in 2008 (A) and 2019 (B).



Source: author

The drop in the CWB and the reduction of vegetation cover over the period studied demonstrates a future concern with the recharge of groundwater, rainfall, and evapotranspiration not only in the Alter do Chão aquifer but in Brazil as a whole. In Brazil, the AR5-IPCC predicts higher mean temperature and frequent temperature extremes in the southeast, south and mid-west regions (DA SILVA et al., 2019). Extreme rainfall events are predicted to be more frequent in the southeast and south regions, whereas dry spells will affect the Amazon and northeast (MAGRIN et al., 2014). As aquifer recharge is extremely important

for the environment, fauna, flora, and for human development, its non-occurrence, due to the drop in the CWB, tends, over the years, to generate economic and social problems, if no measures are taken (LIU, 2018).

3.5 CONCLUSIONS

- The climatological water balance in the Alter do Chão aquifer region has a no tendency over the years, but there are locals that have a water deficit, suffering direct interference from rainfall, evapotranspiration, and land use and land cover.
- There are places with water deficits, meaning that the rainfall is not able to supply the vegetation's water demand.
- The drop in the CWB provides a future risk for the study region when analyzing the environment, economy, and human consumption needs. Furthermore, an alert for climate change needs to be turned on focusing on the implications of the increasing temperature and evapotranspiration.

REFERENCES

- ABATZOGLOU, J. T. et al. TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958-2015. *Scientific Data*, v. 5, p. 1–12, 2018.
- ABIJITH, D. et al. GIS-based multi-criteria analysis for identification of potential groundwater recharge zones - a case study from Ponnaniyar watershed, Tamil Nadu, India. *HydroResearch*, v. 3, p. 1–14, 2020.
- ACHU, A. L.; REGHUNATH, R.; THOMAS, J. Mapping of Groundwater Recharge Potential Zones and Identification of Suitable Site-Specific Recharge Mechanisms in a Tropical River Basin. *Earth Systems and Environment*, v. 4, n. 1, p. 131–145, 2020.
- AGUIAR, A. P. D. et al. Land use change emission scenarios: Anticipating a forest transition process in the Brazilian Amazon. *Global Change Biology*, v. 22, n. 5, p. 1821–1840, 2016.
- AGUIAR, A. P. D.; CÂMARA, G.; ESCADA, M. I. S. Spatial statistical analysis of land-use determinants in the Brazilian Amazonia: Exploring intra-regional heterogeneity. *Ecological Modelling*, v. 209, n. 2–4, p. 169–188, 2007.
- AKINCI, H.; ÖZALP, Y.; TURGUT, B. Agricultural land use suitability analysis using GIS and AHP technique. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 97, p. 71–82, 2013.
- ALMEIDA, C. T. et al. Spatiotemporal rainfall and temperature trends throughout the Brazilian Legal Amazon, 1973–2013. *International Journal of Climatology*, v. 37, n. 4, p. 2013–2026, 2017.
- ALWATHAF, Y.; MANSOURI, B. EL. Assessment of Aquifer Vulnerability Based on GIS and ARCGIS Methods: A Case Study of the Sana'a Basin (Yemen). *Journal of Water Resource and Protection*, v. 03, n. 12, p. 845–855, 2011.
- ANA. Aquífero Alter do Chão.
- ARAGÃO, L. E. O. C. et al. Spatial patterns and fire response of recent Amazonian droughts. *Geophysical Research Letters*, v. 34, n. 7, p. 1–5, 2007.
- ASHER, S.; NOVOSAD, P. Rural Roads and Local Economic Development. *Rural Roads and Local Economic Development*, v. 110, n. 3, p. 797–823, 2018.
- ÁVILA, P. L. R.; SOUZA, E. B. DE; PINHEIRO, A. N. Simulação da precipitação sazonal com o Regcm4 sobre o estado do Pará para anos de El Niño e La Niña. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 6, n. 5, p. 1316–1335, 2013.

- BATALHA, M. S. et al. Effect of temporal averaging of meteorological data on predictions of groundwater recharge. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, v. 66, n. 2, p. 143–152, 2018.
- BONG, C. P. C. et al. The role of smart waste management in smart agriculture. *Chemical Engineering Transactions*, v. 70, p. 937–942, 2018.
- BORGES, D. Aquífero Alter do Chão. Disponível em: <<https://conhecimentocientifico.com/aquifero-alter-do-chao/>>.
- BRANDO, P. M. et al. The gathering firestorm in southern Amazonia. *Science Advances*, v. 6, n. 2, p. 1–9, 2020.
- CAMBRAIA NETO, A. J.; RODRIGUES, L. N. Evaluation of groundwater recharge estimation methods in a watershed in the Brazilian Savannah. *Environmental Earth Sciences*, v. 79, n. 6, 2020.
- CARVALHO, B. C.; DALBOSCO, A. L. P.; GUERRA, J. V. Shoreline position change and the relationship to annual and interannual meteo-oceanographic conditions in Southeastern Brazil. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, v. 235, n. January, p. 106582, 2020.
- CAVALCANTE, R. B. L. et al. Opposite Effects of Climate and Land Use Changes on the Annual Water Balance in the Amazon Arc of Deforestation. *Water Resources Research*, v. 55, n. 4, p. 3092–3106, 2019.
- CELENTANO, D. et al. Towards zero deforestation and forest restoration in the Amazon region of Maranhão state, Brazil. *Land Use Policy*, v. 68, n. July, p. 692–698, 2017.
- CHADDAD, F. et al. Impact of mining-induced deforestation on soil surface temperature and carbon stocks: A case study using remote sensing in the Amazon rainforest. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 119, n. August, 2022.
- CHEN, Z. et al. Land-use change from arable lands to orchards reduced soil erosion and increased nutrient loss in a small catchment. *Science of the Total Environment*, v. 648, p. 1097–1104, 2019.
- COLLISCHONN, B.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Daily hydrological modeling in the Amazon basin using TRMM rainfall estimates. *Journal of Hydrology*, v. 360, n. 1–4, p. 207–216, 2008.
- COSTA, R. C. A. et al. Land Use Policy Land capability of multiple-landform watersheds with environmental land use conflicts. *Land Use Policy*, v. 81, p. 689–704, 2019.
- DA SILVA, P. E. et al. Precipitation and air temperature extremes in the Amazon and northeast Brazil. *International Journal of Climatology*, v. 39, n. 2, p. 579–595, 2019.

- DAS, B.; PAL, S. C. Combination of GIS and fuzzy-AHP for delineating groundwater recharge potential zones in the critical Goghat-II block of West Bengal, India. *HydroResearch*, v. 2, p. 21–30, 2019.
- DE ALMEIDA, C. T. et al. Avaliação das estimativas de precipitação do produto 3B43-TRMM do estado do Amazonas. *Floresta e Ambiente*, v. 22, n. 3, p. 279–286, 2015.
- DE AZEVEDO, J. H.; CAMPOS, J. E. G.; GOMES, A. W. Piezometric Behavior in the Amazonian Lateritic Plateaus: Implications of Climate Changes to the Recharge of the Alter do Chão Aquifer System. *Journal of Water Resource and Protection*, v. 12, n. 02, p. 102–119, 2020.
- DE BAKKER, L. B. et al. Economic impacts on human health resulting from the use of mercury in the illegal gold mining in the brazilian amazon: A methodological assessment. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 18, n. 22, 2021.
- DE SOUZA, E. B. et al. Sazonalidade Da Precipitação Sobre a Amazônia Legal Brasileira: Clima Atual E Projeções Futuras Usando O Modelo Regcm4. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 14, n. 0, p. 50–75, 2014.
- DOUGHTY, R. et al. Small anomalies in dry-season greenness and chlorophyll fluorescence for Amazon moist tropical forests during El Niño and La Niña. *Remote Sensing of Environment*, v. 253, n. November 2020, p. 112196, 2021.
- GARRETT, R. D. et al. Forests and Sustainable Development in the Brazilian Amazon: History, Trends, and Future Prospects. *Annual Review of Environment and Resources*, v. 46, p. 625–652, 2021.
- GASPAR, M. T. P.; CAMPOS, J. E. G.; CADAMURO, A. L. DE M. Condições de infiltração em solos na região de recarga do sistema aquífero Urucuia no oeste da Bahia sob diferentes condições de usos. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 37, n. 3, p. 542–550, 2007.
- GURUNG, S. Land Capability Classification for Agriculture : GIS and Remote Sensing Approach — A Survey. *Advances in Communication, Cloud, and Big Data*, v. 31, p. 29–39, 2019.
- HAIJ-AMOR, Z. et al. Impacts of climate change on irrigation water requirement of date palms under future salinity trend in coastal aquifer of Tunisian oasis. *Agricultural Water Management*, v. 228, n. June 2019, p. 105843, 2020.
- HALL, G. S.; SANFORD, E. C.; TITCHENER, E. B. *The American Journal of Psychology. The Pedagogical Seminary*, v. 5, n. 4, p. 626, 1 abr. 1898.

- HUANG, S. et al. Quantitative contribution of climate change and human activities to vegetation cover variations based on GA-SVM model. *Journal of Hydrology*, v. 584, n. February, p. 124687, 2020.
- HUBBELL, S. P. et al. How many tree species are there in the Amazon and how many of them will go extinct? In *the Light of Evolution*, v. 2, p. 107–126, 2009.
- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. Projeto PRODES: Monitoramento do desmatamento da floresta Amazônica Brasileira por satélite.
- IV, V. Avaliação dos Aquíferos das Bacias Sedimentares da Província Hidrogeológica Volume IV – Hidrogeoquímica da PHA Tomo I – Aquíferos : Aluvial , Rio Branco , Içá e Tucunaré. v. IV, 2015.
- JANNIS, E. et al. Climate change effects on groundwater recharge and temperatures in Swiss alluvial aquifers. *Journal of Hydrology X*, v. 11, p. 100071, 2021.
- JOSHI, J.; ALI, M.; BERRENS, R. P. Valuing farm access to irrigation in Nepal: A hedonic pricing model. *Agricultural Water Management*, v. 181, p. 35–46, 2017.
- KARIMI, V.; KARAMI, E.; KESHAVARZ, M. Climate change and agriculture: Impacts and adaptive responses in Iran. *Journal of Integrative Agriculture*, v. 17, n. 1, p. 1–15, 2018.
- KHOSRAVI, K. et al. A comparative assessment of flood susceptibility modeling using Multi-Criteria Decision-Making Analysis and Machine Learning Methods. *Journal of Hydrology*, v. 573, n. February, p. 311–323, 2019.
- LAURANCE, W. F. et al. Predictors of deforestation in the Brazilian Amazon. *Journal of Biogeography*, v. 29, n. 5–6, p. 737–748, 2002.
- LEPSCH, I. F. et al. Manual para levantamento utilitário e classificação de terras no sistema de capacidade de uso. Viçosa, MG: SBCS. 170p, 2015.
- LIU, Y. Introduction to land use and rural sustainability in China. *Land Use Policy*, v. 74, n. January, p. 1–4, 2018.
- MAGRIN, G. O. et al. Central and South America Coordinating Lead Authors : Lead Authors : Contributing Authors : Review Editors : [s.l: s.n.]. v. Central an
- MAPBIOMAS. Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo no Brasil.
- MAPBIOMAS. MINERAÇÃO, coleção 7. Disponível em: <<https://mapbiomas.org/download>>.
- MCCABE, M. F.; WOOD, E. F. Scale influences on the remote estimation of evapotranspiration using multiple satellite sensors. *Remote Sensing of Environment*, v. 105, n. 4, p. 271–285, 2006.

