

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Instituto de Geociências
Programa de Pós-Graduação em Geologia

Wallace Maciel Pacheco Neto

**CARACTERIZAÇÃO E COMPORTAMENTO HÍDRICO DAS LAGOAS DO
SISTEMA HIDROGEOLÓGICO CÁRSTICO DO GRUPO BAMBUÍ NA REGIÃO DE
LAGOA SANTA – MINAS GERAIS, BRASIL**

Belo Horizonte

2025

Wallace Maciel Pacheco Neto

**CARACTERIZAÇÃO E COMPORTAMENTO HÍDRICO DAS LAGOAS DO
SISTEMA HIDROGEOLÓGICO CÁRSTICO DO GRUPO BAMBUÍ NA REGIÃO DE
LAGOA SANTA – MINAS GERAIS, BRASIL**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Sérgio de Paula

Belo Horizonte

2025

P116c
2025

Pacheco Neto, Wallace Maciel.

Caracterização e comportamento hídrico das lagoas do sistema hidrogeológico cárstico do Grupo Bambuí na região de Lagoa Santa - Minas Gerais, Brasil [manuscrito] / Wallace Maciel Pacheco Neto. – 2025.

372 f., enc. il. (principalmente color.)

Orientador: Rodrigo Sérgio de Paula.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2025.

Bibliografia: f. 68-78.

Inclui apêndices.

1. Hidrogeologia – Teses. 2. Carste – Teses. 3. Lagoas – Teses. 4. Aquíferos – Lagoa Santa (MG) – Teses. 5. Dados geoespaciais – Teses. I. Paula, Rodrigo Sérgio de. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Geociências. III. Título.

CDU: 556.3(815.1)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA DO IGC-UFMG



FOLHA DE APROVAÇÃO

Caracterização e comportamento hídrico das lagoas do sistema hidrogeológico cárstico do Grupo Bambuí na região de Lagoa Santa – Minas Gerais, Brasil

WALLACE MACIEL PACHECO NETO

Tese submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GEOLOGIA (PPGeol), do Instituto de Geociências (IGC), da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), como **REQUISITO PARCIAL** para obtenção do grau de Doutor(a) em GEOLOGIA, área de concentração GEOLOGIA ECONÔMICA E APLICADA, pelo Programa de Pós-graduação em Geologia do IGC/UFMG.

Aprovada em 03 de setembro de 2025, pela banca constituída pelos membros:

Prof(a). Dr(a). Rodrigo Sérgio de Paula – Orientador(a)
PPGeol/UFMG

Prof(a). Dr(a). Paulo Henrique Ferreira Galvão
PPGeol/UFMG

Prof(a). Dr(a). Maria Giovana Parizzi
PPGeol/UFMG

Prof(a). Dr(a). Julian Cardoso Eleutério
EE/UFMG

Prof(a). Dr(a). José Antônio Ferrari
Instituto de Pesquisas Ambientais-SP - Núcleo de Geociências

Assinado por: **Isabel Margarida Horta Ribeiro**

Antunes

Num. de Identificação: 09133647

Data: 2025.09.25 20:14:55+01'00'

Prof(a). Dr(a). Isabel Margarida Horta Ribeiro Antunes
Universidade do Minho - Portugal

Belo Horizonte, 03 de setembro de 2025.

À minha mãe, cuja ausência física jamais apagou sua presença em minha vida. Sei, com o coração tranquilo, que ela acompanha cada um dos meus passos, mesmo em outro plano, guiando-me com o mesmo amor e força que sempre ofereceu em vida.

À minha avó, exemplo de coragem e resiliência, que enfrentou tantas batalhas com dignidade. Que este momento possa ser também uma vitória sua, e que meu caminhar a faça vibrar de alegria e orgulho.

Ao meu pai, por seu apoio incondicional em todas as minhas decisões. Sua confiança em mim e sua presença constante foram fundamentais para que eu tivesse coragem de seguir cada etapa deste caminho.

Com amor e eterna gratidão.

AGRADECIMENTOS

O desenvolvimento desta tese de doutorado ao longo dos últimos quatro anos foi uma jornada intensa e enriquecedora, repleta de valiosos aprendizados, superações e conquistas. Esta trajetória não teria sido possível sem o apoio e a contribuição de pessoas e instituições que, direta ou indiretamente, me auxiliaram nesta caminhada.

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me guiado e sustentado em todos os momentos da minha vida até aqui. À minha família, especialmente ao meu pai e à minha avó, que estiveram ao meu lado durante todo esse percurso, acreditando em mim e caminhando comigo em cada etapa. À minha mãe, que partiu poucos meses antes do início desta pesquisa, mas cuja presença e força continuam sendo inspiração — este trabalho também é seu.

De forma muito especial, deixo meu mais sincero agradecimento ao meu orientador, Professor Dr. Rodrigo Sérgio de Paula. Sua confiança, orientação e generosidade intelectual foram fundamentais em cada passo dessa jornada. Seu exemplo inspira não apenas o pesquisador que me tornei, mas também aquele que ainda almejo ser.

Sou grato à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio essencial por meio da concessão da bolsa de estudos durante todo o período de formação, sem a qual esta caminhada teria sido inviável.

Agradeço ao Instituto de Geociências (IGC) e à Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) pela infraestrutura, biblioteca e subsídios que garantiram condições ideais para a realização deste trabalho, sempre com máximo amparo e conforto. Ao Programa de Pós-Graduação em Geologia e a todos os profissionais que o compõem, por todo o suporte e acolhimento ao longo desses anos. Em especial, ao William, da secretaria da Pós, pelo exemplar profissionalismo e constante disponibilidade. Sem a UFMG e as parcerias com o Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN) e com o Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (CECAV), pelos inestimáveis apoios técnicos e financeiros, esta pesquisa não teria se concretizado.

Ao longo desses quatro anos, a UFMG tornou-se um verdadeiro lar. Colegas — sejam alunos, mestres ou professores — tornaram-se parceiros e amigos, em uma

convivência marcada por uma rica e prazerosa troca de saberes. Pude participar de diversos projetos, orientações e discussões acadêmicas, todas repletas de significado.

Essa trajetória foi também marcada por importantes realizações acadêmicas: artigos científicos publicados, diversas apresentações de resumos em eventos nacionais e internacionais, coorientações de trabalhos de graduação, além de novas publicações em preparação. Conquistas que só foram possíveis com o apoio e a estrutura oferecidos pelo Laboratório de Estudos Hidrogeológicos (LeHID), idealizado e liderado pelos Professores Dr. Rodrigo Sérgio de Paula e Dr. Paulo Galvão, a quem sou profundamente grato.

Aos meus grandes amigos da geologia, Bruno, Felipe e Pedro, que iniciaram comigo essa jornada ainda no Espírito Santo e, por obra do destino, cruzaram novamente meu caminho em Belo Horizonte — meu sincero agradecimento por caminharem ao meu lado. Aos muitos amigos que me acompanharam nestes anos em Belo Horizonte, tanto os antigos quanto os novos, deixo um agradecimento especial: Tita, Clara, Carlous, Esther, Afrânio, Fofó e Fernanda — vocês fizeram diferença em minha vida.

À Gabrielle, minha namorada, que esteve comigo durante o último ano deste trabalho, sempre acreditando no meu potencial e nas convicções que carrego para o futuro — minha gratidão e carinho.

Agradeço à Comissão Avaliadora por aceitarem o convite para compor a banca e pelas valiosas contribuições oferecidas à minha pesquisa.

Por fim, registro minha gratidão ao Centro Universitário UniBH, que me acolheu no início da minha trajetória na docência. Nesse espaço, ensino e aprendo todos os dias, reafirmando meu amor pela geologia.

"A Spirit with a vision is a dream with a mission." (Neil Ellwood Peart).

RESUMO

A região da Área de Proteção Ambiental Carste de Lagoa Santa, situada na porção central de Minas Gerais, abriga um sistema hidrogeológico cárstico complexo e interligado, marcado pela ocorrência de lagoas instaladas em feições de dissolução como dolinas e uvalas. Inserida na bacia do rio São Francisco, a área apresenta notável importância ecológica, cultural e científica, além de estar sob crescente pressão antrópica. A presente tese teve como objetivo principal investigar o comportamento hídrico dessas lagoas ao longo dos últimos 35 anos, visando compreender os fatores naturais e antrópicos que influenciam sua perenidade e dinâmica. A pesquisa utilizou uma abordagem integrada com base em dados geoespaciais multitemporais (imagens *Landsat*), séries históricas pluviométricas, análises morfoestruturais, caracterização geológica e hidrogeológica local, além da identificação e quantificação de poços tubulares na região. O estudo abrangeu a identificação e classificação das lagoas quanto à sua estabilidade hídrica (perenes ou intermitentes), a análise da influência climática e geológica sobre os níveis d'água e a verificação das interferências causadas por atividades antrópicas, sobretudo a exploração subterrânea. Os resultados demonstraram que a perenidade das lagoas está fortemente condicionada às características geomorfológicas das depressões, à litologia predominante, à elevação topográfica, à conectividade com o sistema aquífero cárstico e à presença de estruturas geológicas que conectam os corpos estudados e os aquíferos na região. Lagoas situadas em depressões fechadas, elevadas e sobre litologias carbonáticas mais puras mostraram maior tendência à estabilidade hídrica. Por outro lado, aquelas em áreas mais baixas ou com maior desenvolvimento lateral apresentaram maior suscetibilidade à drenagem subterrânea e variações sazonais. Além disso, foi constatada uma influência crescente da intervenção humana: entre 1985 e 2020, foram identificados 715 poços ativos, dos quais 292 interferem significativamente na dinâmica de lagoas próximas, sobretudo as de menor volume e maior dependência do aquífero. A análise multitemporal permitiu a classificação das lagoas conforme seu grau de conexão com o aquífero, revelando que a variação pluviométrica por si só não explica a totalidade dos comportamentos observados. A ação sinérgica entre clima, geologia e uso antrópico

da água emerge como determinante na definição do comportamento hídrico das lagoas. Conclui-se que a dinâmica desses corpos hídricos é multifatorial e exige abordagens interdisciplinares para sua compreensão e manejo. Os resultados obtidos fornecem subsídios técnicos e científicos para o aprimoramento das políticas públicas de proteção ambiental e gestão dos recursos hídricos em regiões cársticas vulneráveis, como o Carste de Lagoa Santa.

Palavras-chave: hidrogeologia cárstica; comportamento hídrico; lagoas; Grupo Bambuí; análise geoespacial; poços tubulares; carste de Lagoa Santa.

ABSTRACT

The Lagoa Santa Karst Environmental Protection Area (LSKEPA), located in the central portion of Minas Gerais, hosts a complex and interconnected karst hydrogeological system, marked by the occurrence of lakes situated in dissolution features such as dolines and uvalas. Inserted within the São Francisco River basin, the region holds remarkable ecological, cultural, and scientific importance, while also facing increasing anthropogenic pressure. This doctoral thesis aimed to investigate the hydrological behavior of these lakes over the past 35 years, seeking to understand the natural and anthropogenic factors that influence their permanence and dynamics. The research adopted an integrated approach based on multitemporal geospatial data (*Landsat* imagery), historical rainfall series, morphostructural analyses, local geological and hydrogeological characterization, and the identification and quantification of tubular wells in the region. The study included the identification and classification of lakes based on their hydrological stability (perennial or intermittent), analysis of climatic and geological influences on water levels, and verification of the impacts caused by anthropogenic activities, especially groundwater exploitation. The results demonstrated that the permanence of lakes is strongly conditioned by the geomorphological characteristics of the depressions, prevailing lithology, topographic elevation, connectivity with the karst aquifer system, and the presence of geological structures linking surface water bodies to aquifers in the region. Lakes located in closed, elevated depressions over purer carbonate rocks showed greater hydrological stability. Conversely, those in lower areas or with more lateral development showed greater susceptibility to underground drainage and seasonal fluctuations. Additionally, increasing human intervention was observed: between 1985 and 2020, 715 active wells were identified, 292 of which significantly interfere with the hydrological dynamics of nearby lakes, particularly those with smaller volumes and greater dependency on groundwater. The multitemporal analysis enabled the classification of lakes according to their degree of connection with the aquifer, revealing that rainfall variability alone does not fully explain the observed behaviors. The synergistic action of climate, geology, and anthropogenic water use emerges as a key determinant in defining lakes hydrological behavior. It is concluded that the dynamics of these water bodies are

multifactorial and require interdisciplinary approaches for their understanding and management. The results provide technical and scientific support for improving public policies on environmental protection and water resource management in vulnerable karst regions such as the Lagoa Santa Karst.

Keywords: karst hydrogeology; hydrological behavior; lakes; Bambuí Group; geospatial analysis; tubular wells, Lagoa Santa karst.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1: Mapa de localização da área de estudo com destaque a Área de Proteção Ambiental Carste de Lagoa Santa e as lagoas analisadas neste trabalho. Fonte: Autor.....	30
Figura 2.2: Mapa Geológico da área de estudo. Fonte: Pacheco Neto et al. (2023a), adaptado de “Projeto VIDA” (Cabral, 1994; Ribeiro et al., 2003).....	34
Figura 3.1: Relação entre disponibilidade de CO ₂ e processos de dissolução na zona epicárstica. Fonte: Williams (1983).....	43
Figura 3.2: Classificação genética de dolinas. Fonte: Adaptado de Waltham & Fookes (2003).....	44
Figura 3.3: Representação de diversas feições comuns em ambientes cársticos. Fonte: Ford & William (2007).....	47
Figura 3.4: Lagoas formadas por dissolução em diferentes litologias e seus processos associados, destaque as lagoas que apresentam litologias carbonáticas. Fonte: Adaptado de Dos Santos & Castro (2022).....	50
Figura 3.5: Dinamismo hidráulico demonstrado pela oscilação da sazonalidade da superfície freática. (a) Período seco: as bacias se apresentam independentes. (b) Período chuvoso: as bacias se conectam, de modo que o sistema A contribui com o fluxo do sistema B. Fonte: Adaptado de Sanchez & Lobo (2016) apud Assunção (2019).....	52
Figura 3.6: Perfil hipotético demonstrando o fluxo e o armazenamento em aquíferos cársticos. Fonte: Adaptado de Hartaman (2014).....	54
Figura 3.7: Perfil topográfico, geológico e geomorfológico da região cárstica de Lagoa Santa, MG. Fonte: Kohler (1989).....	56
Figura 4.1: Mapa de localização da área de estudo com destaque a Área de Proteção Ambiental Carste de Lagoa Santa e as lagoas analisadas neste trabalho. Fonte: Autor.....	67
Figura 4.2: Mapa Geológico da área de estudo sobre um modelo digital de elevação (MDE). Fonte: Adaptado de “Projeto VIDA” (Cabral, 1994; Ribeiro et al., 2003).....	69
Figura 4.3: Fluxograma das atividades de geoprocessamento realizadas para identificar a existência das lagoas na área de estudo durante períodos secos e chuvosos entre 1984 e 2020. Fonte: Autor.....	78

Figura 4.4: Depressões Altimétricas destacando as lagoas existentes na área de estudo. As lagoas representadas correspondem a todos os 153 espelhos d'água identificados ao longo do período de pesquisa das imagens – 1984 a 2020. Fonte: Autor.....	82
Figura 4.5: Maciços rochosos carbonáticos e lagoas presentes na área de estudo. Fonte: Autor.....	83
Figura 4.6: Fotolineamentos estruturais e lagoas presentes existentes na área de estudo. Fonte: Autor.....	84
Figura 4.7: Subclasses de lagoas perenes, agrupando por similaridade as características morfoestruturais e geológicas mais comuns entre as lagoas perenes estudadas. Fonte: Autor.....	90
Figura 4.8: Subclasses de Lagoas Intermitentes, agrupando por similaridade as características morfoestruturais e geológicas mais comuns entre as lagoas intermitentes estudadas. Fonte: Autor.....	91
Figura 4.9: Subgrupo lagoas novas, agrupando por similaridade as características morfoestruturais e geológicas mais comuns entre as lagoas novas estudadas. Fonte: Autor.....	93
Figura 4.10: Subgrupos de lagoas existentes na região de estudo e na APA Carste Lagoa Santa, com destaque em dois pontos na região para melhor visualização das lagoas de cada subgrupo. Fonte: Autor.....	94
Figura 5.1: Mapa geológico e de localização da área de estudo, destacando a Área de Proteção Ambiental do Carste de Lagoa Santa, Minas Gerais, Brasil, e as lagoas analisadas neste trabalho. Geologia modificada do “Projeto Vida” (Ribeiro et al., 2003) e perfil modificado de Pacheco Neto et al., 2023b.....	101
Figura 5.2: Exemplo de imagens de satélite Landsat utilizadas neste estudo, representando a estação chuvosa de 1999 e a estação seca do mesmo ano. Fonte: USGS, 2021.....	109
Figura 5.3: Representação gráfica da variação do perímetro ao longo dos anos para as lagoas estudadas (exemplo da Lagoa 28). Fonte: Autor.....	110
Figura 5.4: Fluxograma com síntese das etapas realizadas para identificação do comportamento de expansão ou retração de cada lagoa ao longo dos anos analisados. Fonte: Autor.....	111

Figura 5.5: Gráfico de barras representando as médias pluviométricas anuais entre os anos hidrológicos 1984-1985 e 2019-2020, em laranja nas barras, pode ser observado o aporte pluviométrico durante os meses de seca (abril a setembro) e em azul o aporte pluviométrico durante os meses chuvosos (outubro a março). A linha em vermelho marca a média pluviométrica dos 36 anos analisados no estudo, e seus intervalos de confiança estão representados pela linha tracejada em azul (intervalo de confiança positivo) e linha tracejada em amarelo (intervalo de confiança negativo). Fonte: Autor..... 113

