

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS - UFMG
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS – IGC
Departamento de Geologia



**O DESAPARECIMENTO DA LAGOA DO SUMIDOURO: ANÁLISE DO
COMPORTAMENTO HIDROGEOLÓGICO DA LAGOA AO LONGO DOS
ÚLTIMOS 40 ANOS**

Autores: Caio Augusto Reis Macedo
Gabriel Costa Alvarez

Orientadora: Leila Nunes Menegasse Velásquez

Coorientadores: Rodrigo Sergio de Paula
Paulo César Horta Rodrigues

SETEMBRO DE 2021
BELO HORIZONTE

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS - UFMG
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS – IGC
Departamento de Geologia

**O DESAPARECIMENTO DA LAGOA DO SUMIDOURO: ANÁLISE DO
COMPORTAMENTO HIDROGEOLÓGICO DA LAGOA AO LONGO DOS
ÚLTIMOS 40 ANOS**

Autores: Caio Augusto Reis Macedo
Gabriel Costa Alvarez

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito para
obtenção do título de Bacharel,
pelo Curso de Geologia da
Universidade Federal de Minas
Gerais.

Orientadora: Leila Nunes Menegasse Velásquez

Coorientadores: Rodrigo Sergio de Paula

Paulo César Horta Rodrigues

SETEMBRO DE 2021
BELO HORIZONTE

“O nosso planeta é um grão solitário na imensa escuridão cósmica que nos cerca. Na nossa obscuridade, em toda esta vastidão, não há indícios de que vá chegar ajuda de outro lugar para nos salvar de nós próprios. A Terra é o único mundo conhecido, até hoje, que abriga vida. Não há outro lugar, pelo menos no futuro próximo, para onde a nossa espécie possa emigrar. Visitar, sim. Assentar-se, ainda não. Gostemos ou não, a Terra é onde temos de ficar por enquanto.”

Carl Sagan

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	11
RESUMO.....	12
ABSTRACT	13
APRESENTAÇÃO	14
1. INTRODUÇÃO.....	15
1.1 Caracterização da área	17
2. MATERIAIS E MÉTODOS	22
2.1 Análises Geoespaciais	22
2.2 Análises Hidrometeorológicas	25
3. RESULTADOS	32
3.1 Análises Geoespaciais	32
3.2 Análises Hidrometeorológicas	39
4. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	58
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	61
ANEXO I – SÉRIE HISTÓRICA DE IMAGENS DE SATÉLITE COM ESPELHO D'ÁGUA DEMARcado	66
APÊNDICE I – MÉTODO ABANDONADO PARA ELABORAÇÃO DO MODELO BATIMÉTRICO	89

ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo, a bacia do córrego Samambaia, onde está situada a Lagoa do Sumidouro. No mapa é possível ver em destaque o Rio das Velhas, nível de base regional e a malha urbana de Fidalgo, circundando a Lagoa do Sumidouro..... 15
- Figura 2 - Mapa hipsométrico e da área de estudo. Fidalgo, distrito de Pedro Leopoldo, está tem sua área urbana demarcada na porção norte da Bacia do Samambaia. MDE disponibilizado por © JAXA/METI ALOS PALSAR 2011. Acessado pelo portal ASF DAAC em 15 de março de 2021..... 19
- Figura 3 - Mapa geológico da área de estudo. Fidalgo, distrito de Pedro Leopoldo, tem sua área urbana demarcada na porção norte da Bacia do Samambaia. MDE disponibilizado por © JAXA/METI ALOS PALSAR 2011. Acessado pelo portal ASF DAAC em 15 de março de 2021. O mapa geológico foi realizado por Teixeira, Pena e Silva (2020)..... 21
- Figura 4 - Exemplo de delimitação do perímetro da Lagoa do Sumidouro a partir de imagens Landsat nas estações chuvosa de 1984-1985 (LANDSAT 3) e de estiagem de 1994-1995 (LANDSAT 5)..... 24
- Figura 5 - Localização das estações meteorológica e pluviométricas utilizadas neste trabalho. Nota-se a proximidade da Lagoa do Sumidouro em relação à estação Ponte Raul Soares..... 26
- Figura 6 - Possíveis curvas obtidas após a aplicação de um método de dupla massa para uma estação (na imagem referida como Posto Y) a ser consistida, baseando-se em uma estação conhecida (Posto X). Em (a) os dados são consistentes; em (b) os dados apresentam mudança de tendência pluviométrica; em (c) os dados são inconsistentes com possíveis erros de transcrição de registros; e em (d) os dados possuem diferentes regimes pluviométricos (Extraído de Paz (2004)..... 27
- Figura 7 - Diferença de resolução entre uma imagem do Google Satélite CNES Airbus de 2021 (superior) e uma do satélite LANDSAT 5 de 1997 (inferior). 32
- Figura 8 - Ilustração do processo de seleção de áreas estimadas mais aderentes (pontos em laranja) à linha de tendência para a Lagoa do Sumidouro durante a estação de estiagem, os quais correspondem a um perímetro/área, posteriormente avaliados como possíveis curvas-base para o modelo de batimetria. O maior perímetro/área (ponto em vermelho) também foi usado como possível curva-base..... 33
- Figura 9 - Ilustração do processo de seleção de áreas mais aderentes (pontos em laranja) à linha de tendência para a Lagoa do Sumidouro durante a estação chuvosa, os quais correspondem a um perímetro/área, posteriormente avaliados como possíveis

curvas-base para o modelo de batimetria. O maior perímetro/área (ponto em vermelho) também foi usado como possível curva-base.	33
Figura 10 - Os dois conjuntos de dados de partida para a geração dos modelos batimétricos gerados a partir da combinação de 11 curvas de nível (à esquerda) ou 7 (à direita) e do talvegue da Lagoa do Sumidouro. Cotas foram inferidas para cada uma das curvas base utilizadas, em três cenários de estimativa diferentes.	34
Figura 11 - Resultados para cada modelo e cenário obtidos para a batimetria da Lagoa do Sumidouro, cota em metros. Modelo 1, Cenário 1 (M1C1); Modelo 1, Cenário 2 (M1C2); Modelo 1, Cenário 3 (M1C3); Modelo 2, Cenário 1 (M2C1); Modelo 2, Cenário 2 (M2C2); Modelo 2, Cenário 3 (M2C3).....	36
Figura 12 - A comparação visual entre modelos batimétricos gerados mostrando um favorecimento do M2C2 em relação aos demais por ter o volume máximo mais próximo às médias especificadas.....	38
Figura 13 - Pluviometria e volumes recuperados da série histórica da Lagoa do Sumidouro. Nota-se a forte tendência de redução nos volumes da lagoa, visto que no presente momento esta se encontra num estágio de secas.	39
Figura 14 - Diagramas de dispersão (Scatterplot) e probabilidade (QQ-Plot) para as pluviometrias históricas da estação Pedro Leopoldo, tomando a estação Ponte Raul Soares como referência comparativa. Todos os valores plotados são pluviometrias anuais.....	40
Figura 15 - O resultado do método de dupla massa mostrou dados muito consistentes e de distribuição semelhante para a estação Pedro Leopoldo, corroborando para a escolha desta estação para a completação da série pluviométrica histórica da Lagoa do Sumidouro.	40
Figura 16 - Evolução dos valores pluviométricos anuais registrados na Estação Ponte Raul Soares entre 1972 e 2020, bem como o valor calculado para média harmônica anual, considerando o mesmo período.....	41
Figura 17 - Valores médios anuais de temperatura registrados na estação da Sete Lagoas entre 1972 e 2020.....	42
Figura 18 - Ciclos observados para a série pluviométrica histórica da Lagoa do Sumidouro. Em azul, ciclos chuvosos (azul escuro: valores que excedem a média histórica, azul claro: valores abaixo da média, mas que compõe um ciclo de altas pluviometrias). Em laranja, ciclos secos (laranja escuro: valores abaixo da média, laranja claro: valores acima da média, mas inseridos num ciclo de baixas pluviometrias).	44
Figura 19 - Separação da série histórica volumétrica de estações de estiagem para a Lagoa do Sumidouro. Para essa classificação foi usada a média da série como	

principal atributo de comparação, tendo como resultado sete ciclos de seca (laranja) e cheia (azul).....	45
Figura 20 - Separação da série histórica volumétrica de estações chuvosas para a Lagoa do Sumidouro. Para essa classificação foi usada a média da série como principal atributo de comparação, tendo como resultado seis ciclos de seca (laranja) e cheia (azul).	46
Figura 21 - Perímetros do espelho d'água aproximada das médias volumétricas em estações de estiagem e chuvosas, referente ao ano hidrológico 2009-2010, que se caracteriza como ano de seca, porém com valores muito próximos as médias harmônicas de toda a série histórica (tanto na estação de estiagem quanto chuvosa)	47
Figura 22 - Separação da série histórica volumétrica de estações de estiagem para a Lagoa do Sumidouro a partir da comparação com relação a um valor "normal" de referência, indicador de perenidade. Nota-se uma mudança comportamental bastante que se inicia por volta de 1999 e fica bem mais clara a partir de 2003.	48
Figura 23 - Separação da série histórica volumétrica de estações chuvosas para a Lagoa do Sumidouro a partir da comparação com relação a um valor "normal" de referência, indicador de perenidade. Nota-se uma mudança comportamental bastante que se inicia a partir de 1998 e fica bem mais clara a partir de 2002.	48
Figura 24 - Perímetros do espelho d'água da lagoa "normal" perene (ano hidrológico 1985-1986) utilizada como parâmetro de comparação com relação ao restante da série histórica. Assume-se que nessa época a lagoa não estava sujeita a grandes alterações volumétricas anuais, fazendo com que a comparação dos volumes mínimos registrados nesse período (ano em questão) seja de grande relevância para interpretar o restante da série histórica.....	49
Figura 25 - Relação gráfico-visual entre precipitação e volumes ao longo da série temporal analisada para a Lagoa do Sumidouro. Em tons de laranja, estão demarcados anos de seca, enquanto em tons de azul, estão demarcados anos de cheia. Tons escuros representam a série volumétrica, enquanto tons claros a série pluviométrica. Nota-se que as duas séries apresentaram ciclos muito semelhantes de seca e cheia, coincidindo na maior parte delas.	50
Figura 26 - Mapa potenciométrico do aquífero freático granular, mostrando o fluxo no sentido da Lagoa do Sumidouro nas porções oeste e norte, e do Rio das Velhas, na porção leste.....	51
Figura 27 - Valores anuais de pluviometria, evapotranspiração potencial (ETP) e evapotranspiração real (ETR) entre 1972 e 2020 calculados através da metodologia	

de Thornthwaite-Mather (1955). Para referência, os valores de pluviometria (Pluv) foram inseridos na forma de colunas.....	52
Figura 28 - Valores anuais de Déficit (DEF) e Excedente (EXC) hídrico entre 1972 e 2020 calculados através da metodologia de Thornthwaite-Mather (1955). Para referência, os valores de pluviometria (Pluv) foram inseridos na forma de colunas. .	52
Figura 29 - Entradas e armazenamento da Lagoa do Sumidouro ano a ano, durante toda a série histórica. Nos valores de entrada (laranja) já foram subtraídas a recarga e evapotranspiração.....	54
Figura 30 - Contribuição percentual do córrego Samambaia como entrada da Lagoa do Sumidouro. Como a vazão do córrego foi constante ao longo da série, notou-se a queda na pluviometria registrada para o mesmo período	55
Figura 31 - Valores de pluviometria medidos e volumes calculados para o ano hidrológico de 2009-2010. Graficamente os dados parecem ter uma relação de causa efeito, sugerido pelo pico volumétrico precedido por um pico pluviométrico. A análise de correlação cruzada tentará elucidar essa questão.....	56
Figura 32 - Análise de autocorrelação da vazão (volume) da Lagoa do Sumidouro, em azul, e correlação desta com a pluviometria da área, em laranja. Os dados tiveram um tempo de defasagem muito curto, conforme pode ser observado pelo rápido decaimento do correlograma	57
Figura 33 - Mapa de localização dos seis perfis altimétricos, com suas respectivas cotas reprojatadas. Essas cotas foram utilizadas para confecção das curvas de nível que comporiam o modelo batimétrico. Nota-se a limitação do modelo quanto a coerência das curvas geradas em comparação com a morfologia do talvegue, principalmente nos perfis D e F.....	90
Figura 34 - Perfil altimétrico A. Na parte superior, em vermelho a delineação topográfica do MDE, em azul o prolongamento inferido, e em preto os pontos de cota reprojatada. Na parte inferior, em preto, o novo traçado do perfil, composto por parte inferida e parte extraída do MDE.....	90
Figura 35 - Perfil altimétrico B. Na parte superior, em vermelho a delineação topográfica do MDE, em azul o prolongamento inferido, e em preto os pontos de cota reprojatada. Na parte inferior, em preto, o novo traçado do perfil, composto por parte inferida e parte extraída do MDE.....	91
Figura 36 - Perfil altimétrico C. Na parte superior, em vermelho a delineação topográfica do MDE, em azul o prolongamento inferido, e em preto os pontos de cota reprojatada. Na parte inferior, em preto, o novo traçado do perfil, composto por parte inferida e parte extraída do MDE.....	91

Figura 37 - Perfil altimétrico D. Na parte superior, em vermelho a delineação topográfica do MDE, em azul o prolongamento inferido, e em preto os pontos de cota reprojeta da. Na parte inferior, em preto, o novo traçado do perfil, composto por parte inferida e parte extraída do MDE.....	92
Figura 38 - Perfil altimétrico E. Na parte superior, em vermelho a delineação topográfica do MDE, em azul o prolongamento inferido, e em preto os pontos de cota reprojeta da. Na parte inferior, em preto, o novo traçado do perfil, composto por parte inferida e parte extraída do MDE.....	92
Figura 39 - Perfil altimétrico A. Na parte superior, em vermelho a delineação topográfica do MDE, em azul o prolongamento inferido, e em preto os pontos de cota reprojeta da. Na parte inferior, em preto, o novo traçado do perfil, composto por parte inferida e parte extraída do MDE.....	93

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Componentes do Balanço Hídrico de Massa para a bacia do córrego Samambaia	29
Tabela 2- Cotas inferidas entre os limites 646 e 636 metros para cada uma das curvas de nível nos respectivos modelos e cenários.....	35
Tabela 3 - Volumes máximos calculados para cada um dos modelos-cenários estipulados, em metros cúbicos.....	37

ANEXOS E APÊNDICES

ANEXO I – Série histórica de imagens de satélite com espelho d’água demarcado

APÊNDICE I – Método abandonado para elaboração do modelo batimétrico

SIGLAS

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico

APA – Área de Proteção Ambiental

CPRM – Serviço Geológico do Brasil

DEF – *Déficit* Hídrico

ETP – Evapotranspiração Potencial

ETR – Evapotranspiração Real

EXC – Excedente Hídrico

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

Pluv. – Pluviometria

UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de prestar nossos sinceros agradecimentos à nossa orientadora Leila Nunes Menegasse Velásquez, que acompanhou nosso trabalho desde o princípio e dedicou muitas horas de seu tempo a ele, sempre nos incentivando a fazer um bom trabalho.

Da mesma forma, ao nosso coorientador Rodrigo Sergio de Paula, também presente nos primeiros estágios do trabalho, participando de inúmeras reuniões e sanando todas as dúvidas que foram surgindo, principalmente no que diz respeito à segunda parte deste trabalho.

Por último, mas de igual importância, agradecemos ao nosso coorientador Paulo César Horta Rodrigues, que se mostrou extremamente solícito e prestativo, auxiliando-nos na confecção do modelo batimétrico da Lagoa do Sumidouro, sem o qual este trabalho não seria possível.

Ao apoio financeiro fornecido pela CECAV (Projeto: Adequação e Implantação de uma Rede de Monitoramento de Águas Subterrâneas em Áreas com Cavidades Cársticas da Bacia do Rio São Francisco Aplicado à Área Piloto da APA Carste de Lagoa Santa, Minas Gerais) e FAPEMIG (APQ – 02049-14), muito importante num país que insiste em não valorizar seu potencial científico.

Aos moradores de Fidalgo, pela simpatia com que nos trataram durante os trabalhos de campo, se mostrando muito interessados pelo estudo e dispostos a ajudar.

A todos os colegas de iniciação científica, principalmente Camilla e Isabela, por nos acompanharem no trabalho de campo de medição de nível d'água de cisternas.

E para finalizar, agradecemos a todos os familiares, amigos e colegas que, desde o início do curso, nos proporcionaram carinho e apoio incondicionais, essenciais para chegarmos até aqui!

RESUMO

A Lagoa do Sumidouro localiza-se na região sudeste do Brasil, na porção central do estado de Minas Gerais, dentro do Parque Estadual do Sumidouro, aproximadamente 45 quilômetros ao norte da cidade de Belo Horizonte, capital do estado. Insere-se em terreno cárstico bem desenvolvido, em meio a rochas carbonáticas neoproterozóicas, trata-se de importante ponto turístico, uma vez que diversos achados paleontológicos e espeleológicos foram encontrados em seus arredores, ademais possui significativa importância para o ecossistema local. O clima da região é tropical de savana, com pluviometria média anual de 1213 mm, concentrada durante o verão. Embora seja um corpo d'água de regime intermitente, ao longo das últimas décadas vem sendo observada uma diminuição de seu volume durante os períodos chuvosos acompanhada de um aumento na duração dos períodos de seca, passando atualmente pela maior seca já registrada, desde 2012 e estando completamente seca no ano hidrológico de 2013-2014. Tal situação motivou a realização deste trabalho, que objetivou compreender a dinâmica hídrica e meteorológica da Lagoa do Sumidouro, investigando possíveis causas da mudança no padrão de acúmulo d'água. Para tal, foram realizadas diversas análises geoespaciais e hidro-geo-meteorológicas na área de interesse, gerando um modelo batimétrico e calculando a variação volumétrica para cada ano hidrológico, nas estações de estiagem e chuvosa, a partir do uso de séries históricas de imagens de satélite. Dados históricos de temperatura e pluviometria de estações meteorológicas foram utilizados na análise de balanço hidroclimático e na análise histórica das variações volumétricas da lagoa. Além disso, foram empregados estudos estatísticos, como a correlação cruzada, para analisar melhor a relação entre o volume da lagoa e a pluviometria local. Um balanço de massa também foi realizado, resultando numa estimativa da capacidade de drenagem do sumidouro presente no fundo da lagoa. Todas essas investigações exerceram um importante papel na elucidação do problema e chegou-se à conclusão de que o aumento da temperatura registrado ao longo das últimas décadas tem impactado de forma considerável a quantidade de água que chega à lagoa, que é predominantemente alimentada pela precipitação, que por sua vez tem apresentado uma leve tendência de queda. Embora este trabalho não descarte a possibilidade de que outros fatores sejam responsáveis pelo agravamento do cenário de seca, como o rebaixamento do nível de água subterrânea causado pela captação por meio de poços tubulares profundos, induzindo a conexão do sumidouro com condutos inferiores, como destacado por Tavares (2020), existem fortes indícios de que o aumento das temperaturas médias, associado à uma tendência de diminuição do índice pluviométrico anual, seja a principal causa do desaparecimento da Lagoa do Sumidouro.

ABSTRACT

The *Sumidouro Pond* is located in the southeast region of Brazil, in the central portion of Minas Gerais state, within the Sumidouro State Park, approximately 35 kilometers north of Belo Horizonte, capital of the state. It is accommodated amid well-developed karst terrains and has great historical importance, since several paleontological and speleological findings have been cataloged in its surroundings. In addition, it plays a significant role for the local ecosystem. The problem faced in this pond is, that even though it is a small lake of intermittent regime, over the last decades it has been observed a decrease in its water volume during periods of flood and an increase in the duration of periods of drought, being now at the biggest all-time drought recorded, since 2012. This situation motivated this study, aimed at a better understanding of the hydrogeological and meteorological dynamics of the pond basin, through the investigation of possible causes to the disappearance of the water. For this purpose, several geospatial and hydro-geo-meteorological analyzes in the area of interest were carried out, generating a bathymetric model and estimating the volumetric variation in every hydrological year, applied in the two weather seasons (dry and wet). This was based on the treatment of a hysterical series of satellite imageries. Historical data on temperature and rainfall obtained from weather stations were used in analyses of meteorological balance and the perform a segregation of dry and wet periods through the years. Statistical studies, such as cross correlation, were applied to better illustrate the relation between the pond and meteorology. A water budget for the pond basin was calculated, resulting in the estimation of the drainage stream of the sinkhole that names the pond. All this information played an important role in elucidating the problem, so that, in addition to the hypotheses mentioned in previous works on the subject, it was concluded that the increase in temperature recorded over the last decades has directly impacted in the amount of water that reaches the pond, which depends mainly on precipitation. Although this work does not rule out the possibility that other factors may also be responsible for the worsening of the drought scenario, such as the lowering of the groundwater level and connection to lower conduits, there is strong evidence that the increase in average temperatures, associated with a downward trend in the annual rainfall is one of the main causes of the disappearance of the *Sumidouro Pond*.

APRESENTAÇÃO

Este trabalho está vinculado ao projeto de pesquisa intitulado “*Projeto de Implantação e Adequação de uma Rede de Monitoramento de Águas Subterrâneas em Áreas com Cavidades Cársticas da Bacia do Rio São Francisco Aplicado à Área Piloto da APA Carste de Lagoa Santa, Minas Gerais*” (Processo FUNDEP/GERDAU/UFMG N° 22.317), iniciado em 2015 com previsão de término no final de 2021. Tal projeto é financiado pelo Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas – CECAV, executado pelo Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais – IGC/UFMG e apoiado tecnicamente pelo Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear – CDTN, pelo Serviço Geológico do Brasil – CPRM e pelo Instituto Mineiro de Gestão das Águas – IGAM. O presente trabalho está inserido em uma atividade obrigatória para a conclusão do curso de Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais.

A ênfase do estudo reside na dinâmica hidrológica da Lagoa do Sumidouro, lagoa cárstica que apresenta volumes reduzidos há algum tempo, localizada na APA Carste de Lagoa Santa. Neste trabalho não foi realizado nenhum mapeamento geológico, uma vez que estudos anteriores forneceram informações suficientes para a realização de um trabalho mais específico. Dada a natureza prática e interdisciplinar da pesquisa realizada, bem como sua relevância, optou-se por apresentar o trabalho no formato de artigo científico, que após as correções da banca avaliadora, adequação da formatação e tradução para o inglês, será submetido para publicação em revista científica de abrangência internacional.

O trabalho está dividido em quatro seções principais (Introdução; Materiais e Métodos; Resultados; Conclusões e Recomendações), com separação em subtópicos para elucidação dos temas de maior relevância no estudo. Além disso, compõe o trabalho um anexo, com a série histórica completa de imagens de satélites utilizada, e um apêndice, onde é detalhada uma metodologia para elaboração do modelo batimétrico, abandonada durante o estudo.

1. INTRODUÇÃO

Até há pouco tempo, acreditava-se que a maior parte das águas continentais se concentravam em grandes lagos, mas inventários recentes indicam que as águas continentais ocupam quase o dobro da área que se acreditava e que pequenos lagos e lagoas ocupam a maioria da área das águas continentais superficiais em todo o globo. (Downing *et al.* 2006, Downing 2008). Ademais, lagos e lagoas são considerados eficientes sentinelas em relação às mudanças climáticas que vem sendo observadas em todo o planeta, pois são muito sensíveis ao clima e demonstram rápida resposta às alterações (Adrian *et al.* 2009).

A Lagoa do Sumidouro, por vezes referida como Lagoa da Quinta, se trata de uma grande lagoa intermitente da região sudeste do Brasil, é alongada no sentido E-W e localiza-se no estado de Minas Gerais (Figura 1), no distrito de Fidalgo (Lat.: 19°32'16,88"S, Long.: 43°56'41,3"W), na cidade de Pedro Leopoldo, a cerca de 45 km a norte da capital, Belo Horizonte. A Lagoa em questão insere-se em uma depressão cárstica (Amaral, 2018).

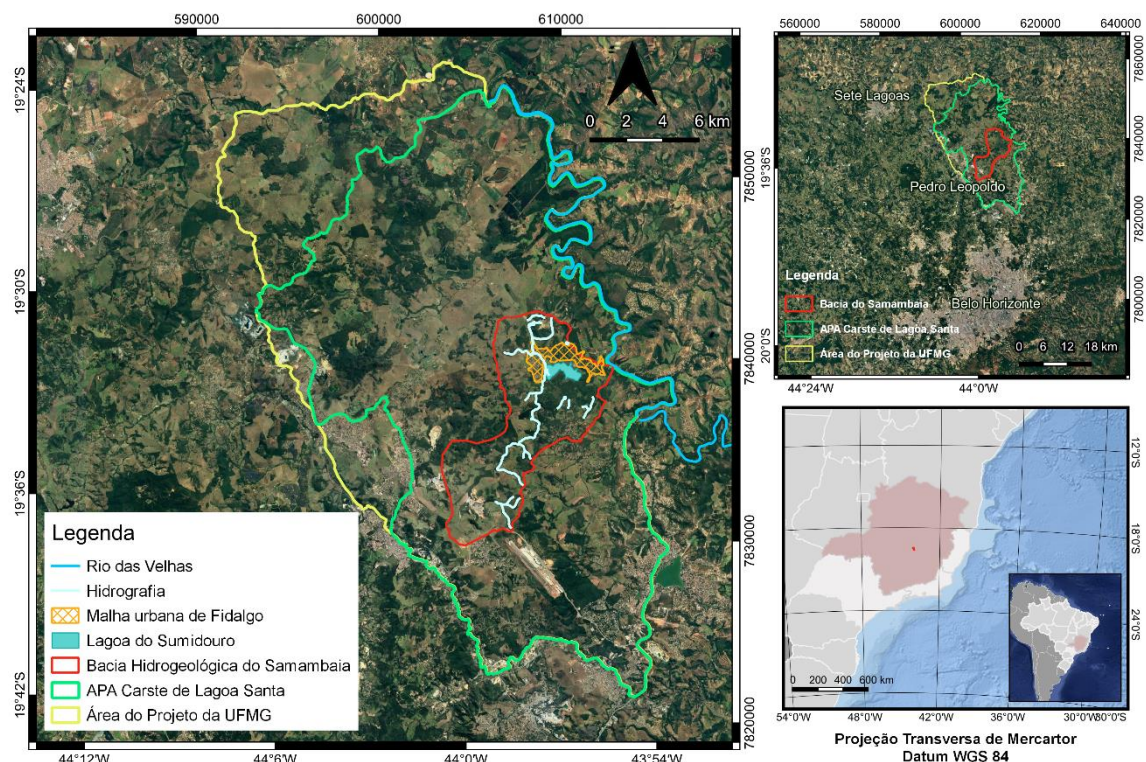


Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo, a bacia do córrego Samambaia, onde está situada a Lagoa do Sumidouro. No mapa é possível ver em destaque o Rio das Velhas, nível de base regional e a malha urbana de Fidalgo, circundando a Lagoa do Sumidouro.

Os terrenos cársticos da região já foram alvo de diversos estudos geomorfológicos e hidrogeológicos, citando-se Kohler (1989); Auler (1994); Pessoa (1996); Viana (1998); Berbert-Born (2002); Vieira (2018); Velásquez et al. (2018); Amaral (2018); Magalhães & Silva (2018); De Paula (2019) e Tavares (2020). Existem na região sítios paleontológicos de grande importância, onde já foram encontrados fósseis relacionados à megafauna pleistocênica extinta e importantes vestígios da ocupação humana pré-histórica no Brasil, entre os quais, ossos de cerca de 12 mil anos descritos pelo naturalista dinamarquês Peter Lund em 1840 como o “Homem de Lagoa Santa”. Por essas razões, a região é considerada o berço da paleontologia e da espeleologia brasileira (Berbert-Born, 2002). Foi nessa região, na década de 1970, que Annette Laming-Emperaire encontrou, no sítio arqueológico de Lapa Vermelha IV, a uma profundidade de 12 metros, um metro abaixo depois de encontrar um fóssil da extinta preguiça-terrácola, os restos desarticulados de ser humano de sexo feminino, batizado de Luzia (Feathers *et al*, 2010), um dos mais antigos da América do Sul e do planeta. Desde 1980 esses terrenos são considerados de utilidade pública e de interesse social, recebendo o *status* de Unidade de Conservação (UC), denominada Parque Estadual do Sumidouro que, por sua vez, faz parte de uma UC ainda maior, a Área de Proteção Ambiental (APA) Carste de Lagoa Santa, com área aproximada de 38 mil hectares (aproximadamente 500 quilômetros quadrados). A criação dessa APA é mais recente, datada de janeiro de 1990 e trata-se de um mecanismo de preservação do carste, considerando que sua proximidade com minas de calcário e indústrias de cimento oferecem risco considerável às estruturas espeleológicas existentes na região.

Mesmo com todos os mecanismos de proteção citados, ao longo das últimas décadas vem sendo observada uma diminuição do volume da lagoa durante a estação úmida e um prolongamento da estação seca, o que representa uma ameaça para o ecossistema local (Macedo, 2020), uma vez que se trata de área de transição de dois *hotspots* de biodiversidade, o Cerrado e a Mata Atlântica (Myers *et al.* 2000), e importante refúgio para alimentação e repouso de aves migratórias (Warming, 1908 & Nóbrega, 2015). Inclusive, em 2017, parte desses terrenos foi reconhecida como área úmida de importância internacional, adquirindo o título de Sítio RAMSAR nº2306, batizado de *Lund-Warming*, em homenagem aos naturalistas que estudaram a região ainda durante a segunda metade do século XIX (RAMSAR, 2017).

O comportamento errático da lagoa também acarreta prejuízos econômicos para a população de Fidalgo, pois se trata de relevante ponto turístico.

Dada a importância local da lagoa e o aumento da frequência de meses em que ela tem estado completamente seca, este trabalho teve como objetivo principal compreender melhor a dinâmica hídrica da Lagoa do Sumidouro, bem como investigar as possíveis causas, naturais ou antrópicas, que levaram ao secamento da água em boa parte do ano.

As principais hipóteses verificadas neste estudo foram aquelas levantadas por Tavares (2020), que atribuiu o secamento da lagoa a uma sobreposição de três fatores i) expansão urbana do Distrito de Fidalgo; ii) Diminuição do aporte de água superficial do córrego Samambaia; iii) rebaixamento do nível de água subterrânea e consequente conexão com condutos inferiores; sendo este último fator o considerado mais provável pela autora. Uma nova hipótese foi formulada neste trabalho, de modo a atribuir grande parte do esvaziamento da Lagoa do Sumidouro a alterações climáticas.

1.1 Caracterização da área

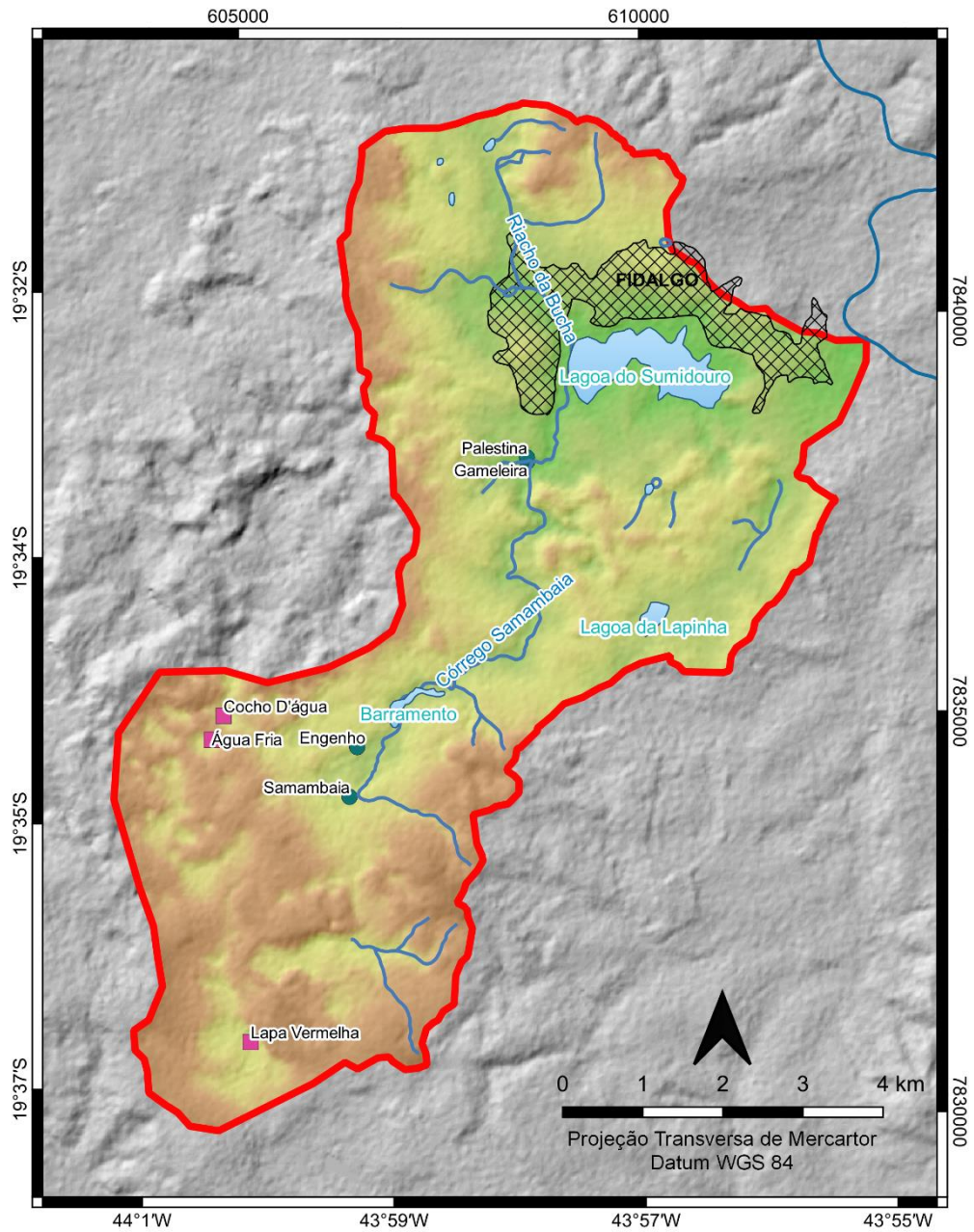
O clima da área de estudo se enquadra na categoria *Aw* da classificação climática de Köppen-Geiger (Viana *et al.*, 1998), também pode ser referido como um clima tropical de savana, com duas estações bem definidas, invernos secos com temperatura média mínima superior a 18°C e verões chuvosos com temperaturas médias na casa dos 23°C. O período chuvoso ocorre entre outubro e abril, enquanto o período seco entre maio e setembro.

A Lagoa do Sumidouro é o exutório da sub-bacia hidrogeológica do Córrego do Samambaia, cuja delimitação mais recente foi aprimorada por Teodoro *et al* (2019), identificando interconexões subterrâneas em zonas externas à bacia. O córrego do Samambaia é o único aporte hídrico em toda a bacia, uma vez que o riacho da Bucha é completamente seco. A bacia apresenta uma área total de drenagem de 56 km² (Figura 2). Além de endorreica, a bacia pode ser classificada como criptorreica, pois a água que deságua na lagoa infiltra-se em um sumidouro localizado na porção mais profunda, na porção leste. Como verificado por Tavares (2020), trata-se de uma bacia tipicamente cárstica, controlada essencialmente pelo escoamento de base (94%), com importantes saídas de água representadas por captações superficiais e subterrâneas. A principal entrada de água é proveniente da chuva (24,18 milhões de m³/ano), sendo seguida pela contribuição das nascentes da área (4,12 milhões de m³/ano) (Tavares, 2020). Conforme o balanço hídrico realizado por De Paula e Velásquez (2019), pode-se classificar essa bacia como de vazões médias de ordem de grandeza intermediária (0,159 m³/s), com resposta quase imediata aos eventos de chuva.

Segundo Tavares (2020), o Córrego Samambaia surge das nascentes Engenho e Samambaia (Figura 2) e é abastecido pelas nascentes Palestina e Gameleira, antes de desaguar na lagoa do Sumidouro. A vazão deste córrego recebe também contribuições por conexões subterrâneas, conforme enunciado por Teodoro *et al* (2019), cerca de 13% da água da nascente Samambaia provém da Gruta de Lapa Vermelha (bacia de Confins), 70% da água da nascente Engenho é proveniente da Janela Cárstica Cocho D'água (bacia Mocambo/Jaguara) e uma contribuição menor de cerca de 7% provém da Gruta de Água Fria.