- MHAWEJ, M.; FADEL, A.; FAOUR, G. Evaporation rates in a vital lake: a 34-year assessment for the Karaoun Lake. *International Journal of Remote Sensing*, v. 41, n. 14, p. 5321–5337, 2020.
- MOURA, M. M. et al. Relation of El Niño and La Niña phenomena to precipitation, evapotranspiration and temperature in the Amazon basin. *Science of the Total Environment*, v. 651, p. 1639–1651, 2019.
- MYERS, L.; SIROIS, M. J. Spearman Correlation Coefficients, Differences between. *Wiley StatsRef: Statistics Reference Online*, p. 1–2, 2006.
- PETTITT, A. A Non-parametric to the Approach Problem. *Applied Statistics*, v. 28, n. 2, p. 126–135, 1979.
- PINTO, E. et al. Estimation of missing hydrological data in monthly rainfall series using meteorological satellite data. *Environmental Earth Sciences*, p. 1–9, 2021.
- PITA, R. C. DOS S. et al. Sistema aquífero Alter do Chão a oeste da cidade de Manaus (AM): processos hidrogeoquímicos, origem da salinidade e relações com aquíferos adjacentes. *Geologia USP. Série Científica*, v. 18, n. 1, p. 273–296, 2018.
- PROBST, B. et al. Impacts of a large-scale titling initiative on deforestation in the Brazilian Amazon. *Nature Sustainability*, 2020.
- QU, L. et al. El Niño-Driven Dry Season Flushing Enhances Dissolved Organic Matter Export From a Subtropical Watershed. *Geophysical Research Letters*, v. 47, n. 19, p. 1–10, 2020.
- R, R. C. T. *A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna. Disponível em: <<https://www.r-project.org/>>.
- RIO GRANDE DO SUL. Manual de conservação do solo. 1979. ed. Rio Grande do Sul: [s.n.].
- RIZZO, R. et al. Land use changes in Southeastern Amazon and trends in rainfall and water yield of the Xingu River during 1976–2015. *Climatic Change*, v. 162, n. 3, p. 1419–1436, 2020.
- RONDHI, M. et al. Agricultural land conversion, land economic value, and sustainable agriculture: A case study in East Java, Indonesia. *Land*, v. 7, n. 4, 2018.
- SALACK, S. et al. Scales for rating heavy rainfall events in the West African Sahel. *Weather and Climate Extremes*, v. 21, n. May, p. 36–42, 2018.
- SARTORI, A. A. DA C.; DA SILVA, R. F. B.; ZIMBACK, C. R. L. Combinação linear ponderada na definição de áreas prioritárias à conectividade entre fragmentos florestais em ambiente SIG. *Revista Arvore*, v. 36, n. 6, p. 1079–1090, 2012.
- SCOPESE, C. et al. Land capability classification of Vernazza catchment , Cinque Terre National Park , Italy. *Journal of Maps*, v. 16, n. 2, p. 357–362, 2020.

- SHARMA, T.; SINGH, O. Soil erosion susceptibility assessment through geo-statistical multivariate approach in Panchkula district of Haryana, India. *Modeling Earth Systems and Environment*, v. 3, n. 2, p. 733–753, 2017.
- SILVA, S. S. DA et al. Burning in southwestern Brazilian Amazonia, 2016–2019. *Journal of Environmental Management*, v. 286, n. March, 2021.
- SOARES, A. S. D.; DA PAZ, A. R.; PICCILLI, D. G. A. Avaliação das estimativas de chuva do satélite TRMM no Estado da Paraíba. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 21, n. 2, p. 288–299, 2016.
- SODRÉ, G. R. C. et al. Cálculo de risco e detecção de queimadas: uma análise na Amazônia Oriental. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais (Online)*, n. 49, p. 1–14, 2018.
- STAAL, A. et al. Feedback between drought and deforestation in the Amazon. *Environmental Research Letters*, v. 15, n. 4, 2020.
- TADESSE, L. et al. Land use and land cover changes and Soil erosion in Yezat Watershed, North Western Ethiopia. *International Soil and Water Conservation Research*, v. 5, n. 2, p. 85–94, 2017.
- TOLLEFSON, J. Brazil's presidential election could savage its science (vol 562, pg 171, 2018). *Nature*, v. 562, n. 7727, p. 321, 2018.
- UFV, U. F. DE V.; UFMG, U. F. DE M. G.; RENOVA, F. Metodologia de priorização: Definição de critérios de priorização de áreas para recuperação ambiental na bacia do Rio Doce Produto 3.2 Universidade Federal de Viçosa, , 2018.
- ULIANA1*, E. M. et al. Análise de tendência em séries históricas de vazão e precipitação: uso de teste estatístico não paramétrico. *Revista Ambiente e Água*, v. 9, n. 3, p. 445–458, 2014.
- VICENTE-SERRANO, S. M.; BEGUERÍA, S.; LÓPEZ-MORENO, J. I. A multiscale drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, v. 23, n. 7, p. 1696–1718, 2010.
- WEI, X. et al. Identification of the interactions and feedbacks among watershed water-energy balance dynamics, hydro-meteorological factors, and underlying surface characteristics. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, v. 35, n. 1, p. 69–81, 2021.
- WICKHAM, H. et al. dplyr: A Grammar of Data Manipulation. R package version. [s.l.: s.n.].
- ZEMP, D. C. et al. Deforestation effects on Amazon forest resilience. *Geophysical Research Letters*, v. 44, n. 12, p. 6182–6190, 2017.
- ZHAO, J. et al. Copula-Based Abrupt Variations Detection in the Relationship of Seasonal Vegetation-Climate in the Jing River Basin, China. *Remote Sensing*, v. 11, n. 13, p. 1628, 2019.

4 CAPÍTULO 2

AVANÇO DA MINERAÇÃO SOBRE O AQUÍFERO ALTER DO CHÃO NA REGIÃO AMAZÔNICA BRASILEIRA

4.1 RESUMO:

A extração mineral na região Aquífero Alter do Chão é algo que preocupa, uma vez que processos agressivos ao meio ambiente podem desestabilizar os ecossistemas a nível nacional, regional e mundial, tendo em vista a importância e a influência exercida pela floresta amazônica no regime das chuvas. Além das questões ambientais, essa região possui cerca de 424 áreas indígenas catalogadas, o que aumenta a sua complexidade. Diante disso, o presente estudo foi desenvolvido com o objetivo de avaliar a evolução do processo de mineração em uma das principais regiões do planeta, bem suas consequências para os povos indígenas e para o ecossistema. Para a realização do estudo foram utilizados os dados da área minerada, obtidos do projeto MapBiomass e dos processos minerários do Brasil, os quais estão disponibilizados no sistema SIGMINE, sendo então realizados dois testes estatísticos: Pettitt e Spearman. Com os testes estatísticos, utilizando-se os dados do portal SIGMINE, observou-se uma tendência de aumento na exploração mineral ao longo da série histórica de 1998 a 2021, aumento acima de oito vezes em área minerada. Com o crescimento da mineração, povos indígenas foram afetados com o surgimento de doenças e contaminações, entre outros problemas, decorrentes dos resíduos provenientes do processo de minerário. Dentro da região de estudo cita-se os Borari como exemplo. Há ainda, sobre a região do Alter do Chão, áreas a serem mineradas que estão em processo de licenciamento e de pesquisa e que juntas representam mais do que o dobro da área que já se encontra em uso. Importante destacar que em decorrência das limitações das bases de dados, o presente estudo não contabilizou as áreas que possuem mineração ilegal, mesmo sendo de conhecimento que as mesmas existem e que afetam diretamente todo o meio. O presente estudo demonstrou o quanto a mineração vem crescendo na região e o quanto ela afeta o meio ambiente, comprovado pelo Balanço Hídrico Climatológico, podendo trazer ainda mais impactos em anos futuros.

Palavras-chave: Aquífero Alter do Chão; Mineração Região amazônica; Povos indígenas.

4.2 ABSTRACT:

The Alter do Chão Aquifer, located in the Brazilian Amazon region, is known by its water and mineral abundance, has an area of approximately 437,500 km². Mineral extraction in the region is something of concern, since processes that are aggressive to the environment can destabilize ecosystems at national, regional, and global levels, in view of the importance and influence exerted by the Amazon rainforest on the rainfall regime. In addition to environmental issues, the study region has about 424 cataloged indigenous areas, which increases its complexity. Therefore, the present study aimed to analyze the mining process in one of the main regions of the planet, confronting this process with the consequences for indigenous people and the ecosystem. To carry out the study, data from the mined area were used, obtained from the MapBiomias project and from mining processes in Brazil, which are available in the SIGMINE system, and then two statistical tests were carried out: Pettitt and Spearman. With the statistical tests, using data from the SIGMINE portal, there was an upward trend in mineral exploration over the historical series from 1998 to 2021, with a breaking point in 2009, the period with the highest growth in extraction, representing a more than eightfold increase in mined area. With the growth of mining, indigenous people were affected and began to suffer from the lack of food, the appearance of diseases and contamination, among other problems resulting from waste from the mining process. In the study region we can mention the Borari. There are still areas to be mined in the Alter do Chão region, which are in the process of licensing and research and which together represent more than twice the area already in use. It is important to highlight that due to the limitations of the databases, the present study did not count the areas that have illegal mining, even though it is known that they exist and that they directly affect the entire environment. The present study demonstrated how much mining has been growing in the region and how much it affects the environment, which can bring even more long-term impacts if not developed in a conscious and responsible way.

Keywords: Alter do Chão aquifer; Mining in the Amazon region; Indian tribes.

4.3 INTRODUÇÃO

A região Amazônica Brasileira apresenta uma abundante biodiversidade, que a coloca em posição de destaque aos olhos do mundo, tendo em vista sua riqueza hídrica, ecológica e mineral, além de sua importância climatológica global (BAKER; SPRACKLEN, 2019; CELENTANO et al., 2017).

Nessa região encontra-se o mais importante sistema aquífero da Província Hidrogeológica Amazonas, o aquífero Alter do Chão, cujo destaque se dá não somente pela abundância hídrica, mas também pela abundância mineral (DE BAKKER et al., 2021a; HENRICH DE AZEVEDO; GUIMARÃES CAMPOS, 2021).

O aumento na exploração de recursos naturais na região interfere diretamente na sustentabilidade do meio ambiente, o que tem gerado preocupação em termos ecossistêmicos (BONG et al., 2018; LIU, 2018; SILVA JUNIOR et al., 2020). Com o aumento da exploração mineral há, por consequência, o aumento do desmatamento. Esse desmatamento na região amazônica, contribui para intensificação dos eventos extremos críticos a nível regional e nacional (BATALHA et al., 2018; ZEMP et al., 2017).

Com esse desmatamento e essa alteração no regime de chuvas, há um desequilíbrio no ciclo ambiental da região como um todo, que pode ser visualizado por meio do Balanço Hídrico Climatológico, que corresponde à diferença entre a precipitação e a evapotranspiração (UFV; UFMG; RENOVA, 2018).

Essa alteração do regime de chuvas, aliada a falta de tecnologias e ao uso de técnicas inadequadas nos processos de extração mineral, têm causado sérios problemas ambientais relacionados à erosão e destruição da paisagem original por meio de agentes químicos, biológicos e físicos (DA SILVA et al., 2020).

Como fato relevante e agravante, mesmo não tendo sido considerado no presente estudo, a mineração ilegal pode afetar a saúde da população, tendo em vista os riscos presentes em possíveis contaminações com rejeitos dispensados em uma região tão rica hidricamente, citando-se por exemplo a contaminação com mercúrio (DE BAKKER et al., 2021a).

Segundo GARRETT et al. (2021), desastres ambientais como o rompimento de barragens com resíduos tóxicos provenientes de extrações minerais atingem, diretamente, comunidades locais que necessitam do meio para a sua sobrevivência. No caso particular da região amazônica, essas comunidades assumem maior importância, pelo fato de muitas delas serem de povos indígenas.

A região possui a maior concentração de povos indígenas do país, das 726 áreas indígenas catalogadas ao longo de todo o território, 424 estão localizadas na região, representando 98,25% de toda a extensão territorial indígena brasileira (ISA, 2022). Essa população vem, ao longo do tempo, sofrendo com descasos governamentais, isolamento territorial e com contaminações por mercúrio provenientes, em sua maioria, por garimpos (PESTANA et al., 2022; RICARDO; GONGORA, 2019; VILLÉN-PÉREZ et al., 2022).

Em contrapartida, a mineração, quando bem realizada, levando-se em consideração a legislação vigente e suas respectivas permissões (BECKER et al., 2019; FRANÇA PIMENTA et al., 2021), pode se tornar fator indutor do desenvolvimento socioeconômico de uma região, ou de um país (FOO; BLOCH; SALIM, 2017).

Diante deste cenário, o presente estudo foi desenvolvido com o objetivo de avaliar a evolução do processo de mineração entre 1985 e 2021 em uma das regiões mais importantes do planeta, a região do aquífero Alter do Chão da Amazônia Brasileira, confrontando esse processo com as suas consequências hídricas para o meio ambiente, considerando-se o Balanço Hídrico Climatológico, e para os povos indígenas por meio de uma análise bibliográfica.