Figura 5.6: Gráfico de barras representando os ciclos pluviométricos de chuva e seca. Valores acima da média histórica (linha tracejada preta), durante ciclos pluviométricos secos, foram definidos como anos hidrológicos secos atípicos, e valores abaixo da média histórica (linha tracejada preta), durante ciclos chuvosos, foram definidos como anos chuvosos atípicos. Fonte: Autor..... 116

Figura 5.7: Gráfico dos ciclos pluviométricos, contendo suas médias e linhas de tendência que representam a variação pluviométrica de ciclo. Abaixo tabela que sintetiza as médias e equações das linhas de tendência de cada ciclo, com seus coeficientes angulares em azul (positivo) e vermelho (negativo). Fonte: Autor..... 117

Figura 5.8: Identificação e distribuição das lagoas perenes (em azul) e lagoas intermitentes (em laranja) na área de estudo. Fonte: Autor..... 119

Figura 5.9: Representação gráfica da variação de perímetro da lagoa perene 23 ao longo do intervalo temporal utilizado nesta pesquisa. Pode-se observar os ciclos pluviométricos e as linhas de tendência de variação perimétrica em cada ciclo. A tabela abaixo informa as equações das linhas de tendência dentro de cada um dos ciclos, assim como os seus coeficientes angulares positivos e negativos. Fonte: Autor..... 120

Figura 5.10: Representação gráfica com exemplos do comportamento de lagoas perenes constantemente conectadas (a), lagoas perenes desconectadas sazonalmente (b) e lagoas perenes desconectadas (c). Fonte: Autor..... 126

Figura 5.11: Ilustração das classes de conexão hídrica proposta para as lagoas perenes analisadas. Fonte: Autor..... 128

Figura 5.12: Representação gráfica com exemplos do comportamento das lagoas intermitentes que se desconectaram do aquífero em algum momento (a), lagoas intermitentes com conexão sazonal (b), lagoas intermitentes desconectadas (c),

lagoas intermitentes extremamente desconectadas (d) e lagoas intermitentes totalmente conectadas (e). Fonte: Autor.....	131
Figura 6.1: Tronco de cone invertido, objeto geométrico escolhido para representar os volumes contidos nas lagoas deste estudo. As setas indicam o raio maior (R), raio menor (r) e a altura (h) do objeto, importantes medidas para o cálculo de seu volume. Fonte: Autor.....	140
Figura 6.2: Fatores contribuintes na mudança de volume da lagoa ($V_{lagoa_{ano}}$) nos anos analisados. $V_{p_{ano}}$ representa os volumes pluviométricos de entrada no sistema e $V_{etr_{ano}}$ e $V_{inf_{ano}}$ representam os volumes de saída pela evapotranspiração e pela infiltração, respectivamente. Fonte: Autor.....	141
Figura 6.3: Variações volumétricas (ΔV_L) ao longo dos anos analisados e variações no espelho d'água da lagoa, representados pela área do topo ($A_{t_{ano}}$) do objeto geométrico. Fonte: Autor.....	143
Figura 6.4: Mapa contendo a identificação das lagoas perenes e intermitentes analisadas, a distribuição, após a filtragem, dos poços que estão localizados próximos as lagoas, além da hipsometria da região estudada. Em (A) pode-se observar com mais detalhe estas informações próximo ao município de Sete Lagoas, e em (B) na porção central da APA Carste de Lagoa Santa. Fonte: Autor.....	148
Figura 6.5: Comportamento hídrico da Lagoa Perene 33, representando as lagoas perenes que não apresentam poços em sua proximidade. A linha contínua azul escuro marca a variação do espelho d'água da lagoa e as barras em azul claro os montantes pluviométricos. Fonte: Autor.....	154
Figura 6.6: Comportamento hídrico da Lagoa Perene 12, representando as lagoas perenes que apresentam poços em sua proximidade, mas não sofrem alteração em seu comportamento hídrico pela exploração de água. A linha contínua azul escuro marca a variação do espelho d'água da lagoa, as barras em azul claro os montantes pluviométricos e as linhas tracejadas o momento que os poços começam a atuar e suas vazões. Fonte: Autor.....	156
Figura 6.7: Comportamento hídrico da Lagoa Perene 32, representando as lagoas perenes que apresentam poços que influenciam em seu comportamento hídrico. A linha contínua azul escuro marca a variação do espelho d'água da lagoa, as barras em azul claro os montantes pluviométricos e as linhas tracejadas o momento que os poços começam a atuar e suas vazões. Fonte: Autor.....	160

Figura 6.8: Comportamento hídrico da Lagoa Perene 25, representando as lagoas perenes que apresentam poços que influenciam em seu comportamento hídrico. A linha contínua azul escuro marca a variação do espelho d'água da lagoa, as barras em azul claro os montantes pluviométricos e as linhas tracejadas o momento que os poços começam a atuar e suas vazões. Fonte: Autor..... 162

Figura 6.9: Comportamento hídrico da Lagoa Intermitente 52, representando as lagoas intermitentes que não apresentam poços em sua proximidade. A linha contínua azul escuro marca a variação do espelho d'água da lagoa e as barras em azul claro os montantes pluviométricos. Fonte: Autor..... 165

Figura 6.10: Comportamento hídrico da Lagoa Intermitente 47, representando as lagoas intermitentes que apresentam poços em sua proximidade, mas não sofrem alteração em seu comportamento hídrico pela exploração de água. A linha contínua azul escuro marca a variação do espelho d'água da lagoa, as barras em azul claro os montantes pluviométricos e as linhas tracejadas o momento que os poços começam a atuar e suas vazões. Fonte: Autor..... 168

Figura 6.11: Comportamento hídrico da Lagoa Intermitente 30, representando as lagoas intermitentes que apresentam poços que influenciam em seu comportamento hídrico. A linha contínua azul escuro marca a variação do espelho d'água da lagoa, as barras em azul claro os montantes pluviométricos e as linhas tracejadas o momento que os poços começam a atuar e suas vazões. Fonte: Autor..... 171

Figura 6.12: Comportamento hídrico da Lagoa Intermitente 4, representando as lagoas intermitentes que apresentam poços que influenciam em seu comportamento hídrico. A linha contínua azul escuro marca a variação do espelho d'água da lagoa, as barras em azul claro os montantes pluviométricos e as linhas tracejadas o momento que os poços começam a atuar e suas vazões. Fonte: Autor..... 174

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1: Tipos de lagoas existentes na região e suas características geológicas e morfoestruturais. Fonte: Autor.....	86
Tabela 5.1: Resultados estatísticos não paramétricos com base na homogeneidade (teste de Pettitt) e na análise de tendência (teste de Mann-Kendall).....	114
Tabela 5.2: Exemplos de lagoas perenes e seus comportamentos de variação do perímetro em cada um dos ciclos de precipitação definidos neste estudo, bem como seu comportamento final após todos os anos analisados. Somatórios em azul representam expansão do espelho d'água, e os em vermelho representam retrações. Fonte: Autor.....	123
Tabela 6.1: Amostra de poços analisados neste trabalho e as informações disponíveis consideradas relevantes para cada um destes poços. Fonte: Modificado de SIAM, 2024.....	149
Tabela 6.2: Análise volumétrica de uma das lagoas estudadas neste trabalho (Lagoa Perene 5), entre os anos hidrológicos 1987-1988 e 1994-1995, contendo suas informações de área superficial, volume da lagoa e as variações volumétricas (ΔV_L) que ocorre entre os anos demonstrados. As variações volumétricas em azul, representam valores positivos que quantificam o ganho de volume neste ano hidrológico, já as em vermelho, representam valores negativos, nestes casos, a lagoa apresentou perdas em sua massa d'água. Fonte: Autor.....	150
Tabela 6.3: Análise dos volumes de entrada e saída de uma das lagoas estudadas neste trabalho (Lagoa Perene 5), entre os anos hidrológicos 1987-1988 e 1994-1995, contendo informações anuais dos volumes de saída (infiltrado, evaporado e explotado pelos poços) e volumes de entrada (precipitado e recarga subterrânea). Os valores positivos em azul representam ganhos volumétricos, enquanto os valores negativos em vermelho, representam perdas volumétricas na lagoa. Fonte: Autor.....	151
Tabela 6.4: Entradas e saídas volumétricas representativas da variação volumétrica da lagoa analisada (Lagoa Perene 5), entre os anos hidrológicos 1987-1988 e 1994-1995, contendo informações anuais dos volumes de entrada referente a recarga subterrânea e os volumes de saída referentes ao somatório das vazões retirada pelos poços, além das variações volumétricas (ΔV_L) anuais, inerente a estas entradas e	

saídas. Os valores em azul, representam ganhos em volume, já os em vermelho, representam perdas no volume da lagoa, no ano hidrológico analisado. Fonte: Autor..... 152

Tabela 6.5: Quantificação das lagoas perenes e intermitentes sobre influência ou não dos poços localizados na região de estudo. Fonte: Autor..... 153

Tabela 6.6: Valores volumétricos obtidos para a Lagoa Perene 33 ao longo dos anos hidrológicos analisados, assim como sua variação volumétrica entre os anos e os montantes de saída e entrada, referentes a exploração de água pelos poços e a recarga subterrânea, respectivamente. Os valores em azul, representam ganhos em volume, já os em vermelho, representam perdas no volume da lagoa, no ano hidrológico analisado. Fonte: Autor..... 155

Tabela 6.7: Poços próximos a Lagoa Perene 12 e suas informações utilizadas para determinar a influência sobre a lagoa. Fonte: Autor..... 157

Tabela 6.8: Valores volumétricos obtidos para a Lagoa Perene 12 ao longo dos anos hidrológicos analisados, assim como sua variação volumétrica entre os anos e os montantes de saída e entrada, referentes a exploração de água pelos poços e a recarga subterrânea, respectivamente. Na última coluna estão evidenciados os momentos em que a retirada volumétrica dos poços foi maior que o aporte fornecido pelo aquífero. Os valores em azul, representam ganhos em volume, já os em vermelho, representam perdas no volume da lagoa, no ano hidrológico analisado. Fonte: Autor..... 158

Tabela 6.9: Poços próximos a Lagoa Perene 32 e suas informações utilizadas para determinar a influência sobre a lagoa. Fonte: Autor..... 160

Tabela 6.10: Valores volumétricos obtidos para a Lagoa Perene 32 ao longo dos anos hidrológicos analisados, assim como sua variação volumétrica entre os anos e os montantes de saída e entrada, referentes a exploração de água pelos poços e a recarga subterrânea, respectivamente. Na última coluna estão evidenciados os momentos em que a retirada volumétrica dos poços foi maior que o aporte fornecido pelo aquífero. Os valores em azul, representam ganhos em volume, já os em vermelho, representam perdas no volume da lagoa, no ano hidrológico analisado. Fonte: Autor..... 161

Tabela 6.11: Poços próximos a Lagoa Perene 25 e suas informações utilizadas para determinar a influência sobre a lagoa. Fonte: Autor..... 163

Tabela 6.12: Valores volumétricos obtidos para a Lagoa Perene 25 ao longo dos anos hidrológicos analisados, assim como sua variação volumétrica entre os anos e os montantes de saída e entrada, referentes a exploração de água pelos poços e a recarga subterrânea, respectivamente. Na última coluna estão evidenciados os momentos em que a retirada volumétrica dos poços foi maior que o aporte fornecido pelo aquífero. Os valores em azul, representam ganhos em volume, já os em vermelho, representam perdas no volume da lagoa, no ano hidrológico analisado.

Fonte: Autor..... 163

Tabela 6.13: Valores volumétricos obtidos para a Lagoa Intermitente 52 ao longo dos anos hidrológicos analisados, assim como sua variação volumétrica entre os anos e os montantes de saída e entrada, referentes a exploração de água pelos poços e a recarga subterrânea, respectivamente. Os valores em azul, representam ganhos em volume, já os em vermelho, representam perdas no volume da lagoa, no ano hidrológico analisado. Fonte: Autor..... 166

Tabela 6.14: Poços próximos a Lagoa Intermitente 47 e suas informações utilizadas para determinar a influência sobre a lagoa. Fonte: Autor..... 168

Tabela 6.15: Valores volumétricos obtidos para a Lagoa Intermitente 47 ao longo dos anos hidrológicos analisados, assim como sua variação volumétrica entre os anos e os montantes de saída e entrada, referentes a exploração de água pelos poços e a recarga subterrânea, respectivamente. Na última coluna estão evidenciados os momentos em que a retirada volumétrica dos poços foi maior que o aporte fornecido pelo aquífero. Os valores em azul, representam ganhos em volume, já os em vermelho, representam perdas no volume da lagoa, no ano hidrológico analisado. Fonte: Autor..... 169

Tabela 6.16: Poços próximos a Lagoa Intermitente 30 e suas informações utilizadas para determinar a influência sobre a lagoa. Fonte: Autor..... 172

Tabela 6.17: Valores volumétricos obtidos para a Lagoa Intermitente 30 ao longo dos anos hidrológicos analisados, assim como sua variação volumétrica entre os anos e os montantes de saída e entrada, referentes a exploração de água pelos poços e a recarga subterrânea, respectivamente. Na última coluna estão evidenciados os momentos em que a retirada volumétrica dos poços foi maior que o aporte fornecido pelo aquífero. Os valores em azul, representam ganhos em volume, já os em

vermelho, representam perdas no volume da lagoa, no ano hidrológico analisado.

Fonte: Autor..... 172

Tabela 6.18: Poços próximos a Lagoa Intermitente 4 e suas informações utilizadas para determinar a influência sobre a lagoa. Fonte: Autor..... 174

Tabela 6.19: Valores volumétricos obtidos para a Lagoa Intermitente 4 ao longo dos anos hidrológicos analisados, assim como sua variação volumétrica entre os anos e os montantes de saída e entrada, referentes a exploração de água pelos poços e a recarga subterrânea, respectivamente. Na última coluna estão evidenciados os momentos em que a retirada volumétrica dos poços foi maior que o aporte fornecido pelo aquífero. Os valores em azul, representam ganhos em volume, já os em vermelho, representam perdas no volume da lagoa, no ano hidrológico analisado.

Fonte: Autor..... 175

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	23
1.1 Estrutura do trabalho.....	23
1.2 Contextualização da pesquisa.....	24
1.3 Objetivos do estudo.....	26
1.4 Justificativa.....	27
1.5 Hipóteses.....	28
2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE PESQUISA	30
2.1 Localização.....	30
2.2 Clima.....	31
2.3 Geomorfologia.....	32
2.4 Geologia.....	33
2.5 Hidrologia e Hidrogeologia.....	35
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	39
3.1 O Carste.....	39
3.1.1 Geomorfologia do Carste.....	43
3.1.2 Lagoas do Carste.....	47
3.1.3 Hidrogeologia Cárstica.....	50
3.1.4 Recarga, descarga e fluxo nos aquíferos cársticos.....	52
3.2 Estudos Anteriores.....	55
4 CARACTERIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DAS LAGOAS DO SISTEMA HIDROGEOLÓGICO CÁRSTICO DO GRUPO BAMBUÍ NA REGIÃO DE LAGOA SANTA - MINAS GERAIS, A PARTIR DE ANÁLISES GEOESPACIAIS	62
4.1 Introdução.....	63
4.2 Caracterização da área de estudo.....	66
4.2.1 Geologia.....	67
4.2.2 Geomorfologia.....	70
4.2.3 Clima.....	72
4.2.4 Hidrologia e Hidrogeologia.....	73

4.3 Métodos.....	75
4.3.1 Identificação e detecção das lagoas.....	76
4.3.2 Periodicidade das Lagoas.....	78
4.3.3 Identificação e detecção de parâmetros morfológicos e estruturais.....	79
4.3.4 Análise de Similaridade entre as Lagoas.....	80
4.4 Resultados.....	80
4.4.1 Identificação e periodicidade das lagoas.....	80
4.4.2 Identificação e detecção de parâmetros morfológicos e estruturais.....	81
4.5 Discussão.....	87
4.5.1 Correlação entre características analisadas e dinâmica hídrica das lagoas.....	87
4.5.2 Análise de Similaridade.....	89
4.6 Conclusão.....	95
5 CONEXÕES HIDROGEOLÓGICAS ENTRE AS LAGOAS E O SISTEMA HIDROGEOLÓGICO NEOPROTEROZOICO ENTRE OS ANOS DE 1985-2020, LAGOA SANTA – MINAS GERAIS, BRASIL.....	97
5.1 Introdução.....	98
5.2 Caracterização da área de estudo.....	100
5.3 Métodos.....	104
5.3.1 Levantamento Climatológico.....	104
5.3.2 Identificação das Lagoas.....	108
5.3.3 Periodicidade das lagoas.....	109
5.3.4 Avaliação do comportamento hidrológico.....	110
5.4 Resultados e Discussão.....	113
5.4.1 Histórico pluviométrico.....	113
5.4.2 Ciclos pluviométricos.....	114
5.4.3 Identificação e Periodicidade das Lagoas.....	118
5.4.4 Comportamento Hídrico das Lagoas.....	119
5.4.5 Classes de lagoa quanto à conexão hídrica.....	121
5.4.5.1 Lagoas Perenes – Análise dos coeficientes angulares.....	121
5.4.5.2 Lagoas Perenes – Análise comportamental durante a transição de ciclos pluviométricos.....	124
5.4.5.3 Lagoas Perenes – Compatibilidade entre as análises.....	128

5.4.5.4 Lagoas Intermitentes – Análise da variação perimétrica.....	130
5.5 Conclusão.....	134
6 INFLUÊNCIA DA EXPLOTAÇÃO DE ÁGUA SOBRE A VARIAÇÃO VOLUMÉTRICA DAS LAGOAS NO SISTEMA HIDROGEOLÓGICO CÁRSTICO DO GRUPO BAMBUÍ, LAGOA SANTA, MINAS GERAIS – BRASIL.....	136
6.1 Introdução.....	136
6.2 Métodos.....	138
6.2.1 Balanço Hídrico das Lagoas.....	138
6.2.2 Influência dos poços frente as características das lagoas.....	147
6.3 Resultados e Discussão.....	147
6.3.1 Levantamento dos Poços.....	147
6.3.2 Análise Volumétrica.....	150
6.3.2.1 Volume das Lagoas.....	150
6.3.2.2 Volume de Entradas e Saídas.....	151
6.3.3 Comportamento Hídrico das Lagoas.....	153
6.3.3.1 Lagoas Perenes.....	153
6.3.3.2 Lagoas Intermitentes.....	164
6.3.4 Características relacionadas a influência dos poços.....	176
6.4 Conclusão.....	179
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	183
REFERÊNCIAS.....	186
APÊNDICE A Lagoas perenes e seus comportamentos de variação perimétrica em cada um dos ciclos pluviométricos definidos neste estudo, assim como o comportamento final após todos os anos analisados.....	198
APÊNDICE B Artigo elaborado com base no Capítulo 4 desta tese publicado na revista Journal of South American Earth Science no ano de 2023.....	200
APÊNDICE C Artigo elaborado com base no Capítulo 5 desta tese publicado na revista Water no ano de 2024.....	215
APÊNDICE D – Catalogo contendo as lagoas perenes e intermitentes contidas na janela cárstica de Lagoa Santa e suas proximidades.....	243

1 INTRODUÇÃO

1.1 Estrutura do trabalho

Esta tese de doutorado está apresentada na forma de artigos científicos, que foram aceitos, publicados em revistas nacionais e internacionais.