A sub-bacia do Córrego do Samambaia por sua vez faz parte da bacia hidrográfica do Rio das Velhas, que representa o nível de base regional. Por fim, em um contexto mais amplo, o Rio das Velhas é um dos principais tributários da grande bacia hidrográfica do Rio Francisco, uma das mais importantes do país.

A geomorfologia da região é evidenciada na Figura 2, sendo caracterizada por feições tipicamente cársticas. As maiores elevações presentes na Bacia do Samambaia se encontram na porção sul, com uma elevada concentração de dolinas, sendo algumas destas alongadas, o que pode indicar controle estrutural. Na porção central da bacia, as feições geomorfológicas são controladas pelo córrego do Samambaia, sendo desenvolvido um pequeno vale em seu entorno. A bacia é bordada por um vale cego ao norte, e pelo distrito de Fidalgo a nordeste. Nessa região, que é a menos elevada de toda a bacia, está localizada a Lagoa do Sumidouro, sendo sua geomorfologia caracterizada por planícies cársticas, denominada de poliés, com nível topográfico abaixo de 670 m e de declividade entre zero e 3 graus. No denominado Poliés de Fidalgo, 80% do terreno é ocupado pela Lagoa do Sumidouro (Viana *et al.*, 1998). Feições cársticas se destacam na paisagem, principalmente dolinas, uvalas, paredões, vales cegos e as mais diversas estruturas originadas da dissolução e/ou colapso da rocha calcárea. Observa-se uma considerável densidade de cavidades na região, frequentemente adentráveis pelo homem (Berbert-Born, 2002). Parte das rochas carbonáticas carstificadas encontram-se cobertas por solo, sedimentos e rochas metapelíticas, que ficam marcadas na paisagem pela forma de colinas. Portanto, a geomorfologia da área é comumente dividida em dois grandes grupos, um compartimento cárstico e um compartimento não cárstico, conforme classificação proposta por Herrmann *et al.* (1998).



Legenda















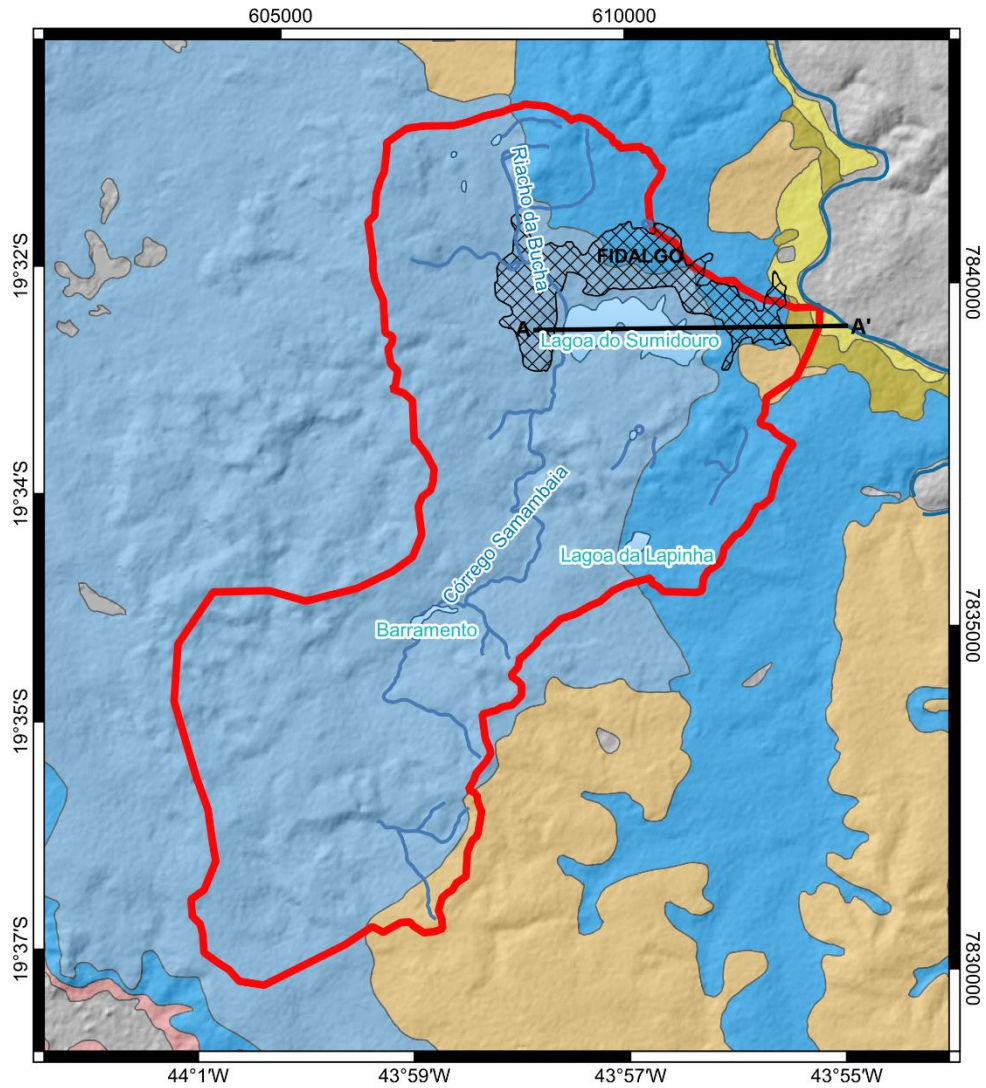
 Rio das Velhas	 Elevação (m)
 Lagoas e barramentos	 633
 Hidrografia	 688
 Malha urbana de Fidalgo	 717
 Bacia Hidrogeológica do Samambaia	 749
Hidrogeologia	 782
 Conexões	 862
 Nascentes	

Figura 2 - Mapa hipsométrico e da área de estudo. Fidalgo, distrito de Pedro Leopoldo, está tem sua área urbana demarcada na porção norte da Bacia do Samambaia. MDE disponibilizado por © JAXA/METI ALOS PALSAR 2011. Acessado pelo portal ASF DAAC em 15 de março de 2021.

Quanto à geologia, a Lagoa do Sumidouro insere-se em uma depressão cárstica formada pelos metacalcários puros e homogêneos do Membro Lagoa Santa (Viana *et al.*, 1998), pertencente à Formação Sete Lagoas, inserida no Grupo Bambuí, nomeado por Rimman (1919) e sintetizado por Dardenne em 1978. Além das rochas carbonáticas o grupo apresenta também uma porção siliciclástica, correspondente aos metapelitos da Formação Serra de Santa Helena, a qual não ocorre na área estudada. A estratigrafia mostra uma clara sequência transgressiva-regressiva, sendo o seu topo constituído por coberturas Cenozóicas pouco espessas. O embasamento do grupo é representado pelo Complexo Gnássico-Granítico-Migmatítico Belo Horizonte (Ribeiro *et al.*, 2003). Estruturalmente, observam-se feições típicas de borda de bacia sedimentar que se deformou em condições dúcteis-rúpteis. Contudo, nos arredores da lagoa, a disposição das camadas é predominantemente sub-horizontal, exibindo indícios de deformação na forma de falhas de empurrão e de descolamento basal (Magalhães & Silva, 2018). Na Figura 3 é possível observar a geologia da área de estudo, com um perfil longitudinal da Lagoa do Sumidouro expandindo-se até o Rio das Velhas. A delimitação de camadas foi realizada por Teixeira, Pena e Silva (2020).

Nas rochas carbonáticas do Grupo Bambuí ocorrem aquíferos cársticos, semi-confinados a livres, de elevada produção e grande vulnerabilidade a processos superficiais (De Paula & Velásquez 2019). As estruturas de dissolução muitas vezes observadas em superfície se estendem pelo subterrâneo e formam uma rede de dutos e fendas alargados pela ação da água (Viana *et al.*, 1998). A principal unidade aquífera ocorre na Formação Sete Lagoas, constituída por calcários de diferentes granulometrias e graus de pureza. A espessura média dessa unidade é próxima a 100 m, contudo pode chegar aos 300 m quando próximo ao rio das Velhas, para onde o fluxo do aquífero se direciona (Velasquez *et al.* 2018, De Paula 2019). O Membro Lagoa Santa, no qual a Lagoa do Sumidouro se insere, apresenta nessa área, o maior potencial hídrico do aquífero. Seus metacalcários apresentam as maiores permeabilidades e representam as principais zonas de recarga (Velasquez *et al.* 2018). Já a Formação Serra de Santa Helena, pela própria natureza de suas rochas metapelíticas, compõe uma pobre unidade aquífera; por vezes, assim como as coberturas cenozóicas, pode servir de zona de recarga para os aquíferos cársticos mais profundos (Pessoa, 2005).



Legenda

- Lagoas e Barramentos
- Rio das Velhas
- Hidrografia
- Malha Urbana de Fidalgo
- Bacia do Samambaia
- Perfil Geológico

Geologia

Fonte do mapa: Teixeira, Pena e Silva, 2020

- Complexo Belo Horizonte
- Formação Serra de Santa Helena
- Formação Sete Lagoas - Membro Lagoa Santa
- Formação Sete Lagoas - Membro Pedro Leopoldo
- Terraço aluvial: sedimentos areno-argilosos
- Terraço aluvial: sedimentos conglomeráticos

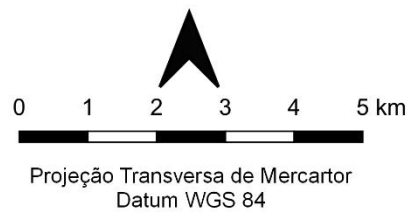
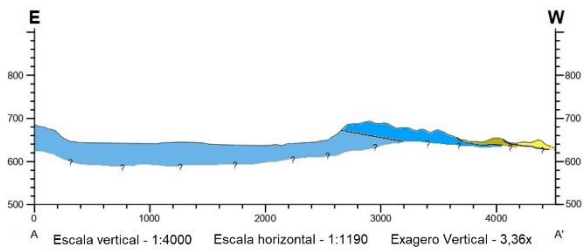


Figura 3 - Mapa geológico da área de estudo. Fidalgo, distrito de Pedro Leopoldo, tem sua área urbana demarcada na porção norte da Bacia do Samambaia. MDE disponibilizado por © JAXA/METI ALOS PALSAR 2011. Acessado pelo portal ASF DAAC em 15 de março de 2021. O mapa geológico foi realizado por Teixeira, Pena e Silva (2020).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho utilizou recursos de geoprocessamento, hidrologia superficial, subterrânea e meteorologia para investigar possíveis razões para o esvaziamento da Lagoa do Sumidouro. O primeiro estágio metodológico analisou séries históricas de dados volumétricos e pluviométricos da Lagoa do Sumidouro, visando a caracterização das respostas hídricas da depressão cárstica frente aos eventos meteorológicos sazonais. Fez-se necessário o uso de ferramentas de geoprocessamento e sensoriamento remoto para manipular esses dados. A série histórica volumétrica foi gerada a partir da realização de um modelo de batimetria da lagoa, baseado na interpretação e identificação do espelho d'água em imagens de satélites históricas. O segundo estágio metodológico compreendeu a realização de correlações dos dados das séries hidrológicas e pluviométricas históricas com os dados comportamentais típicos da lagoa para ciclos de seca e cheia, empregando ferramentas estatísticas, como a autocorrelação e correlação cruzada. Em um terceiro estágio realizou-se o balanço climatológico e hídrico de massa da lagoa, visando obter o comportamento histórico da vazão de descarga do sumidouro existente e também verificar alguma possível anomalia no período analisado. Nessa fase um mapa potenciométrico do nível freático ao redor da lagoa foi também elaborado para melhor compreensão da configuração do fluxo da água subterrânea em relação à lagoa. O quarto e último estágio metodológico analisou todos os dados e resultados levantados ao longo do trabalho e estabeleceu conclusões e hipóteses acerca das possíveis causas da seca na lagoa, baseando-se também em trabalhos anteriores relacionados.

2.1 Análises Geoespaciais

Dada a ausência de informações acerca da batimetria da Lagoa do Sumidouro ao longo dos anos, uma das maneiras para se obter dados históricos de seu volume é utilizar imagens de satélite que mostrem diferentes cotas de nível d'água, para que essas sejam usadas na geração de um modelo de batimetria da lagoa.

Dessa forma, utilizou-se uma série de imagens históricas LANDSAT, disponíveis através do Serviço Geológico Norte-americano (USGS), por meio do portal Earth Explorer/EROS. Foram selecionadas duas imagens por ano, representativas das estações de estiagem e chuvosa. Um conjunto de 82 imagens foi utilizado e sua cobertura temporal se inicia em março de 1980 e termina em março de 2021, de maneira que a série engloba completamente os anos hidrológicos de 1980-1981 a 2019-2020.

As imagens de satélite utilizadas compreendem desde o satélite LANDSAT 2 até o LANDSAT 8. Três imagens extras que não compõem a série foram usadas para ajudar a visualizar a evolução volumétrica da Lagoa, pois eram as imagens mais antigas obtidas neste estudo. A data dessas capturas complementares foi setembro de 1972 e fevereiro de 1973, do LANDSAT 1, e fevereiro de 1975, do LANDSAT 2. Foram utilizadas principalmente as bandas 3, 4 e 5 desses satélites, sendo possível observar com boa clareza a região ocupada pela lagoa através de uma visualização multibanda de falsa-cor. Quando indisponíveis estas bandas, utilizou-se a imagem em sua cor natural.

As imagens referentes à estação de estiagem foram obtidas nos meses de agosto a outubro (sendo agosto o mês das imagens mais frequentes e outubro, o das menos frequentes), enquanto as imagens referentes à estação chuvosa foram capturadas nos meses de fevereiro a maio (sendo março o das mais frequentes e maio, o das menos frequentes).

A partir dessas imagens foi traçado o perímetro da lagoa para toda a série histórica (Figura 4). Para o traçado do limite da lagoa, os *pixels* das imagens de satélite foram interpolados pela função bilinear de visualização de *rasters*, suavizando-se o reticulado dos pixels. A delimitação dos 82 perímetros de acordo com uma maior ou menor expansão do espelho d'água foi, então, a primeira etapa metodológica para a definição da batimetria e, posteriormente, do cálculo dos volumes da Lagoa do Sumidouro ao longo do tempo.

Ocasionalmente, foram utilizadas também imagens do Google Earth Pro devido à sua grande praticidade e excelente resolução. Infelizmente não há disponibilidade delas para a maior parte do recorte cronológico estudado. O método leva em conta premissas semelhantes àquelas apresentadas por Pekel *et al.* (2016), que apresenta um mapeamento global de águas superficiais de forma automatizada e disponibiliza os resultados no portal Global Surface Water, apoiado pela União Europeia. Contudo, esse portal faz uso de satélites de resolução inferior àquela necessária para se atingir resultados precisos na escala trabalhada e por isso esses dados não foram utilizados.

A segunda etapa consistiu na obtenção dos dados altimétricos a partir dos modelos digitais de elevação (MDE) adquiridos via satélite, pelo instrumento PALSAR (resolução espacial de 12,5 metros) que imageou diversas partes do globo entre 2006 e 2011, esse material se encontra disponibilizado publicamente pela Agência Espacial Japonesa, disponível também no site Alaska Satellite Facility.

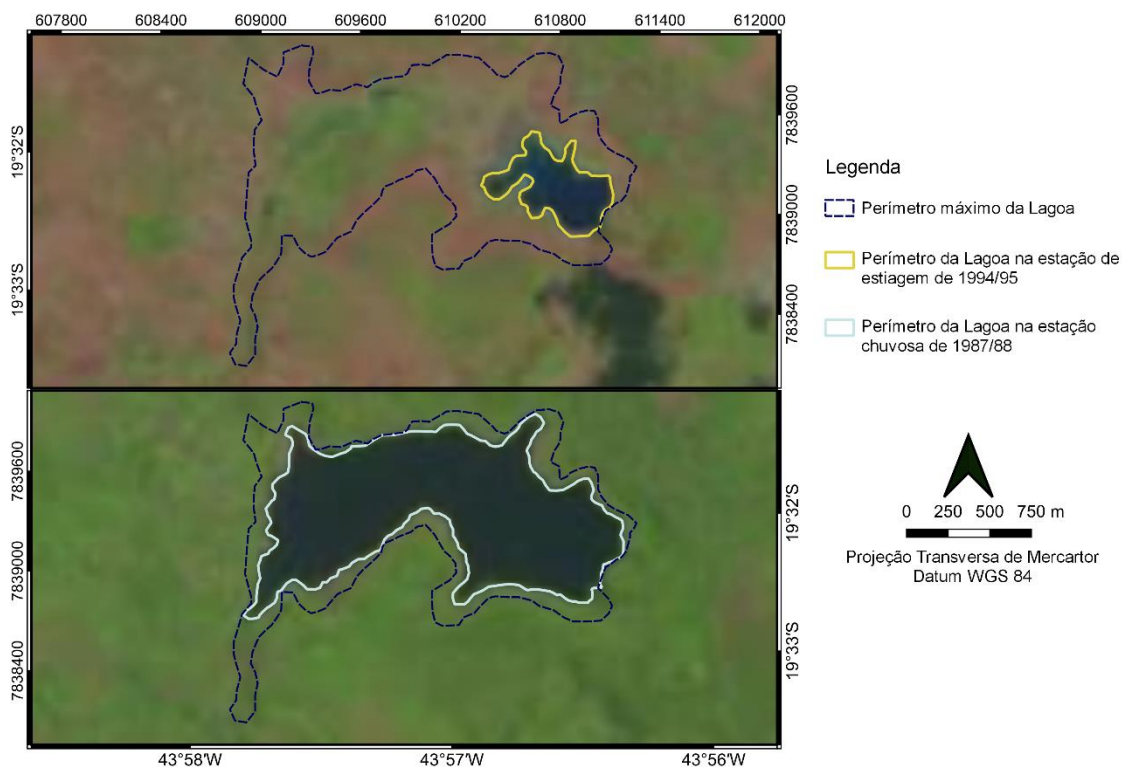


Figura 4 - Exemplo de delimitação do perímetro da Lagoa do Sumidouro a partir de imagens Landsat nas estações chuvosa de 1984-1985 (LANDSAT 3) e de estiagem de 1994-1995 (LANDSAT 5).

Em uma primeira tentativa de se estabelecer um modelo batimétrico, utilizou-se o mencionado MDE do instrumento PALSAR para compor perfis altimétricos e inferir a batimetria da lagoa baseado no prolongamento destes perfis. Essa tentativa, no entanto, apresentou vários problemas e imprecisões, determinantes para o abandono desta metodologia para o estabelecimento de um modelo batimétrico. Mais informações e detalhes sobre este método podem ser encontrados no Apêndice 1 deste trabalho.

Assim, optou-se pelo uso de um método baseado ainda nas mesmas variações dos espelhos d'água da lagoa ao longo do tempo, mas agora assumindo-se seus perímetros sazonais como registros das próprias curvas de nível emersas do reservatório, uma vez que o espelho d'água é sempre planar e horizontal.

Para se completar o modelo seriam necessários somente os dados do relevo que permanecesse submerso. Foi possível, então, se delimitar visualmente a geometria do talvegue da Lagoa do Sumidouro, de forma a se garantir uma estimativa realista do relevo em sua porção submersa, uma vez que esse talvegue corresponde ao nível de base local até o deságue no sumidouro e tem a sua cota aproximada a partir de observações *in situ*, conduzidas em outros trabalhos da UFMG na região.

Toda a reconstituição da batimetria foi baseada, então, na integração das curvas batimétricas ocasionalmente emersas, do talvegue da lagoa e da indicação de sua profundidade real aproximada. O maior desafio metodológico aqui foi realizar a devida correspondência entre as curvas de nível das margens emersas e os valores mais corretos das suas cotas.

Um MDE do ALOS PALSAR de alta resolução, relativo a fevereiro de 2011 (resolução espacial de 12,5 x 12,5 metros) foi, então, empregado para definir a cota onde a lagoa tem seu maior perímetro, e admitindo-se que a espessura máxima de lâmina d'água da lagoa nunca excedeu duas dezenas de metros, como foi constatado por Tavares (2020) em visita de campo, observando as marcações de água em afloramentos vizinhos ao sumidouro. Outra informação, advinda do Parque Estadual do Sumidouro, foi de que a profundidade máxima da lagoa está ao redor de dez metros. Dessa forma, optou-se por basear-se na informação fornecida pelo órgão.

Uma vez que os limites da Lagoa do Sumidouro foram demarcados para cada ano e suas respectivas áreas, calculadas, foram usadas para marcar perímetros de referência a serem utilizados como curvas de nível base para o modelo batimétrico. O critério de definição dessas curvas base foi a aderência em relação à tendência histórica, o que obrigou a uma série de modelagens e cenários, conforme será explicado adiante.

De posse das curvas-base selecionadas e do talvegue, utilizou-se a metodologia de interpolação ANUDEM para gerar o modelo batimétrico, levando-se em consideração as medidas inferidas e aspectos fisiográficos da área (limite máximo e talvegue). O método ANUDEM usa uma técnica de interpolação projetada especificamente para criar uma superfície que representa mais realisticamente uma superfície de drenagem natural e preserva tanto as linhas de crista como as redes de riachos (Hutchinson, 1989). Com o modelo gerado, foi possível se iniciar o processamento dos dados meteorológicos e hidrológicos. O interpolador está disponível no *software* ArcGIS, por meio da ferramenta *Topo to raster*.

2.2 Análises Hidrometeorológicas

Os dados pluviométricos empregados neste trabalho foram obtidos das estações pluviométricas mais próximas a Lagoa do Sumidouro (Figura 5Figura 1): Ponte Raul Soares (1943049) e Pedro Leopoldo (1944109), cujos dados brutos foram baixados do portal HidroWeb, da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). A

principal estação usada como base para os estudos pluviométricos foi a estação Ponte Raul Soares, uma vez que se localiza muito próxima à Lagoa do Sumidouro. Para avaliação da variação da temperatura do ar local foram utilizados dados da estação meteorológica do INMET Sete Lagoas (A569), localizada a aproximadamente 25 km da área estudada, que mantém registros diários de temperatura de 1972 a 2020, que pode ser observada também na Figura 5.

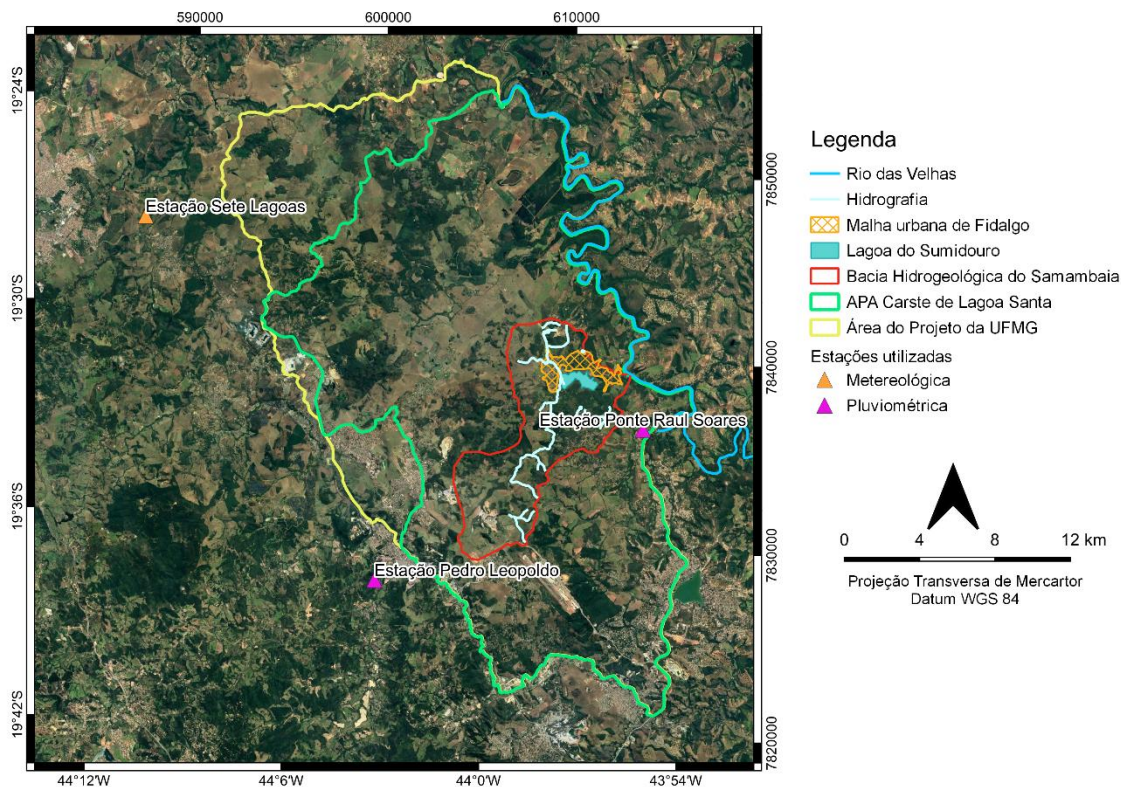


Figura 5 - Localização das estações meteorológica e pluviométricas utilizadas neste trabalho. Nota-se a proximidade da Lagoa do Sumidouro em relação à estação Ponte Raul Soares

Uma completção de dados foi necessária, uma vez que a série apresentou alguns períodos incompletos e era interessante expandir a abrangência temporal da série. Para tanto, foram realizadas correlações estatísticas entre dados de estações vizinhas e o método de dupla-massa foi aplicado. A correlação entre duas variáveis foi calculada através do coeficiente de correlação linear de Pearson, que segundo Yamamoto e Landim (2015) representa a relação mútua entre as duas variáveis. Ele pode ser calculado através da Equação (1):

$$\rho = \frac{C(X, Y)}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (1)$$

onde σ_X e σ_Y são os desvios padrão de cada variável (X e Y) e $C(X, Y)$ é a covariância entre as duas variáveis, sendo esta definida por $C(X, Y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i Y_i - \bar{X} \bar{Y})$.

O método de análise de dupla massa consiste em observar inclinações de diagramas de precipitação cumulativas. Uma vez que a precipitação é menos dependente de ações antrópicas, é mais simples indicar se dois conjuntos de dados de diferentes estações meteorológicas são consistentes (Starcy & Hardison, 1966). Este método foi criado para analisar e agrupar conjuntos de estações meteorológicas correlacionadas, bem como detectar anomalias climatológicas.

Segundo Tucci (2001), o método consiste em acumular os valores de precipitação mensais ou anuais, e plotá-los em um gráfico. No eixo das abcissas devem estar os valores da estação de referência e no eixo das ordenadas a estação a ser consistida. Se os valores em ambas as estações forem proporcionais, o gráfico obtido será uma única reta, cuja declividade definirá a proporcionalidade entre as duas séries. Caso o gráfico obtido não seja uma única reta, há um forte indício de que as séries não são correlacionáveis, ou houve uma mudança de comportamento no regime pluviométrico, ou que as duas séries pertencem a diferentes regimes pluviométricos. As quatro possibilidades podem ser observadas na Figura 6.

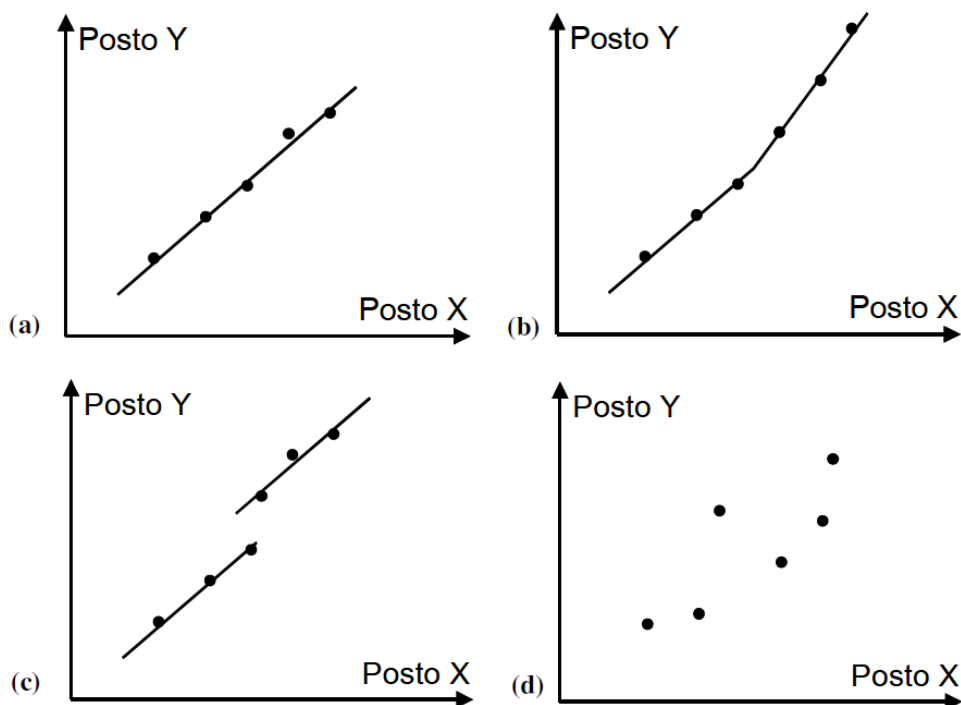


Figura 6 - Possíveis curvas obtidas após a aplicação de um método de dupla massa para uma estação (na imagem referida como Posto Y) a ser consistida, baseando-se em uma estação conhecida (Posto X). Em (a) os dados são consistentes; em (b) os dados apresentam mudança de tendência pluviométrica; em (c) os dados são inconsistentes com possíveis erros de transcrição de registros; e em (d) os dados possuem diferentes regimes pluviométricos (Extraído de Paz (2004).

Neste trabalho optou-se por trabalhar com médias harmônicas no lugar de médias aritméticas, para ter uma perspectiva conservadora em relação aos volumes, uma vez que a média harmônica é sempre menor que a aritmética. Além disso, segundo Ferger (1931) a média harmônica deve ser aplicada em casos em que os fatores são taxas e não há constância nesses fatores. Vazões são exemplos de taxas, e quaisquer medidas de volume anuais ou precipitação podem ser interpretadas como vazão. Como se está trabalhando com a possibilidade de variação na pluviometria e é sabido da variação volumétrica da lagoa, optou-se por trabalhar com a média harmônica.

Na análise da série pluviométrica utilizou-se artifícios estatístico-visuais para determinar ciclos de seca e cheia pluviométricas. A média harmônica dos dados foi utilizada como critério de definição de anos de estiagem ou chuvosos. A análise de comportamento da pluviometria ocorreu pela identificação de tendências semelhantes na quantidade de chuvas, comparando valores com a média e com anos próximos. Para auxiliar a análise, médias móveis de 2 a 11 anos foram plotadas, com o intuito de identificar tendências de crescimento, declínio ou estabilização na quantidade de chuvas.

O mesmo processo foi aplicado à série histórica volumétrica, definindo intervalos de seca e cheia. A esse método foi acrescida a definição de um volume referência para períodos em que a Lagoa do Sumidouro apresentou volumes semelhantes durante as estações de estiagem e chuvosa. Esse dado também serviu como efeito comparativo para o restante da série histórica, já que esse volume definido era o menor calculado para o período em questão (1980 a 1986). Dessa forma, utilizar esse volume poderia indicar informações comportamentais em relação aos valores mais altos obtidos na série histórica, bem como interpretar a possibilidade da lagoa no seu estado “normal” ser perene.

A fim de investigar a relação entre águas subterrâneas e a Lagoa do Sumidouro, foram realizados levantamentos de campo na região de Fidalgo, com o intuito de cadastrar possíveis poços ou cisternas. Os resultados preliminares indicaram uma presença muito sutil de poços, o que fez com que o foco do estudo potenciométrico estivesse no aquífero granular, observado através de cisternas. Foram medidos níveis de água para as cisternas da região, para a confecção de um mapa potenciométrico. Devido à maior precisão dos dados, foi preferido aplicar as cotas de elevação do MDE ALOS Palsar que locá-las com um GPS de mão.

Os dados de temperatura e pluviometria foram usados no cálculo do Balanço Hídrico Climatológico para todos os anos hidrológicos do período estudado. Optou-se

por utilizar o método de *Thornthwaite & Mather* (1955), que tem como produtos finais as estimativas de evapotranspiração real e potencial (ETR e ETP), *déficit* e excedente hídrico (DEF e EXC), além do armazenamento (ARM). Os cálculos foram feitos utilizando planilhas no ambiente EXCEL desenvolvida por Rolim, Sentelhas e Barbieri (1998). Além dos parâmetros de entrada já citados, também é necessário informar a latitude, uma vez que a insolação astronômica é levada em conta nos cálculos. Por fim, o valor de entrada utilizado relativo à Capacidade de Água Disponível (CAD) do solo foi de 248 mm, valor estabelecido por Patrus *et al.* (1998) para a região. A fórmula simplificada do balanço hídrico climatológico (Thornthwaite & Mather, 1955) é dada através da Equação (2):

$$P - ETR - R - I = \Delta S \quad (2)$$

onde, P é a precipitação; ETR é a evapotranspiração real; R é o deflúvio; I é a infiltração; e ΔS é a variação do armazenamento.

O Balanço de Massa consiste na quantificação matemática de entradas e saídas de água em uma bacia. Esse cálculo de balanço pode ser aplicado em variadas escalas, sendo em sua escala mais macroscópica o próprio ciclo hidrológico. Tucci (2001), por exemplo, mostra aplicações do balanço hídrico para o cálculo da evaporação em um reservatório. O Balanço de Massa mostra relevantes informações acerca de uma bacia em questão, tendo como sua equação (3):

$$\text{Entrada} - \text{Saídas} - \text{Armazenamento} = 0 \quad (3)$$

Nesse estudo, o Balanço de Massa pode ser aplicado para estimar a capacidade de drenança do sumidouro presente no interior da Lagoa do Sumidouro, uma vez que este funciona como nível de base total da bacia do córrego Samambaia. Dessa forma, analisaram-se as entradas e saídas dessa bacia (Tabela 1).

Tabela 1 - Componentes do Balanço Hídrico de Massa para a bacia do córrego Samambaia

Entradas	Saídas	Armazenamento
Precipitação	Evapotranspiração	Lagoa do Sumidouro
Escoamento superficial	Drenança do Sumidouro	
Nascentes (córrego Samambaia)	Bombeamento de poços rasos e profundos	
Escoamento subsuperficial	Escoamento de base (descarga)	

Assim, a equação do Balanço de Massa pode ser aplicada à bacia do córrego Samambaia para inferir a vazão de água drenada pelo sumidouro, determinada pela equação (4):

$$P + Q_c - ETR - Q_s - \Delta = 0 \quad (4)$$

onde P é a precipitação na bacia, Q_c é a vazão dos córregos que abastecem a Lagoa do Sumidouro, ETR é a evapotranspiração real na bacia, Q_s é a vazão drenada pelo sumidouro e Δ é o volume de água retido na lagoa. A componente do escoamento de base mencionada na Tabela 1 diz respeito à retenção de água nos solos da região, contabilizada no balanço de Thornthwaite & Mather (1955), e a descarga de água para o aquífero profundo, que seguindo o padrão realizados em trabalhos anteriores na área, consistiu de 10% do valor da precipitação anual, em milímetros. A contribuição referente ao escoamento subsuperficial diz respeito ao fluxo de água subterrânea do aquífero raso, ou seja, o aquífero granular livre das coberturas.

Segundo Tavares (2020), as nascentes que compõe o córrego Samambaia correspondem a cerca de 14,6% da contribuição de entradas no balanço hídrico da bacia do córrego Samambaia. A vazão utilizada no cálculo do balanço de massa deste trabalho foi oriunda do monitoramento da vazão do córrego Samambaia no período de 2016 a 2021, efetuada por pesquisadores do Departamento de Geologia da Universidade Federal de Minas Gerais.