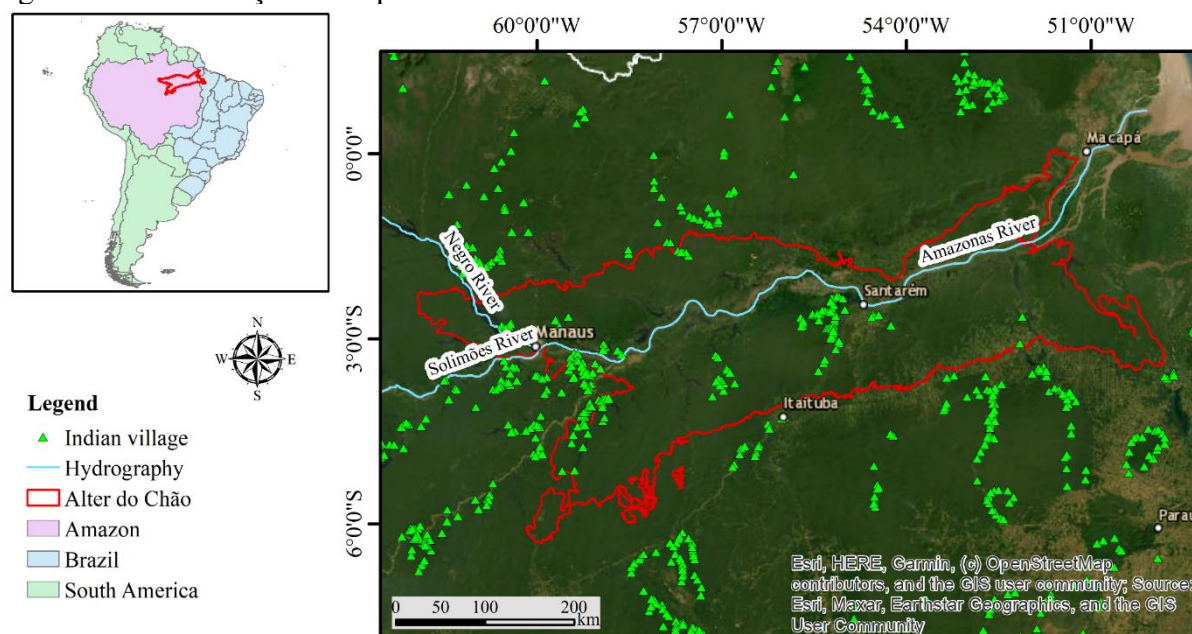
4.4 MATERIAL E MÉTODOS

4.4.1 Área de estudo

O Aquífero Alter do Chão () é considerado um dos mais importantes aquíferos brasileiros. Está situado na região Amazônica e possui área de aproximadamente 437.500 km² (BORGES, 2021), sendo o segundo maior reservatório de água subterrânea do país, atrás apenas do sistema Aquífero Guarani.

O solo da área de estudo é composto por rochas sedimentares com grande volume de intrusões, constituída por argilas, siltes e areias, predominando os arenitos, geralmente tabulares, com estratificação cruzada acanalada e laminação cruzada (PITA et al., 2018).

Figura 4-1. Localização do Aquífero Alter do Chão.



Fonte: Autor

Mesmo sendo uma região rica em recursos hídricos superficiais, a região amazônica pertencente ao território brasileiro, apresenta uma grande dependência dos recursos subterrâneos. Aproximadamente 59% das áreas urbanas da região são abastecidas pelas águas do aquífero em questão, em função dos altos custos de implantação de sistemas de tratamento de água e a menor qualidade das águas superficiais (HENRICHS DE AZEVEDO; GUIMARÃES CAMPOS, 2021; IV, 2015). Tomando-se como exemplo a capital Manaus, cerca de 40% de sua população é abastecida pelas águas provenientes do Aquífero Alter do Chão (BORGES, 2021).

Além da riqueza hídrica, a região amazônica também apresenta-se como possuidora de uma grande riqueza mineral, a qual vem sendo explorada de forma acelerada ano após ano, com destaque para a extração de ouro (MANZOLLI et al., 2021). Segundo MAPBIOMAS (2021), três de cada quatro hectares minerados no Brasil estavam na região Amazônica, 93,7% da área total destinada ao garimpo brasileiro está concentrada na região e quando o assunto é mineração industrial, a região responde por 49,2% da extração total nacional, sendo estes dados referentes ao ano de 2020.

A área estudada apresenta em média uma precipitação de 2.300 mm/ano, sendo uma região afetada por diversos fatores físicos e dinâmicos, como por exemplo as zonas de convergência intertropical e atlântica (DA SILVA et al., 2019).

Quando nos referimos à temperatura média da área estudada, devemos nos atentar que a região amazônica vem sofrendo, ao longo dos anos, uma grande variação, com aumento na temperatura média (TAYLOR et al., 2017).

Em relação à formação sedimentar do Aquífero Alter do Chão, o mesmo é composto, em sua maioria, por solo do tipo Latossolo Vermelho-Amarelo e Argissolo Vermelho-Amarelo. O solo da área de estudo é composto por rochas sedimentares com grande volume de intrusões, constituídas por argilas, siltes e areias, com predominância de arenitos, que atua como uma espécie de esponja, armazenando água subterrânea, geralmente tabulares, com laminação cruzada canelada e laminação cruzada (PITA et al., 2018).

4.4.2 Base de dados

A base de dados de mineração utilizada no estudo foi obtida nos portais MAPBIOMAS (MAPBIOMAS, 2023b) coleção 7, para os anos de 1985 e 2020, e SIGMINE (AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO, 2023) para os anos de 1955 a 2023.

Ambos portais foram utilizados com o intuito de se complementarem. Os dados do SIGMINE são catalogados por órgãos governamentais, apresentam a área e a localização das minas bem como os tipos de minérios lavrados e as áreas com potencial de mineração, ou seja, áreas que ainda não possuem extração, mas que no futuro podem vir a possuir (AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO, 2023). Os dados fornecidos pelo portal MapBiomias fornecem regiões em que há a ocorrência do processo de extração em si, além de serem dados que podem sofrer com a limitação do satélite Landsat (CHEN et al., 2021).

O mapeamento das unidades de conservação da região de estudo foi obtido junto ao Cadastro Nacional de Unidades de Conservação, disponibilizado pelo Ministério do Meio Ambiente (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2019).

As áreas das terras indígenas e a localização das mesmas na região de estudo foram obtidas através da Fundação Nacional dos Povos Indígenas (FUNAI) (FUNAI, 2023a, 2023b).

Para a estimativa do Balanço Hídrico Climatológico foram utilizados dados de precipitação, obtidos do Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) e do Global Precipitation Measurement (GPM), uma vez que o TRMM teve a sua missão finalizada no ano de 2015, e de evapotranspiração, obtidos do produto MODIS MOD16A3 V006 com um pixel de 500x500 m, levando-se em consideração a série histórica de 2000 a 2019.

4.4.3 Análise metodológica

Na análise dos dados de uso e ocupação do solo e dos processos minerários da região, buscou-se verificar a influência das áreas de mineração sobre o Balanço Hídrico Climatológico (obtido no primeiro artigo desta dissertação) e os povos indígenas.

4.4.3.1 Mineração

A partir dos dados do MAPBIOMAS foram computados para cada ano, entre 1985 e 2020, a área total minerada e os tipos de minérios extraídos. A taxa de variação da área de mineração foi calculada considerando a diferença de área entre os anos. Também foi feita uma análise do entorno das áreas de mineração, considerando o uso do solo prévio à mineração, mudanças nos corpos hídricos e as unidades de conservação.

Utilizando-se os dados do portal SIGMINE, foram contabilizadas para cada ano, entre 1998 e 2021, a área total minerada, a área total de ouro minerada e as áreas já disponíveis a serem mineradas que ainda não possuem mineração em atividade. Esses dados foram contabilizados, a fim de permitir uma análise sobre um possível aumento da mineração na região de estudo.

Salienta-se a importância do complemento de informações obtido com a utilização de ambos os portais, além de se pressupor maior riqueza de detalhes com a utilização do SIGMINE, uma vez que o mesmo é documentado e de caráter governamental.

Os dados de mineração foram sobrepostos aos dados de unidades de conservação, aos dados de localização e às áreas das aldeias indígenas. Além disso, também foi analisado para as áreas de mineração o Balanço Hídrico Climatológico, descrito na seção 2.2.3.2.

Para a visualização, contabilização e localização dos dados, utilizou-se o software QGIS 3.22.

4.4.3.2 Balanço Hídrico Climatológico

O Balanço Hídrico Climatológico (BHC) foi obtido pela diferença entre as entradas (precipitação) e as saídas (evapotranspiração) de acordo com metodologia utilizada por (UFV; UFMG; RENOVA, 2018), segundo a Equação 1. Esse BHC levou em consideração somente as áreas mineradas disponibilizadas pelo portal SIGMINE, fornecedor de dados documentados por

órgãos governamentais, o que tende a proporcionar mais precisão e confiança sobre os mesmos, dentro do Aquífero Alter do Chão.

$$\text{BHC} = \text{P} - \text{ET} \quad (1)$$

em que:

BHC = Balanço Hídrico Climatológico (mm ano^{-1});

P = Precipitação (mm ano^{-1}); e

ET = Evapotranspiração (mm ano^{-1}).

Para a análise dos dados de precipitação foi utilizado o produto TRMM/GPM 3B43, tendo-se como suporte o Google Earth Engine. Esse produto representa a intensidade média da chuva em cada mês em uma escala de 25x25 km. Para a conversão dos dados então obtidos em dados de precipitação total anual, a intensidade média de cada mês foi multiplicada pelo número de horas de cada mês e, posteriormente, os valores de precipitação de cada mês (mm/mês) foram somados para obter a precipitação total anual (mm/ano). Este procedimento foi realizado utilizando-se o software Rstudio (R, 2023).

Aos dados de evapotranspiração (mm.ano^{-1}), obtidos através do produto MODIS MOD16A3 V006, foi realizado um pré-processamento, a fim de se retirar áreas que não possuíam dados de evapotranspiração, como por exemplo regiões de solo exposto, área urbana entre outras. Após essa etapa, uma correção de escala foi realizada utilizando-se um fator de escala correspondente a 0,1, o qual é indicado pelo MODIS para o produto utilizado.

4.4.3.3 Tendência

A fim de se verificar a existência de tendência nos dados, um teste estatístico de tendência foi realizado para as áreas mineradas, disponibilizadas pelo portal SIGMINE, e para o Balanço Hídrico Climatológico. Os testes de Pettitt e o de Spearman foram aplicados levando-se em consideração duas variáveis, as áreas mineradas e os anos, a fim de se confirmar uma possível tendência entre ambas. Para ambos os testes se considerou o nível de confiança igual a 5% de probabilidade.

O teste de Pettitt é utilizado para identificar mudanças abruptas em uma série de dados. Se caracteriza por ser um teste não paramétrico que vem sendo amplamente utilizado em séries hidroclimáticas e de mudanças de uso do solo (PETTITT, 1979). Alguns exemplos de trabalhos

que utilizaram o teste de Pettitt para mudanças de uso do solo foram: Das; Banerjee (2021), Souza et al., (2023) e Sousa et al., (2023).

O teste de Spearman, por sua vez, é utilizado como um complemento para o teste de Pettitt, uma vez que verifica a força de associação entre os itens. Apresenta uma correlação entre duas variáveis de +1 a -1, sendo que quanto mais perto o valor encontrado for dos extremos, mais forte é a correlação entre as variáveis. Valores positivos significam aumento de tendência, enquanto que valores negativos significam não tendência (MYERS; SIROIS, 2006).

Para a realização de ambos os testes utilizou-se o software R Project for Statistical Computing, com os seguintes pacotes: *readxl* (Wickham H, Bryan J, 2023), *trend* (Thorsten Pohlert, 2023), *Kendall* (McLeod A.I, 2023) e *dplyr* (Wickham H, François R, Henry L, Müller K, 2023), (R, 2023).

4.4.3.4 Povos indígenas

A partir do banco de dados foram identificados e localizados os povos indígenas pertencentes à região amazônica. Com essa informação, para as aldeias localizadas próximas ou dentro da área do Aquífero Alter do Chão, determinou-se a distância das mesmas em relação à hidrografia e às áreas de mineração. Esse procedimento foi realizado utilizando-se o software QGIS 3.22.

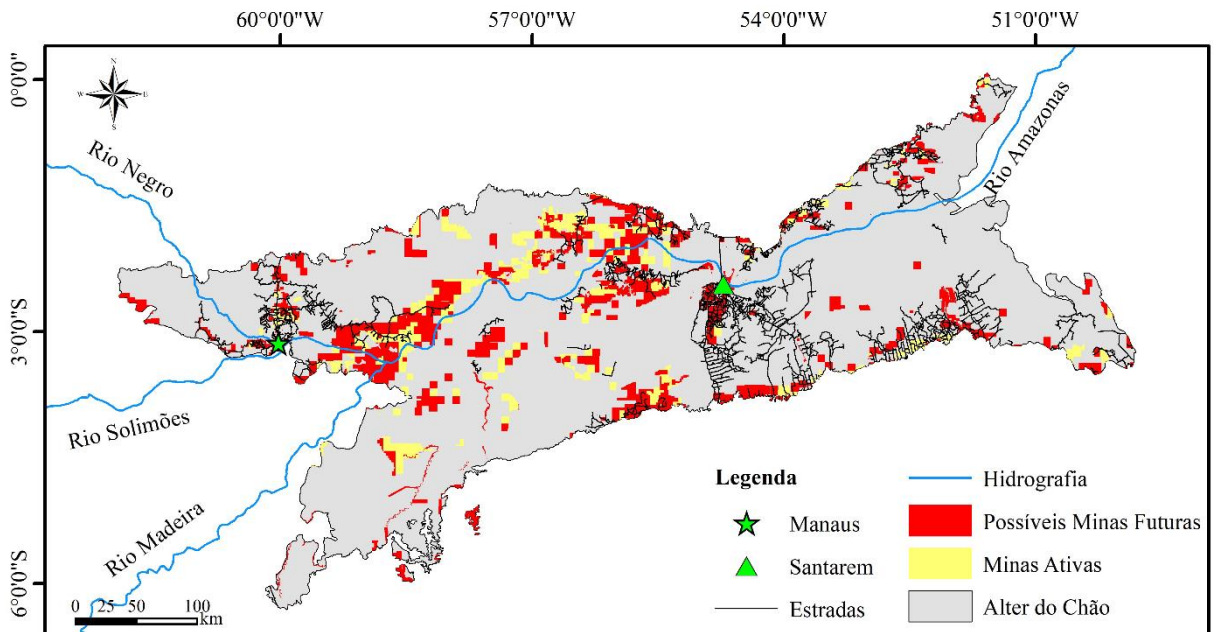
Diante dessa identificação, foi realizada uma revisão bibliográfica sobre o impacto da mineração sobre os povos indígenas para essa região. Foram utilizadas como palavras chave: “aldeias indígenas na região do Alter do Chão”, “o processo de mineração sobre povos indígenas na região Amazônica”, “as consequências da busca por ouro sobre povos indígenas no aquífero Alter do Chão”, sendo selecionados 24 artigos e registros sobre a situação das aldeias indígenas próximas ou que se encontram dentro da área de estudo, os quais foram avaliados, julgados em relação à sua relevância e importância para o presente trabalho, avaliados em relação ao ano de publicação, considerados apenas trabalhos publicados de 2019 em diante, sendo então alocados dentro do item discussão.