O **Capítulo 1** é uma “Introdução” e apresenta a contextualização deste trabalho, seus objetivos, justificativas e hipóteses, além da estruturação completa do trabalho, que está sendo comentada neste momento. O **Capítulo 2** abrange uma caracterização da área de pesquisa, contendo informações sobre a localização, geologia, geomorfologia, clima, hidrologia e hidrogeologia da região em foco. O **Capítulo 3** é constituído de uma revisão bibliográfica, contendo o estado da arte sobre conceitos básicos em hidrogeologia, ambientes cársticos e suas características hidrogeológicas particulares, além de trabalhos anteriores em hidrogeologia cárstica em âmbito regional e local.

O **Capítulo 4** apresenta o artigo “Characterization and classification of lakes based on geospatial analyses in the karst hydrogeological system of the Bambuí group, Lagoa Santa, Minas Gerais, Brazil”, publicado na revista *Journal of South American Earth Sciences* (Pacheco Neto *et al.*, 2023a). Neste artigo está apresentado a metodologia para a sua realização, seus resultados, discussão e conclusões, além de conter a etapa inicial de identificação e caracterização das lagoas tratadas ao longo de todos os anos de realização deste trabalho, fornecendo desta forma, embasamento para o desenvolvimento dos outros artigos.

O **Capítulo 5** apresenta o artigo “Conexões hidrológicas cársticas entre as lagoas e o sistema hidrogeológico neoproterozoico entre os anos de 1985-2020, Lagoa Santa – Minas Gerais, Brasil”, publicado na revista *Water* (Pacheco Neto, De Paula & Galvão, 2024). Neste artigo está apresentado a metodologia para a sua realização, seus resultados, discussão e conclusões. O trabalho é a sequência dos resultados levantados no primeiro artigo deste trabalho (Capítulo 4) e junto a ele, funciona como base para as análises realizadas no próximo capítulo deste trabalho.

O **Capítulo 6** apresenta o futuro artigo “Influência da exploração de água sobre a variação volumétrica das lagoas no sistema hidrogeológico cárstico do Grupo Bambuí, Lagoa Santa, Minas Gerais – Brasil” a ser submetido. Neste capítulo está apresentado a metodologia para a sua realização, seus resultados, discussão e

conclusão. O trabalho levanta discussões interessantes sobre a influência da ação antrópica na dinâmica hídrica das lagoas existentes na região estudada.

O **Capítulo 7** conciste nas considerações finais desta tese, realizando uma síntese das conclusões principais adquiridas dos resultados e discussões levantados nos artigos presentes nos Capítulos 4, 5 e 6. Além das recomendações para trabalhos futuros. Por fim, completa a estrutura desta tese, as referências bibliográficas, apêndices e anexos.

1.2 Contextualização da pesquisa

Na porção central do estado de Minas Gerais, está localizado o Carste de Lagoa Santa, onde ocorre uma série de lagoas associadas ao grande sistema fluvial do rio das Velhas, pertencente à bacia do rio São Francisco. Nesta região, está presente a Área de Proteção Ambiental (APA) Carste de Lagoa Santa, uma unidade de conservação de uso sustentável permitido, que abriga uma das principais áreas de pesquisas relacionadas a arqueologia, paleontologia, espeleologia e hidrogeologia do território brasileiro.

Marcada pelo turismo de grutas, a região é mundialmente conhecida por abrigar diversos sítios arqueológicos, entre os quais foi encontrado o fragmento de esqueleto humano mais antigo das Américas, um crânio com cerca de 11 mil anos apelidado de Luzia (Feathers *et al.*, 2010). A singularidade do local foi discutido por Charles Darwin, em seu livro “A origem das espécies”, onde um de seus correspondentes era Peter Lund, naturalista precursor dos estudos na região de Lagoa Santa (Darwin, 1859; Lund, 1950).

A região além de apresentar uma importância cultural, possui notória influência paisagística, devido a seus sistemas de cavernas e demais formações cársticas, fauna silvestre e cobertura vegetal, cuja preservação é fundamental para o ecossistema da região (Viana *et al.*, 1998). Nos últimos anos, o governo de Minas Gerais promoveu estratégias de crescimento econômico para região, como a expansão do Aeroporto Estadual e novas instalações da Cidade Administrativa (sede do governo do estado), colocando a região sob novos conflitos de interesse ambiental. Dessa forma, a compreensão dos fatores geológicos e hidrogeológicos acrescenta conhecimento a essa área de rica diversidade científica e cultural e que hoje representa um dos principais vetores de crescimento demográfico da região metropolitana do município de Belo Horizonte, capital do estado.

A geomorfologia cárstica tem como principal objeto de estudo feições de relevo derivadas de rochas solúveis, gerando formas peculiares como: cavernas, espeleotemas, depressões, sumidouros, condutos entre outras formas dissolutivas (Kohler, 1989; Ford & Williams, 2007). As depressões cársticas, comumente marcadas por dolinas e uvalas, podem ser caracterizadas em função de sua largura, comprimento e profundidade, e diferenciadas conforme as proporções entre estes parâmetros (White, 1988).

Estas depressões assumem particular importância na recarga de aquíferos cársticos-fissurais, uma vez que essas estruturas geomorfológicas favorecem a concentração de água de escoamento superficial para uma região específica. Não obstante, algumas depressões cársticas podem não contribuir tão veementemente para a recarga hídrica, pois devido as características litoestruturais e ou a menores espessuras da zona vadosa podem apresentar baixa permeabilidade ou mesmo se comportarem como zonas de descarga, e, neste caso, as águas subterrâneas seriam ascendentes, nestes ambientes, estas depressões são conhecidas como *Estavelles* (Monroe, 1970). Ambas exibem espelhos d'água exercendo um papel excepcional na manutenção ecológica do bioma a que está inserida. Estas depressões inundadas constituem as lagoas abordadas neste estudo.

Prejuízos ao turismo ecológico são passíveis de ocorrer na eventualidade de comportamento errático destas lagoas. Ao longo das últimas décadas vem sendo observada uma diminuição do volume de algumas lagoas durante a estação úmida e um prolongamento da estação seca, o que representa uma ameaça para o ecossistema local (Macedo, 2020), uma vez que a região se localiza entre dois *hotspots* de biodiversidade, o Cerrado e a Mata Atlântica (Myers *et al.* 2000), e é importante refúgio para alimentação e repouso de aves migratórias (Warming, 1908; Nóbrega, 2015).

Os autores a seguir já pontuaram sobre a alta frequência de depressões cársticas na região, apresentando lagoas com padrões irregulares de variação do nível d'água, destacando complexos ciclos de comportamentos hídricos.

Warming (1908) observou que a Lagoa de Quinta, localizada no Parque Estadual do Sumidouro, se torna bem grande no período chuvoso, mas que no final do período de seca a água escoava por sumidouros e dutos até se tornar apenas um riacho.

Kohler (1978) pontuou em seu estudo, que a Lagoa central de Lagoa Santa está em estado de equilíbrio, tendo sido formada pela dissolução do pacote calcário sotoposto ao filito.

Auler (1994) classificou três tipos de lagos na área em questão: lagos estáveis sobre o filito; e lagos sazonais contendo sumidouros no fundo das dolinas nas porções topograficamente mais elevadas; e lagos de lençol freático que estão sobre o carbonato, em elevações mais baixas.

Amaral (2018), foi pioneiro nos estudos destinados as depressões cársticas existentes na região, com foco na evolução destas, além da parametrização de suas formas e tamanhos, muitas dessas depressões continham água em alguns anos analisados pelo autor, nestes casos as depressões constituem lagoas. Porém, em seu estudo o foco não era destinado a depressões inundadas e algumas conclusões ainda ficaram imprecisas sobre a evolução destes corpos hídricos.

Macedo & Alvarez (2021) analisaram o comportamento hidrológico da Lagoa do Sumidouro, grande representante destes corpos hídricos na região, ao longo dos seus últimos 40 anos, por meio técnicas de geoprocessamento, hidrologia superficial, subterrânea e análises meteorológicas. Os autores observaram a relação causa-efeito entre a pluviometria e o volume da lagoa, e concluíram que há uma elevada dependência deste corpo hídrico com a quantidade de chuvas e o seu “secamento” desde o ano de 2013 foi atribuído ao aumento considerável das temperaturas médias anuais do ar.

1.3 Objetivos do estudo

O objetivo principal deste doutorado é investigar e contribuir para a compreensão do comportamento hídrico das lagoas, feições comuns em ambientes cársticos, e quais são os principais fatores que influenciam na perenidade destes corpos hídricos. As lagoas aqui estudadas estão em especial na região da Área de Proteção Ambiental Lagoa Santa e toda janela cárstica em suas proximidades.

Neste sentido, são definidos como objetivos específicos:

- 1) Identificar todas as lagoas presentes na região de estudo nos últimos 35 anos, a partir do uso de ferramentas de análise geoespacial;
- 2) Definir o comportamento destas lagoas: quais são perenes, intermitentes e não existem mais (se secaram e não voltaram a apresentar água até o presente momento);

- 3) Verificar a influência do clima, ao longo dos anos, na dinâmica hídrica das lagoas, fazendo o levantamento de informações meteorológicas;
- 4) Identificar possíveis conexões entre as lagoas e os aquíferos, a partir da análise de seus espelhos d'água em relação aos ciclos pluviométricos;
- 5) Apresentar as principais características geológicas e morfoestruturais de cada lagoa identificada na região;
- 6) Pontuar quais lagoas mudaram seu comportamento hídrico ao longo dos anos analisados, e identificar o motivo destas mudanças;
- 7) Analisar possíveis influências antrópicas, devido a exploração de água no entorno das lagoas;
- 8) Determinar as características primordiais na determinação da perenidade de um corpo hídrico em ambientes cársticos.

1.4 Justificativa

A região foco desta pesquisa engloba a totalidade da APA Carste de Lagoa Santa e parte de diversos municípios, situadas no vetor norte da Região Metropolitana de Belo Horizonte. Esta área de proteção, compreende uma das principais regiões de pesquisa relacionada como a arqueologia, paleontologia, espeleologia e hidrogeologia do território brasileiro. Nos últimos anos, o governo de Minas Gerais promoveu estratégias de crescimento econômico para região, como a expansão do Aeroporto Estadual e novas instalações da Cidade Administrativa (sede do governo do estado), colocando a região sob novos conflitos de interesse ambiental.

Dessa forma, a compreensão dos fatores geológicos e hidrogeológicos acrescenta conhecimento a essa área de rica diversidade científica e cultural e que hoje representa um dos principais vetores de crescimento demográfico da região metropolitana do município de Belo Horizonte, capital do estado.

A região de Lagoa Santa está inclusa na porção carstificada do Grupo Bambuí, importante unidade litoestratigráfica pertencente ao Super Grupo São Francisco, este que constitui uma das coberturas neoproterozoicas situadas sobre o Cráton São Francisco, região extremamente estudada na geologia brasileira e de grande relevância. A área ainda apresenta uma série de lagoas associadas ao grande sistema fluvial do rio das Velhas, pertencente à bacia do rio São Francisco, uma das maiores bacias hidrográficas do território brasileiro e amplamente estudada.

Os aquíferos desta região englobam um dos principais reservatórios de água subterrânea do estado de Minas Gerais, e como já falado, são aquíferos que tem como característica geológica principal, as rochas carbonáticas, desta forma, estando em constante mudança, pois a água tem grande capacidade de dissolver os carbonatos da rochas, promovendo o alargamento de fraturas e formação de condutos e cavernas. Caracterizar estes aquíferos é de certa forma complexo, pois trata-se de um sistema heterogêneo e anisotrópico, e dificilmente os estudos realizados em aquíferos cársticos, podem ser extrapolados para outros cárstes (Feitosa *et al.*, 2008).

Cabe ressaltar, que as águas subterrâneas na região, são responsáveis pelo abastecimento de mais de 80% da população (Ribeiro *et al.*, 2003), e danos a estas fontes podem acarretar prejuízos as populações. Não é diferente com as águas superficiais, prejuízos ao turismo ecológico são passíveis de ocorrer na eventualidade de comportamento errático das lagoas. A diminuição do volume de algumas lagoas durante a estação úmida e estações secas mais longas, foram registradas por Macedo (2020) na última década, representando uma grande ameaça para ecossistema local.

Os problemas ambientais relacionados ao crescimento da urbanização não deve ser esquecido, 30 anos atrás Auler (1994), já destacava que as cidades estavam se expandindo diretamente sobre coberturas cárstificadas, com ruas sendo planejadas sobre dolinas e com as cidades cada vez mais próximo as lagoas existentes na região.

A região apresenta diversos estudos que abordam o comportamento das águas subterrâneas, porém ainda carece de estudos relacionados a corpos hídricos superficiais, como é o caso das lagoas. Desta forma, em vista a necessidade de contribuir para um melhor entendimento e perante a relevância hidrogeológica da região, este trabalho busca a compreensão e caracterização do comportamento hídrico da lagoas pertencentes a área carstificada do Gupo Bambuí.

Estes conhecimentos são de grande importancia, devido as crescentes demandas hídricas de aquíferos cársticos, e é necessário o entendimento deles para que possam ser utilizados de forma adequada, evitando a degradação de seus recursos hídricos, assim como facilitando a gestão hídrica e conservação das feições hídricas locais.

1.5 Hipóteses

As hipóteses e perguntas científicas que moveram a realização desta pesquisa foram:

1) As características morfológicas, geológicas e estruturais influenciam na perenidade das lagoas presentes no carste de Lagoa Santa e suas proximidades. Frente a isso, pretende-se responder as seguintes perguntas científicas:

- a) Quantas lagoas existem ou já existiram no carste de Lagoa Santa?
- b) Qual o comportamento destas lagoas entre os anos de 1985 a 2020, intervalo temporal escolhido para esta pesquisa?
- c) Quais são as características morfológicas, geológicas e estruturais de cada uma das lagoas presentes na região?
- d) É possível enquadrar as lagoas identificadas em classes a partir da relação da sua perenidade com as características levantadas?