No presente estudo propôs-se o estudo da relação de causa-efeito entre precipitação e volume da lagoa, calculando-se inicialmente a autocorrelação dessa vazão. A autocorrelação é a medida de dependência de uma série para com seus valores de defasagem, que expressa o tempo de duração de um efeito (De Paula, 2019). Ferrari e Karmann (2008) determinaram que em ambientes cársticos o efeito de memória $r(k)$, que representa o tempo de defasagem para um efeito, está entre 0,1 e 0,2. O efeito de defasagem é o decaimento do correlograma, e quanto menor for esse valor, maior será o tempo de efeito de memória de um evento e, portanto, pressupõe-se um maior o grau de carstificação. Ao contrário, quanto maior for esse valor, pressupõe-se um menor grau de carstificação. As equações (5) e (6) da autocorrelação são:

$$r(k) = \frac{C(k)}{C(0)} \quad (5)$$

$$C(k) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^{n-k} (x_t - \bar{x})(x_{t+k} - \bar{x}) \quad (6)$$

onde $r(k)$ é o coeficiente de autocorrelação, ou efeito de memória; k é o tempo de defasagem entre dois valores da série; $C(k)$ é o valor de correlação da série para um valor k ; $C(0)$ é o valor de correlação da série para o valor 0; n é o tamanho da série; x_t é o valor medido para um tempo t ; x_{t+k} é o valor medido para um tempo de defasagem $t + k$; e \bar{x} é a média da série.

Depois de verificada a autocorrelação, é calculada a relação de causa-efeito entre duas variáveis com base na correlação cruzada. Segundo Ferrari e Karmann (2008), a correlação cruzada aplicada em ambientes cársticos é um ótimo parâmetro para estimar tempos de trânsito. Novamente, o tempo de defasagem de um efeito está, no carste, para valores $r_{xy}(k)$ entre 0,1 e 0,2. A função de correlação cruzada é calculada com base nas equações (7) e (8):

$$r_{xy}(k) = \frac{C_{xy}(k)}{\sigma_x \sigma_y} \quad (7)$$

$$C_{xy}(k) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^{n-k} (x_t - \bar{x})(y_{t+k} - \bar{y}) \quad (8)$$

onde, $r_{xy}(k)$ corresponde ao tempo de resposta do sistema; $C_{xy}(k)$ é o correlograma cruzado entre as variáveis x e y ; σ_x e σ_y são os desvios padrão das séries; k corresponde a um tempo de defasagem, dessa vez entre as duas séries; n é o tamanho da série; x_t e y_t são valores medidos para um instante t ; y_{t+k} é o valor medido para um tempo de defasagem $t + k$; e \bar{x} e \bar{y} são os valores médios da série.

Caso a função de correlação cruzada seja simétrica centrada em um valor k de valor nulo, as duas variáveis são independentes e não apresentam nenhum tipo de relação causa-efeito (Ferrari & Karmann, 2008).

3. RESULTADOS

3.1 Análises Geoespaciais

Para cada uma das 82 imagens da série histórica foi traçado o perímetro da lagoa, que serviu como curva de nível. A série histórica completa pode ser observada no Anexo I. Essa etapa foi particularmente desafiadora, uma vez que boa parte das imagens foi imageada por satélites de média/baixa resoluções (Figura 7). Considerando o traçado de diversos polígonos semelhantes, seria inadequada uma escolha aleatória de quais perímetros seriam empregados como curvas-base para a parte emersa do modelo de relevo; por isso, optou-se por uma análise prévia dos casos, de forma a se permitir a seleção de apenas alguns polígonos mais representativos (tanto do período de estiagem quanto chuvoso).

Assim, plotando-se os dados em função dos anos hidrológicos, foi possível, já em uma primeira avaliação se obter a linha de tendência da área inundada pela lagoa ao longo do tempo. Para ambos os períodos chuvoso/estiagem foram observadas linhas de tendência negativas, indicando uma diminuição generalizada da área da lagoa com o passar do tempo.

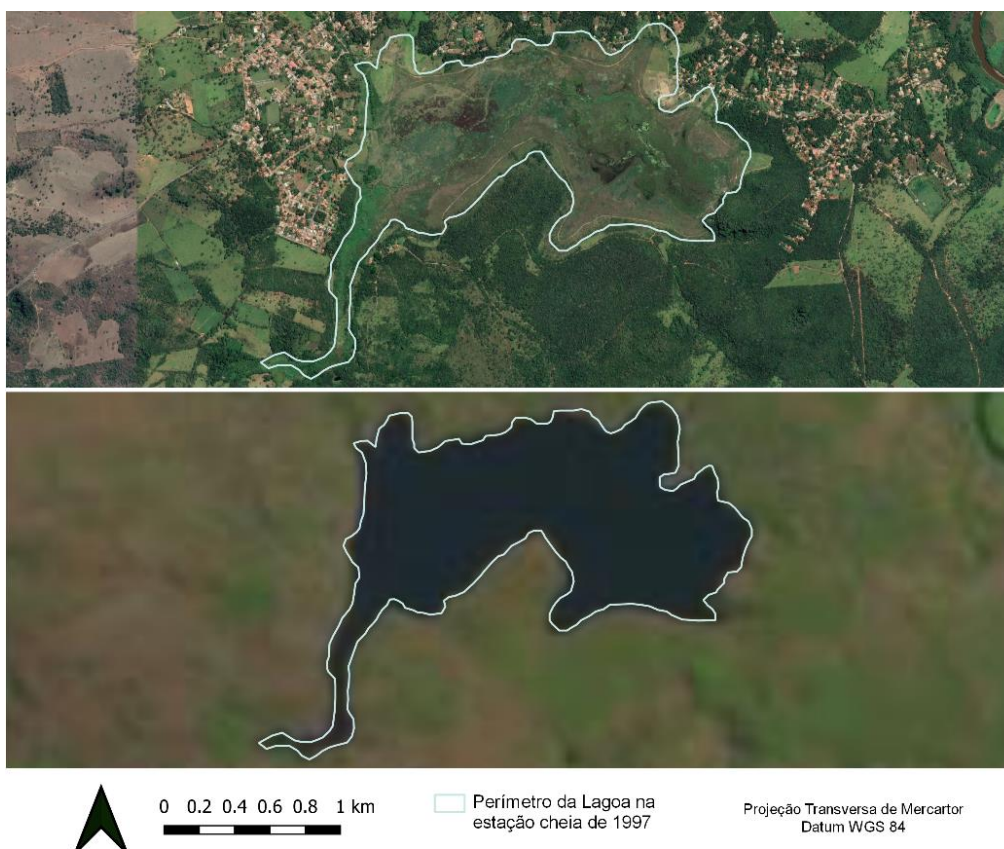


Figura 7 - Diferença de resolução entre uma imagem do Google Satélite CNES Airbus de 2021 (superior) e uma do satélite LANDSAT 5 de 1997 (inferior).

Os perímetros selecionados para compor as curvas de nível para a geração do modelo batimétrico foram aqueles cujas áreas estivessem mais aderentes à linha de tendência, ou seja, mais semelhantes a um valor esperado conforme a evolução da lagoa. As Figura 8 e Figura 9 ilustram o resultado obtido, mostrando os contornos pré-selecionados como possíveis curvas-base. O contorno de maior área nos períodos de estiagem e chuvoso também foi selecionado como possível curva-base, por representar o limite máximo da lagoa para a “batimetria emersa”.

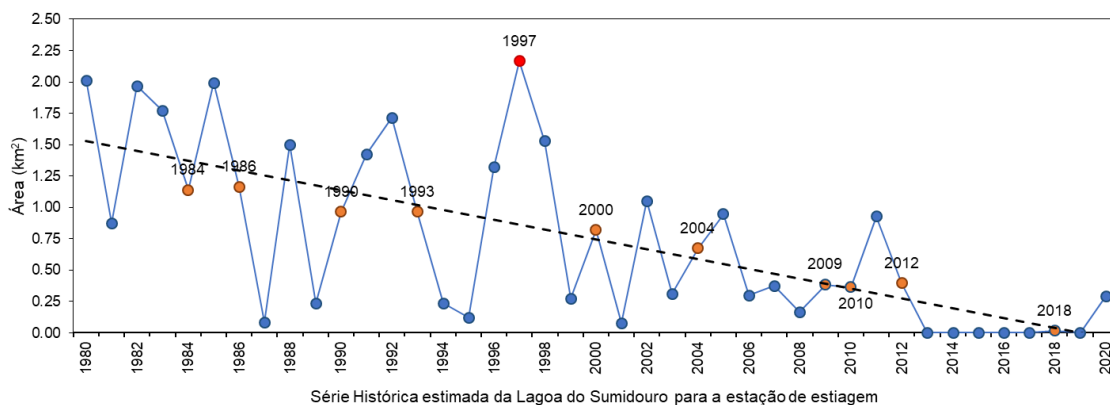


Figura 8 - Ilustração do processo de seleção de áreas estimadas mais aderentes (pontos em laranja) à linha de tendência para a Lagoa do Sumidouro durante a estação de estiagem, os quais correspondem a um perímetro/área, posteriormente avaliados como possíveis curvas-base para o modelo de batimetria. O maior perímetro/área (ponto em vermelho) também foi usado como possível curva-base.

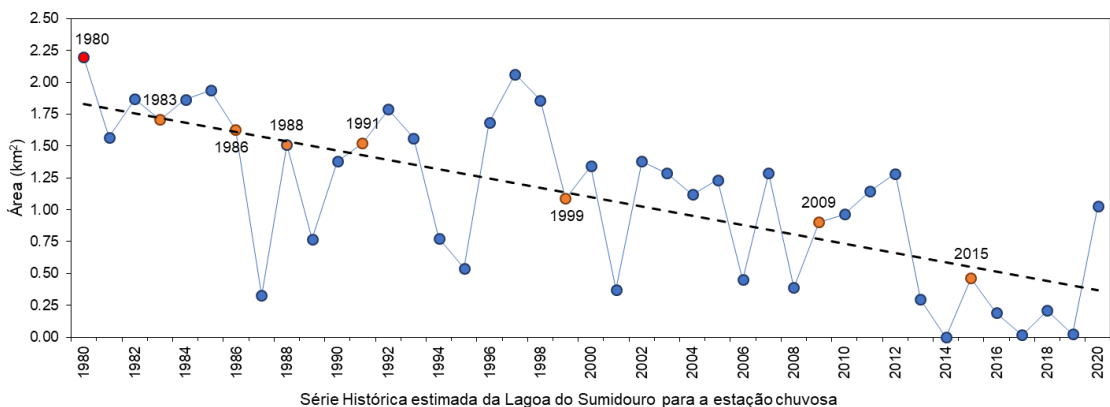


Figura 9 - Ilustração do processo de seleção de áreas mais aderentes (pontos em laranja) à linha de tendência para a Lagoa do Sumidouro durante a estação chuvosa, os quais correspondem a um perímetro/área, posteriormente avaliados como possíveis curvas-base para o modelo de batimetria. O maior perímetro/área (ponto em vermelho) também foi usado como possível curva-base.

Além das imagens das datas selecionadas (Figura 8 e Figura 9), foram utilizadas algumas imagens de satélite do Google Earth Pro (LANDSAT Cornelius e NASA), imageadas em fevereiro de 2003, agosto de 2004, agosto de 2010 e julho de 2013. Dessas imagens, foi traçado o talvegue que deságua no sumidouro da lagoa, na porção leste da mesma.

A partir daí um total de 11 curvas de nível foi selecionado para a elaboração do modelo batimétrico. Pequenos ajustes foram feitos a fim de se evitarem inconsistências no modelo, que seriam geradas por problemas como intercruzamento de curvas de nível próximas.

Com as curvas-base selecionadas, tomou-se a prerrogativa de estabelecer dois modelos distintos para a batimetria da lagoa: o primeiro composto pelas exatas 11 curvas obtidas na etapa anterior e o segundo composto por sete curvas apenas, mais espaçadas entre si, afim de obter-se o melhor resultado possível. As curvas-base utilizadas na definição dos modelos podem ser observadas na Figura 10. O intuito de realizar estimativas em dois modelos foi avaliar a diferença na precisão dos volumes finais gerados, sendo o de 11 curvas com dados menos espaçados e, em teoria, melhores, em comparação com dados menos espaçados, em teoria, piores.

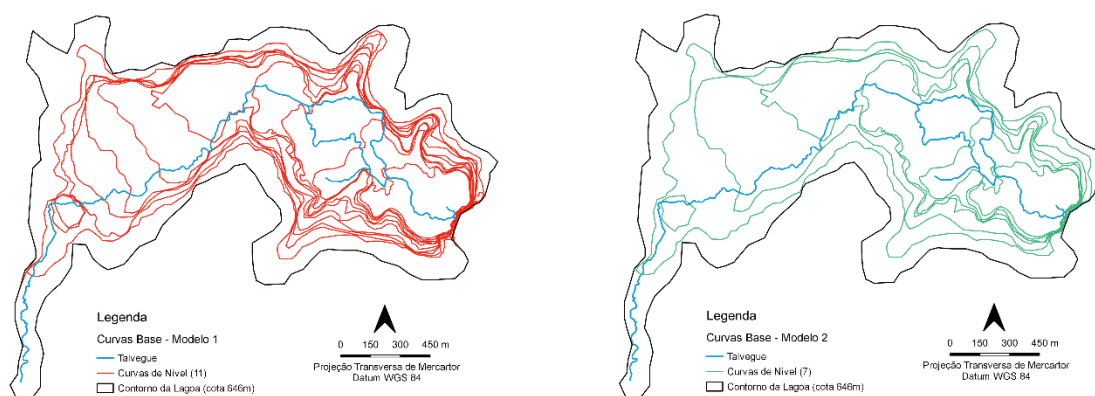


Figura 10 - Os dois conjuntos de dados de partida para a geração dos modelos batimétricos gerados a partir da combinação de 11 curvas de nível (à esquerda) ou 7 (à direita) e do talvegue da Lagoa do Sumidouro. Cotas foram inferidas para cada uma das curvas base utilizadas, em três cenários de estimativa diferentes.

Para cada uma dessas curvas-base, foi inferida, então uma cota topográfica. Essa etapa representou a decisão mais relevante para a representatividade da modelagem batimétrica.

Usando o MDE ALOS PALSAR foi determinada a cota de 646 metros como correspondente a área máxima da Lagoa do Sumidouro, sendo essa então também a cota mais elevada da lagoa. Acompanhando a premissa previamente estabelecida, assumiu-se a profundidade máxima atual da Lagoa em torno de 10 metros. Ou seja, a curva de nível mais baixa da lagoa foi definida com 636 metros. O desafio ficou por conta, então, de como as curvas de nível-base se distribuiriam entre as cotas máxima, de 646, e mínima, de 636 metros. Com o intuito de obter um modelo batimétrico mais

realista possível, foram estabelecidos três diferentes cenários possíveis para cada um dos dois modelos.

O primeiro cenário simulou uma declividade do fundo da lagoa concentrada próximo às margens, valorizando-se a perda de elevação nas curvas de nível mais externas. O segundo cenário simulou que a declividade evolui de maneira aproximadamente homogênea em toda extensão da Lagoa. E, por fim, o terceiro cenário simulou maior declividade na região mais profunda, ou seja, valorizou a perda de elevação nas curvas de nível mais internas. Assim, a Tabela 2 mostra as cotas inferidas para todos os três cenários para cada um dos dois modelos:

Tabela 2- Cotas inferidas entre os limites 646 e 636 metros para cada uma das curvas de nível nos respectivos modelos e cenários.

Modelo 1				Modelo 2			
Ano da curva	Cenário 1 (m)	Cenário 2 (m)	Cenário 3 (m)	Ano da curva	Cenário 1 (m)	Cenário 2 (m)	Cenário 3 (m)
1980	646,00	646,00	646,00	1980	646,00	646,00	646,00
1988	644,00	645,00	645,00	1988	642,00	644,00	645,00
2003	643,00	644,00	644,75	1999	640,00	643,00	644,00
1986	642,00	643,00	644,50	2004	639,00	641,00	643,00
1999	641,00	642,00	644,25	2004	638,00	640,00	642,00
2009	640,00	641,00	644,00	1994	637,00	638,00	639,00
2004	639,00	640,00	643,00	2013	636,00	636,00	636,00
2004	638,00	639,00	641,00				
2010	637,00	638,00	640,00				
1994	636,50	637,00	638,00				
2013	636,00	636,00	636,00				

A interpolação partiu do limite máximo da Lagoa do Sumidouro (ano 1980, cota 646 metros) e o talvegue delineado como área limite e corpo hídrico, respectivamente. A cota de 636 metros foi, por definição, a curva-base mais interna da lagoa. A Figura 11 mostra cada um dos modelos batimétricos gerados com suas respectivas cotas interpoladas e a Tabela 3 mostra os volumes máximos encontrados para as seis estimativas geradas. Os volumes obtidos foram calculados a partir do volume máximo de um MDE, uma vez que o produto da interpolação ANUDEM é um arquivo raster MDE.

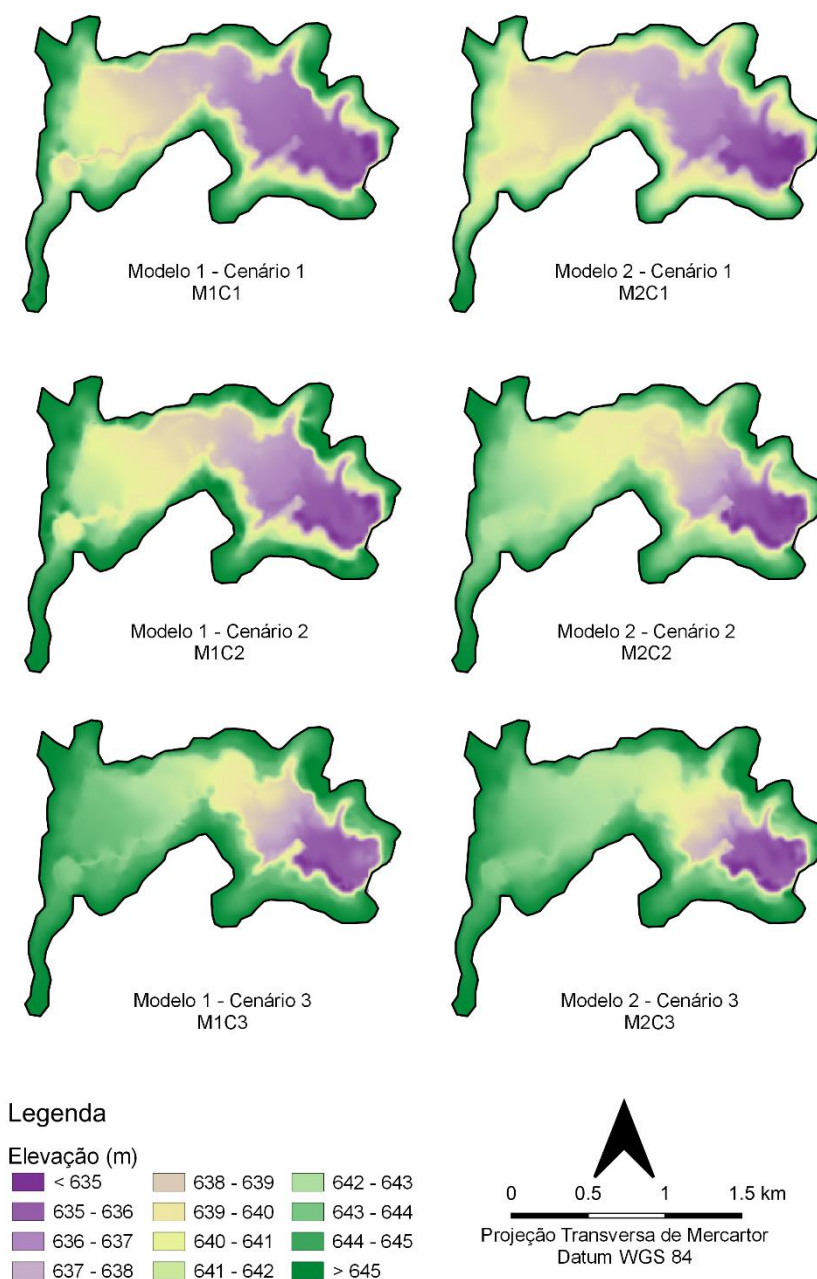


Figura 11 - Resultados para cada modelo e cenário obtidos para a batimetria da Lagoa do Sumidouro, cota em metros. Modelo 1, Cenário 1 (M1C1); Modelo 1, Cenário 2 (M1C2); Modelo 1, Cenário 3 (M1C3); Modelo 2, Cenário 1 (M2C1); Modelo 2, Cenário 2 (M2C2); Modelo 2, Cenário 3 (M2C3).

Tabela 3 - Volumes máximos calculados para cada um dos modelos-cenários estipulados, em metros cúbicos

Modelo 1			Modelo 2		
Cenário 1 (m ³)	Cenário 2 (m ³)	Cenário 3 (m ³)	Cenário 1 (m ³)	Cenário 2 (m ³)	Cenário 3 (m ³)
11.432.803	10.013.727	7.111.371	13.154.494	9.245.222	6.891.814

Analisando-se os dois modelos entre si, os volumes foram semelhantes, apresentando mesma ordem de grandeza, o que comprova não ser crítica a escolha de um conjunto de sete ou onze curvas de nível. Já se comparando modelo a modelo, o Modelo 2 foi 15,06% mais volumoso que o Modelo 1, no cenário 1. Considerando apenas o cenário 2, o Modelo 1 foi 8,31% mais volumoso. Considerando apenas o cenário 3, o Modelo 1 foi 3,19% mais volumoso. Comparando cenário a cenário, os Cenários 1 e 2 apresentaram volumes bastante semelhantes para o Modelo 1, enquanto os Cenários 2 e 3 foram mais semelhantes no Modelo 2. O Cenário 3 apresentou volumes mais baixos em comparação com os outros dois, sendo muito grande a diferença com o Cenário 1. As superfícies batimétricas geradas pelos três cenários do Modelo 1 tiveram estruturas irregulares e acidentadas na parte mais profunda da lagoa, se comparadas com as estruturas simplificadas do Modelo 2.

Um fator determinante para a escolha do modelo batimétrico ideal foi adotar o relevo menos complexo possível, por exemplo, assumindo que o ponto mais fundo da lagoa é o sumidouro. Isso invalida o Modelo 1, Cenário 3. Para o Modelo 2, apenas o cenário 3 apresentou estruturas mais complexas na região proximal do sumidouro. Além deste critério, foi considerado em questão a precisão da medida das cotas, ou seja, cotas de precisão métrica seriam, via de regra, melhores que cotas de precisão centimétricas, uma vez que o MDE utilizado na geração dos modelos tinha precisão métrica. No entanto, fez-se necessário utilizar medidas centimétricas no Modelo 1, Cenários 1 e 3, pois devido ao número de curvas base (11) num intervalo de elevação de 10 metros, necessariamente alguma curva teria de ser inferida com precisão centimétrica. Embora possa parecer que estes dois cenários, a priori, fossem piores que os demais, o resultado final foi muito semelhante ao do Modelo 2.

O modelo batimétrico escolhido para o prosseguimento do estudo foi, então, o **Modelo 2, Cenário 2 (M2C2)**, motivado pelos seguintes fatores: primeiramente, utilizou-se como *input* dados de cotas com precisão igual à do MDE. Em segundo lugar, o relevo gerado é defensável, pois conserva a posição do sumidouro como nível de base. Em

terceiro lugar, o volume máximo da lagoa para o M2C2 é intermediário entre os demais modelos, sendo muito parecido com a média aritmética (tratamento normal de dados) e a média harmônica (considerando o volume da lagoa como uma medida de vazão anual), conforme mostra a Figura 12. A principal vantagem em relação ao Modelo 1, Cenário 2 (M1C2), que também foi considerado como excelente modelo, é a simplicidade das estruturas no fundo da lagoa, sendo mais coerente com o observado pelas imagens satelitais.

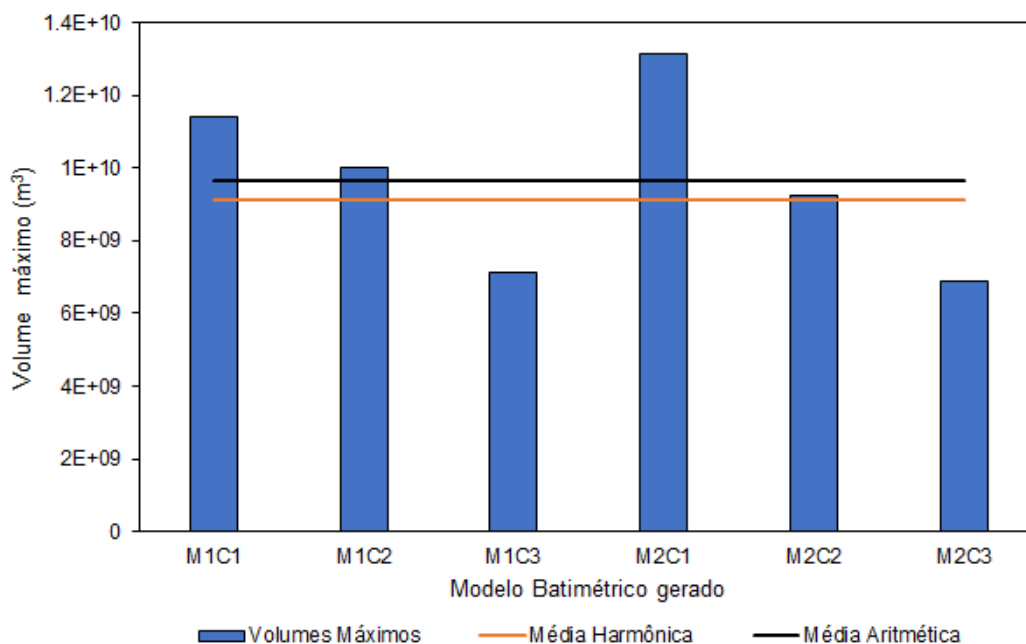


Figura 12 - A comparação visual entre modelos batimétricos gerados mostrando um favorecimento do M2C2 em relação aos demais por ter o volume máximo mais próximo às médias especificadas.

Dessa forma, a partir do M2C2, os volumes históricos calculados da lagoa puderam ser reconstruídos, para os dois períodos registrados (estação de estiagem e estação chuvosa), (Figura 13). Os volumes obtidos foram calculados através do recorte do MDE do M2C2 para cada um dos perímetros na série histórica de imagens de satélite. Assim como no caso das áreas perimetrais da lagoa, os resultados aqui obtidos também corroboraram claramente a linha de tendência negativa para os volumes ao longo do tempo, como demonstrado pelas imagens de satélites multitemporais.

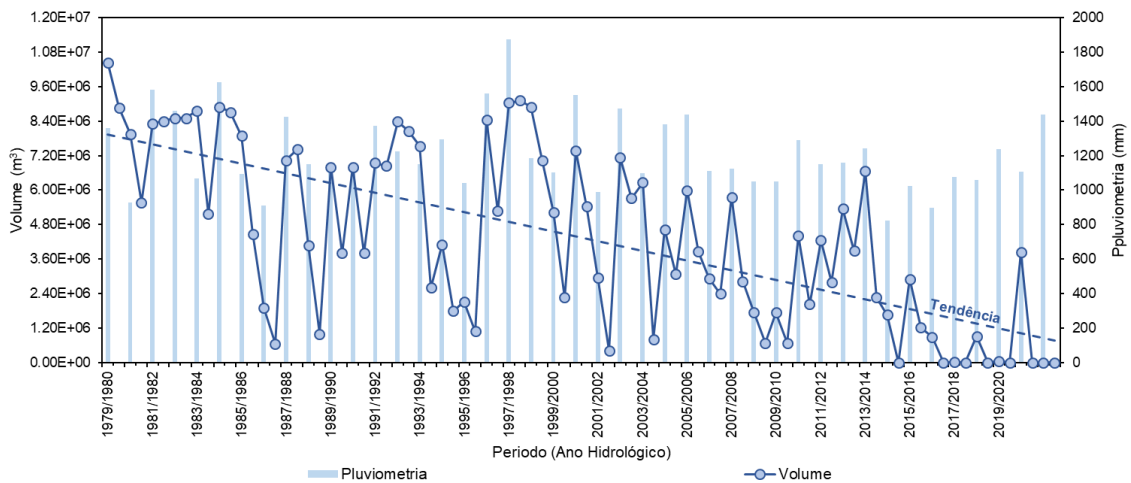


Figura 13 - Pluviometria e volumes recuperados da série histórica da Lagoa do Sumidouro. Nota-se a forte tendência de redução nos volumes da lagoa, visto que no presente momento esta se encontra num estágio de secas.

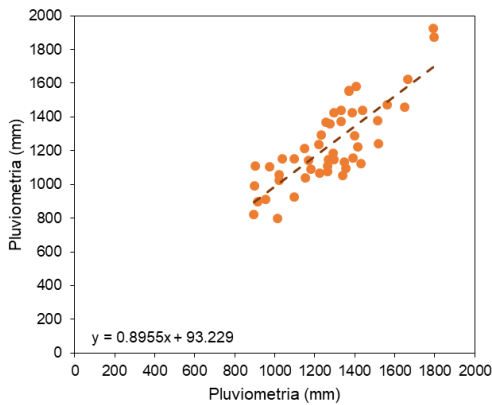
3.2 Análises Hidrometeorológicas

Após a aquisição dos dados brutos de pluviometria e temperatura foi possível a determinação e análises de parâmetros meteorológicos.

A completção de dados da série histórica pluviométrica da Lagoa do Sumidouro ocorreu através da correlação entre as séries históricas das estações Ponte Raul Soares e Pedro Leopoldo, sendo a primeira a estação de referência. Caso a correlação fosse satisfatória, dados ausentes nos anos 2013 a 2015 e 2019 a 2020, bem como o intervalo anterior a 1972 poderiam ser completados, uma vez que a estação Pedro Leopoldo iniciou seus registros em 1941. O critério de seleção foi que o coeficiente de correlação de Pearson fosse maior que 0,7. Embora haja outras estações no entorno, foi usada apenas a segunda estação mais próxima, uma vez que as vizinhas não tinham aquisição de dados tão antiga (caso da estação Lagoa Santa – 1943083, que iniciou em 2001) ou estavam muito afastadas, por isso teriam correlações insuficientes (caso da estação Sete Lagoas).

Para a análise estatística, somente foi considerado o período em que as duas estações apresentaram dados concomitantes, ou seja, de 1972 a 2013 e 2015 a 2019. A série histórica da estação Pedro Leopoldo teve coeficiente de correlação de Pearson de 0,816. Da mesma forma, ao analisar a regressão linear de diagramas de dispersão (Figura 14) da estação em comparação com a estação Ponte Raul Soares, foi possível ver que a distribuição foi bem parecida, com um coeficiente angular de 0,896. A correlação também foi evidenciada no diagrama de probabilidades, o QQPlot.

Pedro Leopoldo e Ponte Raul Soares - Scatterplot



Pedro Leopoldo e Ponte Raul Soares - QQPlot

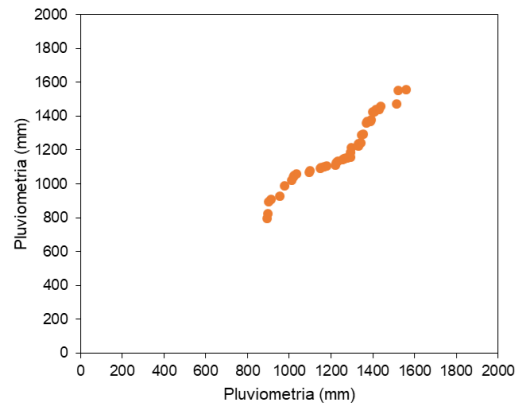


Figura 14 - Diagramas de dispersão (Scatterplot) e probabilidade (QQ-Plot) para as pluviometrias históricas da estação Pedro Leopoldo, tomando a estação Ponte Raul Soares como referência comparativa. Todos os valores plotados são pluviometrias anuais.

Depois disso o método de dupla-massa foi utilizado para confirmar a consistência da série histórica da estação Pedro Leopoldo. O resultado foi satisfatório, não sendo observada nenhuma mudança de declividade na curva (Figura 15), ou seja, os dados são consistentes e não houve mudança no regime pluviométrico para o período analisado. Dessa forma, completou-se os dados ausentes na série histórica com valores registrados pela estação de Pedro Leopoldo

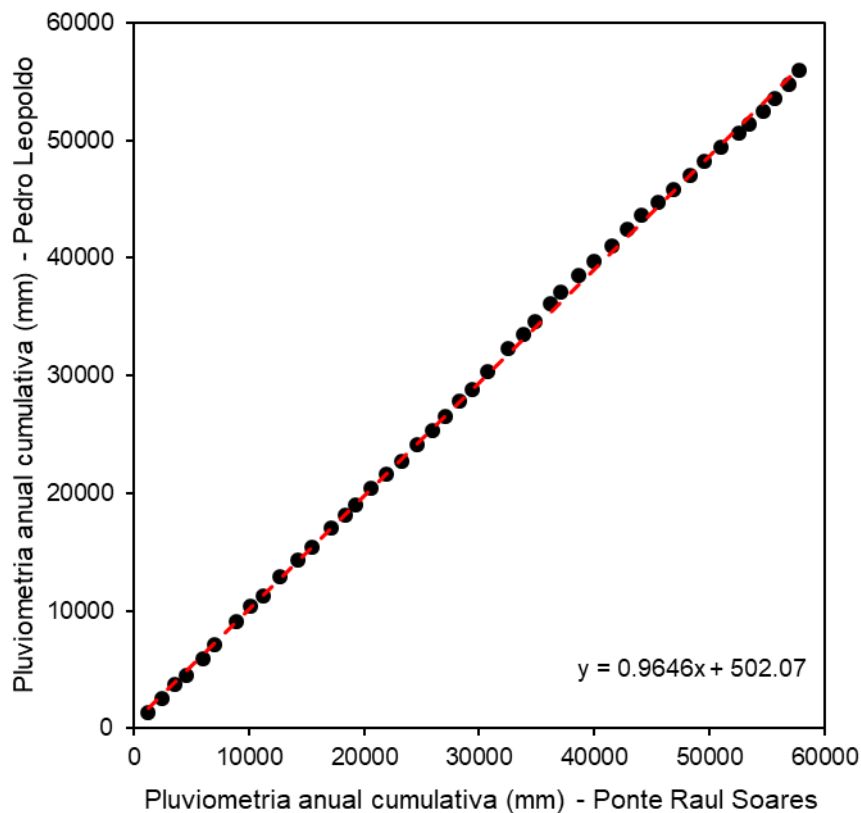


Figura 15 - O resultado do método de dupla massa mostrou dados muito consistentes e de distribuição semelhante para a estação Pedro Leopoldo, corroborando para a escolha desta estação para a completação da série pluviométrica histórica da Lagoa do Sumidouro.

Os dados da estação pluviométrica Ponte Raul Soares, pontualmente completados pelos da estação Pedro Leopoldo, estão apresentados em regime anual na Figura 16. Para as análises de regime pluviométrico, temperatura e balanço hidrometeorológico optou-se por trabalhar apenas com os dados brutos da série histórica da estação Ponte Raul Soares (de 1972 a 2020), e usar os dados completados para as análises de ciclos de seca e cheia pluviométricos históricos (de 1941 a 2020). Essa decisão se deve ao fato de os dados de temperatura serem provenientes da estação Sete Lagoas, que não possui uma correlação pluviométrica tão alta, devido à maior distância em relação à estação de referência.

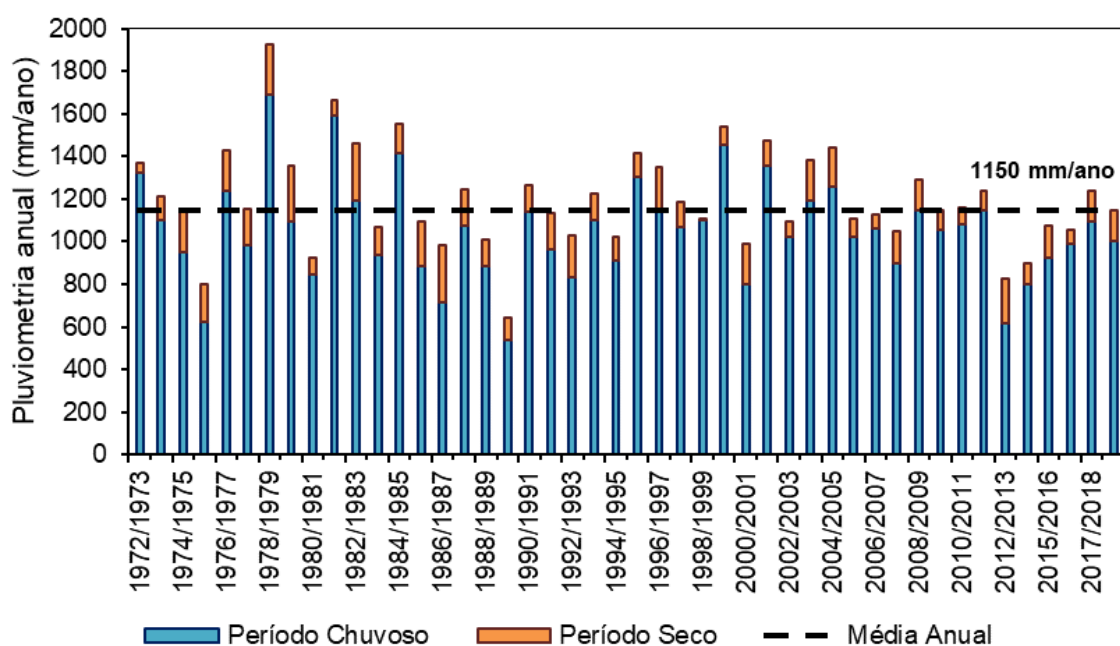


Figura 16 - Evolução dos valores pluviométricos anuais registrados na Estação Ponte Raul Soares entre 1972 e 2020, bem como o valor calculado para média harmônica anual, considerando o mesmo período.