4.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.5.1 Mineração no Aquífero Alter do Chão

Na Figura 4-2 apresentam-se as áreas mineradas e as possíveis de serem mineradas na região do Aquífero Alter do Chão, de acordo com os dados do portal SIGMINE.

Figura 4-2. Áreas com atividade de mineração e as possíveis de serem mineradas segundo dados do SIGMINE.



Fonte: Autor

De acordo com os dados fornecidos pelo portal SIGMINE, as áreas possíveis de serem mineradas totalizam 3.888.432,9 ha, o que equivale a 11,25% da área total do Aquífero Alter do Chão. Essas áreas consideram aquele que estão em fase de pesquisa, de autorização de pesquisa, de direito de requerimento da lavra, de licenciamento, de requerimento de lavra, de requerimento de lavra garimpeira e de requerimento de registro de extração. Salienta-se que toda essa área se apresenta como uma possibilidade de mineração, haja visto que todos os trâmites devem ser realizados e as atividades em si elaboradas.

Quando comparamos os dados presentes com os possíveis dados futuros, fornecidos pelo portal SIGMINE, dentro da região do Aquífero Alter do Chão, ou seja, 1.934.356 ha de área já minerada até o ano de 2021, Figura 4-3B, com os 3.888.432,9 ha de área a serem

mineradas, nos deparamos com uma perspectiva de duplicação da mesma. Ou seja, a área em processo para ser minerada é o mais que o dobro da área que já está em uso.

Há ainda que se salientar, que os dados obtidos neste estudo não contabilizam garimpos ilegais, uma vez que o MapBiomas utiliza imagens do Landsat com resolução espacial de 30x30m que possui como limitação a não classificação de áreas menores a 900 m² (CHEN et al., 2021; LI et al., 2019; MURAD; PEARSE, 2018; ZHOU; ZHONG, 2020). Quando nos referimos ao portal SIGMINE, por ser um portal governamental, o mesmo trabalha com dados reais e legais, o que o torna incapaz de contabilizar regiões em que a extração ocorre de forma ilegal (AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO, 2023).

Embora não tenha sido contabilizada nesse estudo, é de conhecimento a existência de garimpos ilegais na região amazônica como um todo (BUAH, 2021; DA SILVA et al., 2020; ETTEIEB et al., 2020). Há, com constância, ações de apreensão e prisões realizadas pela Funai, pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente (Ibama), e pela Força Nacional de segurança Pública com apreensões de aeronaves, tratores, mecanização para garimpo, combustíveis e estrutura de apoio ao garimpo em regiões proibidas para tal, como por exemplo em terras indígenas ou áreas de preservação (DANTAS, 2022; MEDEIROS; LIMA, 2023).

Na Figura 4-3 apresenta-se a área total minerada no aquífero Alter do Chão em diferentes anos, utilizando-se como base os dados dos portais MapBiomas e SIGMINE. Nesta figura se observa uma grande diferença entre os dados provenientes dos dois portais, algo que já esperado, haja vista a diferença de análise de ambos que, diante disso podem se complementar. O portal SIGMINE leva em consideração toda a área já concedida para o processo de mineração, enquanto o MapBiomas leva em consideração apenas a região onde se há, efetivamente, o processo de extração de minério.

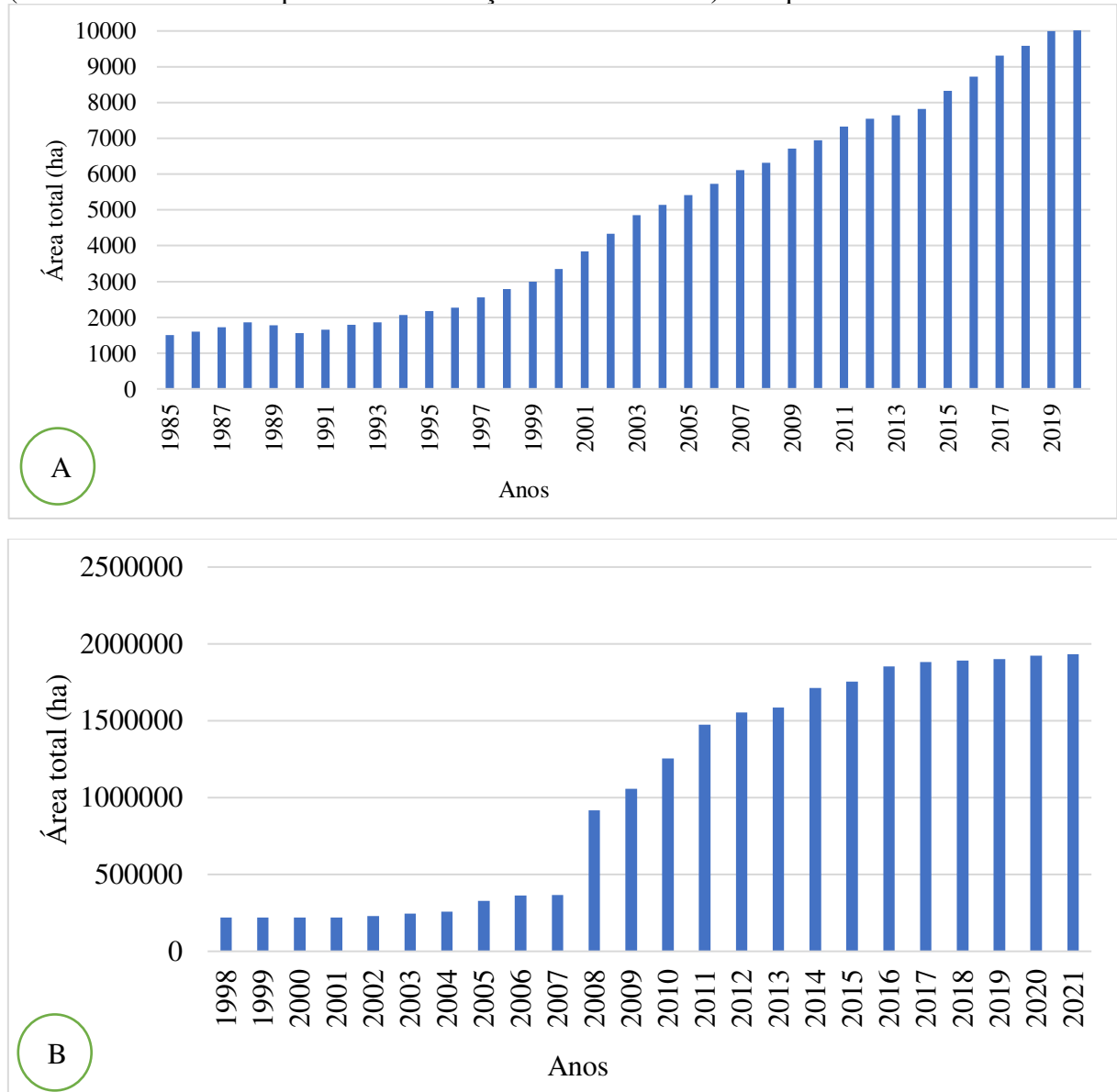
O portal SIGMINE apresenta dados históricos desde 1955, porém nesse estudo utilizou-se como início 1998, uma vez que de 1955 a 1998 não existia uma sequência anual de dados, o que impossibilitaria a utilização dos mesmos para as análises estatísticas. O portal MapBiomas por sua vez apresenta dados desde 1985.

A Amazônia concentra a maior porção de área minerada em processo de extração (garimpo e mineração industrial) do país 72,5%. O estado do Pará, que abrange grande parte do aquífero Alter do Chão, é o líder em área minerada no país, com mais de 110.000 ha (MAPBIOMAS, 2021).

Apesar de todos os impactos ambientais que podem ser advindos do processo de mineração, este setor é fundamental para a economia do país, devido ao volume de recursos

gerados e pela alta dos preços das commodities desde 2003, mesmo que represente cerca de 3% do PIB nacional, pressupondo benefícios econômicos, como por exemplo, a arrecadação tributária, geração de empregos, e desenvolvimento para a região (SANTOS; CASTRO; CUTRIM CARVALHO, 2022).

Figura 4-3. Área total de mineração: a) Mapbiomas (extração em processo); e b) SIGMINE (área documentada em processo de extração e a ser extraída) no aquífero Alter do Chão.



Fonte: Autor

Dentro do estudo em questão há dois tipos de mineração: o garimpo e a mineração industrial. O garimpo é uma forma mais “simples” de mineração, nele há um baixo nível de

mecanização, sendo quase sempre associado a mão de obra não especializada, em um ambiente com pouca ou nenhuma infraestrutura permanente (MAPBIOMAS, 2021).

A mineração industrial, por sua vez, se caracteriza pelo emprego de um alto nível de mecanização e estrutura ao longo de todo o processo, seja na extração, no transporte e no processamento do material, além de se constituir com uma mão de obra especializada e com operações a longo prazo (MAPBIOMAS, 2021).

No Aquífero Alter do Chão, durante os anos de 1985 a 2020, houve um aumento expressivo da área total minerada (mais de seis vezes) considerando o garimpo e a mineração industrial (Figura 4-3a). Quando se analisa os dados provenientes do portal SIGMINE, esse crescimento foi ainda superior, em torno de oito vezes, passando de 220.057 ha para 1.934.356 ha.

O teste de Pettitt para a análise da tendência do processo de mineração obteve um p -valor de 0,000353, o que caracterizou a série como possuidora de tendência de crescimento, uma vez que o p -valor foi menor que 0,05. A análise visual do crescimento da mineração evidenciada na Figura 4-3b corrobora o resultado apontado pelo teste de Pettitt. Além disso, o teste também demonstrou um ponto de ruptura no ano de 2009, algo também de acordo com o gráfico Figura 4-3b, período em que o processo de mineração apresentou um aumento elevado do número de área. Corroborando com o teste de Pettitt, a análise de Spearman obteve o valor de 0,03157.

O Aquífero Alter do Chão possui 8.398.686,52 ha destinados a unidades de conservação (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2019). Ao analisar a posição do crescimento da mineração, nota-se o avanço da mineração em unidades de conservação. Em 1985 duas unidades de conservação possuíam áreas de mineração. A Floresta Nacional de Pau Rosa possuía 0,54 ha de mineração não identificada, enquanto a Floresta Nacional de Sacará-Taquera possuía 1.058,46 ha de mineração industrial de alumínio.