2) A perenidade das lagoas existentes no carste de Lagoa Santa e suas proximidades, estão condicionadas às variações climáticas e às possíveis conexões que as lagoas apresentam com os aquíferos da região? Frente a isso, pretende-se responder as seguintes perguntas científicas:

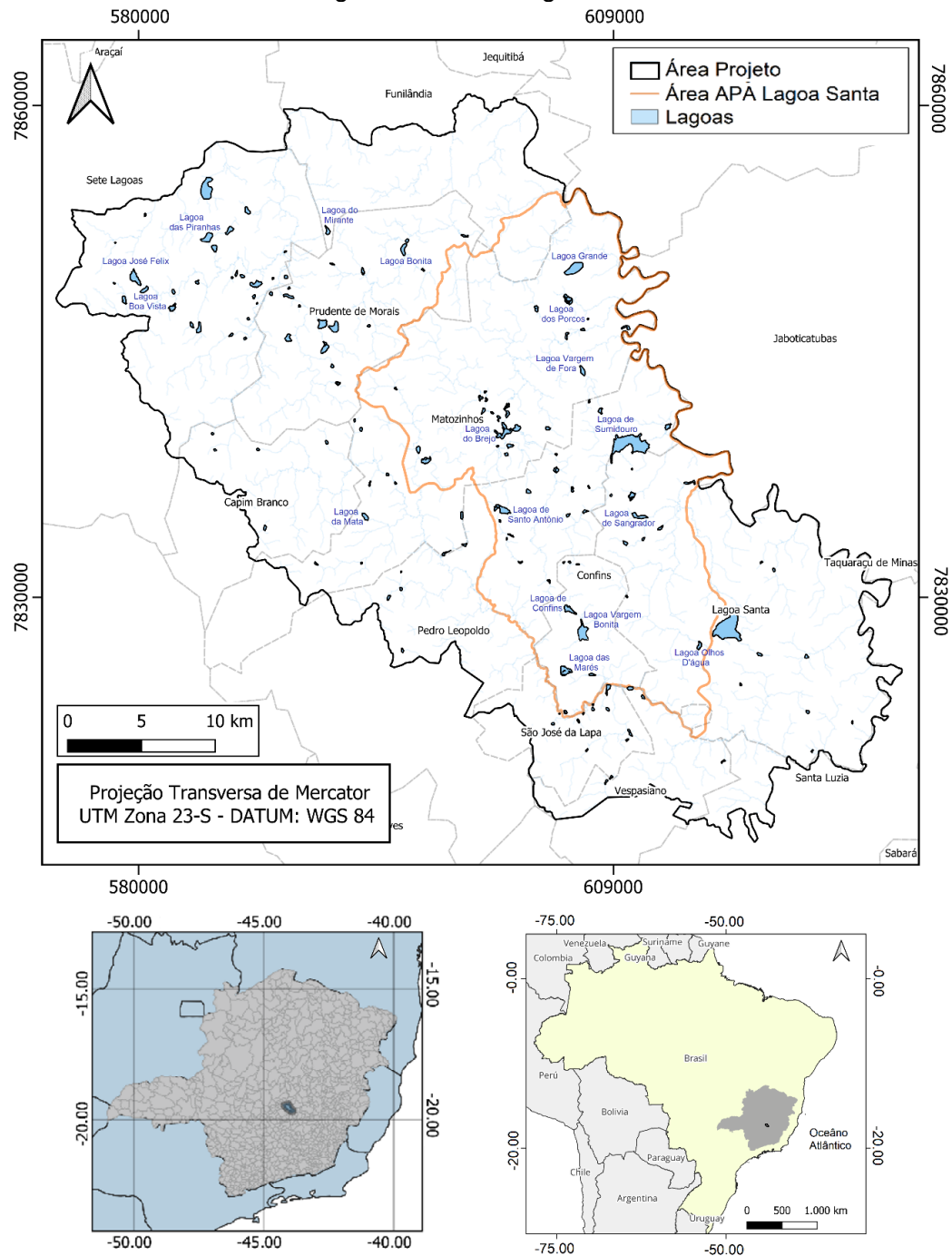
- a) Como o volume de água varia nas lagoas ao longo dos anos? Quais lagoas estão ficando mais cheias ou mais vazias?
- b) As variações climáticas estão influenciando no volume de água nas lagoas? Quais são mais fortemente influenciadas?
- c) É possível identificar quais lagoas estão conectadas ou desconectadas do aquífero local?
- d) Quais outros fatores podem estar influenciando na perenidade das lagoas?

2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE PESQUISA

2.1 Localização

A área de estudo localiza-se 30 km a norte de Belo Horizonte, capital do estado de Minas Gerais (Figura 2.1).

Figura 2.1: Mapa de localização da área de estudo com destaque a Área de Proteção Ambiental Carste de Lagoa Santa e as lagoas analisadas neste trabalho.



Fonte: Autor.

Apresentando uma área de 1197,5 km² e englobando 11 municípios na região, além de toda extensão da Área de Proteção Ambiental (APA) Carste de Lagoa Santa, que foi denominada por Kohler (1978) como “região cárstica de Lagoa Santa”, sendo um dos ambientes amplamente estudados desde o século XIX (Pessoa, 2005). Os municípios de Sete Lagoas, Funilândia, Matozinhos, Pudrente de Morais, Capim Branco, Pedro Leopoldo, Confins, São José da Lapa, Lagoa Santa, Vespasiano e Santa Luzia tem seus limites totais ou parciais dentro da área aqui estudada.

2.2 Clima

A região de estudo está associada às condições médias gerais da circulação atmosférica sob o domínio do sistema estacionário denominado Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul. Este sistema apresenta elevado grau de umidade absoluta e elevada temperatura interior devido à intensa radiação solar incidente. No entanto, apresenta condições de estabilidade atmosférica devido aos efeitos de subsidência ou correntes verticais descendentes.

De acordo com a classificação de Köppen e Geiger (1928) a área é enquadrada na categoria Aw, definida como um clima quente, com temperatura no mês mais frio superior a 18°C, e duas estações alternadas, uma chuvosa (verão), e outra seca (inverno), com amplitudes térmicas anuais inferiores a 5 °C (IEF, 2010).

A média termométrica anual é da ordem de 20,9 °C com o inverno ameno, às vezes com temperaturas mais baixas associadas à invasão de frentes frias advindas do anticiclone polar, e o verão quente e prolongado. O regime de ventos segundo Kohler (1989), tem total de 16,02% direcionados para norte, e 52,74% direcionados para nordeste.

O déficit hídrico ocorre dos meses de abril a setembro, com um máximo de 42mm em agosto. Já o excedente ocorre entre novembro e março, com um máximo de 183 mm em janeiro. A estação chuvosa é bem definida e estende-se entre outubro e março, passando por períodos de transição entre o seco e o chuvoso nos meses de setembro e abril.

De acordo com os dados históricos do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) registrados pela estação convencional de Sete Lagoas, Ponte Raul Soares, Pedro Leopoldo e Vespasiano, pertencente ao próprio Instituto e presentes

da área de influência desta pesquisa, apresenta média anual pluviométrica, considerando o período escolhido neste trabalho, de 1985 a 2020, de 1212,7 mm.

Entretanto, destaca-se o ano de 2014 com o registo anual de 551 mm, valor de precipitação bem abaixo da média histórica. Meneses (2003) ressalta que a variação climática gera consequências diretas para a região cárstica, acometendo suas características hídricas, como o fluxo e a composição química da água, além do grau e modo de atuação dos processos morfogenéticos, incluídos nestes a dissolução

2.3 Geomorfologia

A Geomorfologia da região é reflexo das estruturas e alterações intempéricas das rochas carbonáticas da Formação Sete Lagoas e dos metapelitos da Formação Serra de Santa Helena. Essa relação litológica reflete nitidamente nas características morfológicas de superfície, tornando-se importantes ferramentas na compreensão da paisagem. As altitudes variam de 900 metros, na porção oeste da área, a valores entre 600 e 650 metros na porção leste, onde se encontra com o curso do Rio das Velhas. Neste trabalho optou-se pela classificação geomorfológica realizada por Kohler (1989) e Hermann (1998), em dois compartimentos geomorfológicos denominados: domínio cárstico e domínio não cárstico.

O domínio cárstico, constituído de rochas carbonáticas, é marcado por altos paredões rochosos, desfiladeiros e abismos, dolinas de abatimento que ligam o exocarste ao endocarste, presentes em quase toda extensão da área, principalmente nas regiões centrais. Herrmann (1998) pontua que este compartimento, predomina entre as altitudes de 800 a 650 metros, apresentando mudanças hipsométricas bruscas marcadas por feições cársticas em superfície e em profundidade.

As formas superficiais e subsuperficiais quase sempre se apresentam intimamente ligadas entre si. Nesta unidade são observados desfiladeiros e abismos com altos paredões e grande maciços rochosos com uma elevada concentração de cavernas, vales fechados, vales cegos, torres, arcos e pontes ruiniformes. Outras feições típicas deste domínio são: cinturões de uvalas, planalto de dolinas, depressões largas de fundo aplainado (poljés), depressões formadas por dissolução e ou por colapso, com formas amebóides, côncavas (tigela), cônicas (funil), cilíndricas (caldeirão) grandes ou pequenas, apresentando encostas com declividades íngremes

e ou suaves, com ou sem paredões ou maciços coligados, além de lagoas, com água perene ou intermitente (Kohler, 1989; Herrmann *et al.*, 1998; Ribeiro *et al.*, 2003).

O domínio não cárstico, controlado por rochas cristalinas, metamórficas e sedimentares, está presente nas porções de borda da área (norte, oeste e sudeste) e é onde afloram as rochas do complexo Granítico-Gnáissico arqueano e as rochas da Formação Serra de Santa Helena. Este domínio tende a se localizar nas cotas topográficas mais altas, podendo atingir altitudes acima de 800 metros, caracterizada predominantemente por colinas com topos alongados e convexos entalhadas por um padrão de drenagem dendrítico. Raras feições cársticas são observadas sobre este domínio, tais como dolinas, paredões e vertentes com rugosidades, atestando a manifestação superficial de carstificação em profundidade dos carbonatos de cálcio (Herrmann *et al.*, 1998).

O comportamento geomorfológico dita as características dos cursos d'água presentes na região, como consequência da alta permeabilidade causada pela porosidade secundária das rochas locais, poucos cursos d'água são observados, e em alguns locais, principalmente condicionados às grandes irregularidades de relevo, desenvolvem-se sumidouros, surgências e ressurgências (Amaral, 2018).

2.4 Geologia

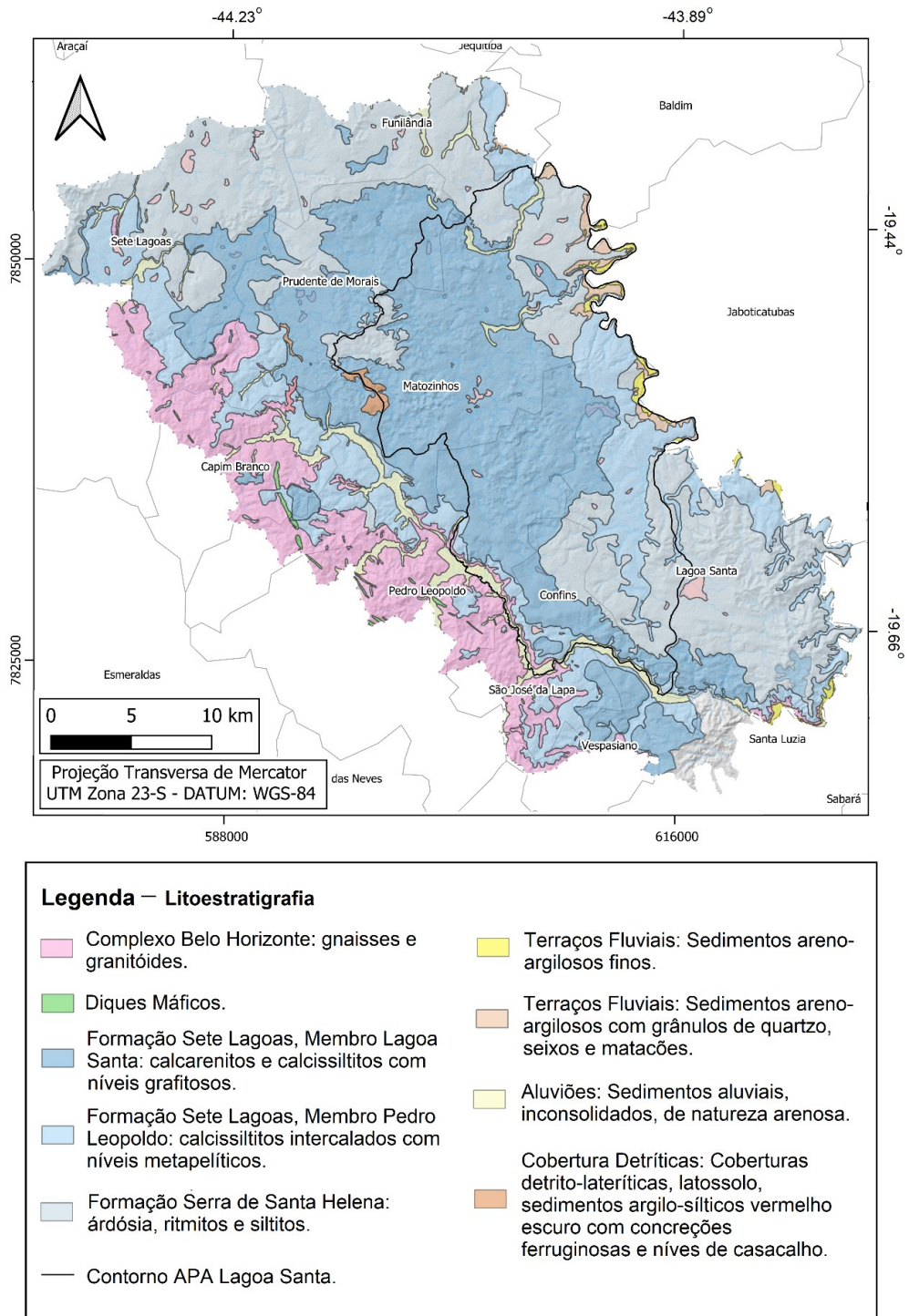
Regionalmente, a área foco deste estudo está inserida no contexto geológico da porção centro-sul do Cráton do São Francisco. Estratigraficamente, aflora na área de estudo o embasamento cristalino do Complexo Belo Horizonte, o qual é sobreposto por unidades basais neoproterozoicas do Grupo Bambuí, pertencente ao Supergrupo São Francisco, mais especificamente as rochas da Formação Sete Lagoas e da Formação Serra de Santa Helena.

Estas litologias podem estar cobertas por parcelas significativas de coberturas sedimentares jovens (Alkmim & Martins Neto, 2001) (Figura 2.2). O embasamento cristalino aflora na porção oeste e sul da área, de composição essencialmente granito-gnáissicas e migmatíticas, datados entre o Arqueano e o Paleoproterozoico (Ribeiro *et al.*, 2003; Ribeiro *et al.*, 2016).

O Grupo Bambuí na área de estudo é composto por unidades litoestratigráficas que foram depositadas sobre o embasamento do cráton até as faixas móveis marginais. O Cráton São Francisco serviu como base para a deposição de sedimentos

pelito-carbonáticos marinhos sobre a plataforma epicontinental estável, sendo este, um ambiente continental afetado por regressões e transgressões marinhas, com idade mínima relativa de 630 Ma (Neoproterozoico) (Dardenne, 1978; Schobbenhaus *et al.*, 1984; Zalán & Romeiro Silva, 2007).

Figura 2.2: Mapa Geológico da área de estudo.



Fonte: Pacheco Neto *et al.* (2023a), adaptado de “Projeto VIDA” (Cabral, 1994; Ribeiro *et al.*, 2003).

A Formação Sete Lagoas, é representada por uma sucessão carbonática composta por calcários, dolomitos e metapelitos intercalados. Esta formação é subdividida em dois membros: Membro basal Pedro Leopoldo e o Membro de topo Lagoa Santa (Viana *et al.*, 1998; Ribeiro *et al.*, 2003; Uhlein *et al.*, 2018). Os litotipos que caracterizam o Membro Pedro Leopoldo são calcissiltitos e ou microesparitos, esparitos, micritas, subordinamente calcarenitos muito finos, margas e milonitos protoderivados (Ribeiro *et al.*, 2003). Já o Membro Lagoa Santa, o qual apresenta maior expressão na área de estudo é constituído de um calcário cinza-escuro a preto quando “fresco” e cinza médio a claro quanto mais alterado, de granulometria fina a grossa (Ribeiro *et al.*, 2016). Estas formações se encontram espalhadas na porção central da área de estudo.

A Formação Serra de Santa Helena ocorre tipicamente na serra homônima em Sete Lagoas, estendendo a norte da área de estudo e também na porção sudeste. Nesta formação predominam litótipos de origem siliciclástica e mais raramente sedimentos carbonáticos. Os siliciclásticos predominantemente muito finos, correspondem a siltitos e argilitos, em grande parte decompostos a semi-alterados, mas são encontrados frescos em pedreiras (Ribeiro *et al.*, 2003). As demais unidades presentes no Grupo Bambuí não serão descritas por não aflorarem na região de estudo, não sendo importantes para esta pesquisa.

As Coberturas Terciárias se fazem presentes na região em formas de capas de alteração limonitizadas e ou representando colúvios de solos ferruginosos laterizados. Ocorrem ainda terraços aluviais e aluviões nas porções que margeiam os principais rios e córregos.

2.5 Hidrologia e Hidrogeologia

A área localiza-se na depressão do Alto-Médio Rio São Francisco e integra-se à sub-bacia do rio das Velhas (IBGE, 2006). A rede de drenagem superficial e subterrânea da APA Carste de Lagoa Santa é caracterizada pela grande variedade de condutos e cavernas, frequentemente interligados com feições cársticas, como dolinas, uvalas, sumidouros e surgências (Teodoro, 2020). Essas particularidades a tornam um sistema complexo e interconectado, com a necessidade de sucessivos e detalhados estudos para a sua compreensão. A rede de drenagem é predominantemente subterrânea, com baixa densidade de escoamento superficial.

De uma forma geral, as nascentes dos rios existentes na área de estudo estão presentes em terrenos carbonáticos, e devido a uma geomorfologia cárstica bem desenvolvida as águas superficiais junto com maior parte da água pluvial, são drenadas para condutos subterrâneos e tem como destino os níveis de base local (rio das Velhas e ribeirão da Mata) (Ribeiro *et al.* 2016; De Paula, 2019). Os principais cursos d'água da área são exatamente os coincidentes com os limites da APA, ou seja, o rio das Velhas no limite leste da área, sendo o exutório do sistema e o ribeirão da Mata, seu afluente, no limite sul e sudoeste (De Paula, 2019).

As sub-bacias hidrográficas mais representativas das zonas carstificadas são definidas pelos córregos Samambaia, o qual drena suas águas para a lagoa do sumidouro, o córrego Palmeiras, localizado a norte da cidade de Matozinhos, onde suas águas são drenadas pelo maciço calcário da Cimento Mauá Minerações (Vieira, 2018). As sub-bacias dos córregos Jaguará e Gordura, são responsáveis por alimentar direta e indiretamente o rio das Velhas (Meneses, 2003).