É possível observar uma leve tendência de queda no valor de precipitação total anual com o passar dos anos. Além disso, sabe-se que as chuvas têm sido mais concentradas, isto é, eventos chuvosos ocorrem mais intensos e em menos dias ao longo do ano (Landau *et al.* 2021).

O tratamento dos dados de temperatura da estação Sete Lagoas (A569) retornou os valores médios anuais (Figura 17). Assim como apresentado por Guimarães, Sans e Leão (2004) e Landau *et al.* (2021), que utilizaram dados desta mesma estação meteorológica, foi observado uma tendência de aumento significativo da temperatura ao longo do período avaliado.

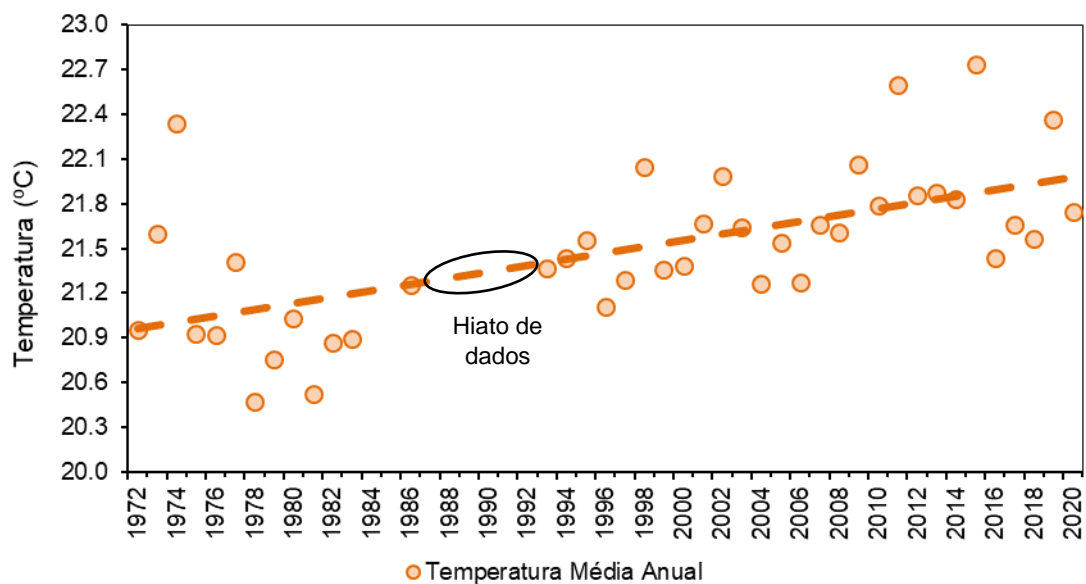


Figura 17 - Valores médios anuais de temperatura registrados na estação da Sete Lagoas entre 1972 e 2020.

De acordo com o Boletim de Desenvolvimento e Pesquisa 226: Mudanças Climáticas em Sete Lagoas-MG, Brasil: Tendências de Variações de Temperatura e Precipitação entre 1926 e 2021, da Embrapa, entre 1926 e 2021 a tendência de aumento de temperatura observada para Sete Lagoas foi de 0,0195 °C/ano, mais de 2,5 vezes maior do que a média global apresentada para o século XX, que foi de 0,0076 °C/ano (*Intergovernmental Panel on Climate Change*, 2007). Além disso, há um registro histórico feito por Peter Lund, em 1865, que indica que a temperatura média anual da região era de 20,5 °C (Warming, 1908), o que é condizente com os valores observados durante a década de 1970. Destaca-se que desde 1751, pouco mais de 400 bilhões de toneladas métricas de carbono foram lançadas na atmosfera, principalmente associadas ao consumo de combustíveis fósseis, sendo que metade dessas emissões ocorreu a partir da segunda metade da década 1980 (Boden, Marland & Andres, 2017). Tal *trend* corrobora com a já amplamente estabelecida relação entre as mudanças climáticas e a emissão antrópica de gases causadores do efeito estufa.

Com a série histórica completa, envolvendo os anos hidrológicos de 1941-1942 a 2019-2020, foi possível definir ciclos chuvosos e secos na lagoa (Figura 18). Ao longo da série histórica foram separados oito ciclos, de durações entre 6 e 16 anos. A série histórica inicia com um período de chuvas de 16 anos, que também é o ciclo mais longo do conjunto (1941-1957), com apenas três anos com precipitação menor que a média da série. Depois, segue para um ciclo seco de 7 anos (1957-1964), seguido de outro ciclo chuvoso de 6 anos (1964-1970) e uma nova seca de 6 anos (1970-1976). É relevante ressaltar que Kohler (1989) constatou no ano hidrológico 1975-1976 uma seca

volumétrica na Lagoa do Sumidouro, coincidindo com essa seca pluviométrica. Logo depois vem um ciclo chuvoso de 9 anos (1976-1985), com apenas três anos com pluviometrias menores que a média. Um novo ciclo seco de 10 anos é constatado no período 1985-1995, que também coincide por uma seca volumétrica na Lagoa do Sumidouro (Kohler, 1989). O seguinte ciclo chuvoso (1995-2005) tem 10 anos, dos quais quatro possuem precipitações menores que a média. A partir de 2005 foi observado o maior ciclo seco de toda a série histórica, já durando 16 anos, com apenas três pluviometrias anuais superiores à média. Esse período também é coincidente com o agravamento da seca volumétrica na Lagoa do Sumidouro. A pluviometria apresenta uma linha de tendência histórica negativa, também registrado pela Figura 18.

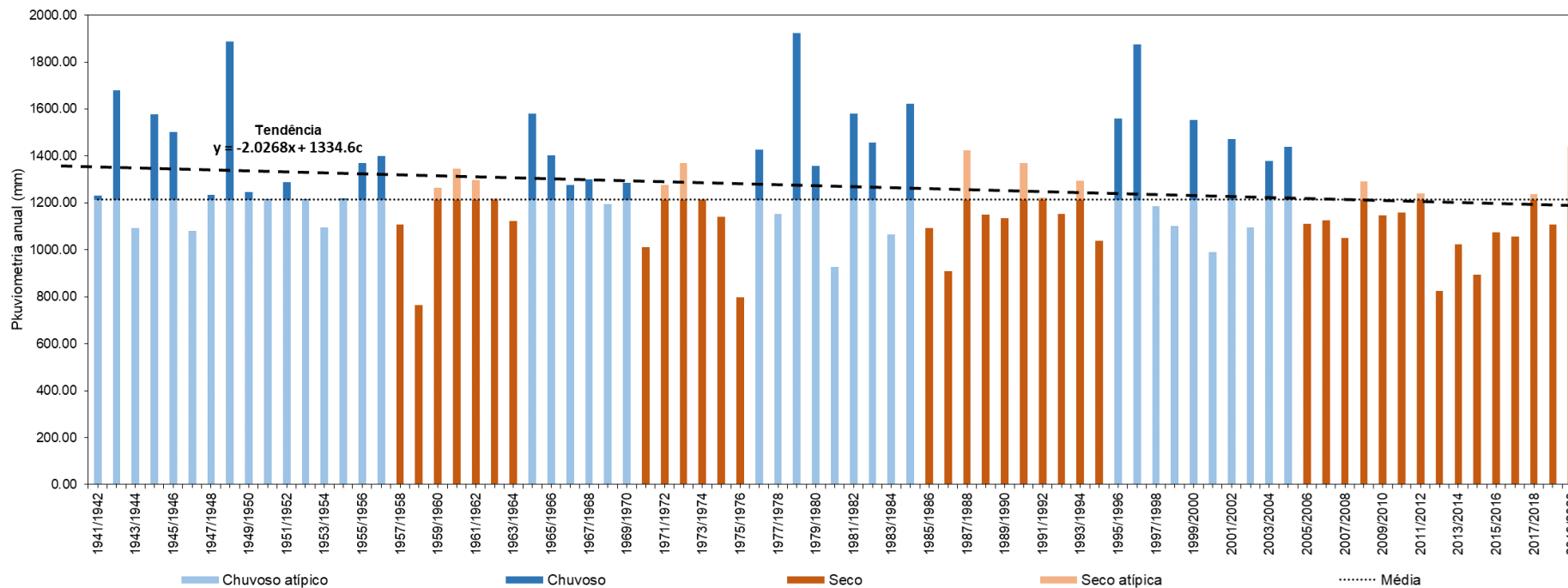


Figura 18 - Ciclos observados para a série pluviométrica histórica da Lagoa do Sumidouro. Em azul, ciclos chuvosos (azul escuro: valores que excedem a média histórica, azul claro: valores abaixo da média, mas que compõe um ciclo de altas pluviometrias). Em laranja, ciclos secos (laranja escuro: valores abaixo da média, laranja claro: valores acima da média, mas inseridos num ciclo de baixas pluviometrias).

Com base nas séries históricas volumétricas da Lagoa do Sumidouro, foram separados ciclos de seca e cheia para os volumes recuperados na estação de estiagem (agosto a outubro) e na chuvosa (fevereiro a abril). A maior parte dos ciclos foi coincidente entre as séries, contudo algumas diferenças foram visíveis. Para a série de estação de estiagem, foram observados sete ciclos de seca, com durações entre um e oito anos, e sete ciclos de cheia, com durações entre um e sete anos (Figura 19). Para a série da estação chuvosa foram constatados seis ciclos de seca, também com durações entre um e oito anos, e seis ciclos de cheia, com durações entre um e sete anos (Figura 20).

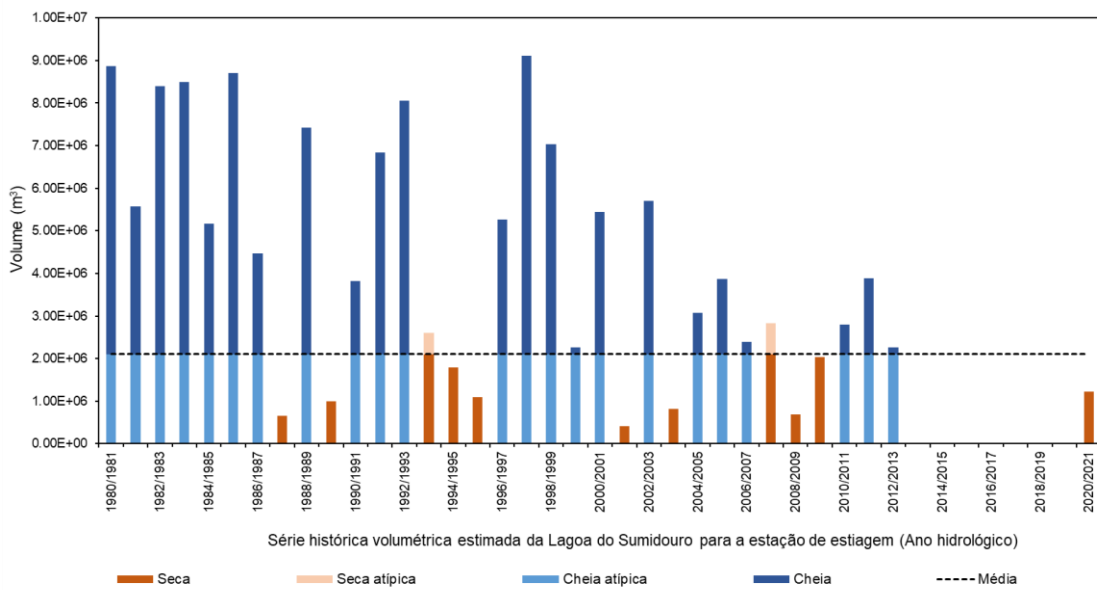


Figura 19 - Separação da série histórica volumétrica de estações de estiagem para a Lagoa do Sumidouro. Para essa classificação foi usada a média da série como principal atributo de comparação, tendo como resultado sete ciclos de seca (laranja) e cheia (azul).

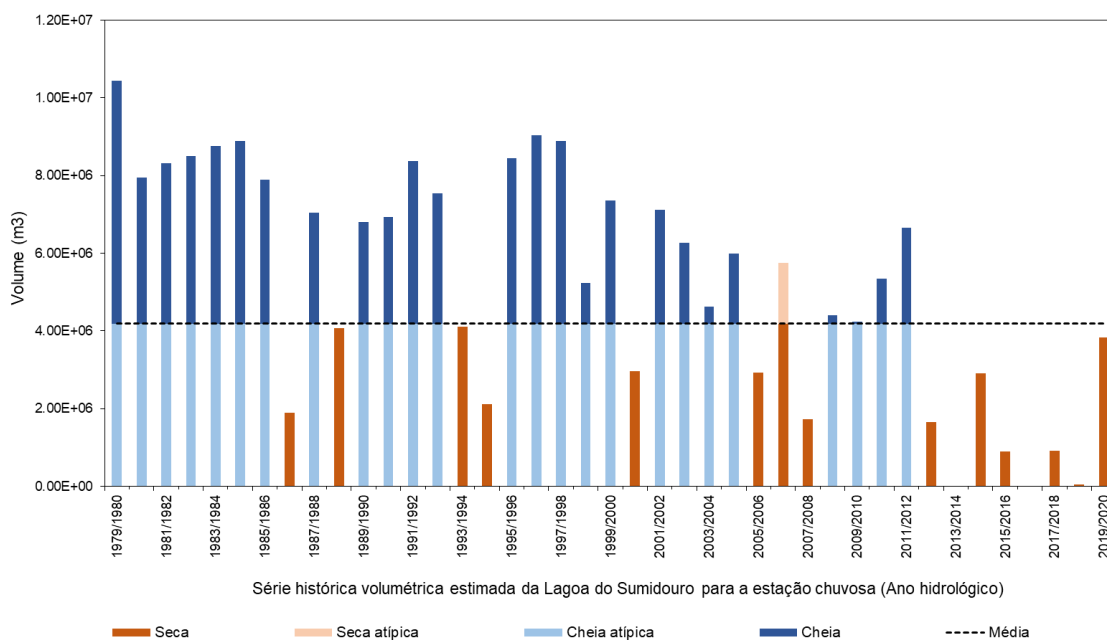


Figura 20 - Separação da série histórica volumétrica de estações chuvosas para a Lagoa do Sumidouro. Para essa classificação foi usada a média da série como principal atributo de comparação, tendo como resultado seis ciclos de seca (laranja) e cheia (azul).

Comparativamente, as duas séries tiveram resultados de agrupamento parecidos, sendo o ciclo de seca-cheia extra da série de estações de estiagem a principal diferença entre as duas. Essa diferença se deu no ano hidrológico 2003-2004, no qual a diminuição do volume da lagoa na estação chuvosa não foi tão grande como na estação de estiagem, mascarando um ciclo curto de seca. Outras pequenas diferenças no início e fim de alguns ciclos se devem a precipitações anômalas para os meses em que os imageamentos foram realizados.

Analisando-se os gráficos, é possível observar algumas tendências para a Lagoa do Sumidouro: no período até 1985-1986 a lagoa tinha altos volumes e se comportava de maneira perene; até 2012-2013 as secas se caracterizavam por serem curtas, normalmente não excedendo dois anos; a lagoa secou completamente em apenas um ano, contradizendo muitos relatos de moradores da região; a lagoa sempre foi intermitente entre ciclos de seca e cheia, sendo muito raros períodos de cheia contínua (1980-1986) ou seca contínua (2012-2020).

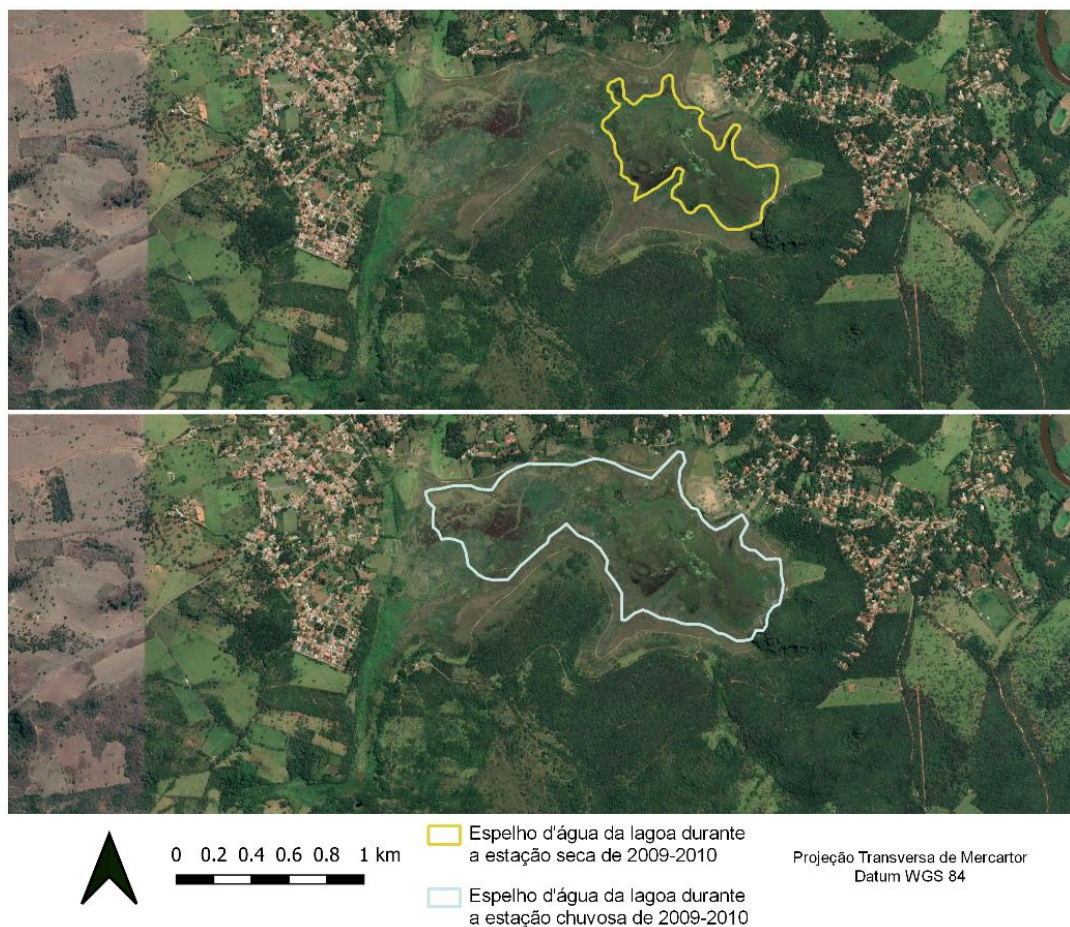


Figura 21 - Perímetros do espelho d'água aproximada das médias volumétricas em estações de estiagem e chuvosas, referente ao ano hidrológico 2009-2010, que se caracteriza como ano de seca, porém com valores muito próximos as médias harmônicas de toda a série histórica (tanto na estação de estiagem quanto chuvosa)

A Figura 21 mostra a representação espacial aproximada de valores médios utilizados para efeito comparativo, sendo estes ilustrados pelo ano 2009-2010. Pela imagem, é possível notar que valores médios representam volumes não representativos da extensão da Lagoa, que chegou a ocupar áreas muito maiores. Dessa forma, avaliar dados apenas baseados em média, seja harmônica ou aritmética, pode não ser adequado em casos como este, uma vez que é sabido que a Lagoa do Sumidouro está secando, o que pode ter tornado estes valores médios não representativos. Todavia, o uso da média harmônica suaviza um pouco esse problema, pois exclui automaticamente dados nulos. Mesmo assim, optou-se por usar outro padrão de comparação para análise das séries volumétricas. Este foi o volume mínimo registrado durante a época em que a lagoa se comportou de maneira perene. As Figura 22 e Figura 23 mostram a diferença na determinação de ciclos de seca e cheia, usando perenidade como fator de comparação. A lagoa normal perene pode ser espacialmente visualizada na Figura 24.

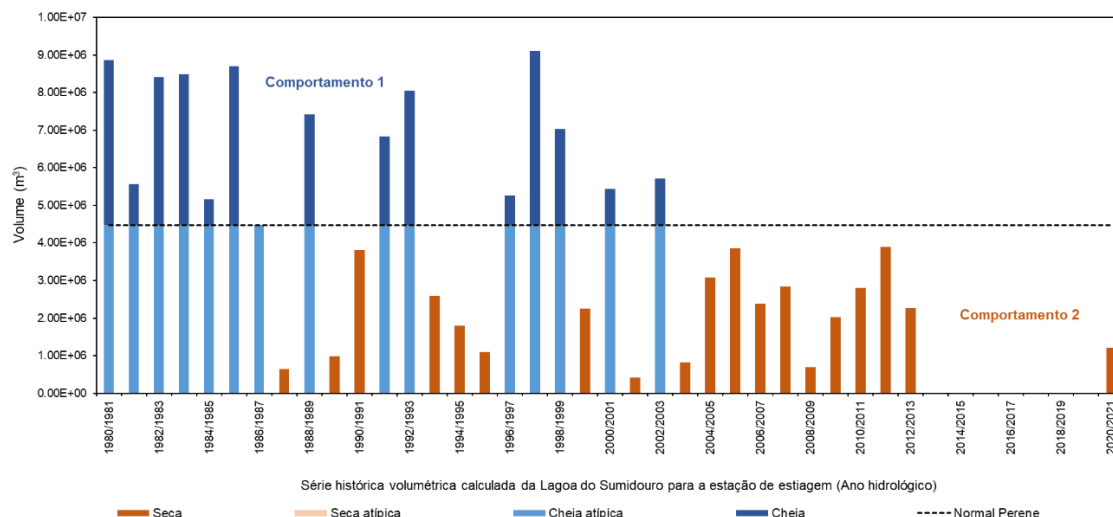


Figura 22 - Separação da série histórica volumétrica de estações de estiagem para a Lagoa do Sumidouro a partir da comparação com relação a um valor “normal” de referência, indicador de perenidade. Nota-se uma mudança comportamental bastante que se inicia por volta de 1999 e fica bem mais clara a partir de 2003.

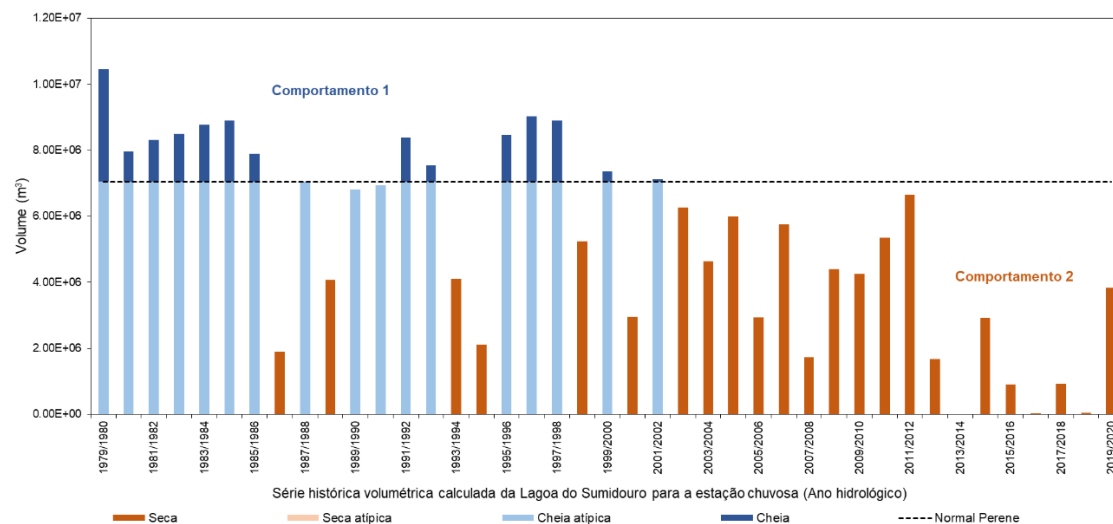


Figura 23 - Separação da série histórica volumétrica de estações chuvosas para a Lagoa do Sumidouro a partir da comparação com relação a um valor “normal” de referência, indicador de perenidade. Nota-se uma mudança comportamental bastante que se inicia a partir de 1998 e fica bem mais clara a partir de 2002.

Estabelecendo essa segunda análise, foi possível verificar dois períodos maiores no comportamento da Lagoa do Sumidouro. O primeiro é predominantemente marcado por anos de cheia, com secas curtas de até três anos. O segundo é predominantemente seco, marcado por pouquíssimos anos de cheia volumétrica. Isso mostra que a Lagoa do Sumidouro não vem conseguindo ter cheias volumétricas relevantes desde os anos hidrológicos 1998-2000. Mesmo quando houve cheias, elas foram menores que as menores cheias do período antecessor. Essa constatação também é evidência da relação pluviometria-volume, visto que o período a partir de 1998 também apresenta menores pluviometrias se comparado com o período anterior.

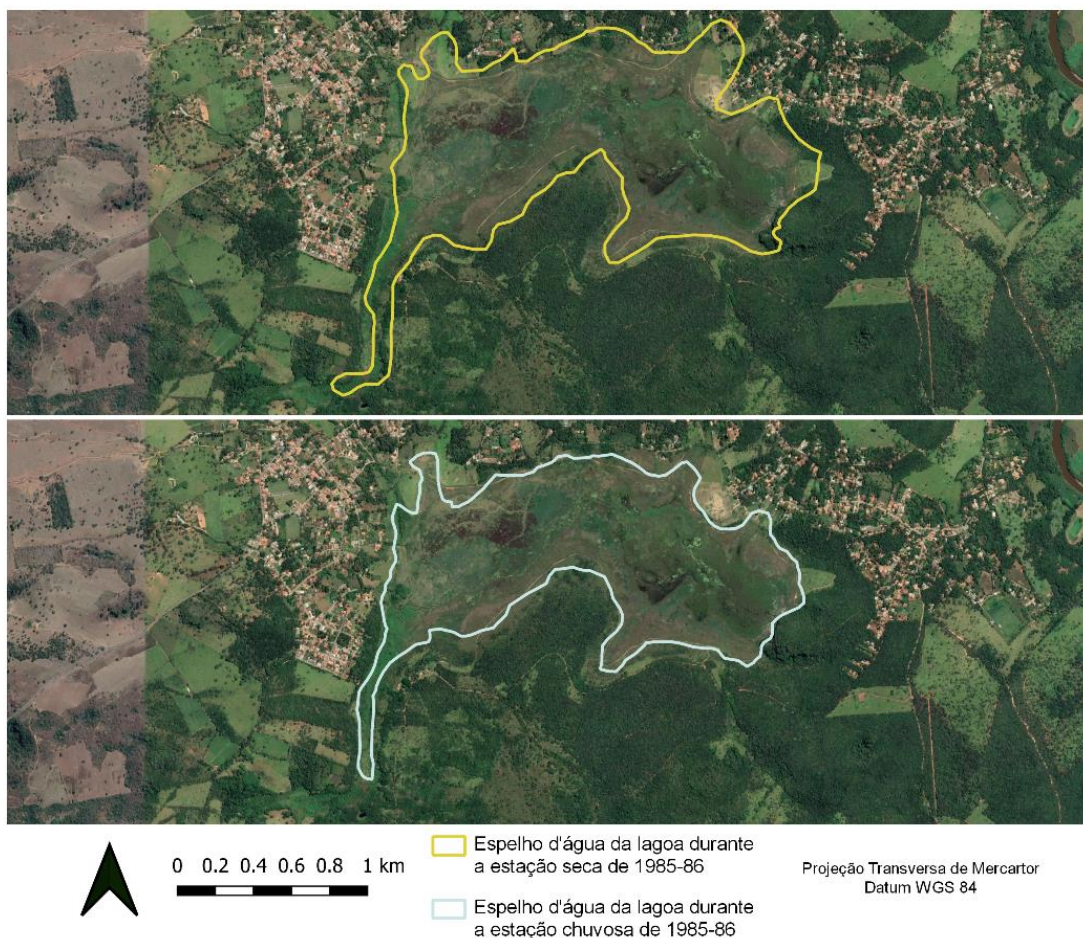
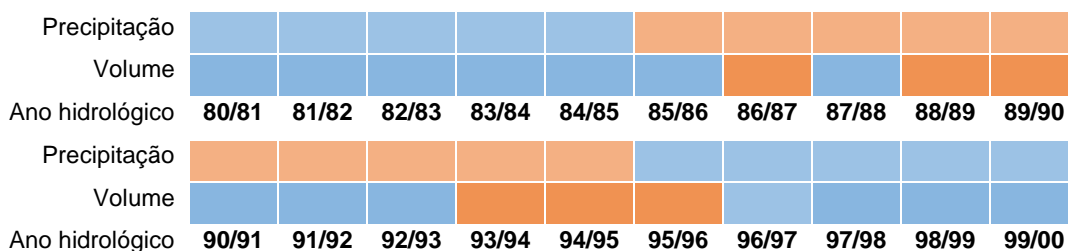


Figura 24 - Perímetros do espelho d'água da lagoa "normal" perene (ano hidrológico 1985-1986) utilizada como parâmetro de comparação com relação ao restante da série histórica. Assume-se que nessa época a lagoa não estava sujeita a grandes alterações volumétricas anuais, fazendo com que a comparação dos volumes mínimos registrados nesse período (ano em questão) seja de grande relevância para interpretar o restante da série histórica.

A Figura 25 é um quadro-síntese entre os ciclos de seca e cheia pluviométricos e os ciclos de seca e cheia volumétricos. Quadrados em laranja representam seca, enquanto os azuis representam cheias. É notória a coincidência entre os dois parâmetros. Embora ciclos volumétricos de seca geralmente sejam curtos, acontecem com mais frequência durante ciclos pluviométricos de seca. Da mesma forma, longos ciclos de seca ou cheia volumétrica são extremamente aderentes com a distribuição temporal dos ciclos pluviométricos.



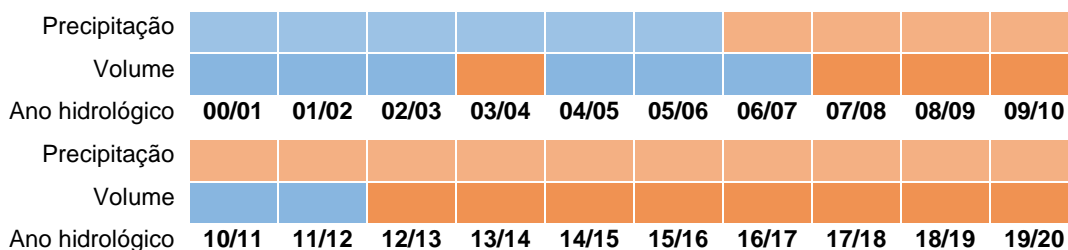


Figura 25 - Relação gráfico-visual entre precipitação e volumes ao longo da série temporal analisada para a Lagoa do Sumidouro. Em tons de laranja, estão demarcados anos de seca, enquanto em tons de azul, estão demarcados anos de cheia. Tons escuros representam a série volumétrica, enquanto tons claros a série pluviométrica. Nota-se que as duas séries apresentaram ciclos muito semelhantes de seca e cheia, coincidindo na maior parte delas.

Os dados apresentados reforçam a pluviometria como um dos principais fatores de influência na dinâmica hídrica da Lagoa do Sumidouro. Seguindo essa linha de raciocínio, é coerente investigar a origem das águas que abastecem a lagoa, o que será discutido a seguir, através do método potenciométrico. Depois, ainda é discutido a relação causa-efeito entre os parâmetros, através do método de correlação cruzada.

Nos levantamentos de campo foram encontrados poucos poços profundos no distrito de Fidalgo, sendo cisternas as mais frequentes. Foram encontrados quatro poços, sendo dois deles operados pela Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA) a uma vazão total de 70,2 m³/h, conhecida através de informes disponibilizados no Plano Municipal de Saneamento Básico de Pedro Leopoldo de 2015 e em dados de outorga do Sistema Integrado de Informação Ambiental (SIAM). Os demais poços pertencem a propriedades particulares. Dentre as cisternas, um total de dez foram identificadas, dentre as quais sete tiveram seu nível d'água medido. Um relato comum de moradores é que a maior parte da população que possuía algum poço ou cisterna deixou de usá-lo e mantê-lo após a COPASA assumir o sistema de abastecimento de água do distrito. Os moradores também relataram "má qualidade" da água fornecida pelo abastecimento e que a origem dessa água bombeada é dos dois poços já mencionados.

A partir da medição do nível d'água das cisternas obteve-se pontualmente as cargas hidráulicas e visualizou-se a direção de fluxo da água do aquífero granular. O mapa potenciométrico (Figura 26) mostra fluxos do aquífero poroso rumo ao interior da Lagoa do Sumidouro: um para leste, a partir da porção oeste da lagoa, e outro para sudeste, a partir da porção norte da lagoa. Através do mapa potenciométrico, de onde foi possível observar o sentido de fluxo subterrâneo, foi possível constatar que a Lagoa do Sumidouro é abastecida pelo aquífero raso e granular das coberturas. O fluxo da água nesse caso é outro indicativo da relação indireta entre a lagoa e pluviometria, visto que o aquífero que abastece a Lagoa do Sumidouro tem como recarga primordial a precipitação.

Segundo estudos de Tavares (2020) e de Paula (2019), o Índice de Fluxo de Base do córrego Samambaia é de mais de 94%, o que comprova a origem de água subterrânea das nascentes. Como os dados mostram que a lagoa é primordialmente abastecida pela pluviometria, é possível concluir que o aquífero superficial de fato possui grande relevância para o abastecimento da lagoa.

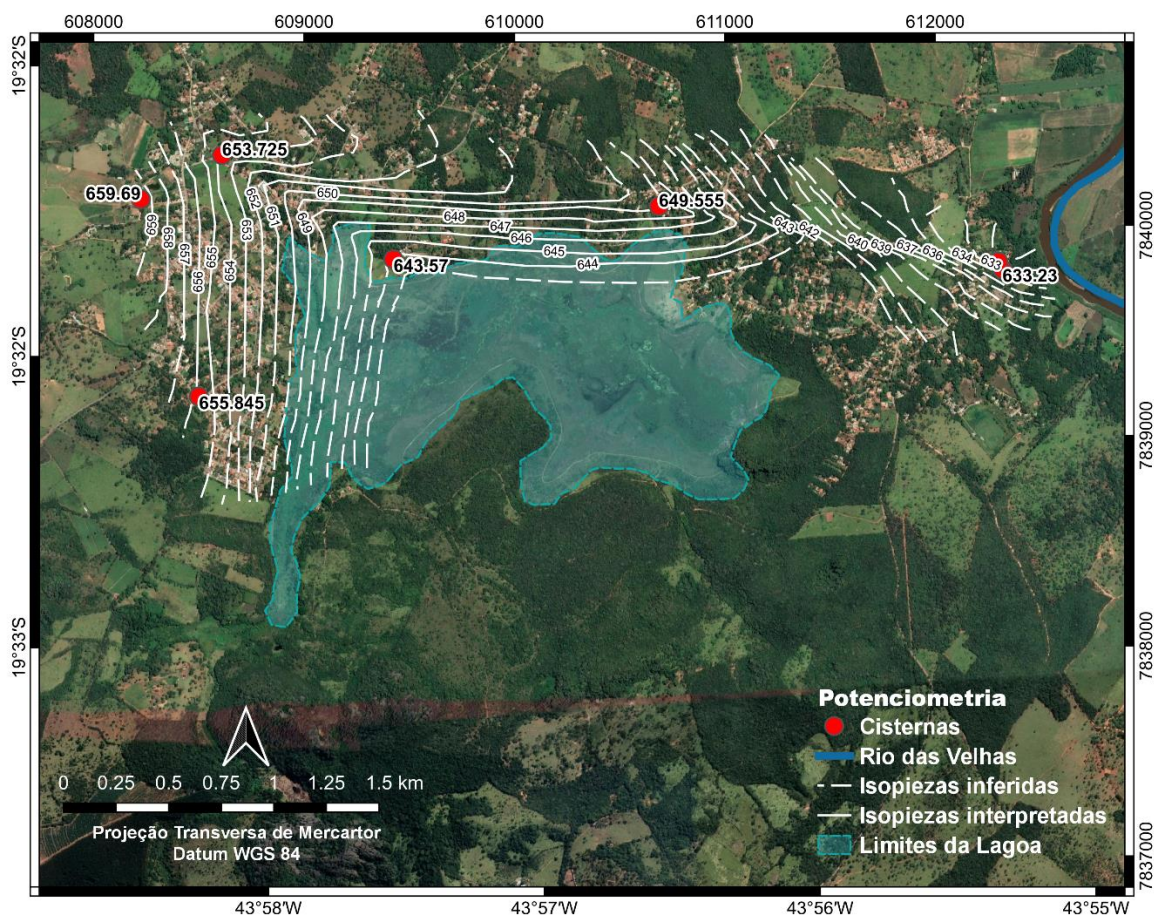


Figura 26 - Mapa potenciométrico do aquífero freático granular, mostrando o fluxo no sentido da Lagoa do Sumidouro nas porções oeste e norte, e do Rio das Velhas, na porção leste.