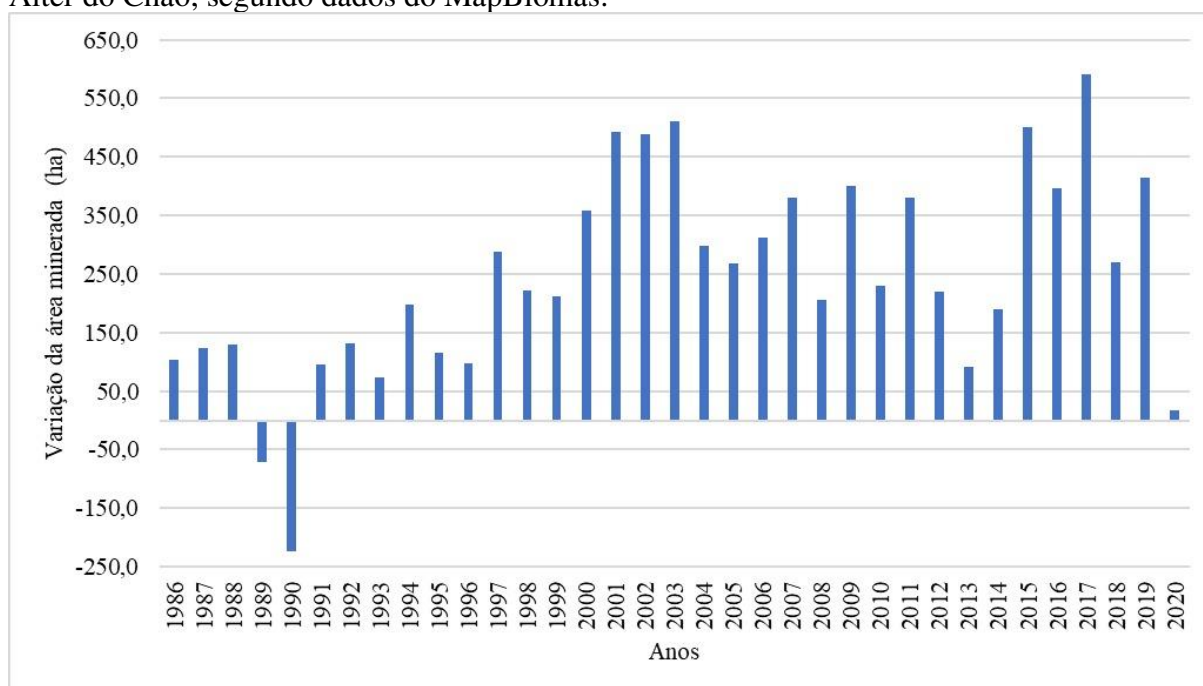
A partir de 2020, mais duas unidades de conservação são afetadas pela mineração: a Floresta Nacional de Pau Rosa com 3,12 ha; a Sacará-Taquera, com 290 ha; e a Amaná com 9,80 ha de garimpo. Nota-se que a área minerada dentro da Floresta Nacional de Sacará-Taquera reduziu em mais de três vezes, em contrapartida houve o aumento da área minerada nas outras duas unidades de conservação.

A área minerada anualmente no aquífero Alter do Chão é bastante variável ao longo do tempo (Figura 4-4). Durante os anos de 1988 e 1990 houve uma redução de 295,0 ha de área minerada na região. Uma das causas para a redução da área de mineração nesse período poderia

ser um reflorestamento ou enquadramento em outro uso da área em questão. Deve-se lembrar que no período desses anos a qualidade das imagens Landsat não eram satisfatórias em comparação às atuais, podendo ter existido erros de classificação no período, conforme explicam ZHOU; ZHONG, (2020); LI et al., (2019) e CHEN et al., (2021).

No entanto, considerando a série utilizada (1985 a 2020), predomina a variação positiva da área ano após ano, evidenciando, desta forma, um crescimento contínuo ao longo da série histórica, destacando-se como período de maior crescimento o ano de 2017 (591,1 há) e de menor crescimento 2020 (16,44 ha).

Figura 4-4. Variação anual, em hectares, da área minerada entre 1985 e 2020 para o aquífero Alter do Chão, segundo dados do MapBiomias.



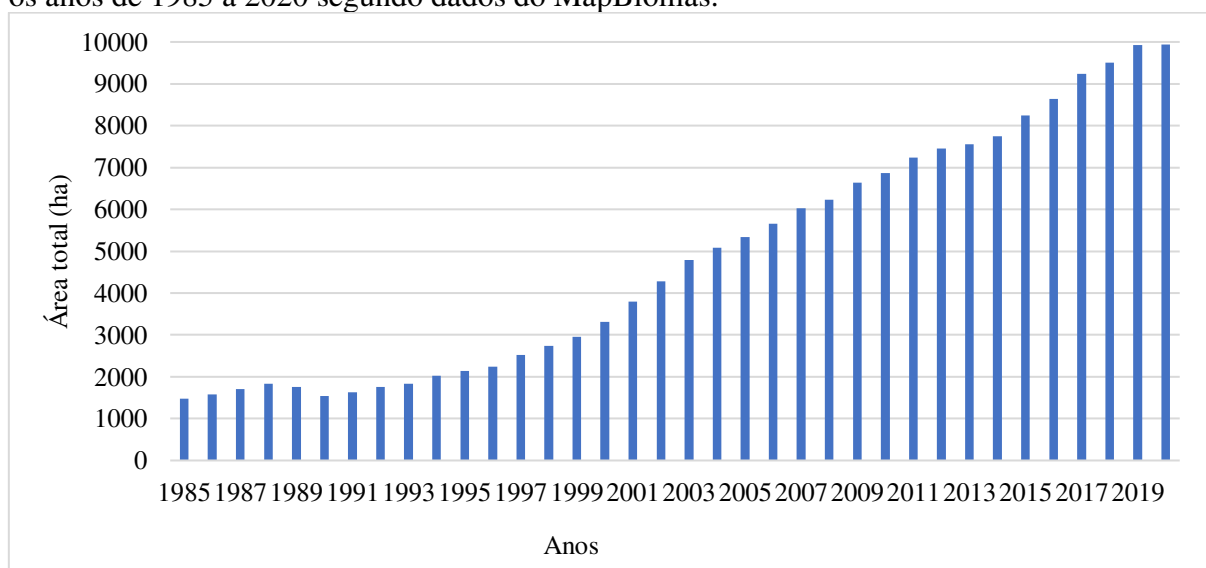
Fonte: Autor

Dentre as explorações minerais no aquífero Alter do Chão, têm-se a mineração industrial superando em área o garimpo. A principal mineração industrial da região é a mineração de alumínio (9.940,95 ha), seguida pelo garimpo não metálico (39,64 ha), metálico (13,77 ha) e outras (3,12 ha) conforme dados do portal MapBiomias.

Apresenta-se na Figura 4-5 a área de extração de alumínio ao longo da série histórica 1985 a 2020. Ressalta-se que a mineração industrial apresenta papel significativo no crescimento e desenvolvimento econômico da região, contrapondo-se aos impactos à saúde e à segurança da população (MOHSIN et al., 2021).

Em 2021, por exemplo, o recolhimento tributário proveniente deste setor possuiu um aumento em cerca de 62%, em nível nacional, assinalando mais de 200 mil empregos diretos, correspondendo a cerca de 80% do saldo comercial brasileiro. Tomando-se o estado do Pará como exemplo, houve um aumento de faturamento de 51% com o setor, o que representou maior riqueza financeira para a região (SERVIÇOS E INFORMAÇÕES DO BRASIL, 2022).

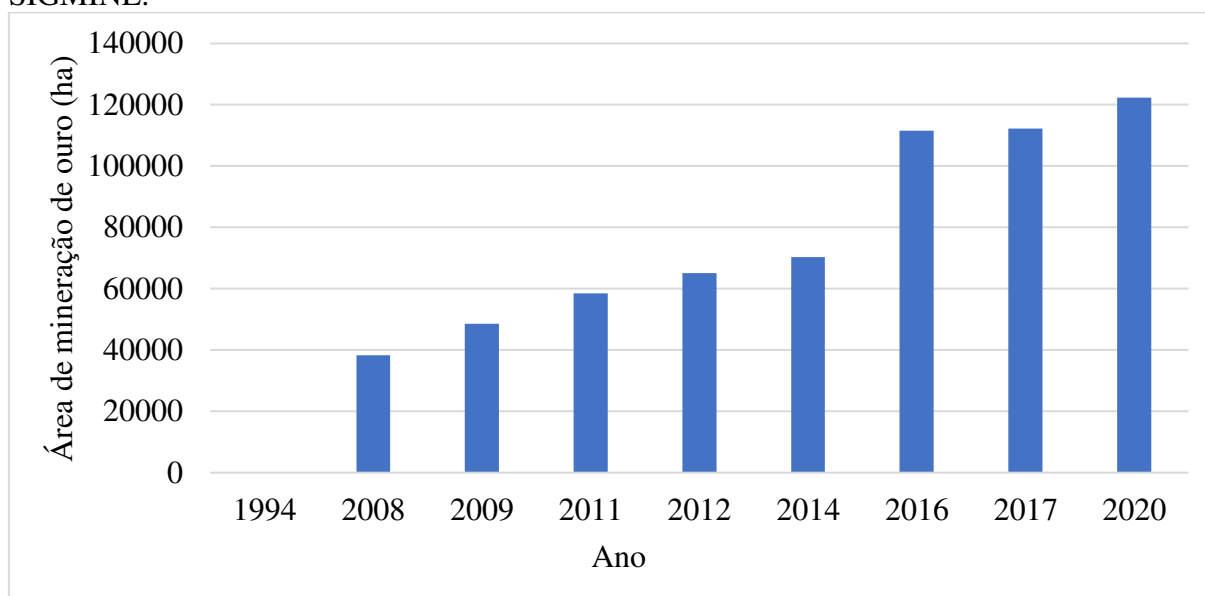
Figura 4-5. Área de mineração industrial de alumínio na região do aquífero Alter do Chão entre os anos de 1985 a 2020 segundo dados do MapBiomias.



Fonte: Autor

Destaca-se que a mineração de ouro só foi identificada a partir de 1994, com pouco mais de 5 ha, um valor quase que imperceptível, como apresentado na Figura 4-6. Desde seu início em 1994, a área de extração apresenta aumento expressivo, saindo de 5,22 ha para 122.285 há em 2020, demonstrando a intensa busca por ouro na região.

Figura 4-6. Mineração de ouro na região do aquífero Alter do Chão, segundo dados do SIGMINE.



Fonte: Autor

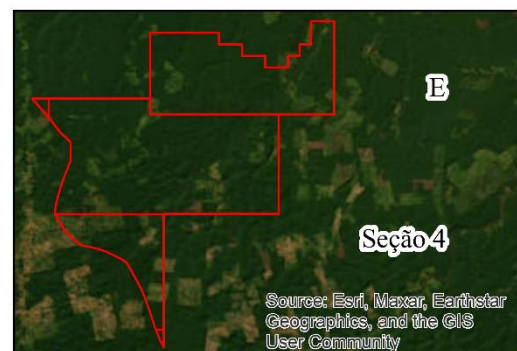
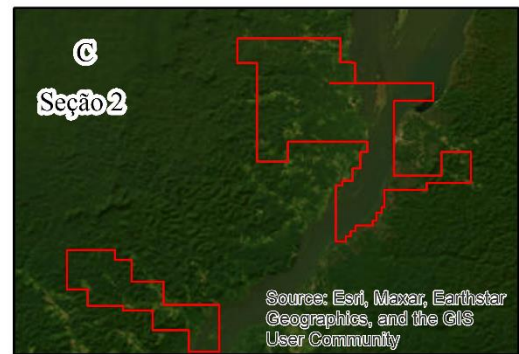
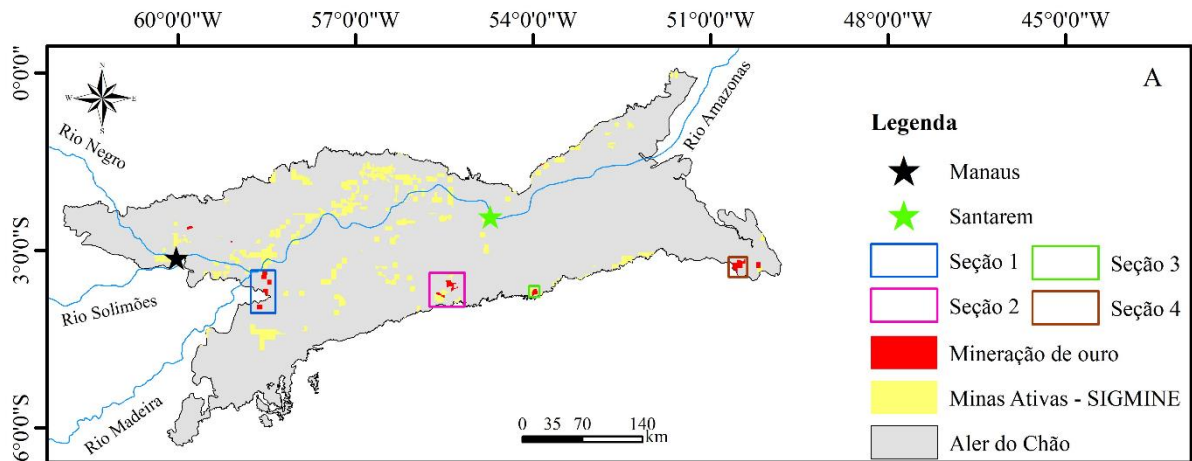
Quando se reporta sobre a mineração de ouro na Figura 4-7, destaca-se o lado negativo deste processo de mineração, uma vez que o processo de extração de ouro é o maior responsável por contaminação de águas por mercúrio em todo o mundo (VELÁSQUEZ RAMÍREZ et al., 2021).

A contaminação por mercúrio gera grandes riscos para a saúde, como leve retardo mental, infarto agudo do miocárdio e hipertensão, gerando prejuízos econômicos que podem chegar a US\$ 400.000 por quilograma de ouro extraído (DE BAKKER et al., 2021b). A população humana apresenta grande vulnerabilidade quando em contato com o elemento mercúrio, seja esse contato direto, ingestão de alimentos ou de água contaminada, ou indireto, contato superficial sem a ingestão interna (MARTÍNEZ-SALCIDO et al., 2018).