Warming (1908), Lund (1950) e Kohler *et al.* (1978) descrevem sobre a alta frequência de lagoas na região de estudo, as quais podem apresentar padrões irregulares de variação de nível d'água destacando complexos ciclos e comportamentos hídricos, a exemplo da existência de ciclos secos de 15 anos encontrado por Kohler e seus colaboradores. O monitoramento das lagoas é imprescindível para a compreensão do seu comportamento hídrico.

Auler (1994), explana sobre a ocorrência de três tipos de lagoas na região da APA Carste Lagoa Santa:

- i) Lagoas sobre filitos;
- ii) Lagoas tipo dolina;
- iii) Lagoas tipo nível d'água do aquífero aflorante.

As lagoas dos tipos dolina e nível d'água aflorante são restritas às rochas calcárias, em que as lagoas tipo dolina ocorrem primordialmente em altas topografias no fundo de depressões cársticas profundas, e as lagoas do tipo nível d'água aflorante ocorrem em locais de baixa elevação topográfica. Em geral as lagoas sobre filitos apresentam-se estáveis, enquanto as sobre rochas calcárias possuem níveis d'água oscilantes, podendo secar em certas ocasiões. A cota do nível d'água das últimas lagoas citadas, está relacionada com a quantidade de precipitação pluvial e com a permeabilidade da cobertura pedológica no fundo dos lagos (Auler, 1994).

Na região da APA Carste de Lagoa Santa predominam os aquíferos cársticos semi confinados a livres, caracterizados por uma intrincada rede de condutos subterrâneos que estão interconectados a numerosas feições cársticas superficiais, como dolinas, uvalas, cavernas, surgências e sumidouros (VIANA *et al.*, 1998).

São definidas quatro unidades hidrogeológicas distintas, a citar, da base para o topo, o aquífero fissural representado pelas das rochas do Complexo Belo Horizonte, o aquífero cárstico-fissural composto pelas rochas carbonáticas da Formação Sete Lagoas, o aquífero constituído pelos metapelitos da Formação Serra de Santa Helena, e os aquíferos granulares representados pelas coberturas terciárias detrítico-lateríticas e cenozoicas aluvionares (De Paula, 2019; Dantas, Velásquez & De Paula, 2023).

O aquífero fissural do embasamento cristalino é o de menor expressão na área de estudo e está sobre domínio das rochas do complexo gnáissico migmatítico Belo Horizonte. Trata-se de um aquífero confinado em grande parte da área pelos metassedimentos do grupo Bambuí, em uma pequena porção da área de estudo, ele pode ser aflorante, adquirindo caráter de aquífero livre (De Paula, 2019; Dantas, Velásquez & De Paula, 2023). A recarga deste aquífero se dá pelo encaixe de parte dos cursos d'água em sistemas de fratura do embasamento cristalino e à infiltração de água através das coberturas coluvionares (Pessoa, 1996). Este é o aquífero de menor expressão existente na área de estudo.

O aquífero cárstico-fissural, de maior importância e representatividade na região, faz parte do Sistema Aquífero Sete Lagoas (SACSL) e sua composição é predominantemente carbonática com intercalação pelítica e influência tectônica (Pessoa, 2005; Galvão, 2015; Dantas, Velásquez & De Paula, 2023). Este aquífero está limitado na base pelo Complexo Belo Horizonte e no topo pelos metapelitos da Formação Serra de Santa Helena. Onde as rochas da Formação Sete Lagoas afloram, o aquífero adquire um caráter livre e onde é sotoposto pelo Aquífero Serra de Santa Helena, sua característica pode mudar para um aquífero semi-confinado (De Paula, 2019; Dantas, Velásquez & De Paula, 2023).

A recarga deste aquífero se dá principalmente nas porções de calcários aflorantes, incluindo diversas estruturas cársticas de abatimento na região (dolinas e uvalas), a outra parte da recarga é vinculada as coberturas das regiões planas e planaltos cársticos anteriormente pontuada por Auler (1994). Pacheco Neto *et al.* (2023b) ainda salienta que o aquífero cárstico fissural apresenta dois compartimentos,

um mais carstificado e outro menos carstificado, sendo o primeiro de maior importância espacial, apresentando conexões hidráulicas além do domínio da APA Carste de Lagoa Santa.

Os calcários do Membro Lagoa Santa constituem a porção mais carstificada do sistema aquífero cárstico-fissural, e devido à maior concentração de calcita, o processo de dissolução é favorecido, aumentando a concentração de sais na água, principalmente carbonato de cálcio, e conseqüentemente, a elevação da dureza e a alcalinidade (Mourão *et al.* 2001). A facilitação do processo de dissolução é também agente de formação de feições cársticas em subsuperfície, as quais propiciam uma série de características peculiares quanto à transmissividade do aquífero.

O Membro Pedro Leopoldo, representado por metassiltitos, filitos, calciofilitos, calcários silicosos cinza escuros, constitui a outra porção dos aquíferos cárstico-fissurais. Possui maior potencial hídrico nas porções tectonizadas, quando presentes, devido à permeabilidade secundária.

Os metapelitos da Formação Serra de Santa Helena possuem uma menor potencialidade aquífera, a qual é mais elevada em zonas de fraturas e em zonas de contato com a Formação Sete Lagoas. O Aquitardo Serra de Santa Helena apresenta baixa permeabilidade, mas capacidade de armazenamento relativamente elevada. Possui porosidade fissural pouco desenvolvida, o que deve propiciar baixos valores de condutividade hidráulica (Ribeiro *et al.*, 2003).

Os aquíferos granulares de cobertura incluem aluviões, cangas e lateritas, situado majoritariamente na zona não saturada, onde parte da recarga dos aquíferos subjacentes é processada (Dantas, Velásquez & De Paula, 2023).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo consiste na síntese da revisão bibliográfica com foco em apresentar os conceitos fundamentais que serviram de embasamento para elaboração deste trabalho. Desta forma, o capítulo apresenta um apanhado sobre a evolução do conhecimento sobre os terrenos cársticos e suas características, uma revisão sobre lagoas particulares de ambientes cársticos, em seguida, será apresentado conceitos hidrogeológicos que influem direta ou indiretamente na dinâmica hídrica dos ambientes cársticos, foco principal deste trabalho. Por fim, adentra-se a esta revisão, um apanhado sobre o desenvolvimento de estudos geológicos pretéritos de interesse ao tema de estudo e à área de estudo, em nível regional e local.

3.1 O Carste

O termo “carste” é amplamente utilizado para terrenos que se distinguem pela existência de rochas solúveis, principalmente as carbonáticas, como calcário, mármore e gesso. Esta condição de solubilização dos materiais é o que condiciona a evolução da paisagem e a formação de diversas feições cársticas, como lapíás, dolinas, uvalas, poljes, sima, sumidouros e cavernas, feições importantes para entender as dinâmicas deste ambiente (Dias, 2009).

De forma geral, o termo carste sintetiza paisagens que se desenvolvem em regiões de rochas predominantemente carbonáticas, como o calcário e o dolomito, amplamente denominado “Carste Clássico” por muitos pesquisadores (Ford & Williams, 2007; Van Beynen, 2011). Outra corrente científica tem buscado a utilização do termo carste para paisagens desenvolvidas em diferentes tipos de rochas, e levando em consideração que rochas não-carbonáticas também são passíveis de desenvolver feições características ou similares ao “Carste Clássico” em carbonatos, percebemos que o uso do termo não é equivocado (Travassos, 2010).

Desta forma, o conceito de carste está em plena mudança, principalmente devido aos avanços da ciência no campo da carstologia e as melhores compreensões dos processos que dão origem às formas, e a relação destes processos com o sistema em que o carste se encontra inserido. No presente texto, quando nos referimos ao carste estaremos, necessariamente, associando a regiões carbonáticas.

Os primeiros relatos acerca do termo carste tiveram sua origem na região de Kras, nos limites da Eslovênia com a Itália, onde tal relevo é denominado de *carso*. A palavra eslovena *kras*, deu origem nas línguas germânicas à palavra *karst*, nome pelo qual é conhecida a região, e nome que acabou definindo o tipo de relevo mundialmente (Sweeting, 1972; Ford & Williams, 1989; 2007). Porém as bases para a moderna compreensão dos processos geomorfológicos destes ambientes se deram a partir do século XIX, com o surgimento da carstologia, enquanto ciência, a partir dos trabalhos do sérvio Jovan Cvijic (1865-1927), nascido e criado na região de Kras.

Para Cvijic (1960), o carste ocorre em regiões calcárias ou de rochas análogas, compostas por uma proporção maior ou menor de carbonato de cálcio, tornando-as, por consequência, solúveis em água, sobretudo em água contendo ácido carbônico, ressaltando que a maior ou menor fissuração da rocha, permite a penetração da água em meio, promovendo a dissolução em profundidade. A ampla descrição de formas cársticas, e a associação da origem destas formas com o processo de dissolução da rocha, estabelecem então as bases da carstologia.

Atualmente, a carstologia teve um grande avanço de forma a integrar melhor a compreensão dos ambientes cársticos, sua fragilidade e o valor para o desenvolvimento humano, visto que grandes áreas continentais são formadas por carstes. Para Ford & Williams (2007), as regiões cársticas totalizam cerca de 10 a 15% da superfície terrestre, perfazendo rochas aflorantes e rochas em subsuperfície.

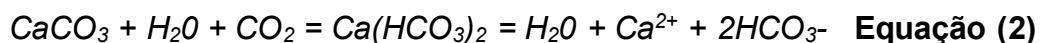
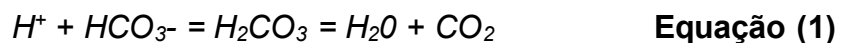
As regiões cársticas, principalmente as carbonáticas, são consideradas como áreas de interesse econômico e hidrogeológico, pois, na maioria das vezes, dispõem de solos agricultáveis, valiosas reservas de água no subsolo e apresentam importância ambiental, principalmente pelas feições geomorfológicas resultantes da dissolução da rocha carbonática, como dolinas e sumidouros, além das lagoas.

O carste e seus territórios são amplamente estudados no mundo todo e os conceitos do “carste clássico” ainda são frequentemente utilizados, apresentando características semelhantes identificados em carstes por todo o mundo, principalmente Europa, Ásia, América do Norte, América Central e no Caribe e, em menor grau, na América do Sul, Austrália e África (Ford & Williams, 2007; Van Beynen, 2011).

Em âmbito nacional, existem diversos pesquisadores que dedicaram e/ou dedicam esforços aos estudos dos diversos carstes no território brasileiro como:

Wernick *et al.* (1973), Troppmair & Tavares (1984), Martins (1985), Karmann (1986), Monteiro & Ribeiro (2001), Berbert-Born (2002), Auler (1994), Willems *et al.* (2008), Hardt (2009), Morais (2009), Rodet *et al.* (2009), entre muitos outros, principalmente a partir de 2000. Com um olhar mais próximo a esta pesquisa, trabalhos na região cárstica de Lagoa Santa foram realizados por Silva (2003), Pessoa (2005), Batista (2009), Carneiro (2013), Galvão (2015), Velásquez *et al.* (2018) e De Paula (2019).

O sistema cárstico é complexo, tendo seu controle imposto pela integração entre os sistemas hidrogeológicos e geoquímicos, e a carstificação é resultado de processos de dissolução química ou ação mecânica da água em rochas carbonáticas (Karamouz *et al.* 2011). A química envolvida entre a água e os tipos de rocha ocorre pela presença de gás carbônico dissolvido na águas, estas adquirindo um caráter ácido e quando entra em contato com a rocha carbonática, gera sua dissolução. A concentração de CO₂ na água, um dos principais agentes da carstificação, depende da temperatura, da pressão parcial de CO₂ da atmosfera e do clima. A acidificação da água, devido ao contato com solo rico em matéria orgânica, pode intensificar os processos de dissolução. A água das precipitações retém o gás carbônico da atmosfera e/ou da decomposição orgânica reagindo em contato com o calcário formando bicarbonato de cálcio (solúvel) segundo as reações abaixo (Equação 1 e 2) (Goldscheider & Drew 2007):



Porém, apenas a solubilidade da rocha, sozinha, não é suficiente para desenvolver o carste, a litologia e as estruturas presentes nas rochas tem grande importância. Rochas carbonáticas com maior pureza e altamente fraturadas desenvolvem melhor o carste, ressaltando que a carstificação é produzida pela conjunção da alta solubilidade da rocha e a existência de prosidade secundária bem desenvolvida (White, 2003; Ford & Willians, 2007). O processo químico descrito acima ocorre no interior dos maciços carbonáticos, principalmente ao longo de planos de estratificações, contatos rochosos e descontinuidades dissolvendo e abrindo gradualmente as fendas, gerando as drenagens subterrâneas e as típicas morfologias cársticas.

O que deve ser levado em consideração ao se tratar destes ambientes é a numerosa distribuição das superfícies de fraturas e de acamamento, locais preferencias onde a água irá circular, muitas vezes sem direções preferencias, desta forma, os aquíferos cársticos são caracterizados por elevada anisotropia e heterogeneidade (Legrand & Lamoreaux, 1975; Ford & Williams, 1989). A orientação e a extensão do sistema de fluxo nestes aquíferos mudam frequentemente com o tempo, uma vez que seus espessos podem colapsar ou serem preenchidos por sedimentos, além das variações dos níveis d'água que podem deixar seus condutos e fraturas saturados ou insaturados (Ford & William, 2007).

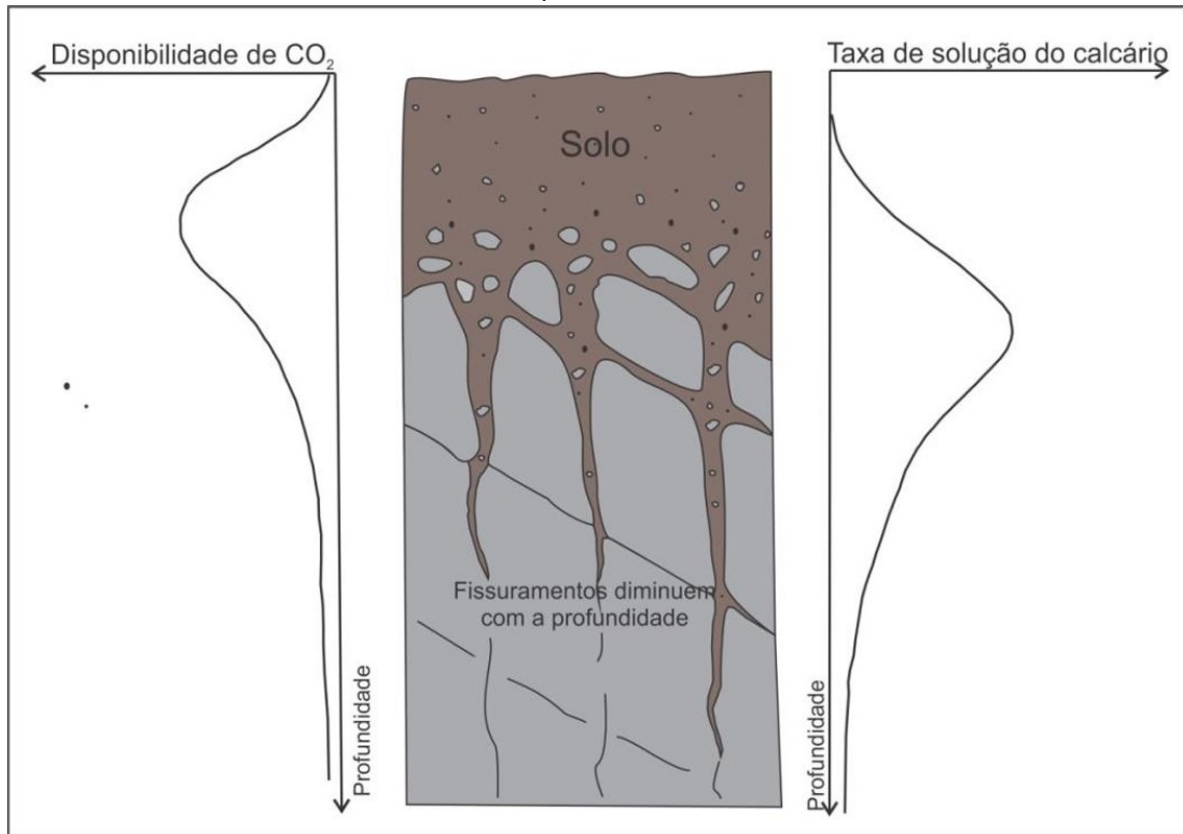
White (2002) descreveu estes aquíferos apresentando tripla permeabilidade, em que os campos de fluxo operam através de cada uma delas em diferentes escalas: permeabilidade da matriz da rocha são, permeabilidade de fraturas e permeabilidade de condutos. Em rochas são a permeabilidade da matriz é bastante variável, podendo ser ignorada em alguns calcários e dolomitos ou muito alta em calcários mesozoicos, como os da Flórida e das ilhas do Caribe.

O segundo tipo de permeabilidade descrito por White (2002) leva em consideração dois parâmetros, a abertura e o espaçamento das fraturas, estas altamente influenciadas pela dissolução da rocha, podendo apresentar fraturas com aberturas que podem variar de dezenas e centenas de micrometros em calcários ou até poucos milímetros. Já para os condutos, essa variação pode chegar de 10 mm a dezenas ou centenas de metros, constituindo a permeabilidade dos condutos (White, 2002; 2003).