Também foi realizado o balanço hídrico climático, por meio do qual obteve-se os valores anuais de Evapotranspiração Real (ETR), Evapotranspiração Potencial (ETP), Déficit (DEF) e Excedente (EXC) pelo método de *Thornthwaite & Mather* (1955) para todos os anos hidrológicos compreendidos entre os anos de 1972/73 a 2019/2020. Observa-se que há uma tendência crescente em ambos os valores de evapotranspiração (Figura 27). Essa variação é coerente com a diminuição das chuvas e elevação da temperatura.

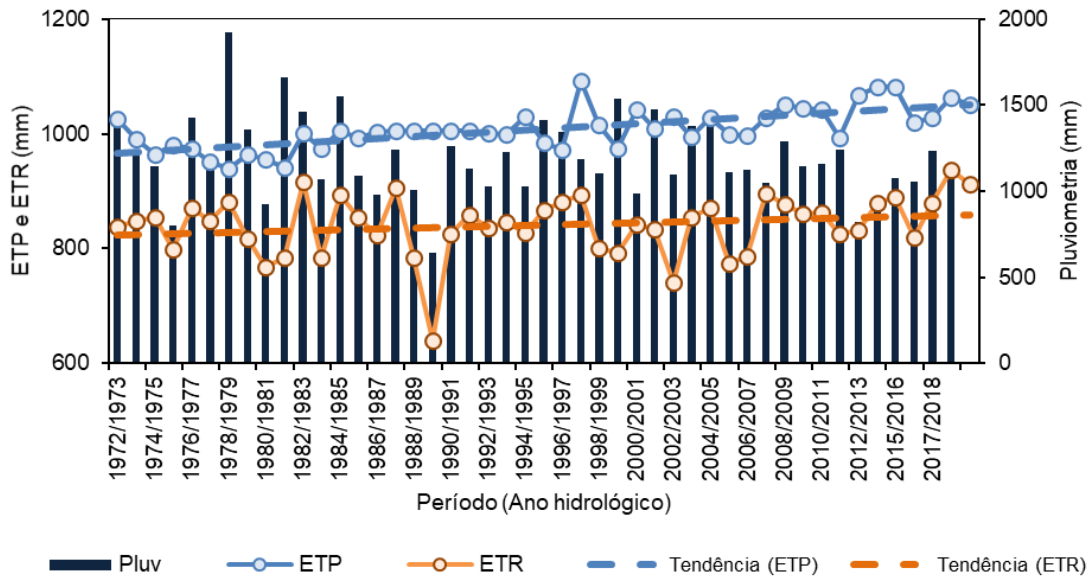


Figura 27 - Valores anuais de pluviosidade, evapotranspiração potencial (ETP) e evapotranspiração real (ETR) entre 1972 e 2020 calculados através da metodologia de *Thornthwaite-Mather* (1955). Para referência, os valores de pluviosidade (Pluv) foram inseridos na forma de colunas.

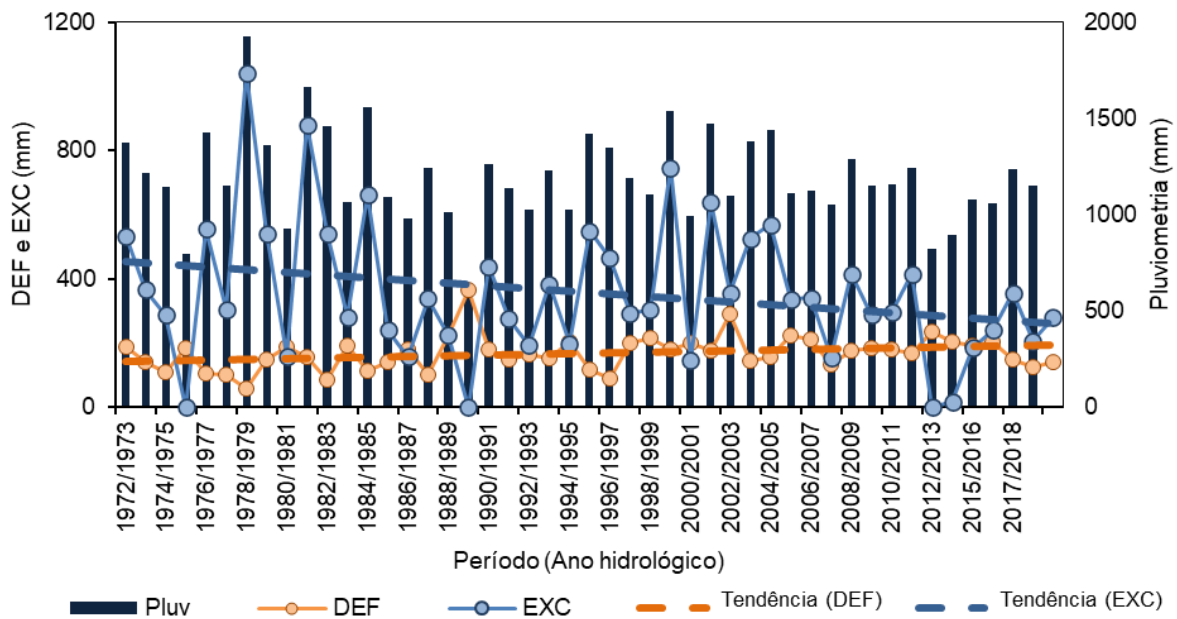


Figura 28 - Valores anuais de Déficit (DEF) e Excedente (EXC) hídrico entre 1972 e 2020 calculados através da metodologia de *Thornthwaite-Mather* (1955). Para referência, os valores de pluviosidade (Pluv) foram inseridos na forma de colunas.

Na Figura 28 nota-se uma tendência de aumento dos valores de *déficit* hídrico, e, por consequência há claro decréscimo nos valores de excedente hídrico anual. Esse comportamento é esperado dada a mudança observada dos principais fatores que controlam esses dois termos. Essas variações impactam diretamente na quantidade de água superficial disponível para abastecimento da lagoa.

Para o cálculo do balanço de massa da Lagoa do Sumidouro, foram utilizados dados de pluviometria e volumes previamente citados ao longo desse trabalho. A precipitação cumulativa anual foi convertida para um valor volumétrico, multiplicando-se pela área da bacia. Por ser um valor com base temporal, este volume nada mais é que a vazão anual. Foi aplicado um fator de recarga aquífera sobre a pluviometria, de maneira que 10% do volume total foi considerado como destinado a recarga, e os restantes 90% compuseram parte das entradas do balanço. A vazão do Córrego Samambaia foi obtida dos valores de monitoramento de campo que vem sendo executado pela UFMG desde o ano hidrológico 2015-2016, tendo como valor médio aproximado $600 \text{ m}^3/\text{h}$.

A evapotranspiração real foi obtida através da metodologia de *Thornthwaite & Mather* (1955) já mencionada. Os dados volumétricos de armazenamento da lagoa, assim como a precipitação anual, foram convertidos para vazões. Foram usados dados volumétricos de estações cheias, uma vez que muitos dados de estações estiagem não se mostrariam úteis na definição da capacidade máxima de drenança do sumidouro, apenas na mínima. Como na série histórica também houve volumes muito baixos para a lagoa, é possível aproximar tanto a drenança máxima quanto a mínima.

Ao aplicar-se a equação do balanço hídrico para a Lagoa do Sumidouro chegou-se a um conjunto de valores para a vazão de drenança do sumidouro, dos quais foi necessário realizar algumas filtragens de inconsistências. O valor de drenança não foi tão homogêneo quanto o esperado, mas foi possível analisar as componentes do balanço e determinar o intervalo de vazões das quais o sumidouro é capaz de drenar. A Figura 29 ilustra a aplicação da equação do balanço hídrico, sendo a soma de todas as entradas, já com a redução causada pela recarga e evapotranspiração, e o armazenamento, que deve ser subtraído das entradas para obtenção da saída do sistema.

Conforme previamente citado, foram desconsideradas as vazões de bombeamento por poços, uma vez que estes apresentaram valores irrisórios em comparação às demais componentes de saída de água. Os poços da COPASA, por exemplo, extraem a uma vazão total de $70,2 \text{ m}^3/\text{h}$, irrisória se comparada com as ordens de grandeza do restante do sistema.

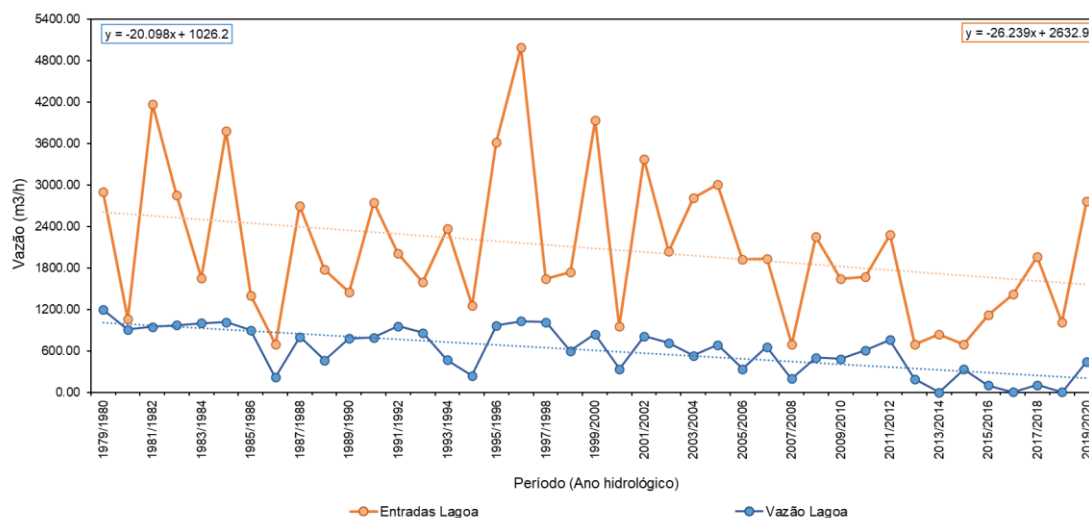


Figura 29 - Entradas e armazenamento da Lagoa do Sumidouro ano a ano, durante toda a série histórica. Nos valores de entrada (laranja) já foram subtraídas a recarga e evapotranspiração

Para determinar a vazão mínima de drenança do sumidouro, foi utilizado o ano hidrológico 2013-2014, de volume completamente seco. Dessa forma, toda a vazão de entrada foi necessariamente drenada pelo sumidouro. A princípio, uma vez que o Córrego do Samambaia é perene e de vazão histórica de $600 \text{ m}^3/\text{h}$, o sumidouro deve ter drenado pelo menos a mesma quantidade para gerar uma lagoa seca. É possível extrapolar mais essa ideia, considerando os valores de excedente hídrico do balanço hidroclimatológico. Ao considerar o excedente hídrico do ano 2013-2014, foi constatada a vazão de $346,30 \text{ m}^3/\text{h}$, o qual teria sido drenado pelo sumidouro. Obteve-se, portanto, uma vazão mínima de $946,30 \text{ m}^3/\text{h}$ para o sumidouro.

Para se determinar a vazão máxima de drenança do sumidouro, todos os balanços anuais foram considerados. Todos os valores de entradas do balanço foram somados, e deste foi extraída a média. O mesmo procedimento foi feito para o armazenamento da lagoa. A vazão máxima foi obtida ao subtrair o armazenamento das entradas, tendo como resultado $1477,83 \text{ m}^3/\text{h}$. Com isso, obtêm-se a drenança do sumidouro como um valor flutuante da ordem de 950 a $1500 \text{ m}^3/\text{h}$. A variação dentro de um intervalo restrito sugere a manutenção das condições naturais do sumidouro desde o início do período analisado, ou seja, entre 1980 e 2020 provavelmente não houve nenhuma reativação de condutos.

A partir do balanço hídrico foi possível interpretar o efeito da redução na precipitação no sistema. Nota-se uma tendência de aumento da contribuição do córrego Samambaia como componente de entrada para a Lagoa do Sumidouro (Figura 30). Isso é ilustrativo da redução pluviométrica observada no período, e causa um aumento na dependência da lagoa para com o córrego.

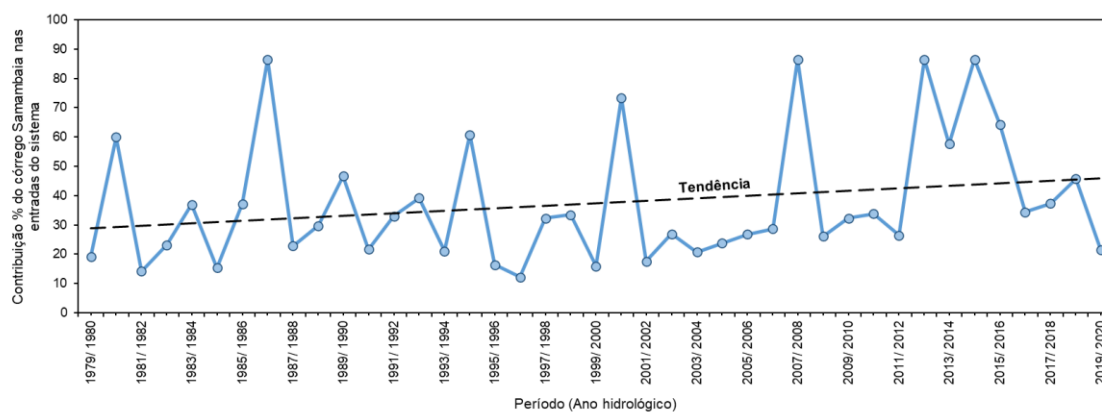


Figura 30 - Contribuição percentual do córrego Samambaia como entrada da Lagoa do Sumidouro. Como a vazão do córrego foi constante ao longo da série, notou-se a queda na pluviometria registrada para o mesmo período

Para analisar a relação causa-efeito entre chuva e volume da lagoa foi necessário obter novas imagens de satélite, desta vez representativas a cada mês de um ano hidrológico completo. A escolha do ano hidrológico a ser usado nesta análise dependeu de dois fatores: primeiro, da representatividade dos registros pluviométricos em relação às séries históricas pluviométricas e volumétricas; e segundo, da disponibilidade de imagens de satélite no portal Earth Explorer/EROS.

Devido à escassez e baixa frequência de imageamento das primeiras imagens família LANDSAT, anos anteriores a 1990 não puderam ser selecionados, impossibilitando a execução da análise baseada na lagoa “normal” perene. Da mesma forma devido à baixa representatividade volumétrica a partir do ano 2012 em relação à série volumétrica total, não foi possível usar os registros praticamente quinzenais das imagens LANDSAT 8.

Dessa forma, o ano hidrológico 2009-2010 foi selecionado como ano referência para o estudo da relação causa efeito, uma vez que sua pluviometria e dados volumétricos estiveram próximos às médias harmônicas das séries históricas. Esse ano foi de seca volumétrica e pluviométrica, mas com valores bastante semelhantes à média. A pluviometria anual foi de 1148,00 mm, comparado aos 1190,51 da média harmônica pluviométrica. O volume na estação de estiagem foi de 2.028.841,52 m³, comparado com a média harmônica de 2.103.090,10 m³. O volume na estação chuvosa foi de 4.245.895,78 m³, muito parecido com a média harmônica de 4.190.175,21 m³. Assim, conforme feito anteriormente para os dados anuais, foram recuperados volumes estimados para os 12 meses que compuseram o ano hidrológico em questão. Os resultados obtidos podem ser visualizados na Figura 31.

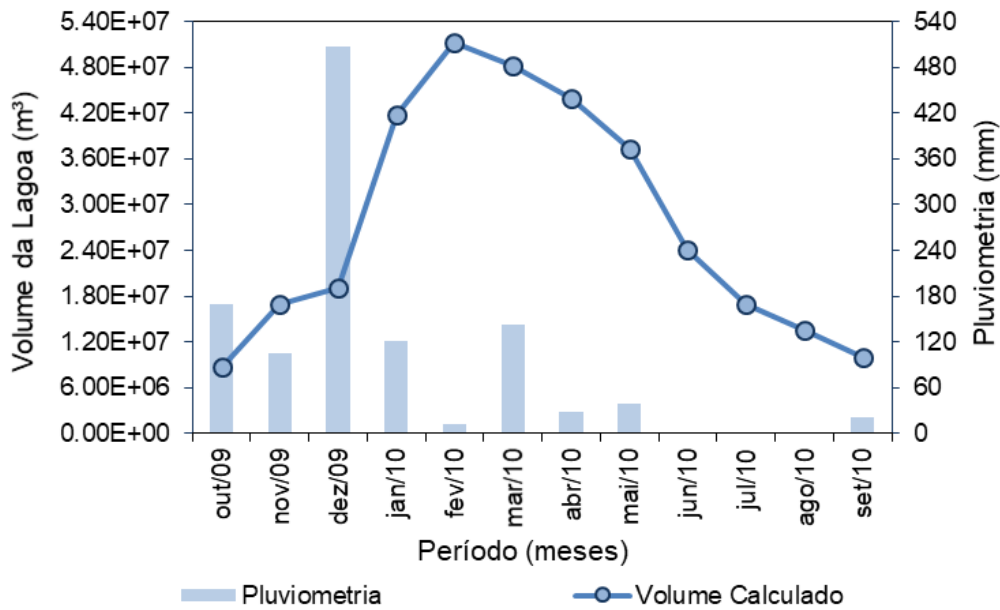


Figura 31 - Valores de pluviosidade medidos e volumes calculados para o ano hidrológico de 2009-2010. Graficamente os dados parecem ter uma relação de causa efeito, sugerido pelo pico volumétrico precedido por um pico pluviométrico. A análise de correlação cruzada tentará elucidar essa questão

Aplicando a autocorrelação somente para os volumes da lagoa (Figura 32), o correlograma atingiu os valores típicos decaimento $r(k)$ de ambientes cársticos entre dois e três meses. Como os volumes são autocorrelacionáveis, partiu-se para a correlação cruzada entre volume e pluviosidade, obtendo-se um valor de defasagem ($r_{xy}(k)$) inferior a um mês. Esses dados são parecidos com o observado por De Paula (2019) e Tavares (2020), que concluíram que o tempo de defasagem k para o Córrego do Samambaia é da ordem de dias. Como o córrego representa uma importante entrada para a Lagoa do Sumidouro, é de se esperar que essa também possua um tempo de defasagem nessa ordem.

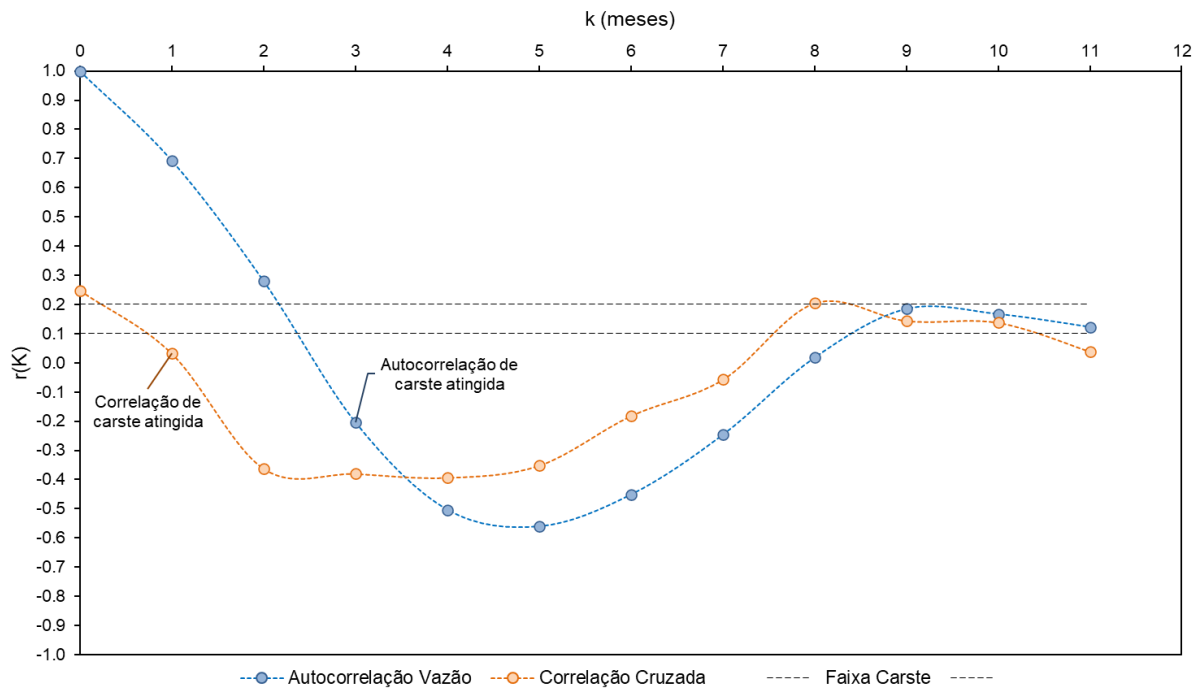


Figura 32 - Análise de autocorrelação da vazão (volume) da Lagoa do Sumidouro, em azul, e correlação desta com a pluviometria da área, em laranja. Os dados tiveram um tempo de defasagem muito curto, conforme pode ser observado pelo rápido decaimento do correlograma

4. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

As análises dos resultados deste trabalho levam a crer que apesar das três hipóteses levantadas por Tavares (2020), uma nova se mostrou preponderante para a aferição do porquê de a Lagoa do Sumidouro ter demonstrado uma diminuição em seu volume: trata-se do aumento considerável das temperaturas médias. Esse quarto fator é determinante para o aumento da evapotranspiração e do *déficit* hídrico na bacia em que a Lagoa do Sumidouro está inserida, conforme foi matematicamente explicitado no balanço meteorológico.

O modelo batimétrico da lagoa, obtido a partir de técnicas de geoprocessamento, foi essencial para a realização desse estudo, demonstrando a relevante aplicabilidade do uso de técnicas de sensoriamento remoto em estudos hidroambientais.

O levantamento de poços na região urbana de Fidalgo indicou um decréscimo no uso de poços e cisternas pela população local, uma vez que o abastecimento de água foi facilitado pela COPASA. Por sua vez, as vazões relatadas para os poços produtores da COPASA não seriam suficientes para causar tal decréscimo no volume.

A principal entrada d'água da lagoa é proveniente do escoamento superficial intimamente associado à ocorrência de chuvas. A relação entre as duas variáveis foi demonstrada através dos ciclos de comportamento de seca e cheia para a pluviometria e para a Lagoa do Sumidouro. A coincidência de praticamente todos esses ciclos corrobora para a dependência do volume em função da quantidade de chuvas. Dessa forma quaisquer alterações pluviométricas registradas serão observadas também na lagoa.

O balanço hídrico de massa indica uma tendência crescente de influência da vazão das nascentes na contribuição das entradas d'água do sistema Lagoa do Sumidouro. Segundo os recentes monitoramentos feitos pela UFMG, a vazão de nascentes permaneceu constante com o tempo, o que refuta a segunda hipótese proposta por Tavares (2020), de que uma das causas do secamento da lagoa seria a diminuição do aporte de água superficial do córrego Samambaia. Considerando tal informação, o aumento da contribuição de córregos como entrada no balanço de massa só pode ser recorrente de uma redução no aporte pluviométrico. Isso não quer dizer que a pluviometria deixou de ser o principal contribuinte para o enchimento da lagoa, somente prova que alterações pluviométricas geram grandes efeitos no volume armazenado pela lagoa. Como a vazão das nascentes é insuficiente para o enchimento da lagoa, esta pode ter sido a causa para as crescentes reduções volumétricas.

A relação causa-efeito entre a pluviometria e volume da lagoa também corrobora a influência de chuvas nos volumes da lagoa ao longo do tempo. Foi constatado um curto tempo de efeito das chuvas nas vazões da lagoa, inferior a um mês, conforme explicitado pelo método da autocorrelação. Isso também abre margem para possíveis estudos futuros, onde poderia se avaliar a periodicidade e intensidade das chuvas e relacioná-las aos volumes estimados.

A potenciometria de cisternas indica abastecimento através do aquífero granular de coberturas sedimentares da região para a própria Lagoa do Sumidouro. O fluxo observado vai para a direção da lagoa nas porções oeste e norte do corpo hídrico. Contudo, estes dados não são suficientes para concluir que a Lagoa do Sumidouro é estritamente abastecida por águas do aquífero granular das coberturas. É sabido que as nascentes têm proveniência de águas profundas (aquífero cárstico), de maneira que estudos hidroquímicos de maior detalhe poderiam ajudar a estimar a dependência da Lagoa do Sumidouro com relação ao meio superficial e subterrâneo.

Uma sobreposição de fatores para o secamento da lagoa, conforme propõe Tavares (2020), é possível, porém os dados levantados por este trabalho sugerem que o principal fator, é, provavelmente, o aumento de temperatura e suas possíveis influências nas demais componentes do ciclo hidrológico (pluviometria, evapotranspiração). Não se descarta que a influência de poços esteja subestimada e que poços clandestinos estejam extraíndo grandes vazões que estariam contribuindo para alimentar a lagoa, porém é bastante provável que a causa do secamento seja realmente natural, uma vez que não há indícios de reativação hidráulica, pois o sumidouro teve sua capacidade de drenança mantida dentro de um mesmo intervalo, ao longo de toda a série histórica.

Outros métodos de investigação também podem ser utilizados para consolidar o conhecimento hidrogeológico da Lagoa do Sumidouro, dentre eles destacam-se o uso de métodos geofísicos terrestres para determinação de velocidade e direção de fluxo de água subterrânea, com o uso de traçadores salinos e detectores de eletrorresistividade (White, 1994). Como a lagoa se encontra totalmente seca em boa parte do ano, é possível, com a autorização da administração do Parque do Sumidouro, montar arranjos em seu fundo, o que seria muito interessante para tentar identificar fluxo subterrâneo nas proximidades do sumidouro. Ademais, conforme previamente sugerido, análises hidrogeoquímicas comparativas das águas subterrâneas rasas (cisternas) e subterrâneas profundas (nascentes) poderiam auxiliar em um melhor entendimento da procedência das águas que alimentam a lagoa.

Em busca de se caracterizar melhor a hidrodinâmica da lagoa, sugere-se também realizar levantamentos batimétricos e altimétricos na mesma, através, por exemplo, do uso veículos aéreos não tripulados (VANTs). Dessa maneira, os cálculos de volume recuperados deixariam de ser baseados em um modelo, e sim se baseariam em resultados obtidos em campo, fazendo com que valores mais próximos da realidade fossem obtidos. Da mesma forma, realizar análises de sensibilidade no método empregado pode ajudar a identificar erros e a calibrar o balanço de massa.

Os dados apresentados neste trabalho não indicam uma tendência natural de recuperação da Lagoa, uma vez que a tendência é de aumento de temperatura, diminuição de precipitação e aumento de *déficit* hídrico. A dificuldade de se combater as causas do problema de maneira local torna complexo o desenvolvimento de soluções a curto prazo, o mesmo valendo para diversos lagos e lagoas que passam por situação semelhante em todo o globo (Sahoo & Schladow, 2008). Dessa forma, a tendência esperada para a Lagoa do Sumidouro nos próximos anos é de perpetuação do ciclo de secas, a não ser que relevantes aumentos pluviométricos ocorram ou uma diminuição da temperatura média anual para valores próximos aos anteriores à década de 1980.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADRIAN, R.; OREILLY, C.; ZAGARESE, H.; BAINES, S.; HESSEN, D.; Keller, B.; LIVINGSTONE, D.; SOMMARUGA, R.; STRAILE, D.; DONK, E.; WEYHENMEYER, G. & WINDER, M. (2009). Lakes as sentinels of climate change. *Limnology and oceanography*. 54. 2283-2297. 10.4319/lo.2009.54.6_part_2.2283.
- AMARAL, D.G.P. (2018). Análise do comportamento e desempenho hídrico das depressões cársticas da região da APA carste Lagoa Santa (MG). Dissertação de Mestrado – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- AULER, A. (1994) Hydrogeological and Hydrochemical Characterization of The Matozinhos - Pedro Leopoldo Karst, Brazil. Bowling Green: Faculty of the Department of Geography and Geology / Western Kentucky.
- BERBERT-BORN, M. L. (2002). Carste de Lagoa Santa, MG - Berço da paleontologia e da espeleologia brasileira. In: SCHOBENHAUS, C.; CAMPOS, D. A.; QUEIROZ, E. T.; WINGE, M.; BERBERT-BORN, M. L. C. (Eds.), *Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil*. 1. ed. Brasília: DNPM/CPRM - Comissão Brasileira de Sítios Geológicos e Paleobiológicos (SIGEP), v. 01. 415- 430.
- DARDENNE, M. A. (1978). Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 30, Anais do..., Recife, v.2, p.597- 610
- DE PAULA, R. S. (2019). Modelo conceitual de fluxo dos aquíferos pelíticoscarbonáticos da região da APA Carste de Lagoa Santa, MG. Doutorado em hidrogeologia – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- DOWNING, J. (2008). Emerging global role of small lakes and ponds: Little things mean a lot. *Limnetica*. 29. 9-24.
- DOWNING, J. A.; PRAIRIE, Y. T.; COLE, J. J.; DUARTE, C. M.; TRANVIK, L. J.; STRIEGL, R. G.; MCDOWELL, W.H.; KORTELAJINEN, P.; CARACO, N.F.; MELACK, J.M. & MIDDELBURG, J. J. (2006). The global abundance and size distribution of lakes, ponds, and impoundments. *Limnology and Oceanography*, 51(5), 2388-2397.
- FEATHERS, J.; KIPNIS, R.; PILÓ, L.; ARROYO-KALIN, M.; & COBLENTZ, D. (2010). How old is Luzia? Luminescence dating and stratigraphic integrity at Lapa Vermelha, Lagoa Santa, Brazil. *Geoarchaeology*, 25(4), 395-436.
- FERGE, W. F. (1931). The Nature and Use of the Harmonic Mean. *Journal of the American Statistical Association*, v. 26, n. 173, p. 36–40.

FERRARI, J. A.; KARMANN, I. (2008). Comportamento hidrodinâmico de sistemas cársticos na bacia do rio Betari, Município de Iporanga - SP. *Geologia USP. Série Científica*, v. 8, n. 1, p. 1–24.

HERRMANN, G.; KOHLER, H. C.; DUARTE, J. C.; CARVALHO, P. G. S. (Org.) (1998). APA Carste de Lagoa Santa – Gestão Ambiental. IBAMA/CPRM, Belo Horizonte, 57p

HUTCHINSON, M.F. (1989). —A new method for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. *Journal of Hydrology* 106: 211-232.

KOHLER, H.C. Geomorfologia cárstica na região de Lagoa Santa. (1989). Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo.

MACEDO, L. B. (2020). Secas e molhadas: estratégias ecológicas e dinâmica de comunidades vegetais em lagoas temporárias – Dissertação de Mestrado (Biologia), Programa de Pós-graduação em Ecologia, Conservação e Manejo da vida silvestre - Instituto de Ciências Biológicas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 62p.

MAGALHÃES, C.C.; SILVA, T.G.A. (2018). Mapeamento hidroestratigráfico dos aquíferos cársticos nos municípios de Matozinhos e Pedro Leopoldo, MG – Trabalho de Graduação (Geologia), Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 97p.

MYERS, N.; MITTERMIER, R.A.; MITTTERMIER, C.G.; FONSECA, G.A.B. & KENT, J. (2000). Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 403:853-858.

NÓBREGA, P.F.A. (2015). Aves aquáticas da Área de Proteção Ambiental Carste de Lagoa Santa: ecologia e conservação. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação Ecologia, Conservação e Manejo da Vida Silvestre, Universidade Federal de Minas Gerais.

PATRUS, M.A. (1998) Estudos hidrológicos e qualidade das águas de superfície. In: APA Carste de Lagoa Santa—Meio Físico. Belo Horizonte: CPRM/IBAMA, p. 1-54

PAULA, R.S., & VELÁSQUEZ, L.N.M. (2019). Balanço hídrico em sistema hidrogeológico cárstico, região de Lagoa Santa, Minas Gerais. *Águas Subterrâneas*, 33(2), 119–133. <https://doi.org/10.14295/ras.v33i2.29252>

PAZ, A.R. (2004). Hidrologia Aplicada. Texto básico para a disciplina Hidrologia Aplicada para os cursos de Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia. Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, 138 p.

PEKEL, J.F.; COTTAM, A.; GORELICK, N. & BELWARD, A.S. (2016). High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, 540(7633), 418-422.

PESSOA, P.F.P. (1996). Caracterização hidrogeológica da região cárstica de Sete Lagoas – MG: potencialidades e risco. Dissertação de Mestrado (Recursos Minerais e Hidrogeologia), Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

PESSOA, P.F.P. (2005). Hidrogeologia do aquífero cárstico coberto de Lagoa Santa, MG. Tese (Doutorado) -Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 375p.

RAMSAR (2017) - Ramsar Information Sheet – Brazil Lund Warming – Disponível em: rsis Ramsar.org/RISapp/files/RISrep/BR2306RIS_1707_en.pdf. Acesso: 21 de agosto de 2021.

RIBEIRO, J.H.; TULLER, M.P.; FILHO, A.D.; PADILHA, AV.; CÓRDOBA, C. V. (2003). Projeto VIDA: mapeamento geológico, região de Sete Lagoas, Pedro Leopoldo, Matozinhos, Lagoa Santa, Vespasiano, Capim Branco, Prudente de Moraes, Confins e Funilândia, Minas Gerais – relatório final, escala 1:50.000, 2ª ed.; Belo Horizonte: CPRM, 54p., Mapas e anexos (Série Programa Informações Básicas para Gestão Territorial – GATE, versão digital e convenção).

ROLIM, G.S.; SENTELHAS, P.C.; BARBIERI, V. (1998). Planilhas no ambiente EXCEL para os cálculos de balanços hídricos: normal, sequencial, de cultura e de produtividade real e potencial. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v.6, p.133-137

SAHOO, G.B., SCHLADOW, S.G. (2008). Impacts of climate change on lakes and reservoirs dynamics and restoration policies. *Sustain Sci* 3, 189–199. <https://doi.org/10.1007/s11625-008-0056-y>

STARCY, J. R.; HARDISON, C. (1996). Double-Mass Curves. *Geological Water Supply Paper*, v. 1541- B. United States Geological Survey.

TAVARES, I.C.P. (2020). Caracterização hidrológica da bacia do córrego Samambaia, região da APA Carste de Lagoa Santa – MG. Dissertação de Mestrado – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

TEIXEIRA, G. M.; PENA, M. A. C.; da SILVA, P. H. P. (2020). Avaliação da conectividade hidrogeológica entre a região a sudeste de Sete Lagoas e a APA Carste de Lagoa Santa, MG. Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

TEODORO, M.I.; VELÁSQUEZ, L.N.M.; FLEMING, P.M.; DE PAULA, R.S.; SOUZA, R.T.; DOI, B.M. (2019). Hidrodinâmica do Sistema Aquífero Cárstico Bambuí, com uso de traçadores corantes, na região de Lagoa Santa, Minas Gerais

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. (1955). The water balance. Publications in Climatology. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 104p.