Outro fator importante, quando nos referimos à contaminação por mercúrio, é o fato de que ela é provida, em sua maioria, por meio de extração artesanal, também denominada ilegal, uma vez que, nesse tipo de extração, cuidados com a segurança e com o manejo da atividade são deixados em segundo plano (RIAZ et al., 2019).

Na Figura 4-7 observa-se, com a ampliação das áreas onde há a mineração de ouro, que a área disponível para o processo minerário é bem maior do que a área em que de fato há o processo de mineração em execução, ou seja, efetivamente a área explorada é muito menor do que a área potencial de exploração, comprovando o que já foi discutido anteriormente.

Figura 4-7. Área de mineração do ouro dentro do Aquífero Alter do Chão de 1955 a 2023 segundo dados do SIGMINE.



Fonte: Autor

4.5.2 Análise do Balanço Hídrico Climatológico

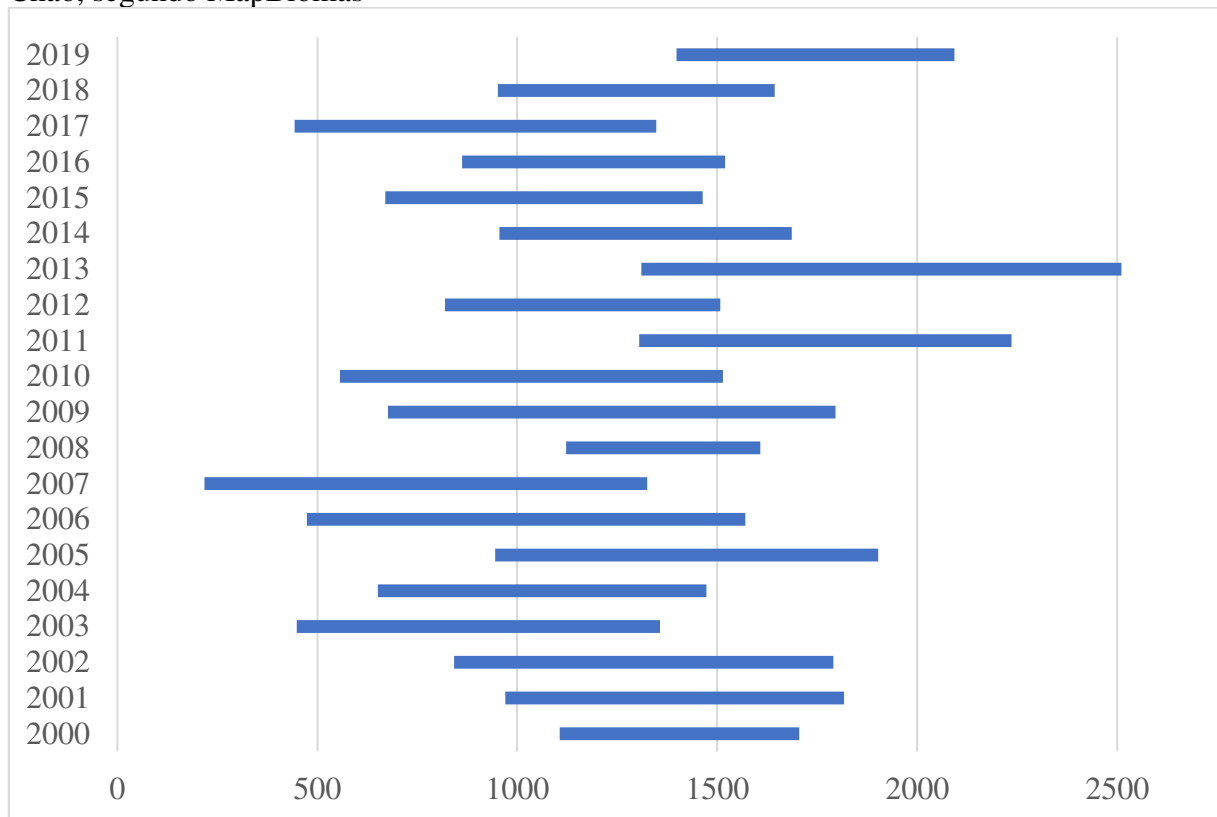
Levando-se em consideração a área minerada em si, utilizando-se o projeto Mapbiomas, observa-se que o Balanço Hídrico Climatológico não apresentou valores negativos, Figura 4-8, ou seja, a evapotranspiração se apresentou sempre menor em relação a precipitação.

Essa ocorrência pode ter como justificativa a falta de vegetação em regiões que estão sendo mineradas, haja visto as drásticas mudanças no meio ambiente em decorrência do processo minerário (RENTIER; CAMMERAAT, 2022). A vegetação, por sua vez, se apresenta

como um dos fatores de grande importância para o processo de evapotranspiração (STAAL et al., 2020).

Outra justificativa para os valores observados é a de que precipitação em solos descobertos rapidamente promove a quebra dos agregados de solo, causando compactação da camada superficial do solo, reduzindo assim, sua capacidade de infiltração (PRUSKI, 2009). Com essa redução, há por consequência o aumento do escoamento superficial direto que se apresenta como principal gerador de erosão hídrica, transporte de sedimentos e contaminação de corpos de água. O escoamento superficial direto representa perda de água para o sistema, o que torna essa água não contabilizada no cálculo do balanço hídrico (MELLO; SILVA; BESKOW, 2020).

Figura 4-8. Balanço Hídrico Climatológico para regiões mineradas dentro do Aquífero Alter do Chão, segundo MapBiomás



Fonte: Autor

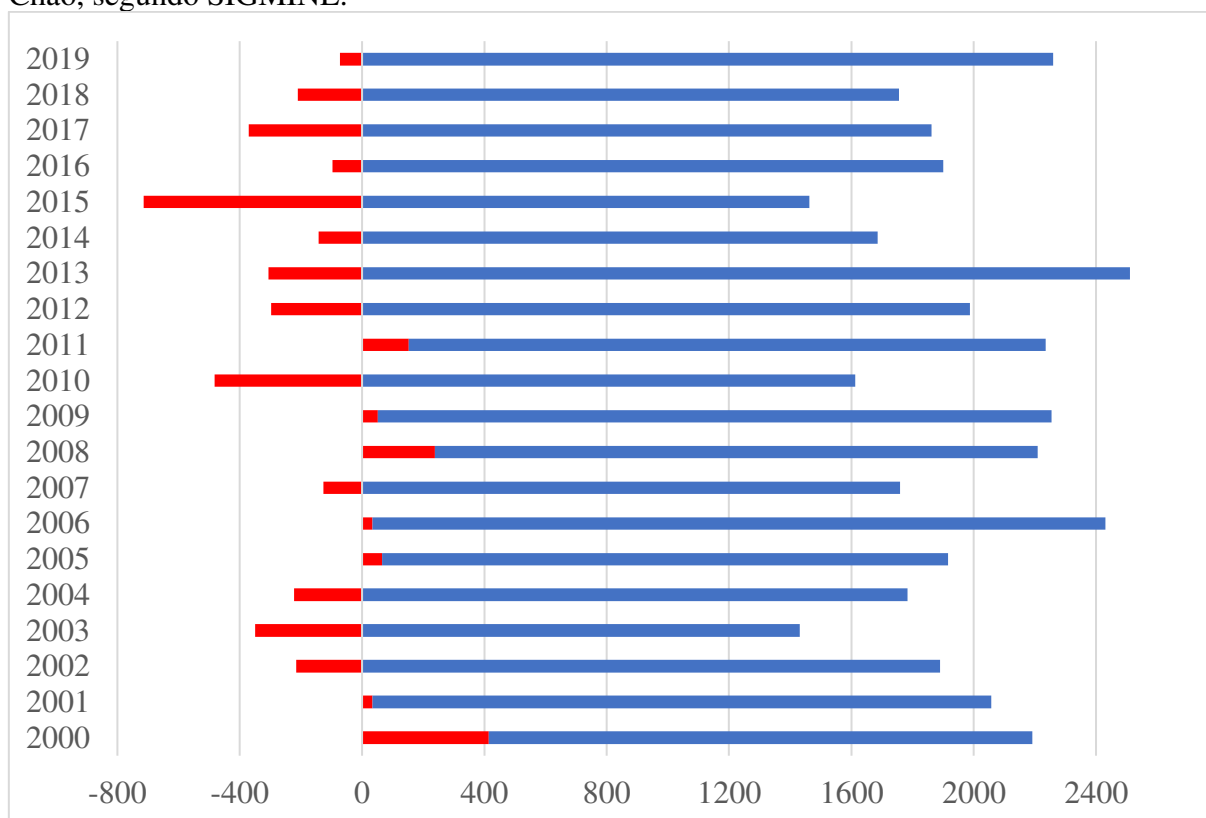
O Balanço Hídrico Climatológico do Aquífero Alter do Chão, utilizando-se o projeto SIGMINE, é apresentado na Figura 4-9, onde se observam valores negativos em determinados anos, ou seja, existem áreas em que há maior evapotranspiração do que precipitação, como pode

ser visualizado na Figura 4-10, considerando-se o ano inicial da série e o ano que apresentou maior déficit hídrico (2015).

Nota-se, pelos dados obtidos, que, ao longo dos dez primeiros anos da série histórica (2000 a 2009), houve quatro anos com regiões em déficit, ou seja, 40%. Em contrapartida, ao longo dos dez anos restantes (2010 a 2019) esse número saltou para nove, representando 90% desse recorte, destacando-se o ano de 2015 como ano com maior déficit hídrico ao longo da série.

Essa constatação nos permite inferir que, ao longo dos anos da série histórica analisada, houve um aumento da ocorrência de déficit hídrico dentro da região do aquífero Alter do Chão, sendo que esse aumento pode estar associado ao aumento do processo de mineração na mesma, vide Figura 4-3b, e também a fatores climáticos como o El Niño entre outros.

Figura 4-9. Balanço Hídrico Climatológico para regiões mineradas dentro do Aquífero Alter do Chão, segundo SIGMINE.



Fonte: Autor

Essa análise se apresenta surpreendentemente, uma vez que a região amazônica, como um todo, é caracterizada por ser uma região rica em quantidade de água precipitada, em média

2.300 mm/ano (DA SILVA et al., 2019), o que torna o resultado negativo algo inimaginável e, ao mesmo tempo, preocupante tendo em vista a importância regional e global da região (GARRETT et al., 2021).

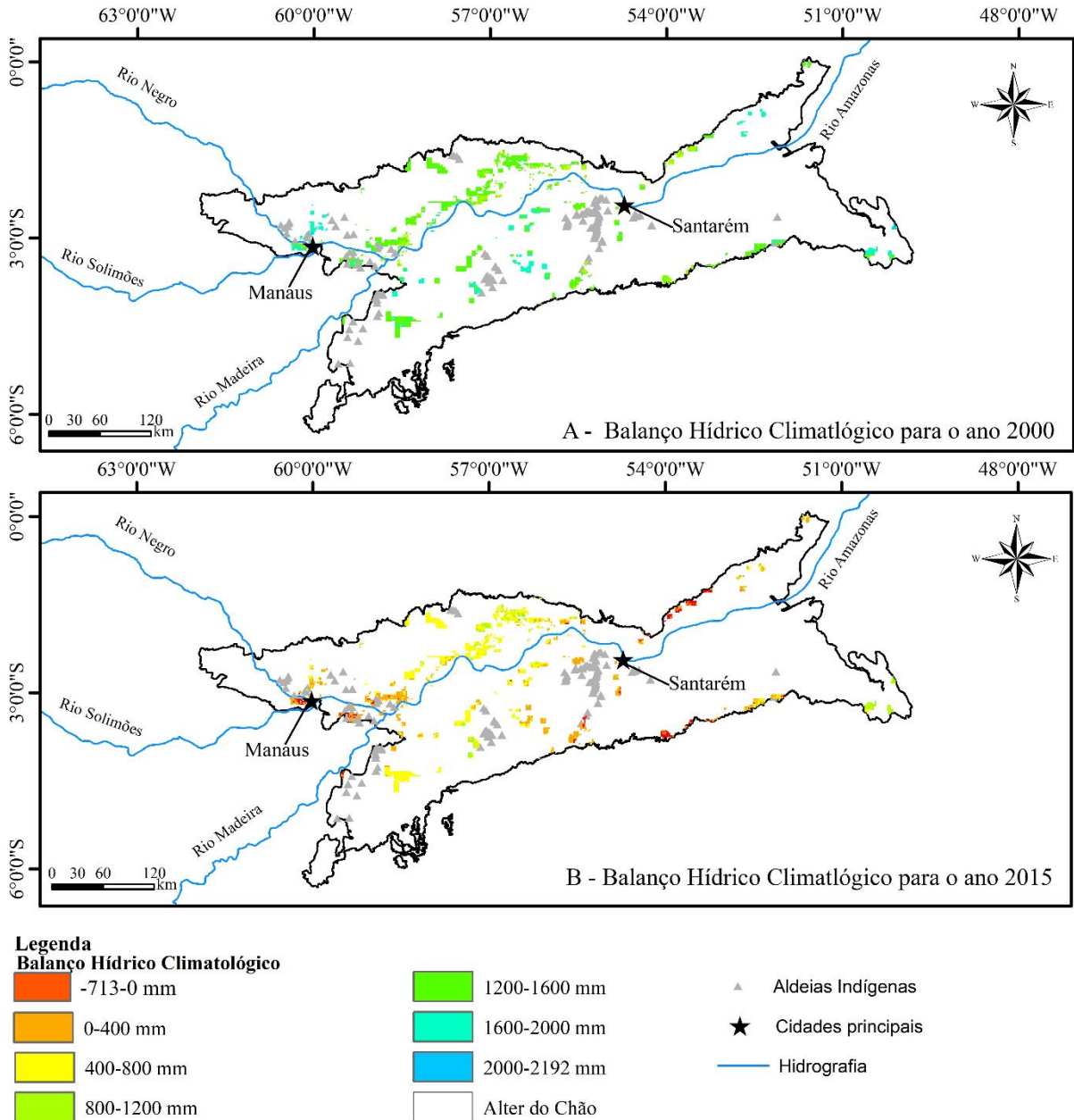
Esses valores negativos podem ser explicados pela interferência humana sobre a floresta. Regiões em que há processo minerário são, em sua maioria, compostas por um vasto desmatamento, o que promove uma série de consequências ou alterações ao meio ambiente como um todo, alterando clima, intensidade e quantidade de chuvas, ciclo atmosférico, temperatura ambiente entre outros (BAKER; SPRACKLEN, 2019; BRANDO et al., 2020; CAVALCANTE et al., 2019; CHADDAD et al., 2022; DE MORAES et al., 2020; GARRETT et al., 2021; PROBST et al., 2020; WANG; LIU; JIN, 2018).