Portanto, a carstificação opera de acordo com a dissolução de diferentes tipos de rochas e o avanço ao longo das rotas de permeabilidade que estas rochas apresentam, há também manifestações mais intensas do alargamento de fraturas dependendo de fatores como as condições do gradiente hidráulico, distância a percorrer e dimensões iniciais das aberturas (Pessoa, 2005).

Apesar do desenvolvimento da carstificação estar condicionada aos fatores descritos acima, a tendência é de que sua evolução diminua em profundidade (Milanović, 2004). A Figura 3.1 ilustra este comportamento, condicionado a disponibilidade de gás carbônico e da quantidade de descontinuidades que se reduzem em profundidade.

Figura 3.1: Relação entre disponibilidade de CO₂ e processos de dissolução na zona epicárstica.



Fonte: Williams (1983).

3.1.1 Geomorfologia do Carste

Diversos autores, como Ford & Williams (1989), Piló (2000) e Jones *et al.* (2003), atribuíram a compartimentação geomorfológica do carste em uma divisão com três domínios: “exocarste” (em superfície), “epicarste” (em subsuperfície) e “endocarste” (em meio subterrâneo).

O exocarste compreende o domínio mais exposto superficialmente, representando o agrupamento morfológico que pode adquirir diversos tipos de feições cársticas diante de variáveis que ajustam o relevo (Guareschi, 2012). De acordo com Goldscheider & Drew (2007), este domínio engloba diversas feições que são comumente representadas em mapas geomorfológicos, ainda que sejam, muitas vezes, expressões superficiais do epicarste e do endocarste.

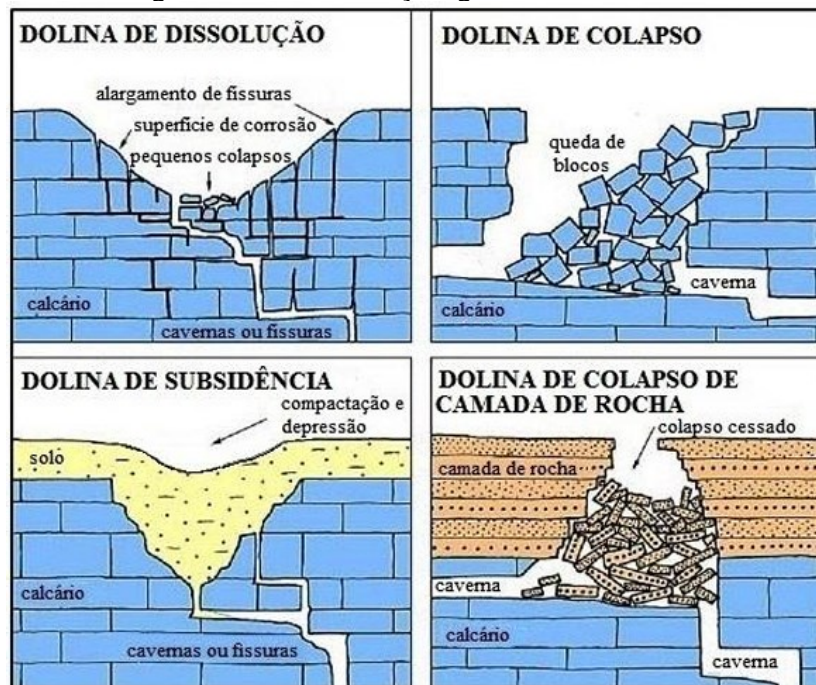
Segundo Bogli (1980), as feições cársticas mais comuns são distinguidas no relevo cárstico a partir do exocarste e do endocarste, estando mais próximas a superfície. As feições cársticas, características na zona do exocarste, são as formas

negativas (poljes, uvalas e dolinas) e as positivas (maciços, torres e verrugas). Já na zona do endocarste são os condutos ou cavernas que podem ser representados por espeleotemas, tais como colunas, cortinas, estalactites, estalagmites, entre outros.

As dolinas são formas circulares fechadas muito comuns no terreno cárstico, sua gênese está na maioria das vezes associada a dissolução de rochas através da infiltração de água superficial por meio de fraturas, juntas, e planos de acamamento, entretanto, estas dolinas podem evoluir devido a forças mecânicas, em dolinas de abatimento, e colapso devido ao carste subjacente e de subsidência (Piló, 2000; Silva, 2008) (Figura 3.2).

Segundo Piló (2000), existem três pré-requisitos básicos e necessários para a formação destas feições: uma passagem para o fluxo de água, uma zona de rocha solubilizada sub-superficial e, por fim, cobertura de solo ou outro material encobrindo a superfície. Estas feições adquirem extrema importância quando se necessita compreender as recargas existentes em aquíferos cársticos (Galvão, 2015).

Figura 3.2: Classificação genética de dolinas.



Fonte: Adaptado de Waltham & Fookes (2003).

Comumente quando um conjunto de depressões de dissolução se conectam à medida que crescem são denominadas de uvalas ou dolinas compostas (White, 2003). A evolução de dolinas para uvalas é resultado de uma evolução superficial mais rápida do que em profundidade destas feições carsticas, e geralmente, sua linha de

conjugação (ou união destas depressões) associa-se à direção do fraturamento das rochas bem como da direção preferencial do fluxo de água (Silva, 2008).

Largas depressões fechadas que podem atingir dezenas de quilômetros, de fundo plano preenchido por sedimentos e paredes elevadas, com uma carstificação bem evoluída, são denominadas de poljes (Monroe, 1970; Piló, 2000; Field, 2002). Os poljes podem ser secos, intermitentes ou permanentemente inundados. Segundo Piló (2000), a evolução destas formas é atribuída à dissolução de suas bordas e inibição dos processos de rebaixamento de relevo ocasionada pela impermeabilização do fundo destas depressões por sedimentos argilosos ou também, pela proximidade destas depressões ao nível da base. Vales cegos, zonas de perdas e vales mortos são outras formas cársticas comuns de absorção fechada. Estas feições compreendem vales epigenéticos que deixaram de funcionar em consequência de uma evolução da carstificação em grandes profundidades. Em alguns casos, eles podem ser intermitentes nas épocas de chuvas intensas (Silva, 2008).

As formas cársticas de absorção abertas no carste são denominadas de sumidouros e cavernas. Os primeiros são definidos como locais de infiltração preferencial de águas superficiais no carste, geralmente associados a outras feições cársticas características (Ford & Williams, 2007; Silva, 2008). Os sumidouros podem ser permanentes, quando absorvem as vazões de corpos hídricos de pequeno ou grande porte; acidentais, quando atuam unicamente nas enchentes das drenagens superficiais; ou intermitentes, quando captam águas somente nas épocas chuvosas (Goldscheider & Drew, 2007). As cavernas, por sua vez, são aberturas naturais largas o suficiente para entrada de humanos (Milanović, 2004), muitas vezes também conectadas a outras formas do carste e que podem funcionar como condutos para fluxo de água (Silva, 2008). Segundo Milanović (2004), as cavernas consistem em canais horizontais ou levemente inclinados conectados com a superfície por uma ou mais aberturas, que se desenvolvem ao longo de falhas, fraturas e juntas pré-existentes nas rochas.

Outra formação comum no domínio exocárstico são os lapiás, formas côncavas de dissolução que podem ser classificadas de acordo com tamanho, forma ou gênese. Quando existe uma grande concentração destas formas, pode ser um indício de zonas de intenso desenvolvimento do epicarste, devido a grande importância dessas feições para recarga de água subterrânea, não excluindo situações de epicarste desenvolvido

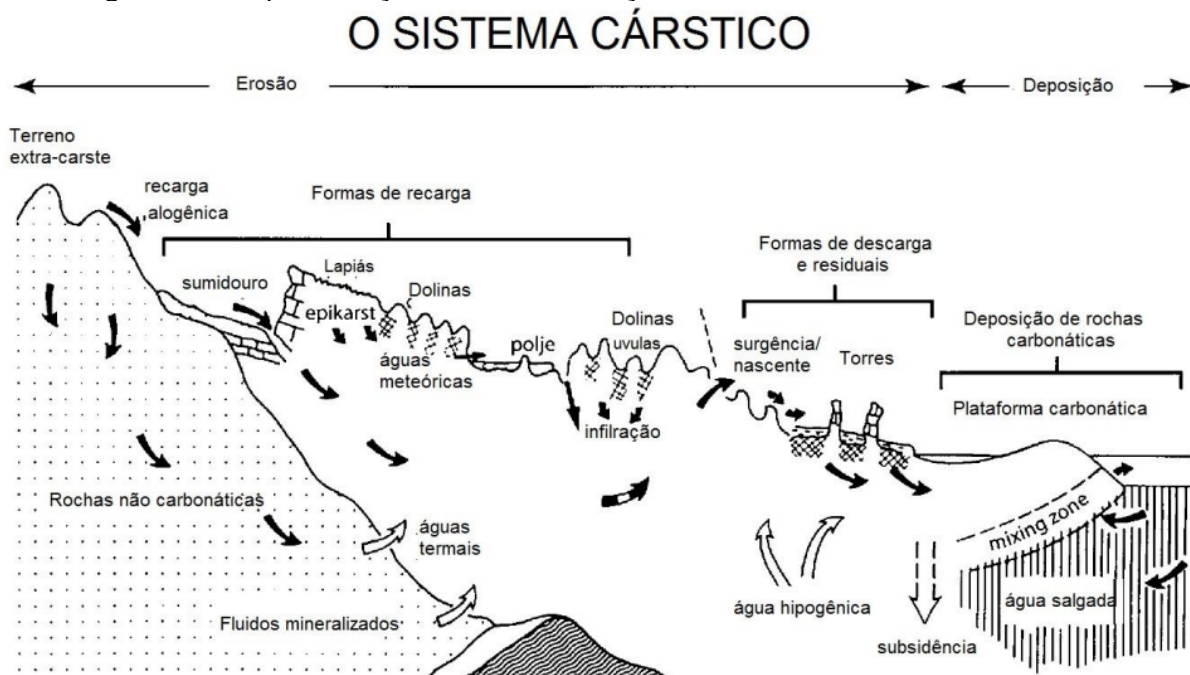
sem a presença de lapiás. Esta concentração é denominada de campos de lapiás (Goldscheider & Drew 2007, Feitosa *et al.* 2008). Algumas das formações cársticas descritas acima podem ser observadas na Figura 3.3.

O domínio epicarste, também denominado zona subcutânea (Ford & William, 2007), é caracterizado pela zona de contato da rocha com o solo, onde a parte superior às rochas subjacentes, podendo conter material inconsolidado ou não, apresenta uma trama de fissuras originada por processos cársticos (Piló, 2000). O epicarste apresenta espessura variável de decímetros a dezenas de metros, em que a permeabilidade é maior e melhor distribuída quando comparada as rochas abaixo deste domínio, desta forma este compartimento adquire a função principal de armazenamento de água e concentração de fluxo (Goldscheider & Drew, 2007). Piló (2000) salienta a importância do manto de alteração e dos solos no contexto do epicarste, posto que estes materiais estão em contato com a rocha solúvel subjacente e, conseqüentemente, influenciam a circulação hídrica interna e o desenvolvimento do exocarste e endocarste, este domínio faz a conexão dos outros dois.

O endocarste representa a zona subterrânea, segundo Piló (2000) e Bogli (1980), esta zona é representada por condutos subterrâneos e seus depósitos químicos, clásticos e orgânicos. Sua gênese é condicionada a estruturas da rocha em combinação com a relação geográfica entre as áreas de recarga e descarga hídrica. Este domínio ainda pode ser dividido em hipocarste, quando existem estruturas formadas por dissolução a partir de águas meteóricas, e hipocarste, quando as feições estão ligadas a dissolução a partir de águas conatas (*juvenis*) (Ford & William 2007, Goldscheider & Drew 2007).

Desta forma, como foi descrito, as feições cársticas assumem diversas formas e funções a depender do compartimento cárstico em que se encontrem, e qual estágio de evolução do mesmo, que nada mais é que o resultado da modelagem realizada pela percolação da água sobre a rocha carbonática.

Figura 3.3: Representação de diversas feições comuns em ambientes cársticos.



Fonte: Ford & William (2007).

3.1.2 Lagoas do Carste

Segundo Tundisi (2008), os lagos e lagoas são tidos como corpos de águas estacionários, e considerados como fenômenos de curta duração na escala de tempo geológica. Comumente estes termos são confundidos, porém existe uma diferenciação entre lagos e lagoas. O primeiro é definido como corpos de água profundos, devido a este fator, apresentam estratificação térmica com diferentes teores de água com oxigênio dissolvido, definindo assim camadas tropogênicas. Já as lagoas, são corpos hídricos de amplitude geralmente rasa, podendo não haver estratificações, e por isso com grande camada tropogênica em relação ao seu volume total (Kleerekoper, 1994).

As lagoas terrestres podem ser classificadas a partir da sua perenidade, isto é, as variações na presença de água em seu interior. Segundo Linkens (2010), as lagoas podem ser perenes, quanto mantêm água em seu interior durante todo o ano, independente de variações climáticas sazonais. Estas lagoas não secam, por influência da alimentação hídrica feita por rios, nascentes ou água subterrânea. As lagoas intermitentes, são aquelas que apresentam variações em sua perenidade, podendo secar completamente durante certas épocas do ano, principalmente nos

períodos de seca. Suas águas podem ser reabastecidas no retorno das estações chuvosas ou pelo aumento do nível do lençol freático.

As lagoas efêmeras e lagoas de inundação, são tipos de lagoas estritamente ligadas a eventos climáticos, episódios de chuvas intensas são capazes de estabelecer novas lagoas temporárias e inundar áreas próximo a corpos hídricos permanentes e criar lagoas de inundações. Estes dois tipos de lagoas podem secar rapidamente após os eventos que as desenvolveram (Linkens, 2010). Cabe lembrar, que estes tipos de lagoas podem variar dependendo do contexto geológico, climático e hidrológico específico de cada região.

As lagoas desempenham um papel importante no ciclo hidrológico e segundo Tundisi (2016), apresentam funções fundamentais na dinâmica hidrológica das regiões onde estes corpos estão localizados. São fundamentais para o armazenamento de água, podendo atuar como reservatórios naturais, acumulando água durante estações de alta precipitação e liberando-a gradualmente durante períodos de seca. Desempenham papel na regulação do fluxo de água nas bacias hidrográficas, reduzindo inundações e contribuindo para manter um fluxo constante nos rios.

As lagoas ainda podem funcionar como filtros naturais capazes de melhorar a qualidade das águas, ao remover sedimentos e nutrientes em excesso de outros ecossistemas aquáticos. Além destas relações hidrológicas, estes corpos hídricos confinados dão suporte a biodiversidade, sendo o habitat para diversas espécies de plantas e animais, contribuindo para a biodiversidade.

Uma classificação mais detalhada na separação de diferentes tipos de lagos e lagoas é a relacionada a seus processos de formação. Day (2006) destaca diferentes gêneses destes corpos hídricos, como: de origem glacial e periglacial, fluvial, vulcânica, tectônica, costeira, cárstica ou dissolução, éolicas e de barramento. Como o âmbito que este trabalho habita são os ambientes cársticos, as lagoas de origem de dissolução ou lagoas cársticas será mais enfatizado.

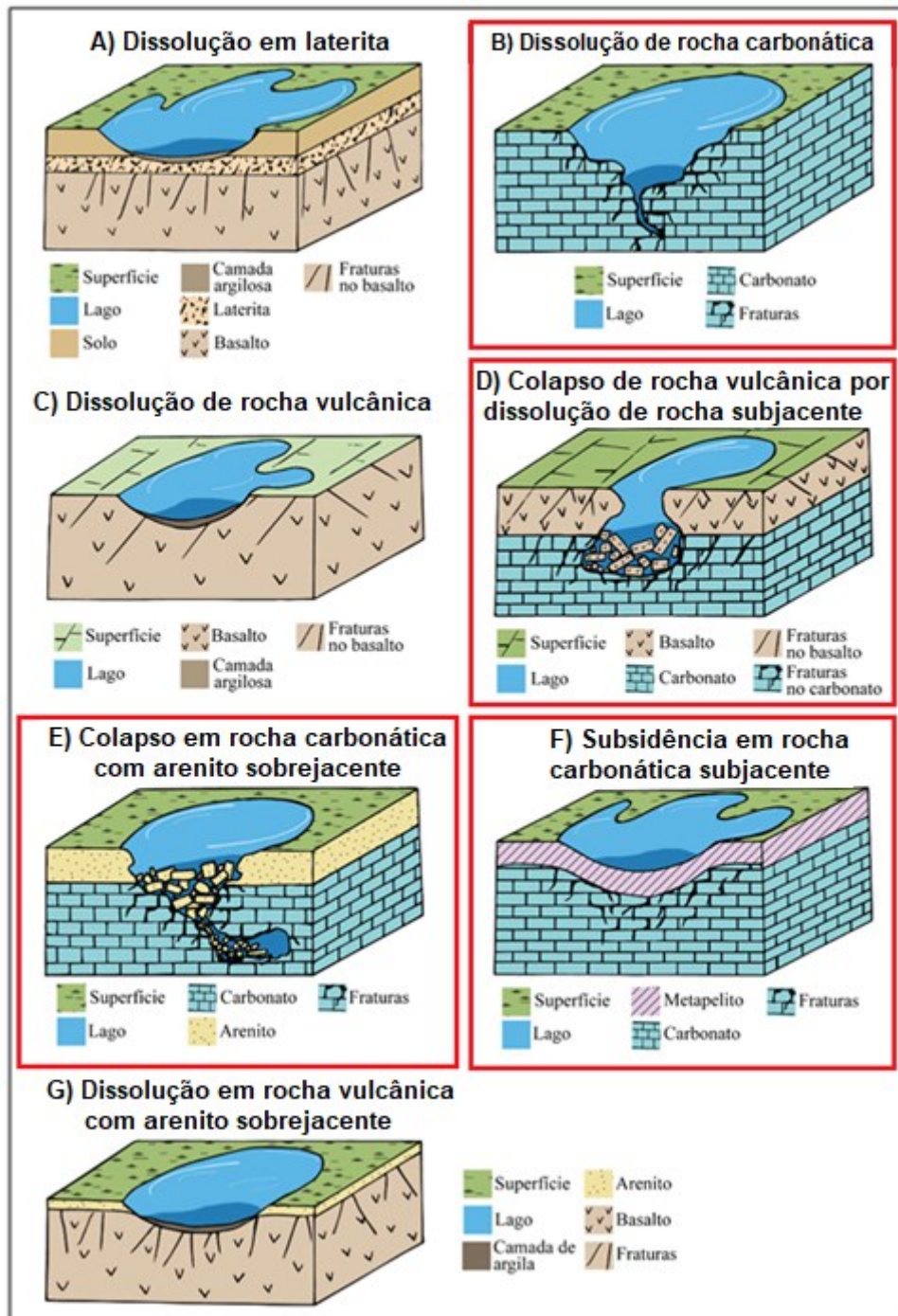
As lagoas formadas por dissolução, tem sua gênese condicionada a lixiviação de minerais das rochas causadas pela percolação de água no terreno, acarretando assim, depressões no relevo que ao serem preenchidas por água, formam estes corpos hídricos (Sperling, 1999). A dissolução e a locação de lagoas ocorre preferencialmente em rochas carbonáticas, pela característica altamente solúvel

destas rochas sob ação de água. A depressão que pode formar as lagoas cársticas é denominada dolina, elas podem evoluir para uvalas, que são coalescências de dolinas, resultantes da evolução superficial mais rápida em área do que em profundidade tendendo a tomar forma elipsoidal quando derivam da conjugação de duas dolinas (Piló, 2000). Porém a dissolução de outras rochas diferentes das carbonáticas também pode ocorrer.