TUCCI, C.E.M. (2001). Hidrologia: ciência e aplicação. 2. ed. Porto Alegre, 943p.

VELÁSQUEZ, L.N.M.; ANDRADE, I.B.; RIBEIRO, C.G.; AMARAL, D.G.P.; VIEIRA, L.C.M.; CARDOSO, F.A.; PAULA, R.S.; SILVA, P.H.P.; SOUZA, R.T.; ALMEIRA, S.B.S. (2018). Projeto de adequação e implantação de uma rede de monitoramento de águas subterrâneas em áreas com cavidades cársticas da Bacia do Rio São Francisco aplicado à Área Piloto da APA Carste de Lagoa Santa, Minas Gerais. Relatório parcial, PROCESSO FUNDEP/GERDAU/UFMG n22.317 / Plano de ação nacional para a conservação do patrimônio espeleológico nas áreas cársticas da bacia do São Francisco. Pan Cavernas do São Francisco.

VIANA, H.S.; KOHLER, H.C.; TAVARES, V.P. (Org.). (1998). APA Carste de Lagoa Santa - Meio Físico. Volume I. IBAMA/CPRM, Belo Horizonte.

VIEIRA, L. C. M. (2018). Hidrogeoquímica dos aquíferos da região da APA Carste de Lagoa Santa, MG (manuscrito). 111 p.

WARMING, E. (1908). Contribuição para a geografia phytobiológica. Belo Horizonte, Imprensa Oficial do Estado de Minas Gerais (Tradução do dinamarquês por Alberto Loefgre). Reeditado pela EDUSP em 1973 e 1982. 386p.

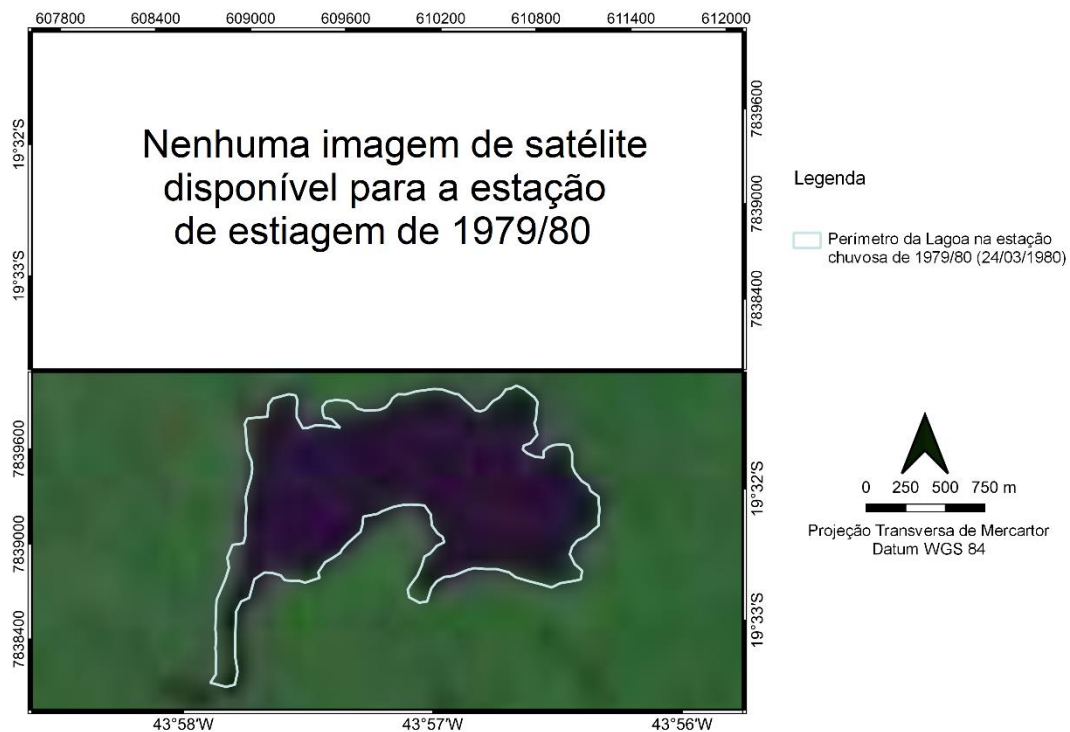
WHITE, P. A. (1994). Electrode arrays for measuring groundwater flow direction and velocity. Geophysics, 59(2), 192–201. doi:10.1190/1.1443581

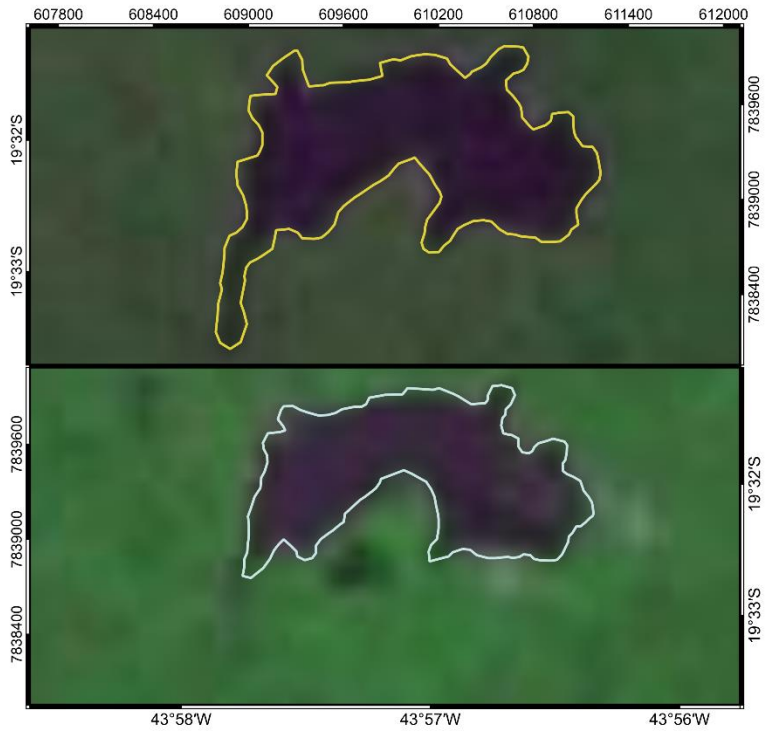
YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. (2013). Geoestatística: conceitos e aplicações. São Paulo: Oficina de Textos.

**ANEXO I – SÉRIE HISTÓRICA DE IMAGENS DE SATÉLITE COM
ESPELHO D'ÁGUA DEMARCADO**

ANEXO I – SÉRIE HISTÓRICA DE IMAGENS DE SATÉLITE COM ESPELHO D'ÁGUA DEMARCADO

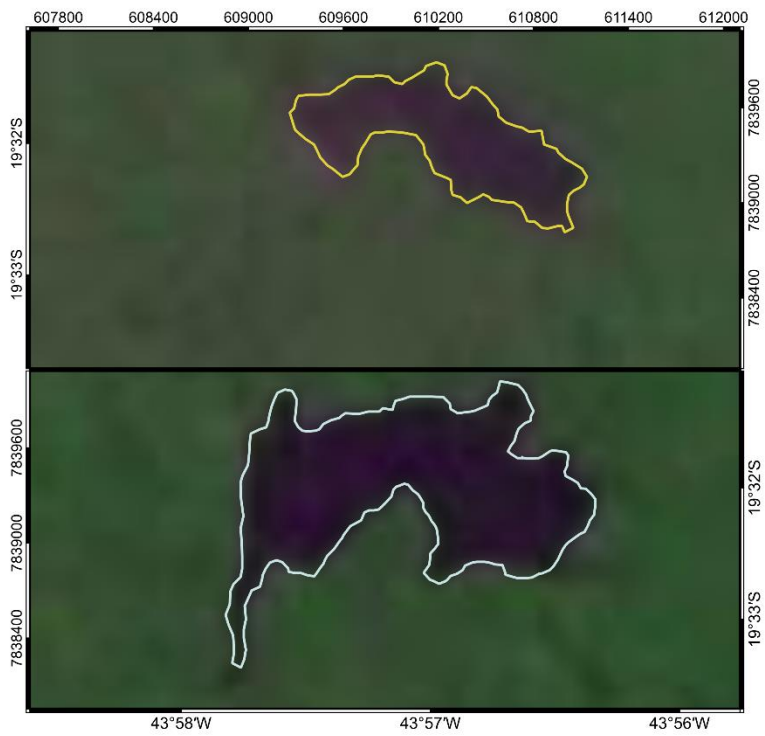
Seguindo o que foi descrito na metodologia e resultados, os perímetros de espelho d'água da Lagoa do Sumidouro foram demarcados baseados nos contrastes em imagens de satélite. Também foram utilizadas camadas de máscara para ajudar a visualizar o contorno da lagoa. A série histórica completa englobou os anos hidrológicos de 1979-1980 a 2020-2021, compondo um total de 82 imagens. Foram utilizadas imagens de satélite da família LANDSAT (2 ao 8), obtidas pelo portal Earth Explorer/EROS, mantido pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS).





Legenda

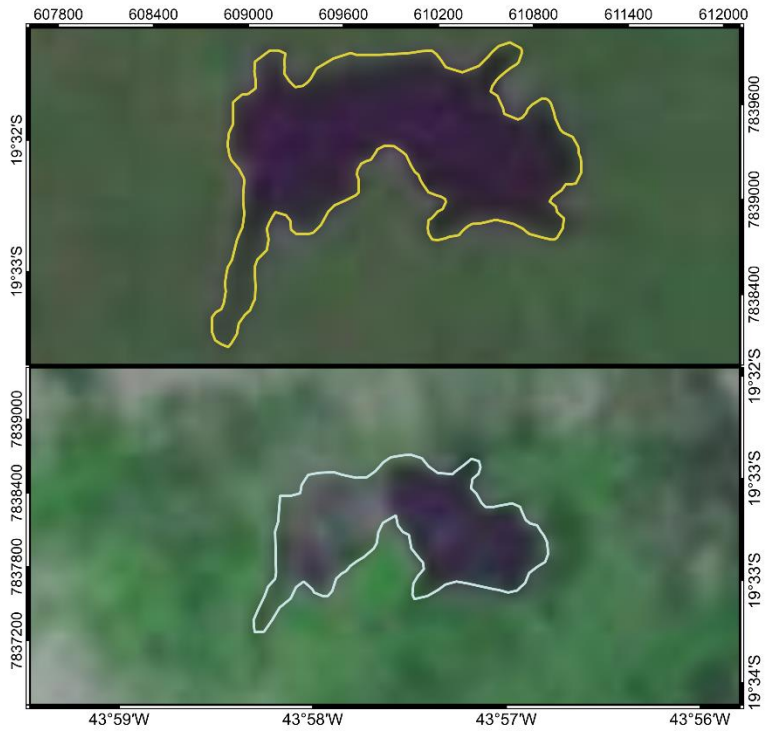
- Perímetro da Lagoa na estação de estiagem de 1980/81 (15/08/1980)
- Perímetro da Lagoa na estação chuvosa de 1980/81 (02/02/1981)



Legenda

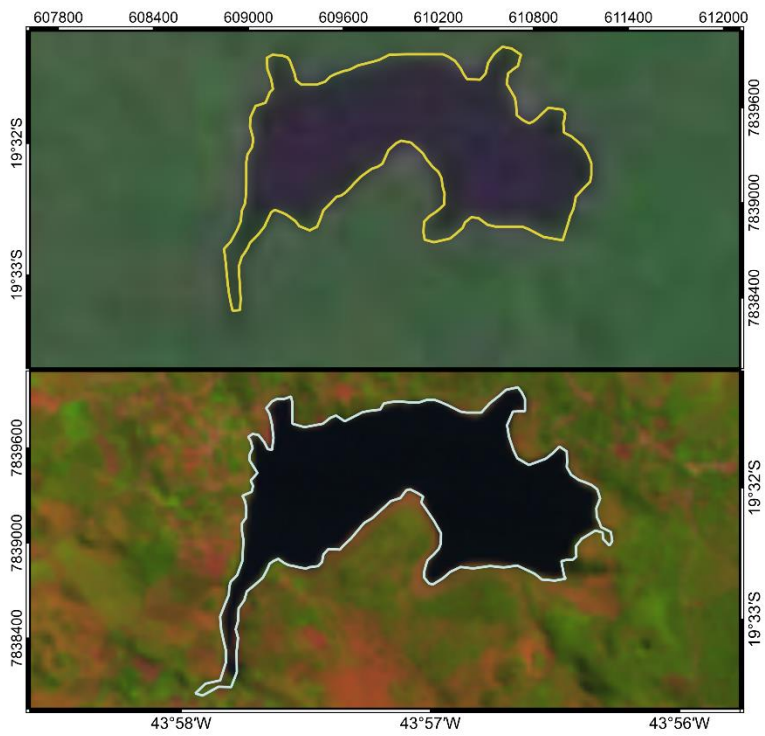
- Perímetro da Lagoa na estação de estiagem de 1981/82 (19/08/1981)
- Perímetro da Lagoa na estação chuvosa de 1981/82 (12/06/1982)





Legenda

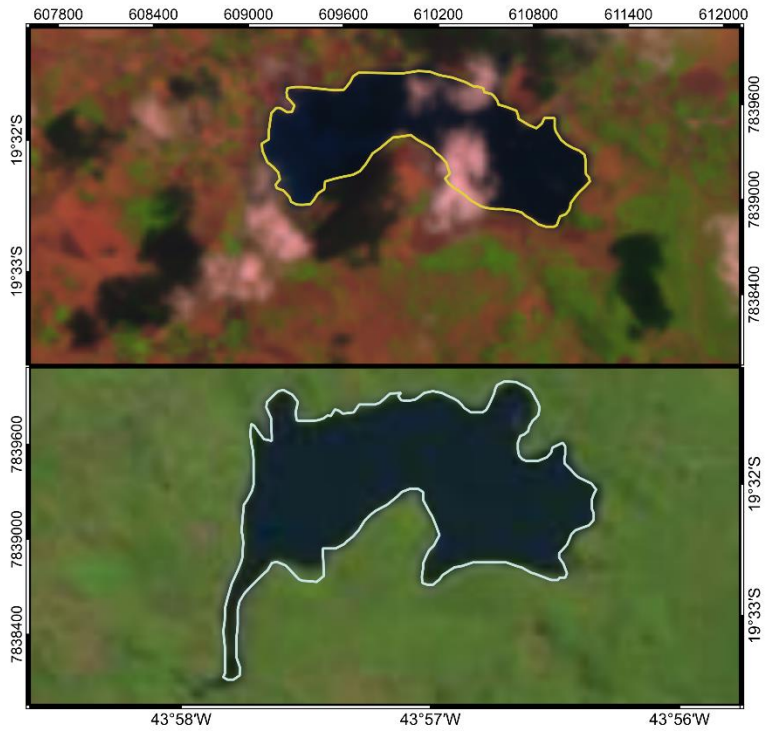
- Perímetro da Lagoa na estação de estiagem de 1982/83 (10/09/1982)
- Perímetro da Lagoa na estação chuvosa de 1982/83 (20/02/1983)



Legenda

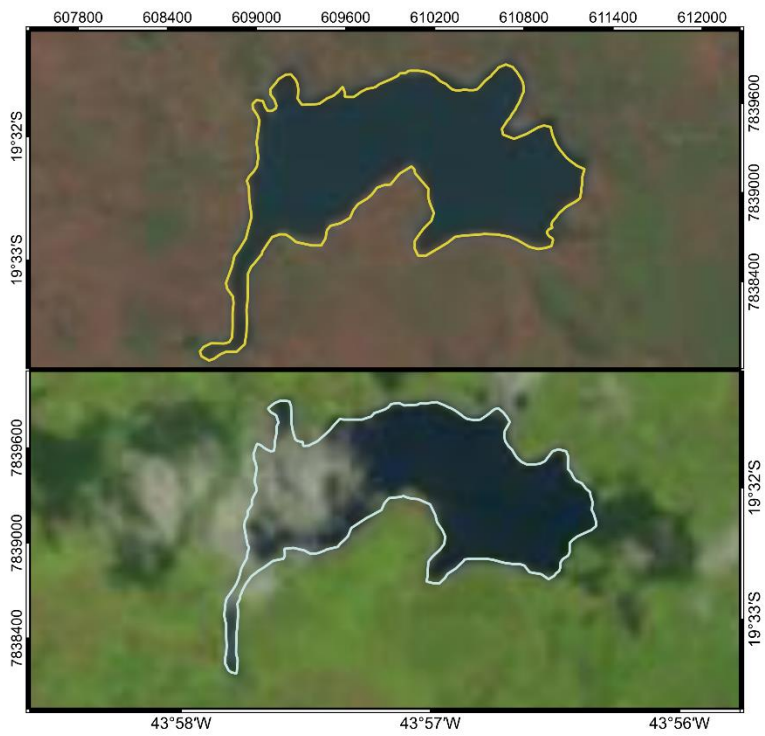
- Perímetro da Lagoa na estação de estiagem de 1983/84 (31/08/1983)
- Perímetro da Lagoa na estação chuvosa de 1983/84 (19/04/1984)





Legenda

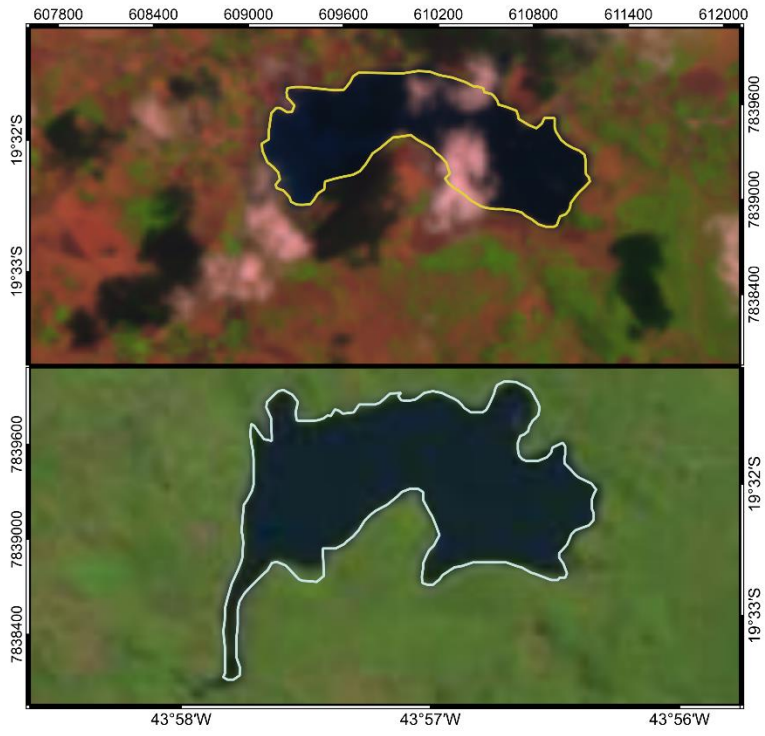
- Perímetro da Lagoa na estação de estiagem de 1984/85 (12/10/1984)
- Perímetro da Lagoa na estação chuvosa de 1984/85 (06/04/1985)



Legenda

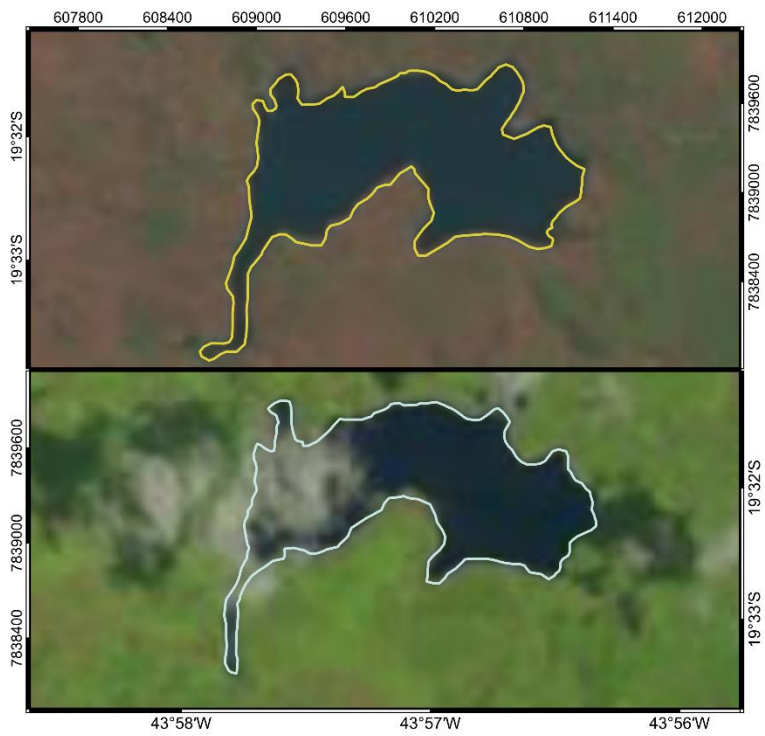
- Perímetro da Lagoa na estação de estiagem de 1985/86 (19/02/1985)
- Perímetro da Lagoa na estação chuvosa de 1985/86 (18/02/1986)





Legenda

- Perímetro da Lagoa na estação de estiagem de 1984/85 (12/10/1984)
- Perímetro da Lagoa na estação chuvosa de 1984/85 (06/04/1985)



Legenda

- Perímetro da Lagoa na estação de estiagem de 1985/86 (19/02/1985)
- Perímetro da Lagoa na estação chuvosa de 1985/86 (18/02/1986)





Legenda

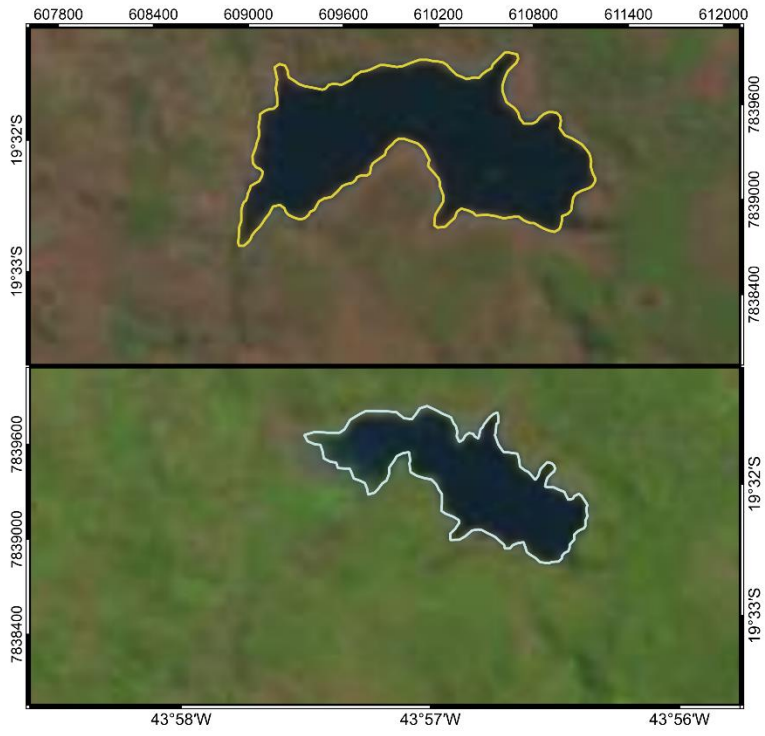
- Perímetro da Lagoa na estação de estiagem de 1986/87 (31/08/1986)
- Perímetro da Lagoa na estação chuvosa de 1986/87 (12/04/1987)



Legenda

- Perímetro da Lagoa na estação de estiagem de 1987/88 (02/08/1987)
- Perímetro da Lagoa na estação chuvosa de 1987/88 (13/03/1988)





Legenda

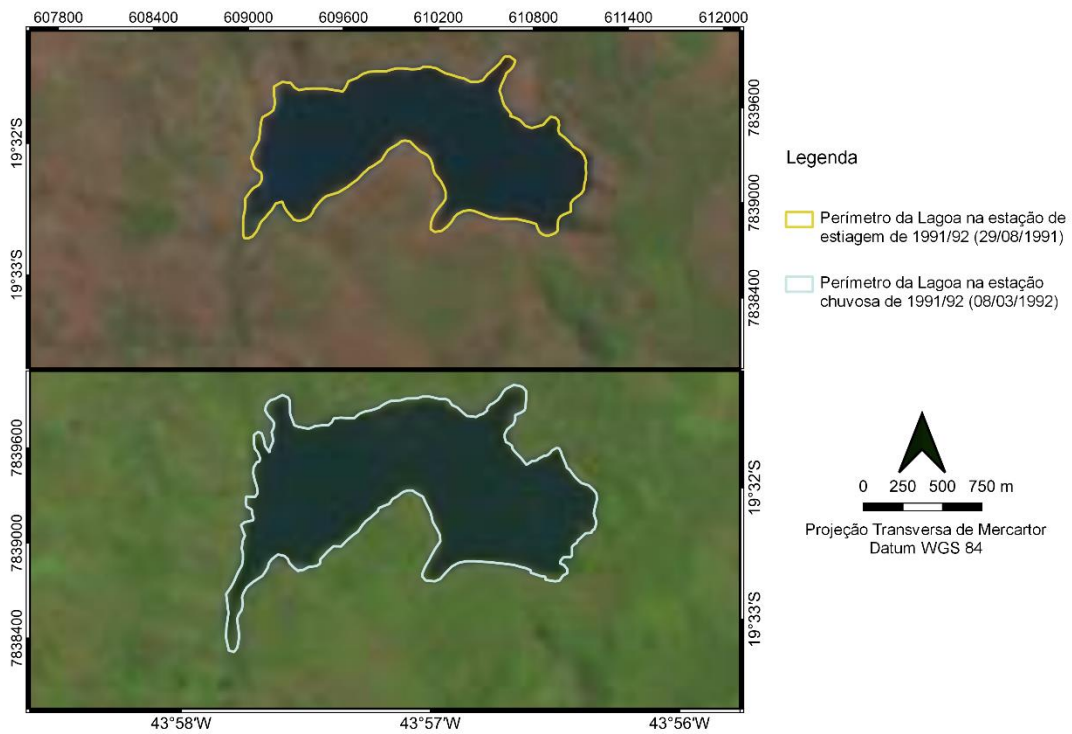
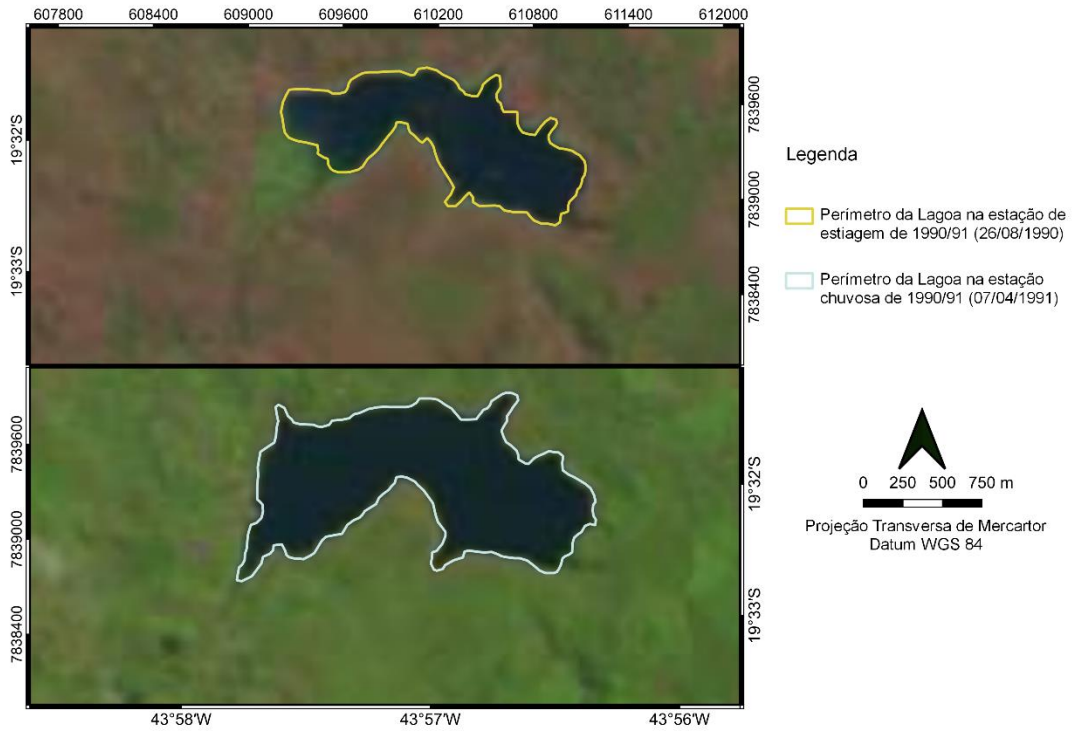
- Perímetro da Lagoa na estação de estiagem de 1988/89 (04/08/1988)
- Perímetro da Lagoa na estação chuvosa de 1988/89 (01/04/1989)

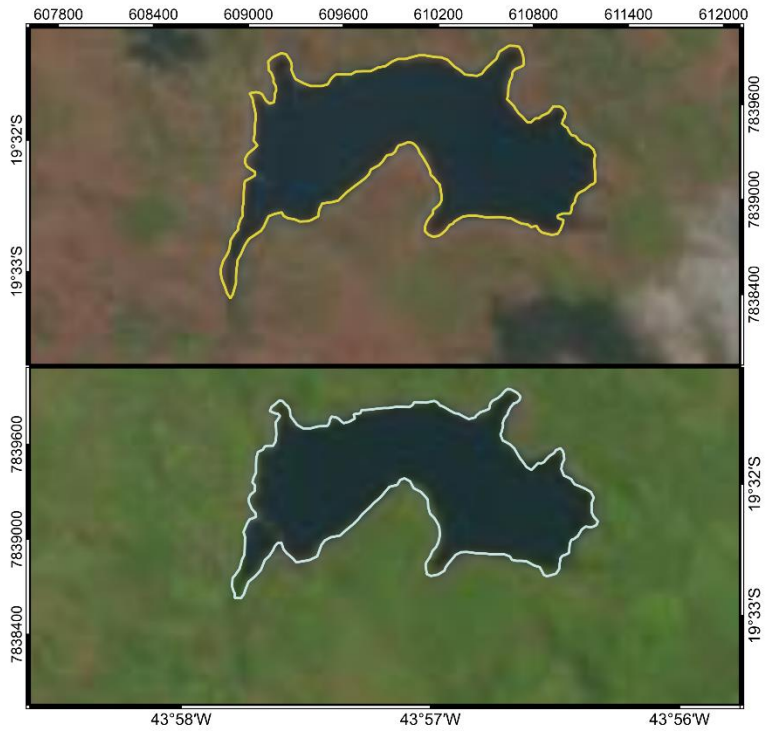


Legenda



- Perímetro da Lagoa na estação de estiagem de 1989/90 (07/08/1989)
- Perímetro da Lagoa na estação chuvosa de 1989/90 (04/04/1990)

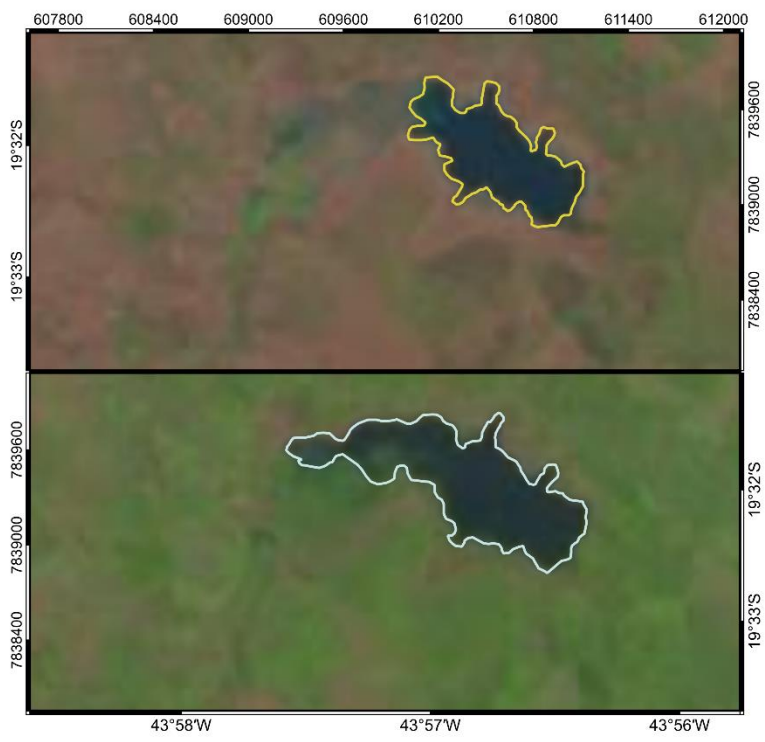








Legenda

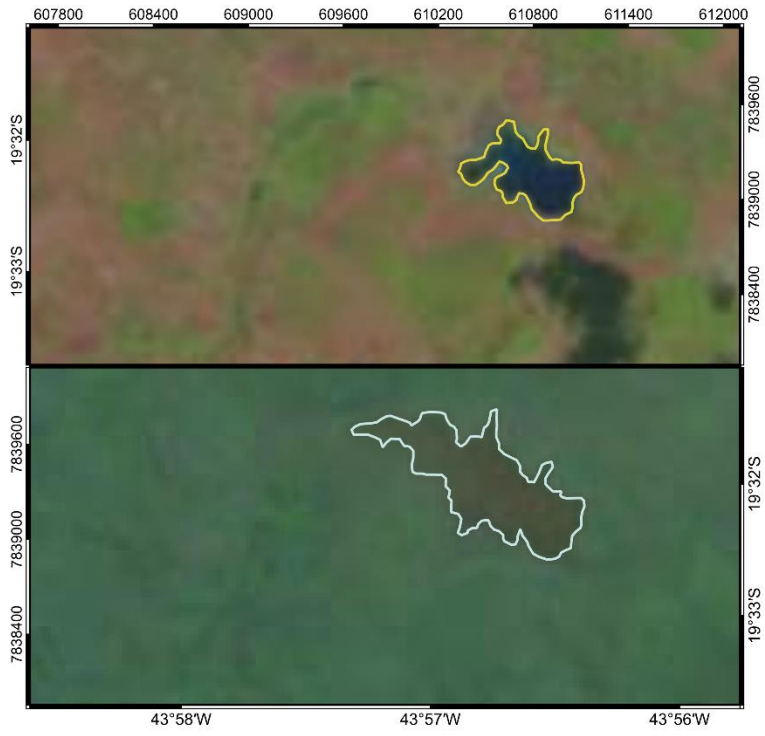
-  Perímetro da Lagoa na estação de estiagem de 1992/93 (31/08/1992)
-  Perímetro da Lagoa na estação chuvosa de 1992/93 (27/03/1993)





Legenda

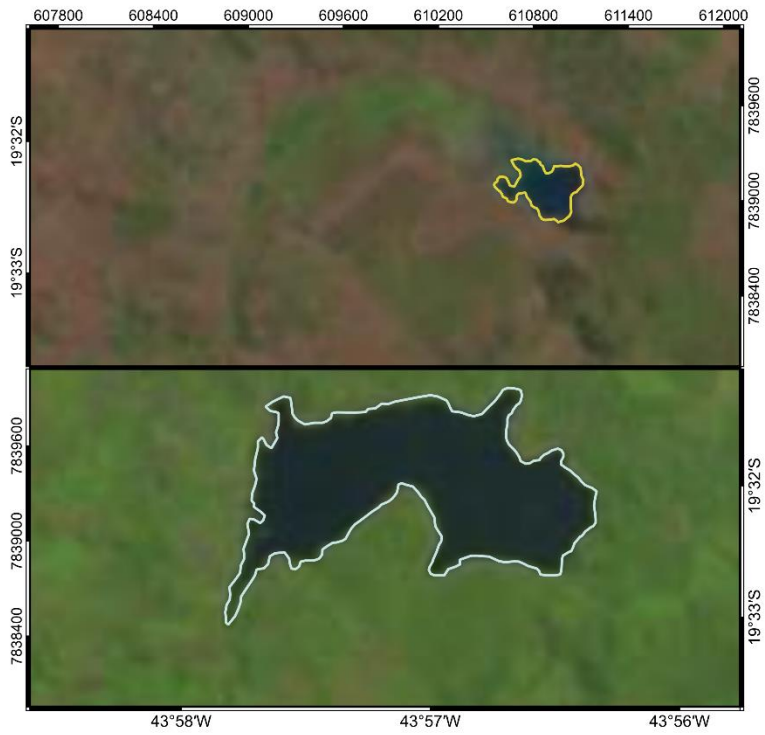
-  Perímetro da Lagoa na estação de estiagem de 1993/94 (19/09/1993)
-  Perímetro da Lagoa na estação chuvosa de 1993/94 (26/02/1994)