Uma análise de tendência foi realizada para a série de dados do Balanço Hídrico Climatológico 2000 a 2019, sendo utilizado os testes de Pettitt e Spearman. Para a série em questão, o teste de Pettitt apresentou valor de 0,7129, o que demonstra que não há tendência na série.

Dessa forma, mesmo diante da preocupação externada com os dados obtidos através do PBHC, não há, estatisticamente, como garantir que haverá um aumento no processo de déficit hídrico, valor negativo para o PBHC, na região do aquífero Alter do Chão, mesmo sabendo que há tendência de aumento do processo minerário, conforme apresentado na Figura 4-3b.

Na Figura 4-10 observa-se o aumento do déficit hídrico nas áreas em que há extração mineral dentro do aquífero Alter do Chão, pegando-se como parâmetros o ano inicial da série (2000) e o ano em que houve maior déficit hídrico (2015), vide Figura 4-9. Observa-se que no ano inicial não houve nenhuma região minerada com déficit hídrico, algo totalmente oposto ao ano de 2015 em que várias regiões em que há extração mineral apresentaram valores negativos para o PBHC.

Figura 4-10. Balanço Hídrico Climatológico com base nos dados do SIGMINE para os anos de 2000 e 2015

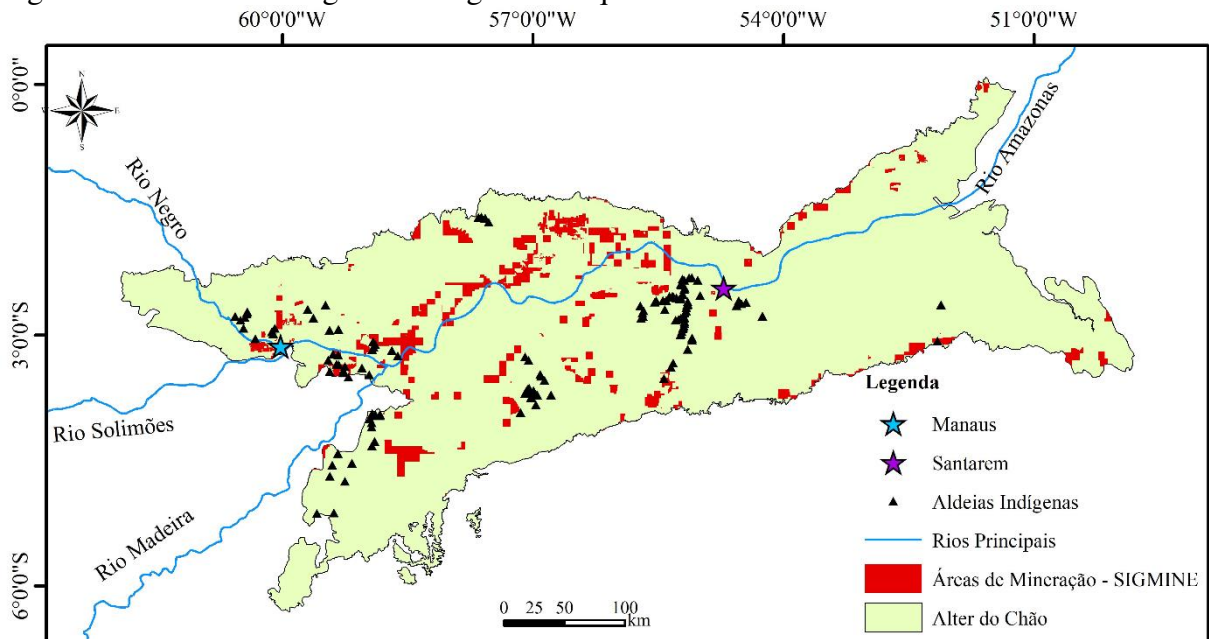


Fonte: Autor

4.5.3 Análise do impacto da mineração sobre os povos indígenas considerando-se uma revisão bibliográfica

Na Figura 4-11 apresenta-se a localização de aldeias indígenas na região do Aquífero Alter do Chão (DAMASIO, 2022), com destaque para importantes rios da região, como o Solimões, o Madeira e o Negro, que desembocam, já dentro do Aquífero Alter do Chão, em outro rio de imensa importância, o rio Amazonas.

Figura 4-11. Aldeias indígenas na região do Aquífero Alter do Chão.



Fonte: Autor

Em decorrência da licença política concedida aos garimpeiros, órgãos que seriam responsáveis pela fiscalização e cuidado para com o meio ambiente, como o Instituto de Proteção Ambiental do Amazonas (IPAAM), se tornaram alvos de ações judiciais por concederem, de forma desenfreada e ilegal, diversas licenças de extração de ouro, um dos principais causadores da contaminação das águas amazônicas (DANTAS, 2021).

Como consequência da mineração, terras indígenas foram desmatadas, fauna e flora destruídas, tendo como consequência a destruição de recursos alimentares e medicinais, peixes foram contaminados, doenças, como a covid-19, foram disseminadas pelo contato próximo ao homem branco (CAPASSO PALAMIM; MARQUES ORTEGA; LIMA MARSON, 2020; FERRANTE; FEARNSSIDE, 2020; SANTOS et al., 2021), salientando-se que povos indígenas, normalmente, não possuem a imunidade presente na sociedade como um todo. Esse conjunto de fatores anuncia, para os povos indígenas, uma catástrofe iminente (ANGELO, 2020; DA CRUZ et al., 2021; FERNÁNDEZ-LLAMAZARES et al., 2020; QUIJANO VALLEJOS et al., 2020; RICARDO; GONGORA, 2019; SIQUEIRA-GAY et al., 2020).

Após a assinatura do projeto de lei 191/2020, pelo então presidente brasileiro Jair Bolsonaro, que permitia mineração em terras indígenas, que até então eram consideradas áreas de proteção, geraram-se graves problemas aos povos indígenas como um todo, que passaram a

conviver com as adversidades oriundas do garimpo (SIQUEIRA-GAY et al., 2020; VILLÉN-PÉREZ et al., 2022).

Ao se falar sobre a região do aquífero Alter do Chão, pode-se citar, dentre outras aldeias, a tribo Borari, localizada nas proximidades da cidade de Santarém (FUNAI, 2023a). Povos indígenas se utilizam da floresta para o seu desenvolvimento, uma vez que é da floresta que são retirados alimentos para consumo como frutas e peixes, plantas medicinais, que atuam como verdadeiros mecanismo de defesa contra doenças, o que mantém a sobrevivência desses povos (OLIVEIRA; BRAGA, 2017).

Observa-se ainda, dentro da região do aquífero Alter do Chão, que as áreas ao entorno às aldeias indígenas da região vêm apresentando, ao longo dos anos, um déficit hídrico, segundo BHC, como demonstrado pela Figura 4-10. Esse déficit pode comprometer o acesso à água potável, a alimentos, comprometendo todo o meio ambiente que circunda as aldeias apresentadas.

Contribuindo para o agravamento da situação, a contaminação das águas por rejeitos, como exemplo o mercúrio, acaba por isolar os indígenas (DANTAS, 2021; GARCIA, 2021; PESTANA et al., 2022). A captação ou acesso a uma fonte de água limpa é algo essencial para o desenvolvimento da vida humana. Em áreas de difícil acesso, e por tal, propensas ao desenvolvimento de atividades ilegais ou artesanais, o controle da qualidade da água se torna um grande desafio (BERNALTE et al., 2020).

4.6 CONCLUSÕES

A partir da análise dos resultados pode-se concluir que:

- No período estudado, houve um aumento de mais de oito vezes da área minerada sobre o Aquífero Alter do Chão, consequência do desenvolvimento e aumento de pesquisas na região, descobrindo-se novas minas e desenvolvendo esse setor, comercialmente, na mesma.
- A área com potencial a ser minerada é mais que o dobro da área já minerada, o que contribui para a constatação de que o processo de extração na região irá apresentar um crescimento ao longo dos anos.
- Há uma tendência de crescimento da mineração ao longo dos anos de acordo com os testes estatísticos Pettitt e Spearman.
- O Balanço Hídrico Climatológico, para as regiões que possuem extração mineral e se localizam dentro do aquífero Alter do Chão, apresentou, em algumas áreas, valores

negativos, ou seja, regiões que se encontram com déficit hídrico, havendo mais evapotranspiração do que precipitação na mesma. Embora esses valores tenham sido encontrados, não há, de acordo com o teste de Pettitt, tendência de aumento desse déficit para as mesmas.

- Como houve aumento da mineração durante o período de análise e o PBHC não apresentou tendência significativa, pode-se concluir que, para o período analisado, o avanço da mineração na região do aquífero Alter do Chão ainda não interferiu/influenciou o PBHC da referida região.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. Sistema de Informações Geográficas da Mineração. Disponível em: <<https://geo.anm.gov.br/portal/apps/webappviewer/index.html?id=6a8f5ccc4b6a4c2bba79759aa952d908>>.
- ANGELO, M. Barrage of mining requests targets Brazil's isolated indigenous people. Disponível em: <<https://news.mongabay.com/2020/02/barrage-of-mining-requests-targets-brazils-isolated-indigenous-peoples/>>.
- BAKER, J. C. A.; SPRACKLEN, D. V. Climate Benefits of Intact Amazon Forests and the Biophysical Consequences of Disturbance. *Frontiers in Forests and Global Change*, v. 2, n. August, p. 1–13, 2019.
- BATALHA, M. S. et al. Effect of temporal averaging of meteorological data on predictions of groundwater recharge. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, v. 66, n. 2, p. 143–152, 2018.
- BECKER, F. G. et al. Anuário Mineral Brasileiro, Principais Substâncias Metálicas. *Brazilian Mineral Yearbook*, v. 5, n. 1, p. 42, 2019.
- BERNALTE, E. et al. Rapid and on-site simultaneous electrochemical detection of copper, lead and mercury in the Amazon river. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, v. 307, n. September 2019, p. 127620, 2020.
- BONG, C. P. C. et al. The role of smart waste management in smart agriculture. *Chemical Engineering Transactions*, v. 70, p. 937–942, 2018.
- BORGES, D. Aquífero Alter do Chão. Disponível em: <<https://conhecimentocientifico.com/aquifero-alter-do-chao/>>. Acesso em: 17 out. 2023.
- BRANDO, P. M. et al. The gathering firestorm in southern Amazonia. *Science Advances*, v. 6, n. 2, p. 1–9, 2020.
- BUAH, M. K. Assessing the Environmental Effects of Illegal Mining Activities on the Health of Individuals in Mining Communities in Ghana: A Case Study of Aboso, Samahu and Tarkwa. *University of Mines and Technology*, , 2021.
- CAPASSO PALAMIM, C. V.; MARQUES ORTEGA, M.; LIMA MARSON, F. A. COVID-19 in the Indigenous Population of Brazil. *Journal of Racial and Ethnic Health Disparities*, v. 7, n. 6, p. 1053–1058, 2020.