Existem lagoas formadas por dissolução em rochas vulcânicas, como as identificadas por Maciel Filho *et al.* (2013), nas depressões localizadas entre o Rio Grande do Sul e Santa Catarina, condicionadas a dissolução da sílica do vidro vulcânico. Corbella & Lara (2008) descreveram os processos de dissolução responsáveis pela formação de lagoas em basaltos cenozoicos na unidade geomorfológica denominada Meseta de Somuncurá, na Patagônia Argentina. A dissolução também pode ocorrer em certas profundidades, um exemplo são as dolinas de colapso em arenitos, geradas pela dissolução de sistemas cársticos subjacentes, localizados nos arenitos em Ponta Grossa, no Paraná (Sallun Filho & Karmann, 2007). Nesta região, as águas dentro das dolinas, só são encontradas nos arenitos que apresentam rochas carbonáticas subjacentes. Neste sentido, Berbert-Born (2002) afirma que no Carste de Lagoa Santa, em Minas Gerais, ocorrem as “superfícies filíticas” que recobrem ampla área, onde os carbonatos estão recobertos por rochas metapelíticas, neste domínio há ocorrências indicativas de formas cársticas, que podem derivar de carstificação ocorrendo em profundidade nos carbonatos.

Com estes exemplos citados, é íntima a relação da feição “dolina” e a presença de água que condiciona uma lagoa por dissolução em diferentes litologias. Ainda deve-se destacar que as lagoas geradas por processos de dissolução, estão relacionadas com fatores que amplificam ou diminuem a dissolução, podendo interferir na forma, extensão e profundidade das depressões no relevo. Falhas, fraturas e condutos nas rochas podem ser gatilhos para o processo de dissolução e ampliação das depressões. A Mineralogia também é atrelada a dissolução, desempenhando um papel importante na permeabilidade, que interfere na percolação das águas e conseqüentemente na perenidade destas lagoas (Dos Santos & Castro, 2022). Na Figura 3.4 pode ser observado os diferentes tipos de lagoas formadas por dissolução e seus processos associados.

Figura 3.4: Lagoas formadas por dissolução em diferentes litologias e seus processos associados, destaque as lagoas que apresentam litologias carbonáticas.



Fonte: Adaptado de Dos Santos & Castro (2022).

3.1.3 Hidrogeologia Cárstica

A hidrogeologia cárstica tem como foco a compreensão das características e controles do desenvolvimento dos aquíferos cársticos, tal compreensão é de extrema importância, pois estes corpos hídricos são bons reservatórios subterrâneos e

também por influenciar em possíveis problemas geotécnicos e ambientais (Feitosa *et al.*, 2008).

Assim como os demais tipos de aquíferos, os aquífero cárstico podem ser classificados como: confinados, quando seu reservatório de água está entre duas camadas impermeáveis de rocha, estando submetidos a uma pressão maior que a atmosférica; como livres, quando suas pressões estão condicionadas à pressão atmosférica; ou suspensos, formado sobre uma camada impermeável entre o nível freático e do terreno (Ford & Williams, 2007; Feitosa *et al.*, 2008). Não obstante, os mesmos autores pontuam também que o sistema de águas subterrâneas no carste possuem algumas características intrínsecas que fazem no se distinguir dos demais aquíferos, desta forma, alguns princípios da hidrogeologia devem ser aplicados corretamente no contexto cárstico.

Segundo Milanović (2004), aquíferos carsticos também são caracterizados pela ocorrência de grandes depressões de relevo e cavidades no subsolo que apresentam drenagens subterrâneas, reduzindo assim, o escoamento superficial, aumentando a circulação de águas subterrâneas nas zonas saturadas e insaturadas. Estes aquíferos também são marcados pela alta velocidade de infiltração de chuvas e demais águas superficiais. Tais particularidades são resultado da circulação de água em regiões de rochas carbonáticas, favorecidas por contribuições pluviométricas. Estas e outras características distinguem os demais aquíferos, dos cársticos, sendo em realidade o resultado da procura natural do equilíbrio químico entre a água e as rochas carbonáticas (Silva, 2002).

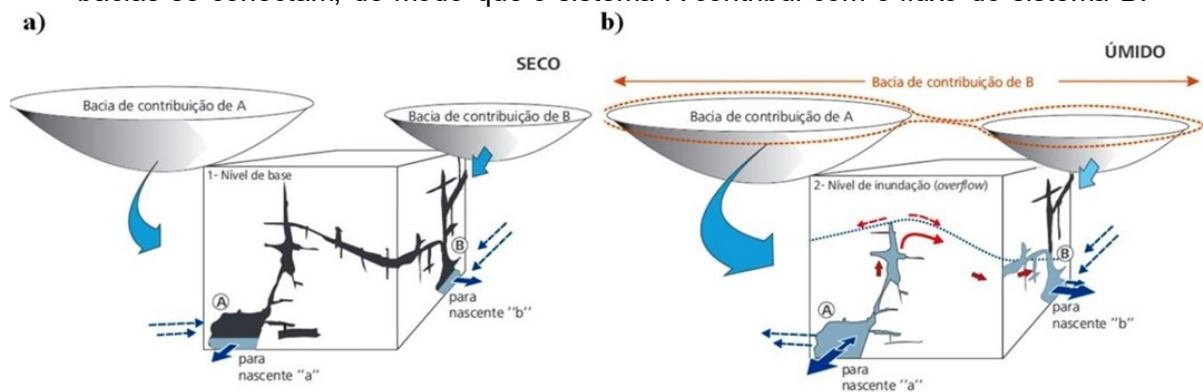
No geral, estes reservatórios subterrâneos, apresentam forte heterogeneidade e anisotropia relacionada à diversificada distribuição dos condutos (Worthington & Ford, 2009) o que ocasiona grande variação dos parâmetros hidráulicos, como permeabilidade, transmissividade e condutividade hidráulica, além de anomalias na direção de fluxo em relação ao nível de base regional (Milanović, 2004; Feitosa *et al.*, 2008). Segundo Goldscheider & Drew (2007), diferente de regiões não-cársticas, onde os fluxos de água podem ser identificados pelas análises de mapas topográficos, em regiões cársticas, a água subterrânea pode independe da topografia da superfície.

Além dos fatores geológicos e geográficos, a circulação e atividade da água, condicionantes dos fenômenos cársticos, estão também sujeitas aos fatores climáticos, que juntos determinam não só a intensidade de carstificação como a

composição química das águas do aquífero (Silva, 2008). Em regiões de clima frio, a dissolução dos calcários é significativamente maior que naquelas de altas temperaturas considerando a mesma quantidade de água, favorecendo a carstificação (Milanović, 2004).

A variabilidade temporal é outra característica muito marcante dos aquíferos carstícos. Goldscheider & Drew (2007) pontuam que em um curto período de tempo, a hidrodinâmica do aquífero pode sofrer grandes modificações, devido às condições hidrológicas. O dinamismo hidráulico de um sistema cárstico por meio da organização espacial de bacias aquíferas, pode ser observado na Figura 3.5, onde é representada a oscilação sazonal do nível de água e sua influência na conectividade da rede de condutos e contribuição hidrológica.

Figura 3.5: Dinamismo hidráulico demonstrado pela oscilação da sazonalidade da superfície freática. (a) Período seco: as bacias se apresentam independentes. (b) Périodo chuvoso: as bacias se conectam, de modo que o sistema A contribui com o fluxo do sistema B.



Fonte: Adaptado de Sanchez & Lobo (2016).

3.1.4 Recarga, descarga e fluxo nos aquíferos cársticos

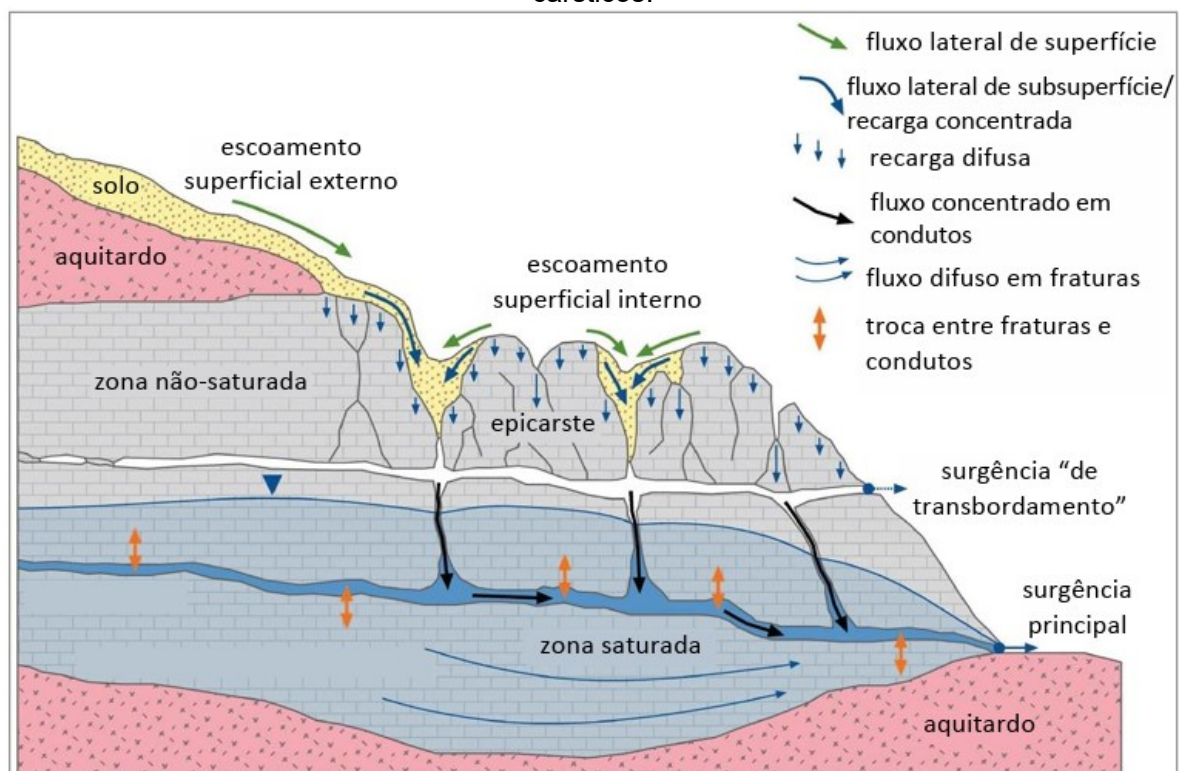
Como visto anteriormente, as rochas presentes no carste tem características peculiares ao serem comparadas com outros tipos de formações rochosas. O fato dos processos de dissolução atuarem mais fortemente em rochas carbonáticas, está inteiramente relacionado com a composição químicas e a porosidade das mesmas (Dias, 2009). Segundo Silva (2002), essas características são fundamentais para o processo de carstificação, promovendo feições morfológicas distintas, diante da percolação de água através das fissuras e condutos.

O modo localizado de percolação das águas deve-se à variabilidade espacial da permeabilidade e da capacidade de infiltração, que é muito maior nos meios

cársticos que em outros meios permeáveis. Porém, para que o processo de castificação ocorra é necessário que os fluxos subterrâneos sejam capazes de criar cavidades em subsuperfície como produto de dissolução (Galvão, 2015). Com o tempo, essas cavidades, vão se desenvolver e criar uma rede interconectada de dutos, por onde são criadas condições favoráveis para a circulação da água no aquífero (De Paula & Velásquez, 2019; Teixeira *et al.*, 2023).

Na figura 3.6 está representado o fluxo e o armazenamento de água em um sistema cárstico. Em superfície, a água pode fluir até atingir uma fissura, oblíqua ou vertical, alargada pela dissolução das rochas. Neste caminho, parte dela pode se infiltrar lentamente no solo, ou rapidamente, quando as chuvas forem mais fortes, a água irá se infiltrar em rachaduras e fissuras mais rapidamente, e conseqüentemente será redistribuída lateralmente em subsuperfície. Desta forma, ocorre a recarga e os fluxos das águas subterrâneas, rapidamente pelas cavernas e lentamente pela matriz do material rochoso (Hartmann *et al.*, 2014). Segundo Ford & Williams (2007), os sistemas cársticos costumam receber a maior porção de seus aportes em pontos de recarga pontual, tais como depressões fechadas (como dolinas) e sumidouros.

Figura 3.6: Perfil hipotético demonstrando o fluxo e o armazenamento em aquíferos cársticos.



Fonte: Adaptado de Hartaman (2014).

Na hidrogeologia cárstica dois conceitos são fundamentais para entender as entradas que podem existir nestes ambientes: recarga autogênica e recarga alôgenica. A recarga autogênica corresponde aquela originada somente da precipitação caída diretamente sobre as rochas carbonáticas, geralmente este tipo de recarga é bastante difusa e lenta, as águas infiltram pelas fraturas presentes nos afloramentos cársticos expostos ou no solo derivado destas rochas (Ford & Williams, 2007).

Por outro lado, a recarga alogênica, segundo Goldscheider & Drew (2007), estão relacionadas com o escoamento superficial de rochas vizinhas não-cársticas, ou de rochas em níveis superiores às rochas cársticas que fluem para dentro do aquífero cárstico, este tipo de recarga geralmente tem entradas pontuais concentradas de maior velocidade. Cabe ressaltar que estes conceitos são teóricos, na prática, os sistemas cársticos apresentam uma combinação de componentes autogênicos e alogênicos (Ford & Williams, 2007).

Segundo White (2002), as entradas de água nos aquíferos cársticos podem acontecer de diversas formas como: 1) infiltração difusa, quando a precipitação cai diretamente sobre a superfície cárstica e infiltra através do solo, fraturas e permeabilidade da matriz rochosa; 2) escoamento interno, neste caso as águas entram rapidamente no aquífero através de fluxos turbulentos em dolinas e depressões de relevo; e 3) recarga por aquíferos suspensos, onde a água é conduzida ao aquífero cárstico que se localiza abaixo por poços verticais ou fraturas na zona vadosa.

Pensando agora nas saídas dos sistemas cársticos, tem-se as nascentes ou surgências, que constituem os pontos onde a água subterrânea emerge do sistema de drenagem local (Fleury, 2009). Segundo Milanović (2004), estas feições podem apresentar caráter temporário ou permanente, dependendo diretamente da precipitação, além de suas características hidrológicas estarem atreladas a diversos fatores relacionados ao aquífero, como: área de captação, porosidade total efetiva, capacidade de recarga e composição geológica. As nascentes perenes, são aquelas responsáveis pela manutenção do fluxo de base, enquanto as intermitentes, são aquelas que fluem durante períodos de alta descarga (Worthington, 1991).

Descargas controladas por um pequeno número de nascentes, ou as vezes apenas por uma surgência, são características peculiares dos sistemas cársticos (White, 2003). Para Ford & Williams (2007), as nascentes cársticas representam o fim do sistema de drenagem subterrânea e o início do predomínio das drenagens superficiais. Estes locais acabam representando toda água que flui através do aquífero, deste modo se tornando um local ideal para a medição de vazões, aspectos hidroquímicos e monitoramento de contaminantes (White, 2002).

Todas as características interconectadas de um aquífero, incluindo áreas de recarga, o substrato geológico e sua respectiva permeabilidade que permitem a percolação do fluxo de água por uma rede de condutos e seu armazenamento, até as regiões de descarga, consistem em um modelo conceitual, geralmente físico, do sistema (White, 2003). No caso do carste, em consequência de suas características genéticas que abrangem a dissolução aleatória e ao longo de fraturas e demais descontinuidades, além da grande variabilidade geomorfológica e hidrogeológica de um lugar para o outro, o entendimento do sistema hidráulico torna-se complicado, bem como a extrapolação de resultados de diferentes regiões cársticas ao redor do mundo (Silva, 2008).