Legenda

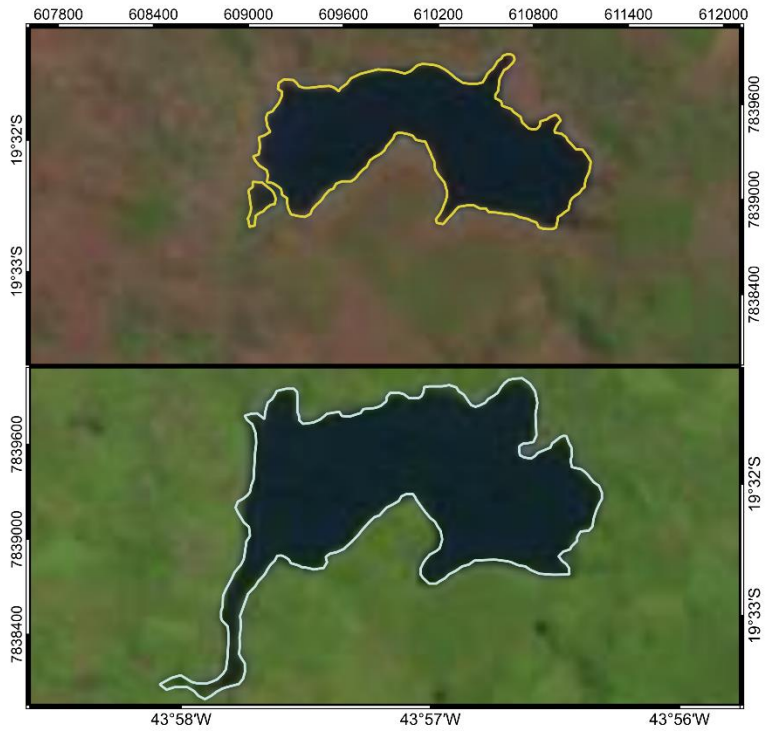
-  Perímetro da Lagoa na estação de estiagem de 1994/95 (24/10/1994)
-  Perímetro da Lagoa na estação chuvosa de 1994/95 (18/04/1995)



Legenda

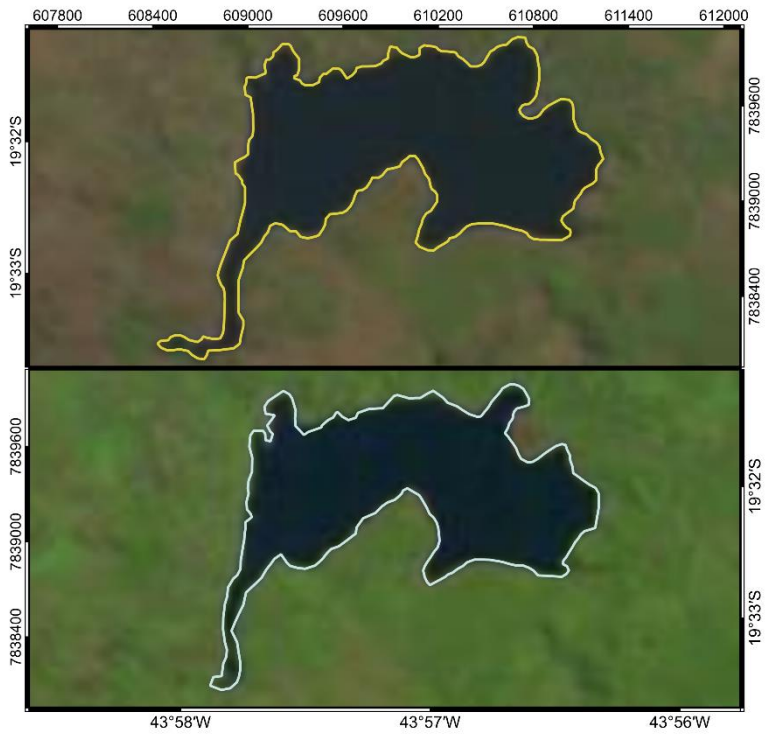
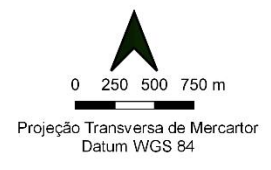
-  Perímetro da Lagoa na estação de estiagem de 1995/96 (24/08/1995)
-  Perímetro da Lagoa na estação chuvosa de 1995/96 (19/03/1996)





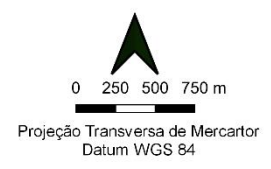
Legenda

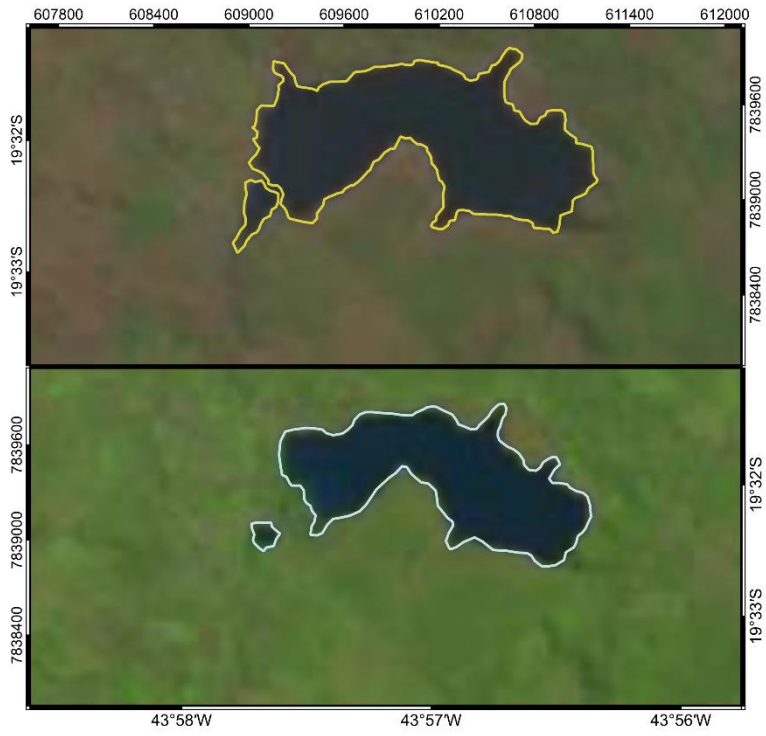
- Perímetro da Lagoa na estação de estiagem de 1996/97 (26/08/1996)
- Perímetro da Lagoa na estação chuvosa de 1996/97 (22/03/1997)



Legenda

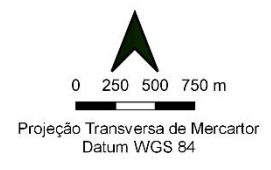
- Perímetro da Lagoa na estação de estiagem de 1997/98 (13/08/1997)
- Perímetro da Lagoa na estação chuvosa de 1997/98 (10/04/1998)





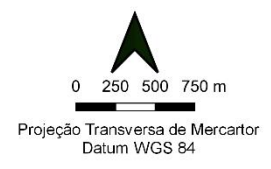
Legenda

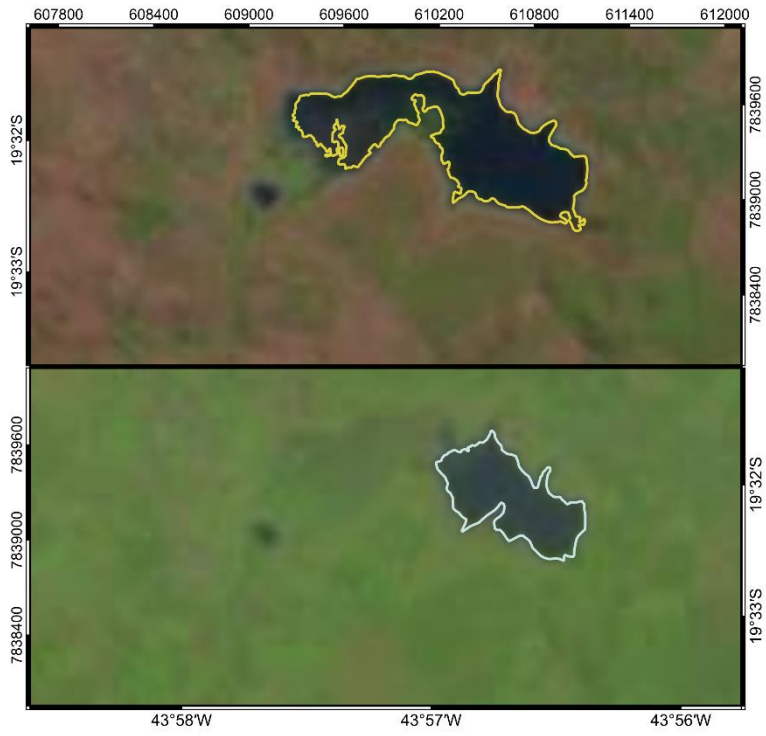
- Perímetro da Lagoa na estação de estiagem de 1998/99 (16/08/1998)
- Perímetro da Lagoa na estação chuvosa de 1998/99 (28/03/1999)



Legenda

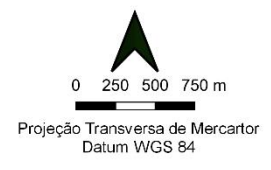
- Perímetro da Lagoa na estação de estiagem de 1999/00 (19/08/1999)
- Perímetro da Lagoa na estação chuvosa de 1999/00 (15/04/2000)





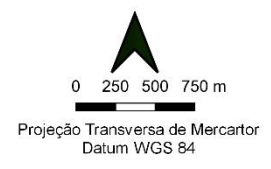
Legenda

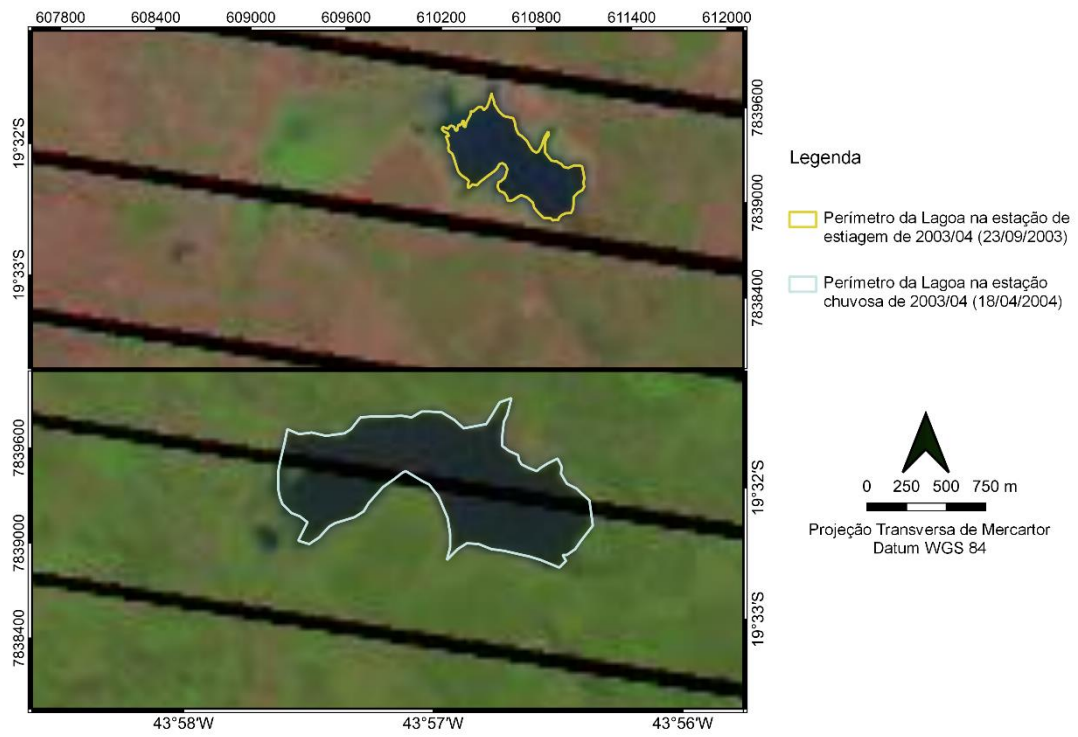
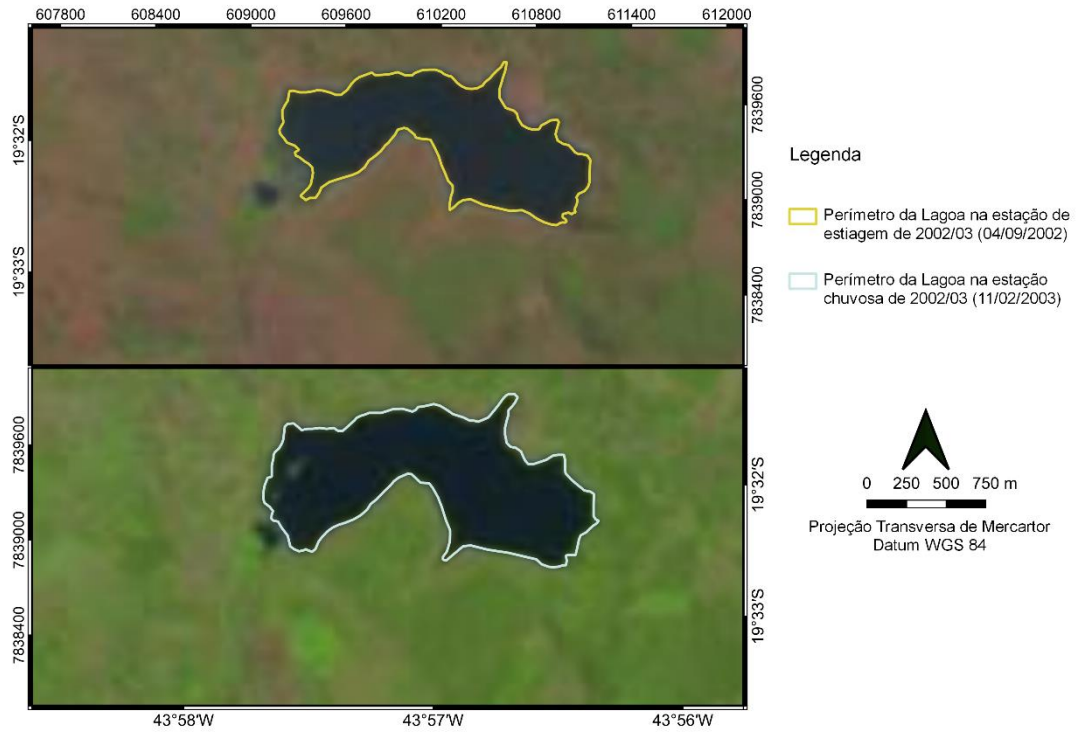
- Perímetro da Lagoa na estação de estiagem de 2000/01 (13/08/2000)
- Perímetro da Lagoa na estação chuvosa de 2000/01 (05/02/2001)

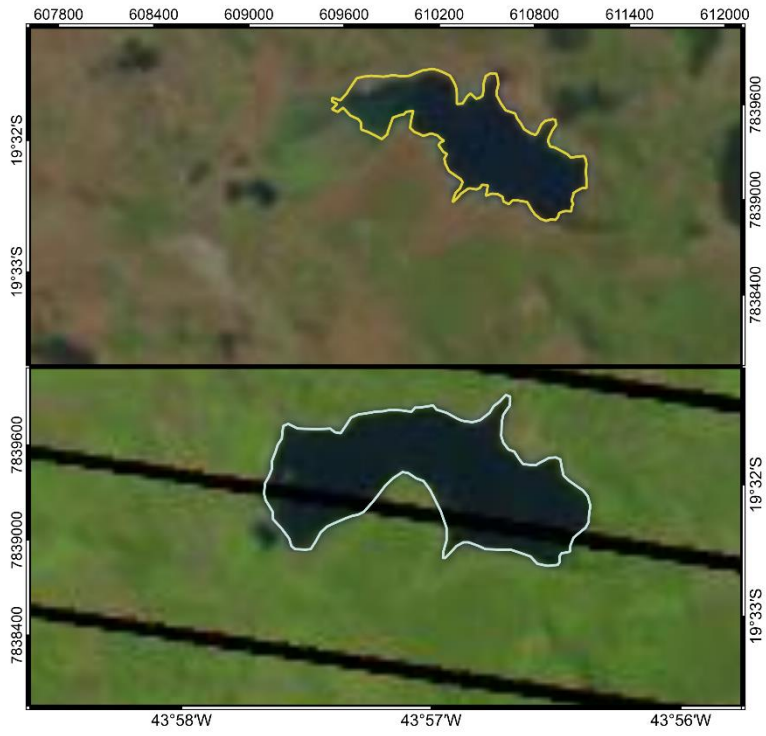


Legenda



- Perímetro da Lagoa na estação de estiagem de 2001/02 (01/09/2001)
- Perímetro da Lagoa na estação chuvosa de 2001/02 (12/03/2002)

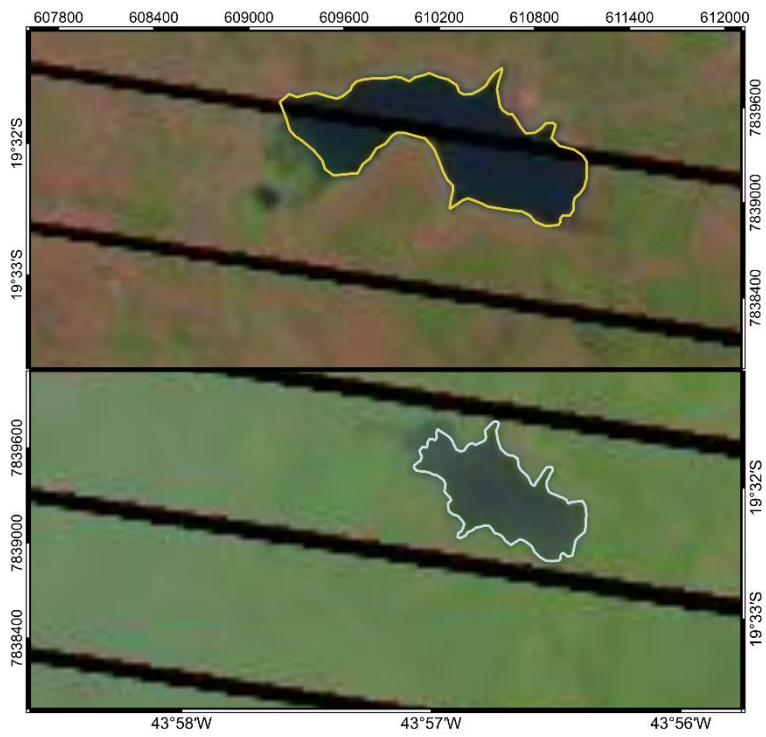
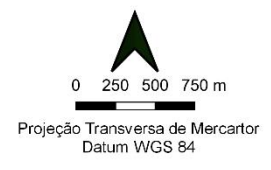








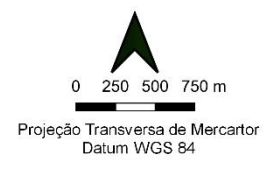
Legenda

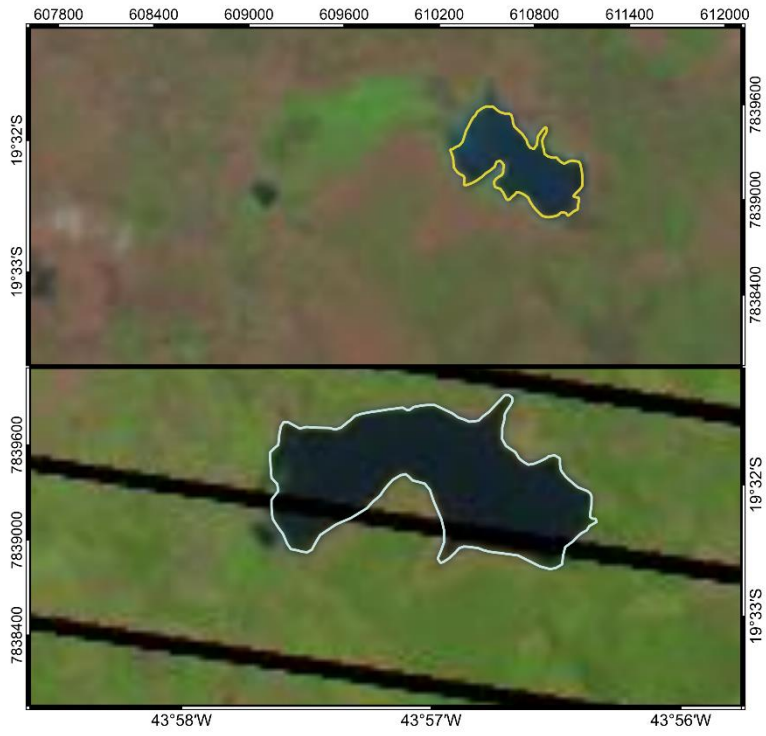
-  Perímetro da Lagoa na estação de estiagem de 2004/05 (16/08/2004)
-  Perímetro da Lagoa na estação chuvosa de 2004/05 (05/04/2005)





Legenda

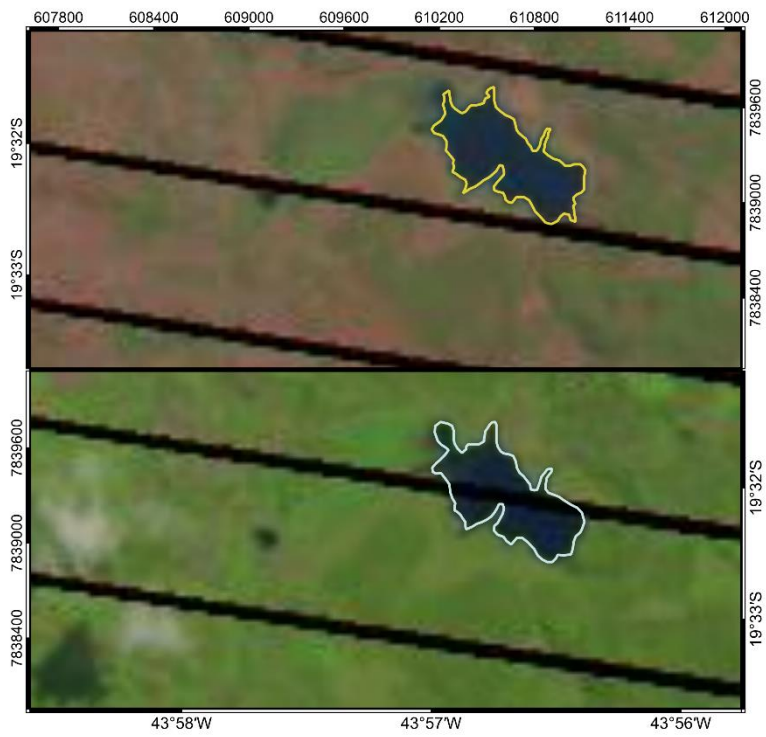
-  Perímetro da Lagoa na estação de estiagem de 2005/06 (12/09/2005)
-  Perímetro da Lagoa na estação chuvosa de 2005/06 (19/02/2006)







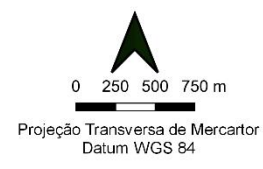
Legenda

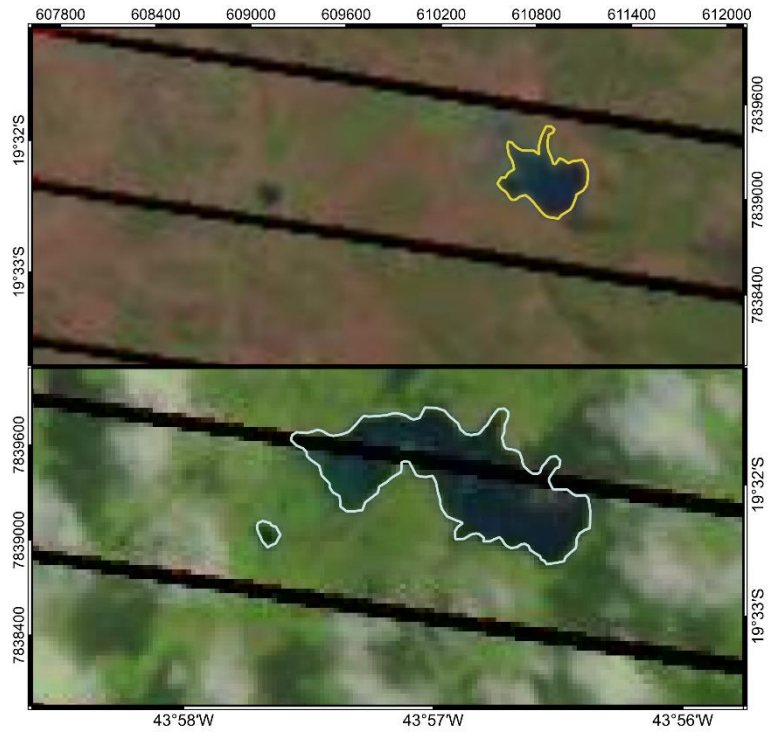
-  Perímetro da Lagoa na estação de estiagem de 2006/07 (23/09/2006)
-  Perímetro da Lagoa na estação chuvosa de 2006/07 (10/03/2007)





Legenda

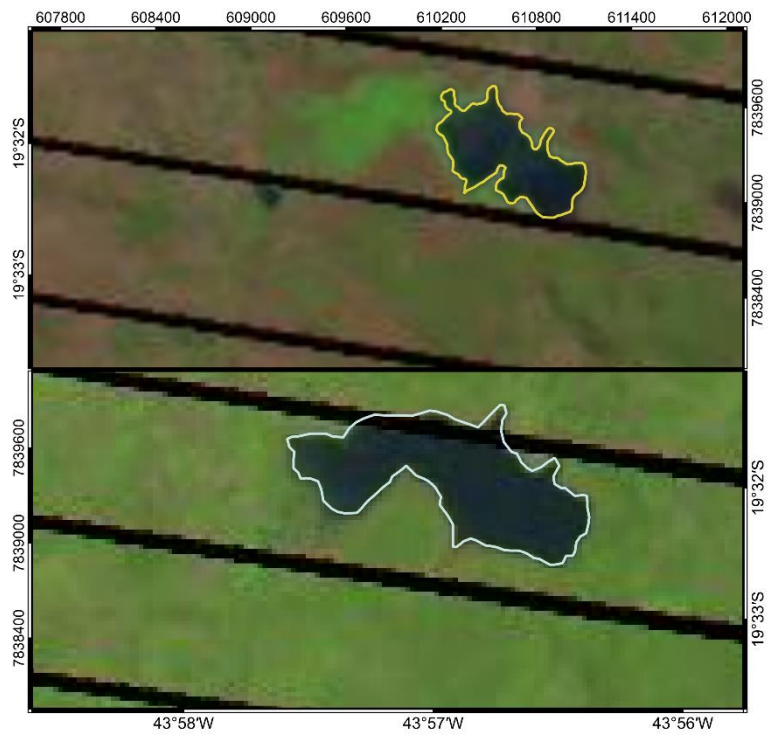
-  Perímetro da Lagoa na estação de estiagem de 2007/08 (02/09/2007)
-  Perímetro da Lagoa na estação chuvosa de 2007/08 (28/03/2008)







Legenda

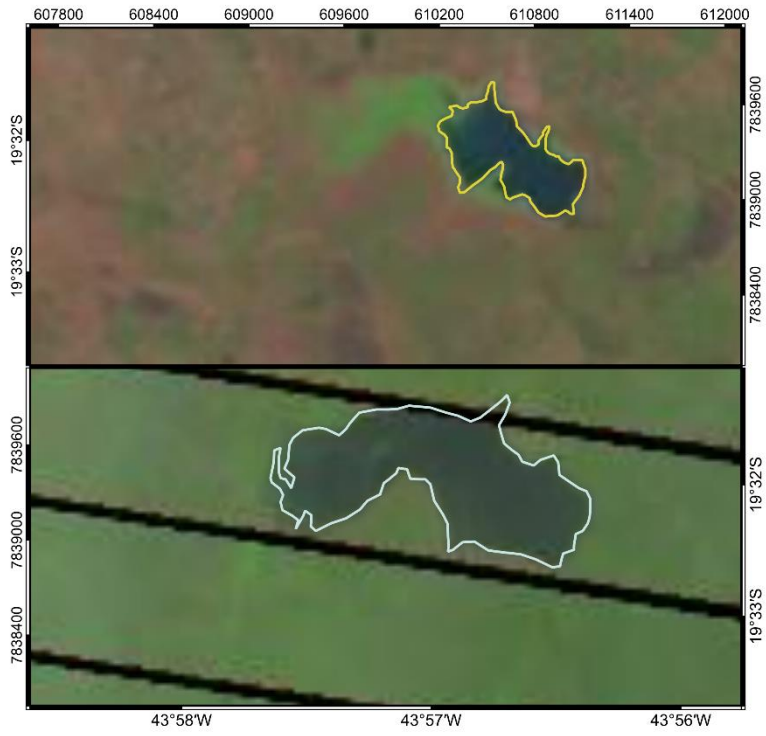
-  Perímetro da Lagoa na estação de estiagem de 2008/09 (03/08/2008)
-  Perímetro da Lagoa na estação chuvosa de 2008/09 (31/03/2009)





Legenda

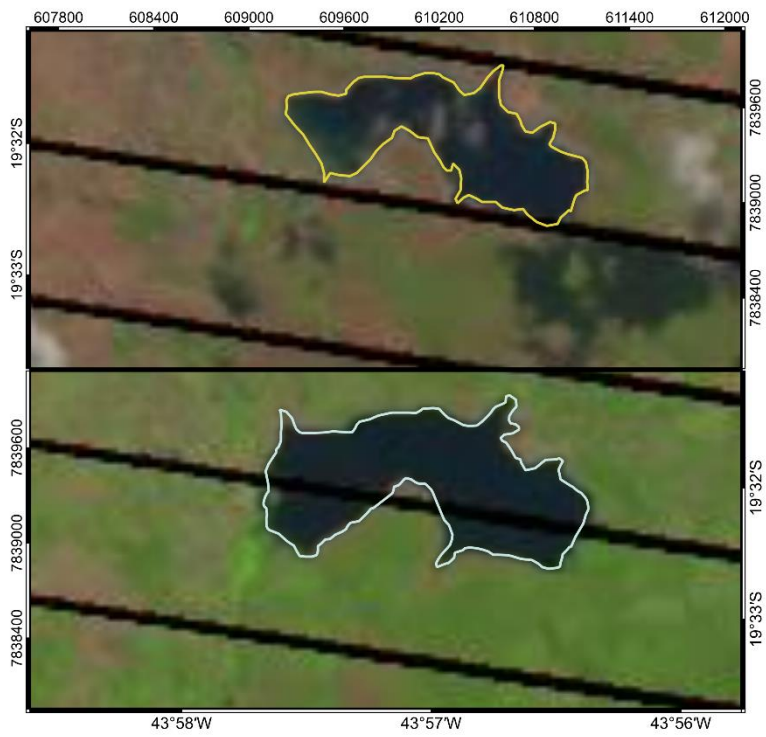
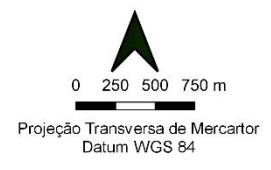
-  Perímetro da Lagoa na estação de estiagem de 2009/10 (06/08/2009)
-  Perímetro da Lagoa na estação chuvosa de 2009/10 (13/01/2010)







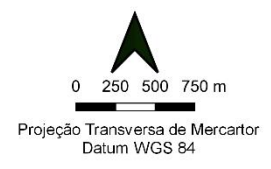
Legenda

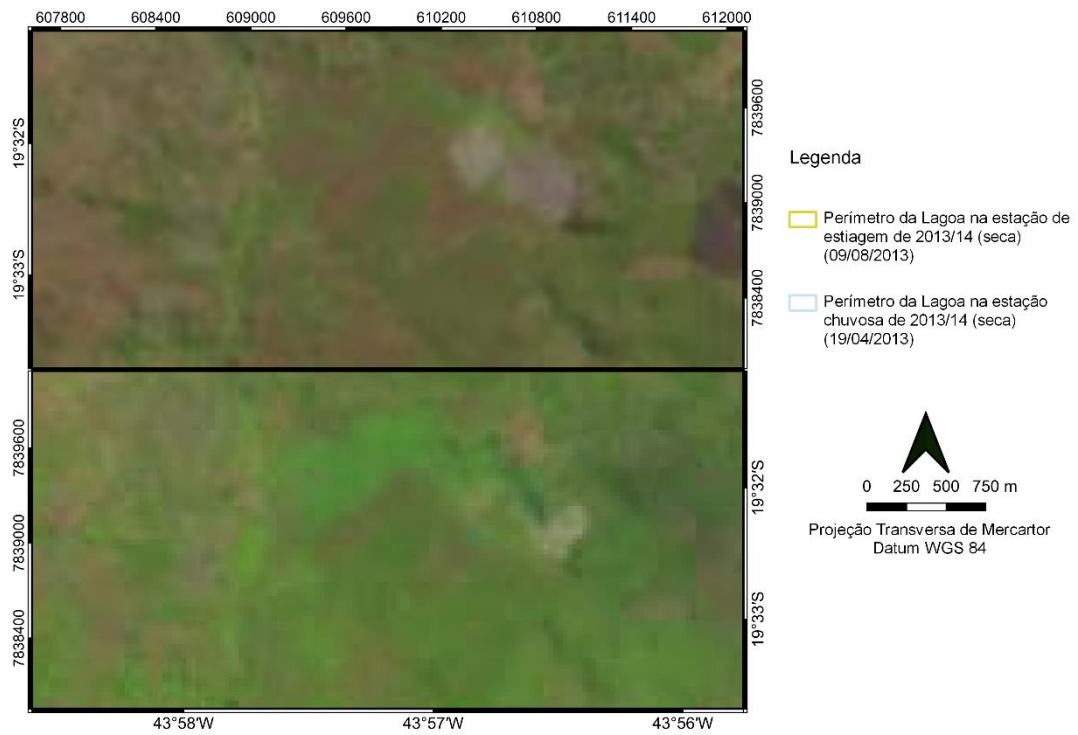
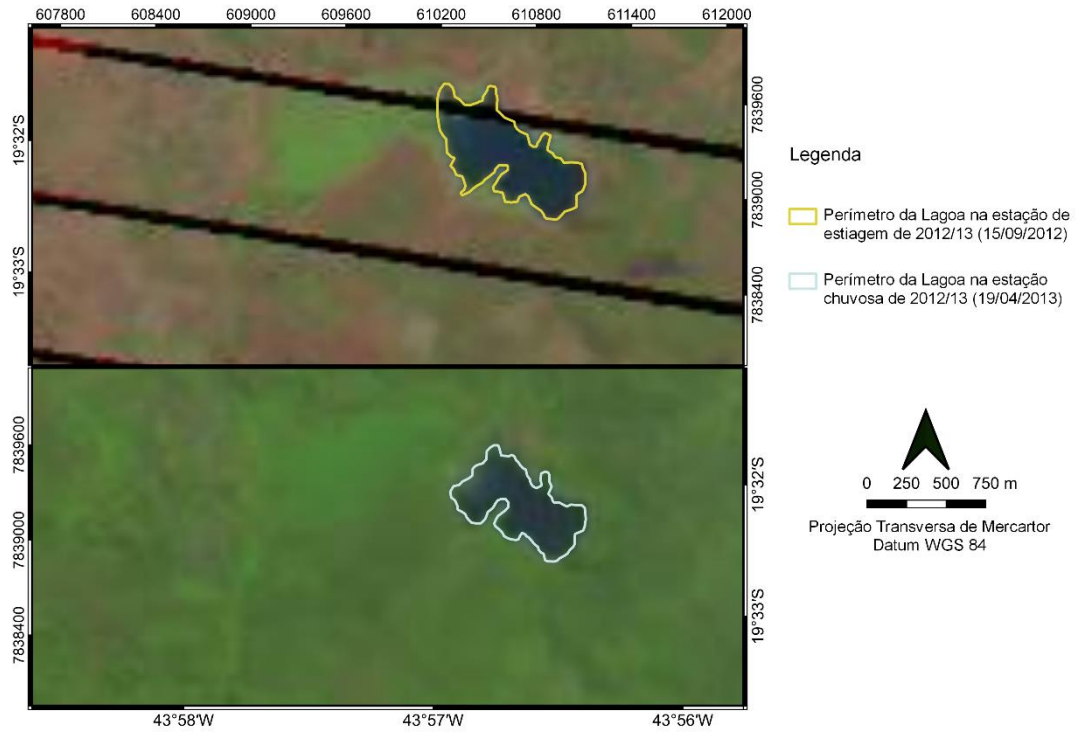
-  Perímetro da Lagoa na estação de estiagem de 2010/11 (18/09/2010)
-  Perímetro da Lagoa na estação chuvosa de 2010/11 (01/02/2011)