CAVALCANTE, R. B. L. et al. Opposite Effects of Climate and Land Use Changes on the Annual Water Balance in the Amazon Arc of Deforestation. *Water Resources Research*, v. 55, n. 4, p. 3092–3106, 2019.

CELENTANO, D. et al. Towards zero deforestation and forest restoration in the Amazon region of Maranhão state, Brazil. *Land Use Policy*, v. 68, n. July, p. 692–698, 2017.

CHADDAD, F. et al. Impact of mining-induced deforestation on soil surface temperature and carbon stocks: A case study using remote sensing in the Amazon rainforest. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 119, n. August, 2022.

CHEN, Y. et al. A practical approach to reconstruct high-quality Landsat NDVI time-series data by gap filling and the Savitzky–Golay filter. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 180, n. August, p. 174–190, 2021.

DA CRUZ, D. C. et al. An overview of forest loss and restoration in the Brazilian Amazon. *New Forests*, v. 52, n. 1, 2021.

DA SILVA, E. F. et al. Environmental impacts of sand mining in the city of Santarém, Amazon region, Northern Brazil. *Environment, Development and Sustainability*, v. 22, n. 1, p. 47–60, 2020.

DA SILVA, P. E. et al. Precipitation and air temperature extremes in the Amazon and northeast Brazil. *International Journal of Climatology*, v. 39, n. 2, p. 579–595, 2019.

DAMASIO, K. Bacia do Madeira é a mais biodiversa da Amazônia – e uma das mais ameaçadas. Disponível em: <<https://www.nationalgeographicbrasil.com/meio-ambiente/2022/04/bacia-do-madeira-e-a-mais-biodiversa-da-amazonia-e-uma-das-mais-ameacadas>>.

DANTAS, J. E. O avanço do garimpo: dragas e empurradores chegam a nova área de exploração no rio Madeira. Disponível em: <<https://www.greenpeace.org/brasil/blog/o-avanco-do-garimpo-dragas-e-empurradores-chegam-a-nova-area-de-exploracao-no-rio-madeira/>>.

DANTAS, J. E. Estrada ilegal ameaça povo isolado na Terra Indígena Yanomami. Disponível em: <https://www.greenpeace.org/brasil/blog/estrada-ilegal-ameaca-povo-isolado-na-terra-indigena-yanomami/?appeal=21057&utm_source=google&utm_medium=paid&utm_campaign=florestas&utm_content=aq_20230206_grants&utm_term=garimpo_ilegal&utm_campaign=&utm_source=adw>.

DAS, S.; BANERJEE, S. Investigation of changes in seasonal streamflow and sediment load in the Subarnarekha-Burhabalang basins using Mann-Kendall and Pettitt tests. *Arabian Journal of Geosciences*, v. 14, n. 11, 2021.

DE MORAES, J. R. DA S. C. et al. Performance of the ECMWF in air temperature and precipitation estimates in the Brazilian Amazon. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 141, n. 3–4, p. 803–816, 2020.

ETTEIEB, S. et al. Monitoring and analysis of selenium as an emerging contaminant in mining industry: A critical review. *Science of the Total Environment*, v. 698, p. 134339, 2020.

FERNÁNDEZ-LLAMAZARES, Á. et al. A State-of-the-Art Review of Indigenous Peoples and Environmental Pollution. *Integrated Environmental Assessment and Management*, v. 16, n. 3, p. 324–341, 2020.

FERRANTE, L.; FEARNSIDE, P. Protect Indigenous peoples from COVID-19 Ecosystem aridity and atmospheric CO₂. *Science*, v. 368, n. 6488, p. 5–7, 2020.

FRANÇA PIMENTA, A. A. et al. Social licence to operate model: Critical factors of social acceptance of mining in the Brazilian Amazon. *Resources Policy*, v. 74, n. February, p. 102237, 2021.

FUNAI. Aldeias Indígenas. Disponível em: <<https://geoserver.funai.gov.br/geoserver/web/wicket/bookmarkable/org.geoserver.web.demo.MapPreviewPage?1&filter=false>>.

FUNAI. Terras Indígenas Poligonais. Disponível em: <<https://geoserver.funai.gov.br/geoserver/web/wicket/bookmarkable/org.geoserver.web.demo.MapPreviewPage?1&filter=false>>.

GARCIA, R. 'Queimar balsas não vai acabar com o garimpo no Madeira', diz cientista.

GARRETT, R. D. et al. Forests and Sustainable Development in the Brazilian Amazon: History, Trends, and Future Prospects. *Annual Review of Environment and Resources*, v. 46, p. 625–652, 2021.

ISA (INSTITUTO SOCIOAMBIENTAL) POVOS INDÍGENAS NO BRASIL. Localização e extensão das Tribos Indígenas. Disponível em: <https://pib.socioambiental.org/pt/Localização_e_extensão_das_TIs>.

LI, H. et al. A Google Earth Engine-enabled software for efficiently generating high-quality user-ready Landsat mosaic images. *Environmental Modelling and Software*, v. 112, p. 16–22, 2019.

- LIU, Y. Introduction to land use and rural sustainability in China. *Land Use Policy*, v. 74, n. January, p. 1–4, 2018.
- MANZOLLI, B. et al. Legalidade da produção de ouro no Brasil. p. 18, 2021.
- MAPBIOMAS. MINERAÇÃO, coleção 7. Disponível em: <<https://mapbiomas.org/download>>.
- MAPBIOMAS BRASIL. Área ocupada pela mineração no Brasil cresce mais de 6 vezes entre 1985 e 2020. Disponível em: <<https://mapbiomas.org/area-ocupada-pela-mineracao-no-brasil-cresce-mais-de-6-vezes-entre-1985-e-2020>>.
- MAPBIOMAS, P. A Expansão da Mineração e do Garimpo no Brasil nos Últimos 36 anos. p. 1–18, 2021.
- MARTÍNEZ-SALCIDO, A. I. et al. Mercury Levels in Fish for Human Consumption from the Southeast Gulf of California: Tissue Distribution and Health Risk Assessment. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, v. 74, n. 2, p. 273–283, 2018.
- MEDEIROS, F.; LIMA, L. Começa a operação de desmonte do garimpo na TI Yanomami. Disponível em: <https://amazoniareal.com.br/desmonte-do-garimpo/?gad=1&gclid=CjwKCAjwo7iiBhAEEiwAsIxQEf7IiLWTqIPKc4p8WtbVP_W-a6bnDBSrVXCu3wbc3EfN-5nCOGkNxoCLmsQAvD_BwE>.
- MELLO, C. R. DE; SILVA, A. M. DA; BESKOW, S. Hidrologia de superfície: princípios e aplicações. 2. ed. Lavras: Editora UFLA, 2020.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Unidades de Conservação. Disponível em: <<https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/9407d38f-84d2-48ea-97dd-ee152c493043>>.
- MURAD, C. A.; PEARSE, J. Landsat study of deforestation in the Amazon region of Colombia: Departments of Caquetá and Putumayo. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, v. 11, p. 161–171, 2018.
- MYERS, L.; SIROIS, M. J. Spearman Correlation Coefficients, Differences between. *Wiley StatsRef: Statistics Reference Online*, p. 1–2, 2006.
- OLIVEIRA, P. C. DE; BRAGA, J. Ethnobotany of Borari-Arapiuns indigenous people, Amazon, Brazil. ~ 164 ~ *Journal of Medicinal Plants Studies*, v. 5, n. 1, p. 164–170, 2017.
- PESTANA, I. A. et al. Let's talk about mercury contamination in the Amazon (again): The case of the floating gold miners' village on the Madeira River.
- PETTITT. A Non-parametric to the Approach Problem. *Applied Statistics*, v. 28, n. 2, p. 126–135, 1979.

- PITA, R. C. DOS S. et al. Sistema aquífero Alter do Chão a oeste da cidade de Manaus (AM): processos hidrogeoquímicos, origem da salinidade e relações com aquíferos adjacentes. *Geologia USP. Série Científica*, v. 18, n. 1, p. 273–296, 2018.
- PROBST, B. et al. Impacts of a large-scale titling initiative on deforestation in the Brazilian Amazon. *Nature Sustainability*, 2020.
- PRUSKI, F. F. (ED. . Conservação de solo e água: práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica. 2. ed. Viçosa - MG: Universidade Federal de Viçosa, 2009.
- QUIJANO VALLEJOS, P. et al. Undermining Rights: Indigenous Lands and Mining in the Amazon. World Resources Institute, 2020.
- R, R. C. T. A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna. Disponível em: <<https://www.r-project.org/>>.
- RENTIER, E. S.; CAMMERAAT, L. H. The environmental impacts of river sand mining. *Science of the Total Environment*, v. 838, n. April, p. 155877, 2022.
- RIAZ, A. et al. Mercury Contamination in Water and Sediments and the Associated Health Risk: A Case Study of Artisanal Gold-mining. *Mine Water and the Environment*, v. 38, n. 4, p. 847–854, 2019.
- RICARDO, F. P.; GONGORA, M. F. (ORG. . Cercos E Indígenas Isolados Na Amazônia Registros Dos Povos Indígenas. p. 255, 2019.
- SANTOS, V. S. et al. COVID-19 mortality among Indigenous people in Brazil: a nationwide register-based study. *Journal of Public Health (United Kingdom)*, v. 43, n. 2, p. E250–E251, 2021.
- SERVIÇOS E INFORMAÇÕES DO BRASIL. Mineração tem saldo de US\$ 49 bilhões em 2021 e garante balança comercial positiva. Disponível em: <

SOUSA, L. F. DE et al. ASSESSMENT OF HYDROLOGICAL TRENDS AND CHANGES IN HYDROCLIMATIC AND LAND USE PARAMETERS IN A RIVER BASIN IN NORTHEAST BRAZIL. SSRN, 2023.

SOUZA, R. S. DE et al. Vegetation resilience prognosis : A past and future approach from hydrometeorological and remote sensing data for eight government regions of Rio de Janeiro , Brazil. *Arabian Journal of Geosciences*, p. 1–16, 2023.

STAAL, A. et al. Feedback between drought and deforestation in the Amazon. *Environmental Research Letters*, v. 15, n. 4, 2020.

TAYLOR, P. G. et al. Temperature and rainfall interact to control carbon cycling in tropical forests. *Ecology Letters*, v. 20, n. 6, p. 779–788, 2017.

UFV, U. F. DE V.; UFMG, U. F. DE M. G.; RENOVA, F. Metodologia de priorização: Definição de critérios de priorização de áreas para recuperação ambiental na bacia do Rio Doce Produto 3.2 Universidade Federal de Viçosa, , 2018.

VILLÉN-PÉREZ, S. et al. Mining threatens isolated indigenous peoples in the Brazilian Amazon. *Global Environmental Change*, v. 72, 2022.

WANG, Y.; LIU, Y.; JIN, J. Contrast effects of vegetation cover change on evapotranspiration during a revegetation period in the Poyang Lake Basin, China. *Forests*, v. 9, n. 4, p. 1–14, 2018.

ZEMP, D. C. et al. Deforestation effects on Amazon forest resilience. *Geophysical Research Letters*, v. 44, n. 12, p. 6182–6190, 2017.

ZHOU, F.; ZHONG, D. Kalman filter method for generating time-series synthetic Landsat images and their uncertainty from Landsat and MODIS observations. *Remote Sensing of Environment*, v. 239, n. March 2019, p. 111628, 2020.

5 CONCLUSÃO GERAL

O balanço hídrico climatológico na região do aquífero Alter do Chão não apresentou tendência ao longo dos anos, apesar de existirem locais que apresentam déficit hídrico, mesmo sendo a região de estudo uma região com alta pluviosidade média anual, o que prejudica a demanda hídrica da vegetação e da população. Muitos desses locais coincidem com locais onde há mineração em andamento, o que pode ser explicado pelo alto processo de desmatamento nessas regiões.

A área minerada, ao longo do período estudado, apresentou um aumento em mais de 8 vezes, o que representa um crescimento dessa atividade econômica ao longo dos anos, crescimento esse que tende a continuar, uma vez que a área a ser disponibilizada para o processo de mineração é mais que o dobro da área minerada atual.

Um alerta para mudanças climáticas precisa ser ativado com foco nas implicações do aumento da temperatura e da evapotranspiração. A presença de regiões com déficit hídrico em uma região rica em recursos naturais abre um leque de preocupação e exige ações de combate ao desmatamento.

Há também a preocupação com o impacto sobre as demais regiões do planeta, haja vista a importância da região amazônica para o clima global, uma vez que a mesma é responsável pelo ciclo de chuvas de diversas regiões e pela riqueza em biodiversidade.

Quando nos referimos às aldeias indígenas, observa-se que as mesmas devem ser assistidas, uma vez que sofrem com o crescimento da extração mineral na região, sofrendo com a disseminação de doenças, conflitos com garimpeiros, falta de alimentos e contaminação das águas, o que também afeta o meio ambiente como um todo.