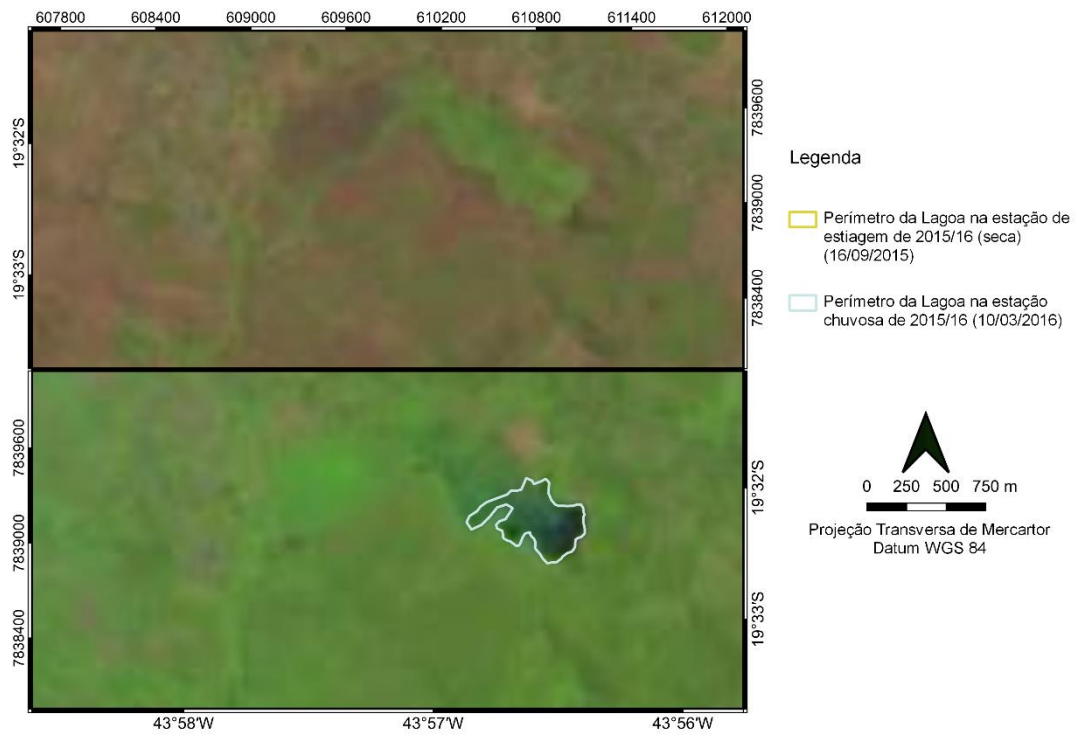
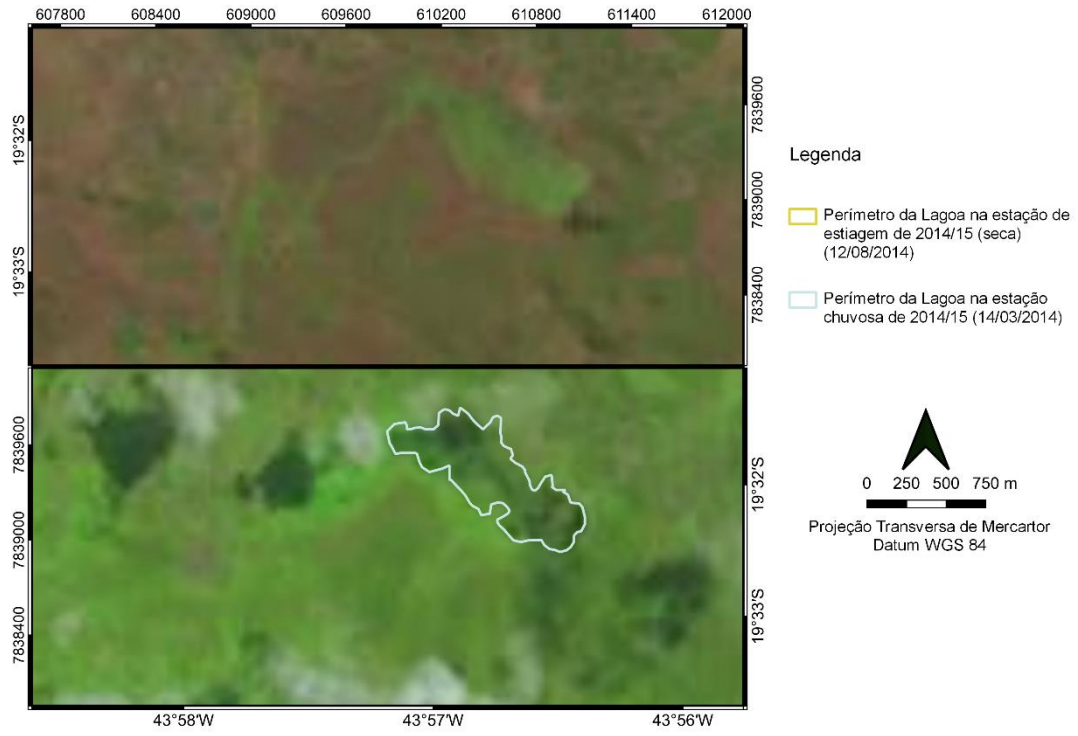


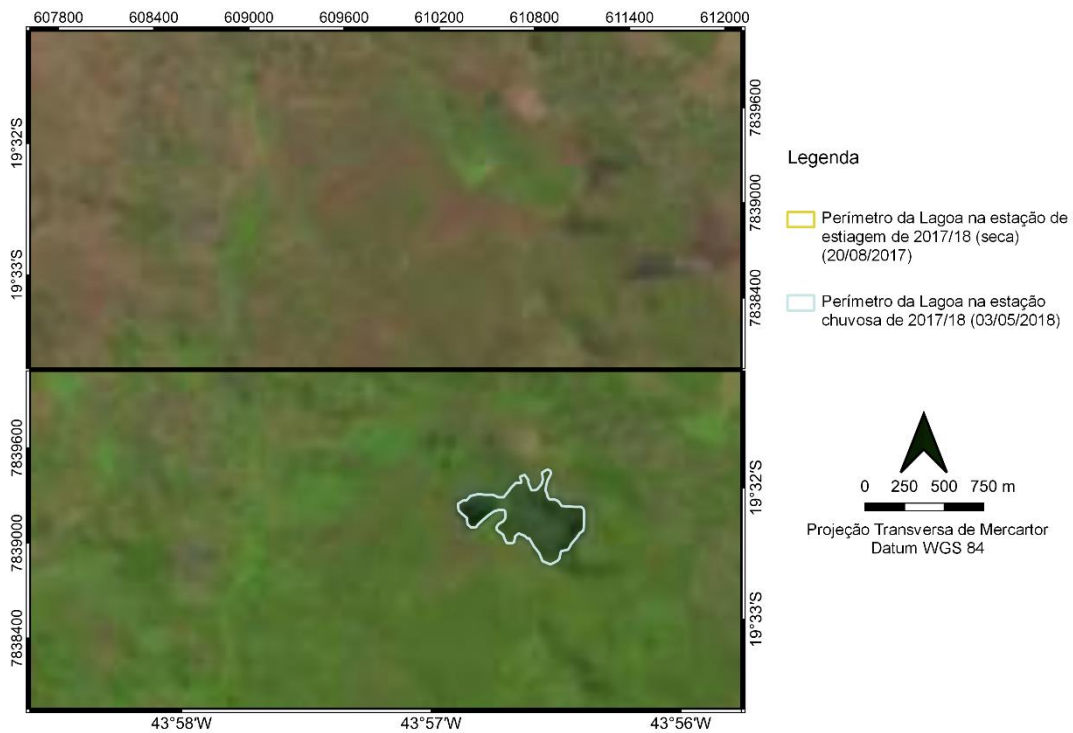
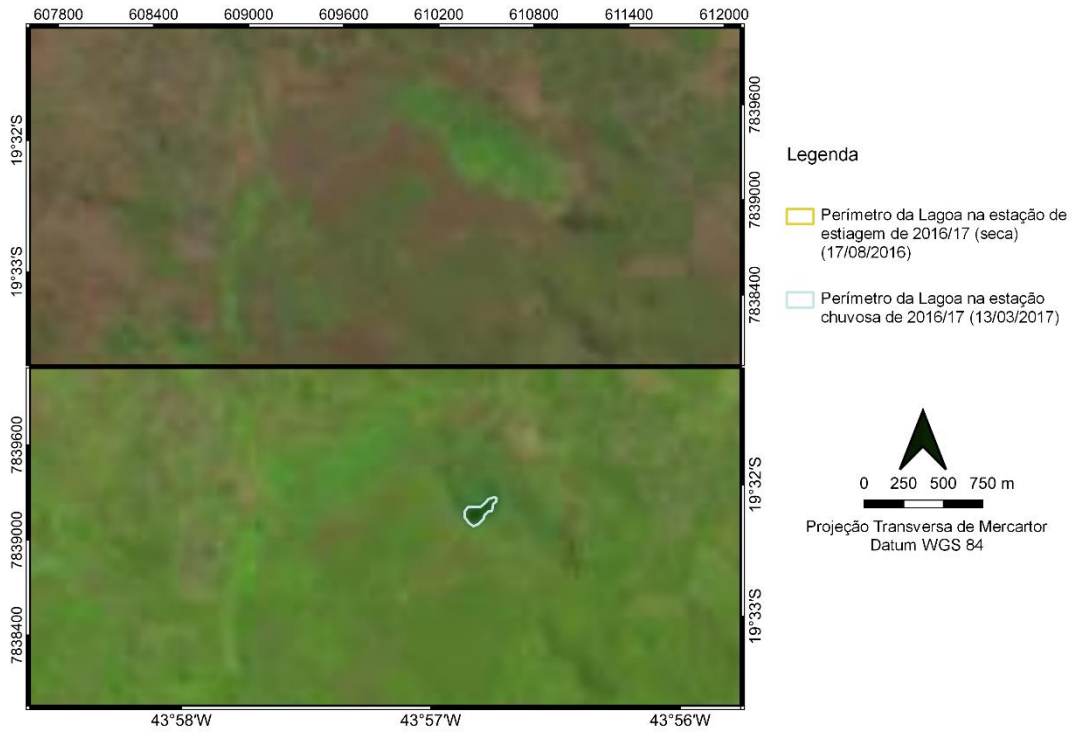
Legenda

-  Perímetro da Lagoa na estação de estiagem de 2011/12 (28/08/2011)
-  Perímetro da Lagoa na estação chuvosa de 2011/12 (07/03/2012)











Legenda

- Perímetro da Lagoa na estação de estiagem de 2018/19 (24/09/2018)
- Perímetro da Lagoa na estação chuvosa de 2018/19 (04/04/2019)



Legenda

- Perímetro da Lagoa na estação de estiagem de 2020/21 (28/08/2020)



O ano hidrológico 2020/21 ainda não havia terminado durante a realização deste estudo, por isso nenhuma imagem foi utilizada para a estação chuvosa

**APÊNDICE I – MÉTODO ABANDONADO PARA ELABORAÇÃO
DO MODELO BATIMÉTRICO**

APÊNDICE I – MÉTODO ABANDONADO PARA ELABORAÇÃO DO MODELO BATIMÉTRICO

A primeira tentativa de se delinear com alguma representatividade a batimetria da lagoa ocorreu através do uso de um MDE adquirido via satélite, pelo instrumento PALSAR (resolução espacial de 12,5 metros), para a composição de vários perfis altimétricos cortando a Lagoa do Sumidouro. Eles tiveram início no limite da margem mais expandida da lagoa, perfilando-se seu fundo emerso até as variadas linhas de espelhos d'água ao longo do tempo.

Esses perfis, formados por declives emersos ao redor da lagoa, foram assumidos como padrão topográfico representante também de toda a parte submersa, de forma a permitirem o traçado de prolongamentos submersos até o fundo da lagoa. O prolongamento dos perfis foi baseado na morfologia e inclinação obtida na porção mais proximal à margem, e supôs que, depois de certo avanço, tenderia a sofrer um abaulamento e suavização do terreno.

Seis perfis foram traçados, dois no setor oeste (A e B), um no setor central (C) e três no setor leste (D, E e F). Através dos perfis, foi possível reprojeter as cotas dos prolongamentos e definir suas curvas de nível correspondentes, reconstruindo assim a batimetria da lagoa. A Figura 33 mostra a localização de cada um dos perfis no mapa da lagoa, bem como os pontos de cota reprojeterados, que seriam utilizados para compor o modelo batimétrico. As Figura 34, Figura 35, Figura 36, Figura 37, Figura 38 e Figura 39 representam cada um dos perfis construídos, e suas respectivas projeções batimétricas.

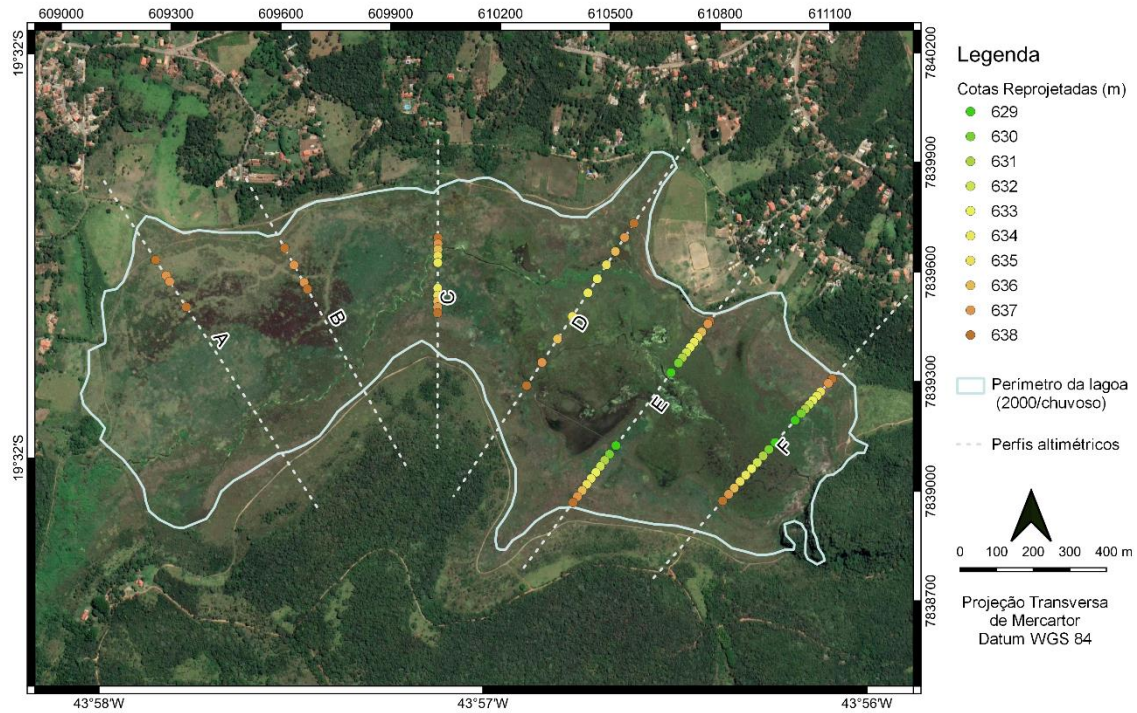


Figura 33 - Mapa de localização dos seis perfis altimétricos, com suas respectivas cotas reprojctadas. Essas cotas foram utilizadas para confecção das curvas de nível que comporiam o modelo batimétrico. Nota-se a limitação do modelo quanto a coerência das curvas geradas em comparação com a morfologia do talvegue, principalmente nos perfis D e F.

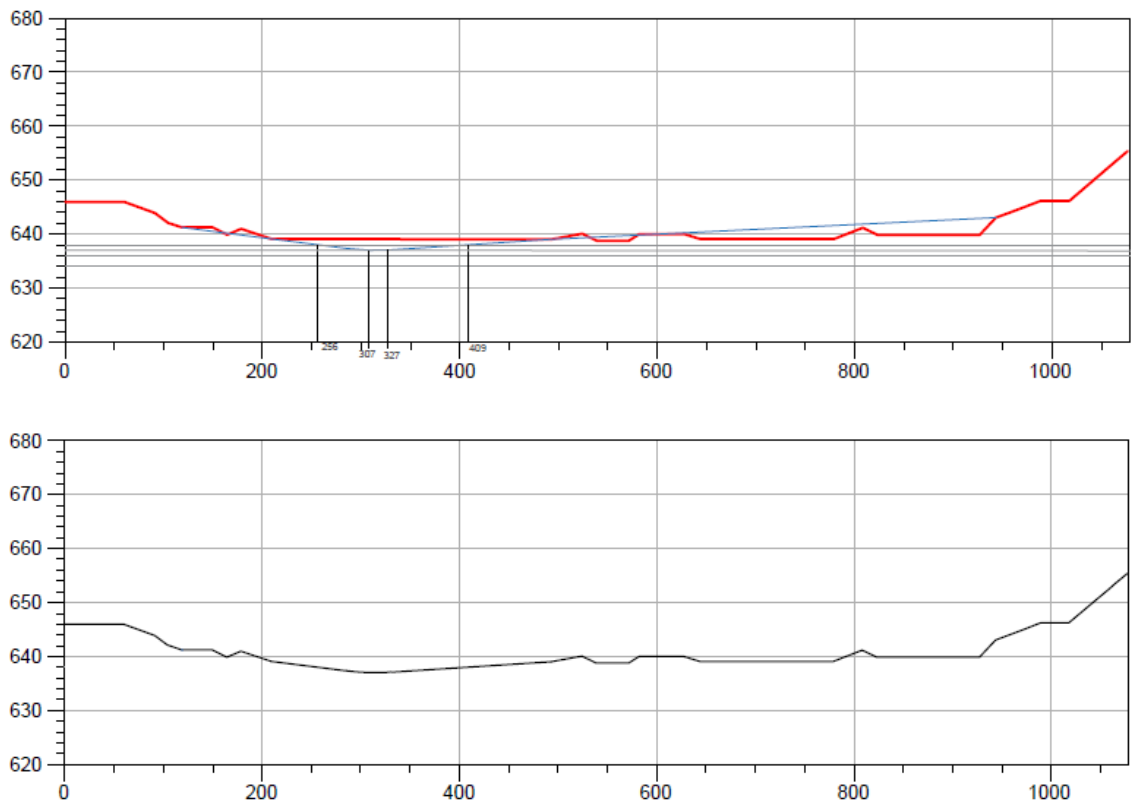


Figura 34 - Perfil altimétrico A. Na parte superior, em vermelho a delineação topográfica do MDE, em azul o prolongamento inferido, e em preto os pontos de cota reprojctada. Na parte inferior, em preto, o novo traçado do perfil, composto por parte inferida e parte extraída do MDE

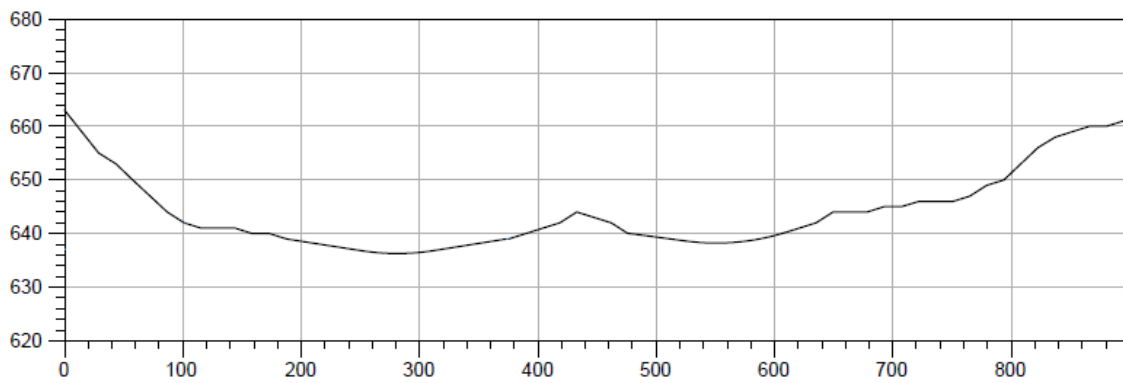
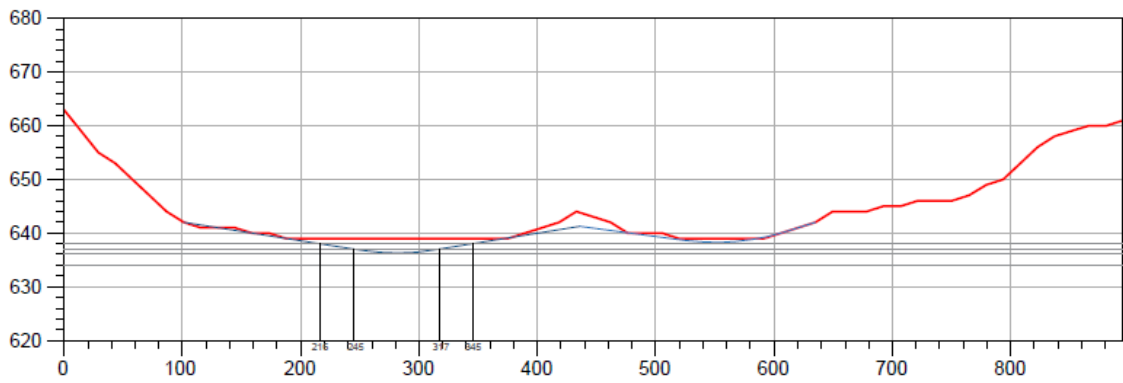


Figura 35 - Perfil altimétrico B. Na parte superior, em vermelho a delineação topográfica do MDE, em azul o prolongamento inferido, e em preto os pontos de cota reprojetaada. Na parte inferior, em preto, o novo traçado do perfil, composto por parte inferida e parte extraída do MDE

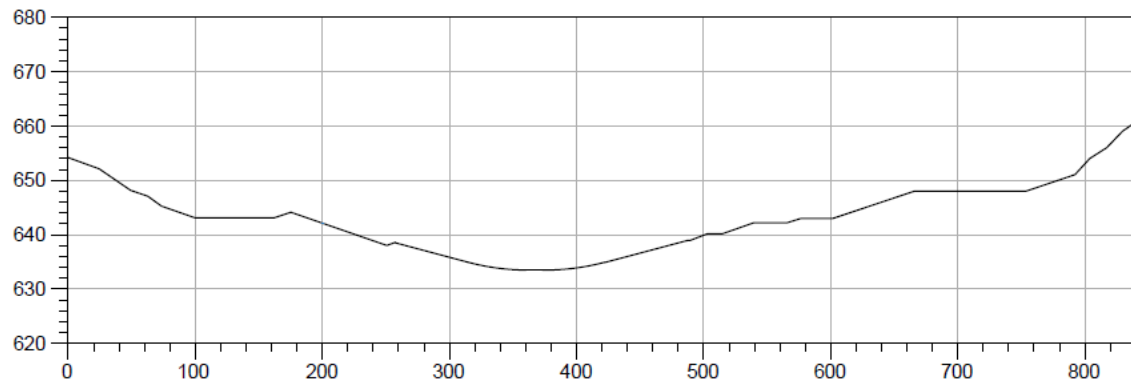
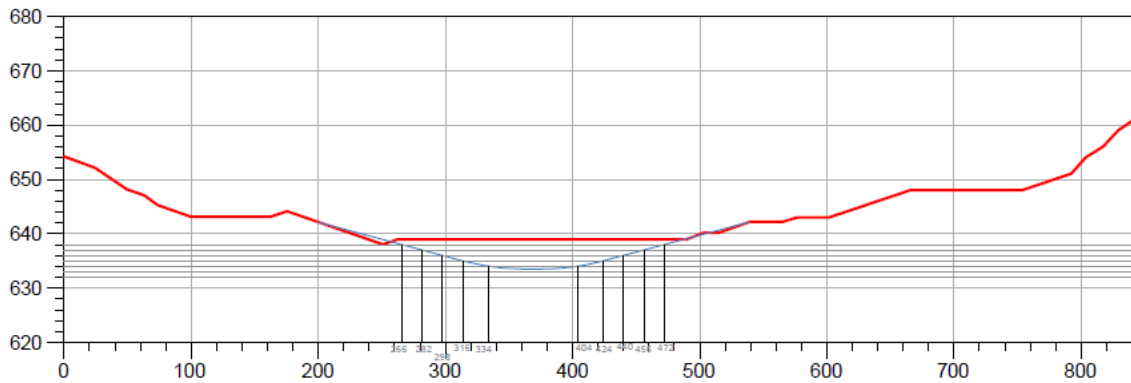


Figura 36 - Perfil altimétrico C. Na parte superior, em vermelho a delineação topográfica do MDE, em azul o prolongamento inferido, e em preto os pontos de cota reprojetaada. Na parte inferior, em preto, o novo traçado do perfil, composto por parte inferida e parte extraída do MDE

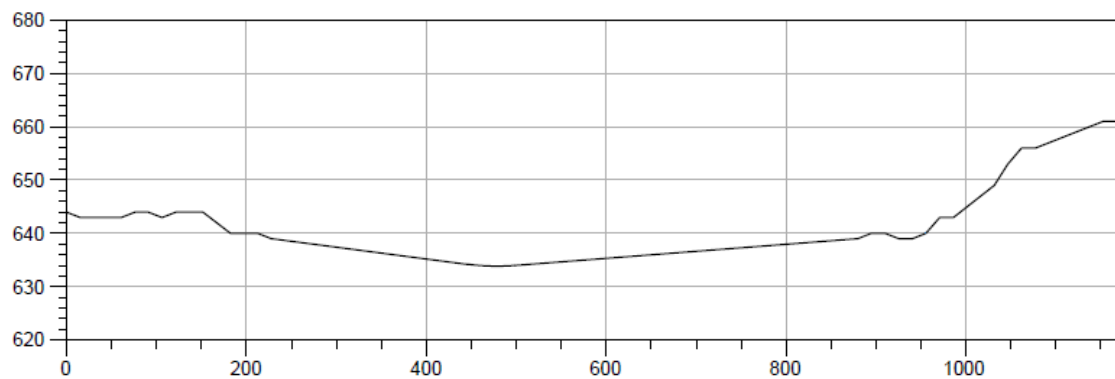
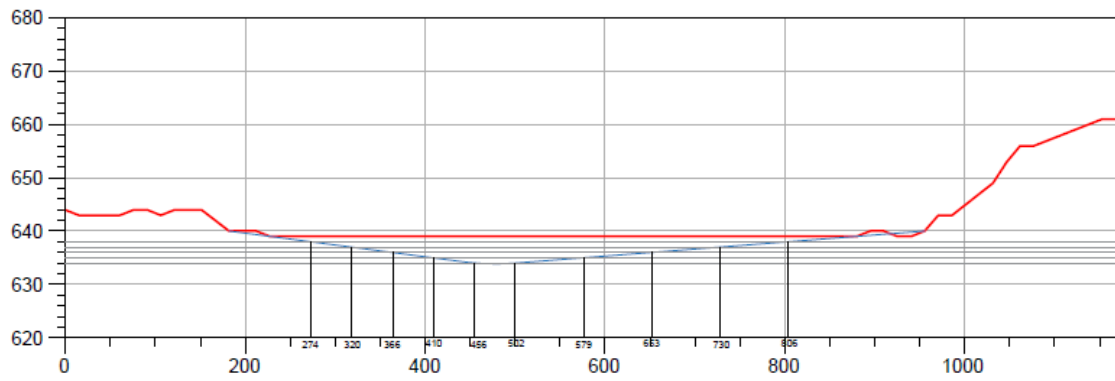


Figura 37 - Perfil altimétrico D. Na parte superior, em vermelho a delineação topográfica do MDE, em azul o prolongamento inferido, e em preto os pontos de cota reprojetaada. Na parte inferior, em preto, o novo traçado do perfil, composto por parte inferida e parte extraída do MDE

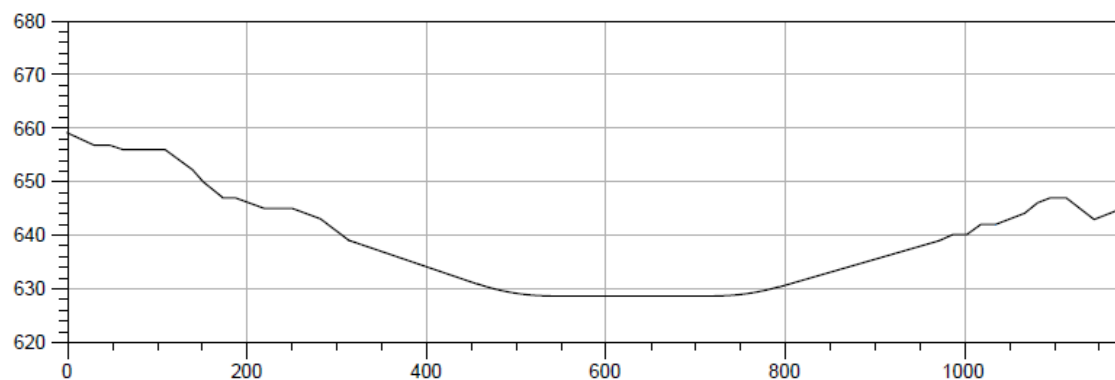
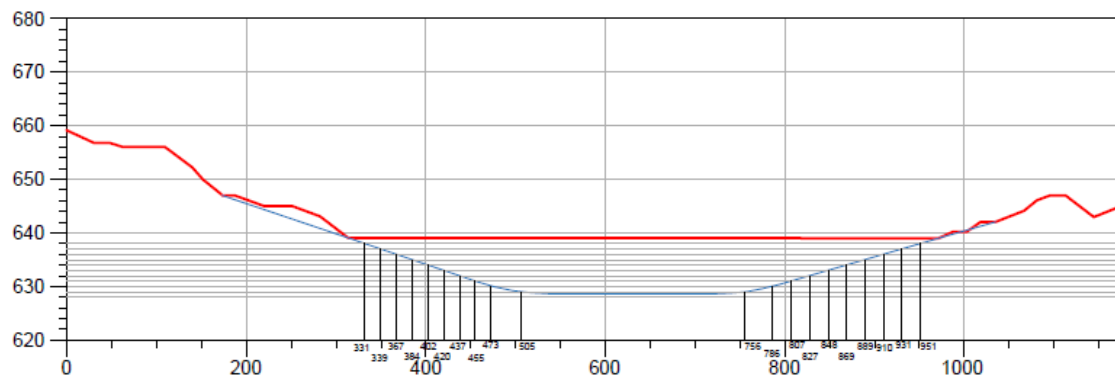


Figura 38 - Perfil altimétrico E. Na parte superior, em vermelho a delineação topográfica do MDE, em azul o prolongamento inferido, e em preto os pontos de cota reprojetaada. Na parte inferior, em preto, o novo traçado do perfil, composto por parte inferida e parte extraída do MDE

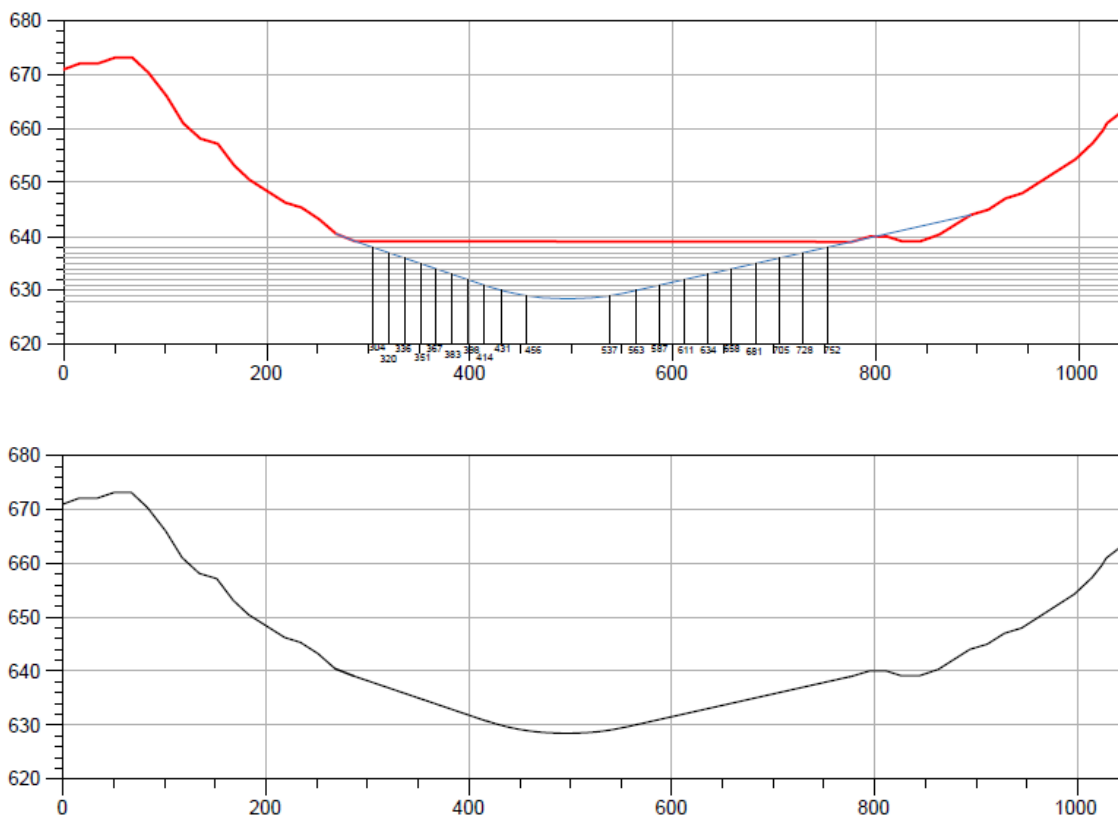


Figura 39 - Perfil altimétrico A. Na parte superior, em vermelho a delineação topográfica do MDE, em azul o prolongamento inferido, e em preto os pontos de cota reprojeta. Na parte inferior, em preto, o novo traçado do perfil, composto por parte inferida e parte extraída do MDE

Essa tentativa, entretanto, não se mostrou defensável devido à grande carga laboral necessária para um recobrimento minimamente significativo de toda a área, mas também por causa das grandes subjetividades e imprecisões inerentes à premissa assumida das margens emersas como representantes, em sua continuidade, do fundo submerso.

Além disso, inconsistências nos perfis batimétricos simulados foram notórias, uma vez que esse método não levou em consideração aspectos geomorfológicos do fundo da lagoa, como a presença de um talvegue que desagua no sumidouro. Por causa disso, esse talvegue, que deveria funcionar como ponto de cota mais baixa do perfil, muitas vezes se encontrava em uma elevação incoerente.

Outra falha marcante a respeito desse método foi que, ao supor que ao se aplicar o abaulamento e suavização previsto, em casos de perfis de maior extensão, foram geradas estruturas planares muito longas na parte mais profunda da lagoa, atingindo até 250 metros. Esse resultado não é coerente com o que foi relatado em trabalhos anteriores que tiveram a oportunidade de visitar a Lagoa do Sumidouro durante uma seca volumétrica e relatos de funcionários do parque.

Dessa forma, optou-se pelo uso de um método baseado nas variações dos espelhos d'água da lagoa ao longo do tempo, mas agora assumindo-se seus perímetros sazonais como registros das próprias curvas de nível emersas do reservatório, uma vez que o espelho d'água é sempre planar e horizontal. Esse segundo método apresentou resultados muito mais satisfatórios e coerentes com os esperados para uma lagoa.