Ainda assim, White (2003) destaca a recarga, permeabilidade e descarga como características essenciais do sistema de fluxo do aquífero cárstico, mesmo que nem todos os tipos estejam presentes ou que tenham a mesma importância em todos os aquíferos.

3.2 Estudos Anteriores

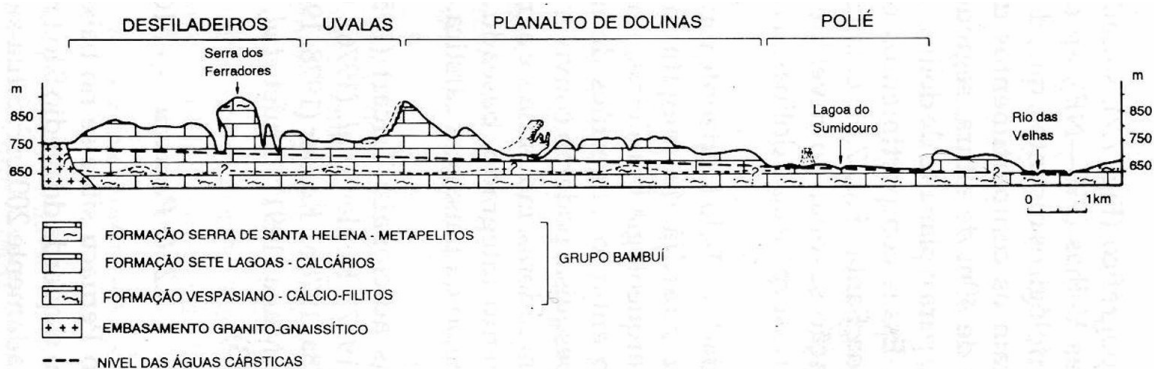
Os terrenos da região de Lagoa Santa são locais clássicos de estudos sobre ambientes cársticos no território brasileiro. Durante anos, diversos autores realizaram trabalhos, que tem como foco a geologia, a geomorfologia e a dinâmica hídrica existente nesta região, pode-se citar Kohler (1989), Auler (1994), Berbert-Born (1998), Pessoa (2005), Galvão (2015) e De Paula (2019), além dos projetos da CPRM (Projeto APA Carste Lagoa Santa – 1998, Projeto Vida – 2003 e Projeto Sete Lagoas – Abaeté - 2010) e dos trabalhos relacionados ao Projeto PAN Cavernas São Francisco (Velásquez *et al.* 2018).

Os primeiros registros de estudos na região, sobre o ponto de vista geológico, datam do século XIX, através do paleontólogo dinamarquês Peter Lund. Segundo

Burmesiter (1853 apud Auler, 1994), Lund entre os anos de 1835 e 1844 explorou aproximadamente 1000 cavidades e foi o pioneiro na produção de mapas de cavernas no Brasil. Silva *et al.* (1987), em seus estudos com foco na dinâmica hídrica da região, realizou um mapeamento geológico bem como estudos morfológicos e estruturais imprescindíveis para a compreensão da hidrogeologia dos municípios de Lagoa Santa, Pedro Leopoldo e Matozinhos – Minas Gerais.

Estes autores reconheceram oito domínios fisiográficos, que a frente foram sumarizados em seis por Auler (1994), e determinaram domínios hidrogeológicos, individualizando zonas de recarga e descarga na região. Devido a grande extensão da APA Carste de Lagoa Santa, poucos são os estudos com tamanha área de abrangência, desta forma, muitos estudos focam em locais específicos da região, além de diversos assuntos que permeiam a hidrogeologia cárstica. Kohler (1989), identificou e descreveu macro, meso e microfieções cársticas em detalhes, além disso, propôs uma compartimentação geomorfológica do exocarste, que perdura até os dias de hoje, uma breve demonstração de seus resultados pode ser visto na Figura 3.7.

Figura 3.7: Perfil topográfico, geológico e geomorfológico da região cárstica de Lagoa Santa, MG.



Fonte: Kohler (1989).

Quando o assunto em foco na região está ligado à evolução cárstica, Auler (1994) descreveu a região de Matozinhos-Pedro Leopoldo como um carste maduro, marcado pela presença de feições cársticas típicas e um fluxo subterrâneo bem desenvolvido. O modelo de carstificação da região é descrito em alguns momentos: o primeiro onde a evolução carste teria se iniciado após a dissecação de solos lateríticos terciários sob influência de variações de climas frio/seco e quente/úmido; um segundo momento onde o nível carbonático é atingindo e se inicia o processo de carstificação,

onde o seu climax tenha sido sob influência de climas quentes e úmidos durante o Pleistoceno Superior; e por fim, em um momento de climas mais frios e secos, ocorrendo uma sedimentação química, com precipitações secundárias e formação de crostas de calcita e espeleotemas (Kohler, 1989 apud Berbet-Born, 1998). Segundo estes autores, novos momentos de temperatura e umidade podem tornar estes ambientes favoráveis para um novo episódio de carstificação e retrabalhamento de feições primárias e secundárias.

Diversos autores focaram os seus esforços na compreensão da dinâmica hídrica e o fluxo de água subterrânea na região, desenvolvendo modelos conceituais complexos, como foco em áreas restritas localizadas dentro da região cárstica de Lagoa Santa e suas imediações. Auler (1994) apresentou uma caracterização hidrogeológica e hidroquímica do carste de Matozinhos-Pedro Leopoldo, este estudo é até hoje, um dos mais relevantes sobre o fluxo de água subterrânea na região da APA carste fundamentado pela aplicação de traçadores artificiais nas redes hidrológicas.

Silva (2003) e Pessoa (2005), investigaram o comportamento dos aquíferos cársticos na região do entorno de Lagoa Santa – Minas Gerais. Destaca-se no estudo de Pessoa (2005), a presença na região de um aquífero cárstico extremamente ativo abaixo do manto de intemperismo, onde o controle é primordialmente exercido pela distribuição espacial das faixas de ocorrência de calcários mais puros, pertencentes ao Membro Lagoa Santa da Formação Sete Lagoas. O autor ainda pontua que o processo de carstificação na região está condicionado pela geologia estrutural, devido aos contatos, planos de juntas e foliações tectônicas dos carbonatos.

Dentro dos limites da APA Carste de Lagoa Santa, destaca-se os trabalhos realizados por Amaral (2018), como foco no comportamento e desempenho hídrico das depressões cársticas, e De Paula (2019), que produziu um modelo conceitual de fluxo dos aquíferos pelíticos-carbonáticos desta região, além de identificar a continuidade de fluxo provindo de oeste para leste nas imediações da bacia córrego Palmeira. Neste trabalho também, De Paula (2019), pontuou sobre o elevado grau de antropização na região, observando que a retirada por poços tubulares aliados à exploração de água em córregos é responsável por explorar toda recarga aquífera pluviométrica da região.

Na região de Sete Lagoas – Minas Gerais, temos os estudos de caracterização hidrogeológica e modelagem hidrogeoquímica, respectivamente de Batista (2009) e Carneiro (2013), também nesta região, Galvão (2015), aplicou metodologias multidisciplinares integrando geologia, hidrogeologia, geoquímica e isótopos estáveis e produziu um modelo hidrogeológico conceitual do aquífero cárstico da região, além de o relacionar com o desenvolvimento urbano e ao surgimento de problemas geotécnicos.

Nos últimos anos diversos trabalhos estão sendo desenvolvidos no âmbito do Projeto PAN Cavernas São Francisco (Velásquez *et al.* 2018), com a inclusão de toda a extensão da APA Carste de Lagoa Santa. Ribeiro *et al.* (2019) identificaram e caracterizaram planos de acamamento, fraturas e paleocondutos para associá-las a direções de fluxo já levantadas em estudos anteriores. Amaral (2018), também dentro do Projeto PAN Cavernas São Francisco, nos estudos realizados nas depressões cársticas, consideram que depressões sempre secas e as que se esgotam totalmente ao final da estiagem (possivelmente lagoas intermitentes), especialmente no ano hidrológico normal, são as de elevado potencial para promover a recarga aquífera.

Como falado anteriormente Amaral (2018), pontuou sobre depressões cársticas, como possíveis locais onde a água pode ocupar e secar em períodos secos, neste ponto, entramos no assunto foco deste trabalho, as lagoas presentes na APA Carste Lagoa Santa e suas imediações, e assim como muitos trabalhos anteriores sobre a geologia, geomorfologia, dinâmica de fluxo, entre outros assuntos, as lagoas também já foram abordadas em estudos pretéritos na área em foco.

Warming (1908), Lund (1950) e Kohler *et al.* (1978) descrevem sobre a alta frequência de lagoas na região de estudo, as quais podem apresentar padrões irregulares de variação de nível d'água destacando complexos ciclos e comportamentos hídricos, a exemplo da existência de ciclos secos de 15 anos encontrado por Kohler e seus colaboradores. O monitoramento das lagoas é imprescindível para a compreensão do seu comportamento hídrico. Berbert-Born (1998), descreve o notável número de lagoas na região, intermitentes ou não, as quais também estão regidas por uma “complexa dinâmica hídrica”.

Algumas lagoas foram estudadas em detalhe, como é o caso dos estudos de Warming (1908), que observou a Lagoa de Quinta, localizada no Parque Estadual do Sumidouro, se torna bem grande no período chuvoso, mas que no final do período de

seca a água escoar por sumidouros e dutos até se tornar apenas um riacho. Como já foi descrito anteriormente na caracterização da área de estudo, Kohler (1978) e Auler (1994) foram outros autores pioneiros ao descrever as lagoas da região, o primeiro apontou o equilíbrio da lagoa central de Lagoa Santa pela dissolução do pacote calcário sotoposto ao filito. Auler (1994) classificou três tipos de lagoas na área: lagoas estáveis sobre o filito; lagoas sazonais contendo sumidouros no fundo das dolinas nas porções topograficamente mais elevadas; e lagoas de lençol freático que estão sobre o carbonato, em elevações mais baixas.

Recentemente a região experimentou um grande momento de seca e muitas das lagoas secaram ou reduziram de forma expressiva o seu nível de água, desta forma, muitos autores vem juntando esforços e trabalhos com foco nas lagoas de região estão cada vez mais comuns, podemos citar os trabalhos de Assunção (2019), Alves (2020) e Macedo & Alvarez (2021), todos com foco em lagoas dentro do carste em questão.

Assunção (2019) em seu estudo, inicialmente utilizou de ferramentas como: sensoriamento remoto; geoprocessamento; e mapeamento de campo, para a identificação de feições cársticas existentes no centro da lagoa do Matadouro, uma lagoa situada próximo a zona urbana do município de Sete Lagoas, Minas Gerais. A lagoa é considerada uma importante zona de recarga do aquífero cárstico Sete Lagoas e atual condição de intermitência deste corpo hídrico está condicionada pela hidrodinâmica regional deste aquífero. O autor, observando a superfície potenciométrica regional ao longo do tempo, pontua que a mudança de condição de perene para intermitente da lagoa do Matadouro é justificada pela superexploração da água subterrânea advinda dos centros urbanos próximo a lagoa.

Outra lagoa situada próximo ao município de Sete Lagoas é a lagoa Grande, foco do estudo realizado por Alves (2020). A autora por meio de um modelamento indentificou porções da lagoa que estão diretamente ligadas as rochas cársticas da Formação Sete Lagoas, e desta forma propôs uma ligação entre a lagoa e o aquífero. O estudo se baseou pelo uso da geofísica, testes de bombeamento e análise de isótopos ambientais estáveis. A geofísica indicou que a lagoa Grande, apresenta duas compartimentações em subsuperfície: uma mais rasa e mais alterada, capaz de promover a circulação das águas subterrâneas e misturas com águas superficiais; e uma mais profunda menos alterada e menos permeável. Os testes de bombeamento

realizados indicaram que há interceptação de outra fonte que não somente as águas dos condutos e a análise isotópica corroborou com estes resultados, mostrando enriquecimento em isótopos mais pesados ao longo do bombeamento, comum de ambientes lacustres. Desta forma, Alves (2020), concluiu que existe a conexão entre a lagoa e o sistema de águas subterrâneas da região, e o quase esgotamento de água deste corpo hídrico está condicionado a fatores antrópicos e a alta demanda por água na região.

Macedo & Alvarez (2021) analisaram o comportamento hidrológico da Lagoa do Sumidouro, no distrito de Fidalgo pertencente ao município de Pedro Leopoldo – Minas Gerais, grande representante destes corpos hídricos na região, ao longo dos seus últimos 40 anos, por meio técnicas de geoprocessamento, hidrologia superficial, subterrânea e análises meteorológicas. Os autores observaram a relação causa-efeito entre a pluviometria e o volume da lagoa, e concluíram que há uma elevada dependência deste corpo hídrico com a quantidade de chuvas e o seu “secamento” desde o ano de 2013 foi atribuído ao aumento considerável das temperaturas médias anuais do ar.

Além dos trabalhos discutos anteriormente, podem ser citados diversas outras produções recentes na região com diferentes abordagens de estudos hidrogeológicos. Podemos citar alguns artigos como: Tayer & Velásquez (2017), Aragão (2019) e Silva (2022), que abordaram a vulnerabilidade intrínseca no carste de Lagoa Santa; De Paula & Velásquez (2019) e Teixeira *et al.* (2023), com ênfase no balanço hídrico e nas recargas dos aquíferos; Teodoro *et al.* (2019), utilizando traçadores corantes na região; Ribeiro *et al.* (2019), Andrade *et al.* (2020), Dantas *et al.* (2023) e Pacheco Neto *et al.* (2023b), analisando os fluxos e conexões dentro dos aquíferos presentes na região da APA Carste de Lagoa Santa e regiões circundantes; Ribeiro, Velásquez & Fleming (2020), tem seus esforços destinado a análise de isótopos no carste de Lagoa Santa; Vieira, Dussin & Velásquez (2018) e Vieira *et al.* (2020), realizaram caracterização geoquímicas nas rochas e aquíferos locais; De Paula *et al.* (2020) e Pena *et al.* (2024), levantaram os parâmetros hidrodinâmicos dos aquíferos da região; De Paula (2019) e Dantas (2023), realizaram modelagem hidrogeológica nos sistemas aquíferos da região.

Estes artigos são apenas uma parcela da produção originada de diversos trabalhos de conclusão de cursos, dissertações de mestrado e teses de doutorado

realizadas na APA Carste de Lagoa Santa e seus entornos. Além de diversos artigos, muitos resumos e resumos expandidos também foram publicados e apresentados em diversos congressos e simpósios.

4 CARACTERIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DAS LAGOAS DO SISTEMA HIDROGEOLÓGICO CÁRSTICO DO GRUPO BAMBUÍ NA REGIÃO DE LAGOA SANTA – MINAS GERAIS, A PARTIR DE ANÁLISES GEOESPACIAIS

Wallace Maciel Pacheco Neto ¹; Rodrigo Sérgio de Paula ¹; Leila Nunes Menegasse Velásquez ¹; Gabriela Meira ¹; Matheus Alonso Castelo Pena ¹

1- Universidade Federal de Minas Gerais

Artigo publicado na revista Journal of South American Earth Sciences. A versão original pode ser encontrada nos apêndices deste trabalho.

Resumo

O Carste de Lagoa Santa é uma unidade de conservação localizada próximo à cidade de Belo Horizonte, no estado de Minas Gerais (Brasil), conhecida como Área de Proteção Ambiental (APA) Carste de Lagoa Santa, uma das principais áreas de pesquisa relacionadas à arqueologia, paleontologia, espeleologia e hidrogeologia no território brasileiro. A região é dotada de inúmeras lagoas fruto do seu complexo sistema hídrico devido à evolução cárstica. Além disso, a natureza cárstica das rochas da região permite a existência de diversas outras morfologias típicas de dissolução, tais como: cavernas, espeleotemas, dolinas, uvalas, entre outras. As características morfoestruturais, aliadas à geologia local, podem fornecer informações importantes sobre o comportamento das lagoas frente aos ciclos de expansão e retração de seus espelhos d'água. Assim, este trabalho tem como objetivo compreender a dinâmica hídrica das lagoas presentes no Carste de Lagoa Santa através da análise de dados espaciais entre os anos de 1984 e 2020. Com base nos levantamentos, foram identificadas 153 lagoas na região de estudo nos últimos 35 anos: 40 lagoas perenes, 89 lagoas intermitentes, 19 lagoas novas e 5 lagoas que secaram completamente. Além disso, este estudo compara a relação de cada lagoa com o tipo de depressões do relevo (Dolina ou Uvala), maciços rochosos e os principais lineamentos estruturais negativos. Os dados obtidos permitiram identificar quais características são diagnósticas de perenidade ou intermitência das lagoas existentes na região, bem

como agrupar as lagoas existentes em subgrupos com características geológicas e morfoestruturais semelhantes. As características mais importantes para definir a dinâmica hídrica das lagoas são o estado evolutivo das depressões cársticas e a presença de lineamentos estruturais, em que nas depressões mais evoluídas (uvalas) as lagoas tendem a ser intermitentes e nas depressões menos evoluídas (dolinas) as lagoas tendem a ser perenes. Por fim, a associação dos corpos hídricos aos lineamentos estruturais demonstrou ser a condição para a permanência da água em algumas depressões, principalmente em lagoas sobre formações não carbonáticas existentes na região.

Palavras-chave: Dinâmica Hídrica; Evolução Cárstica; Geoprocessamento.

4.1 Introdução

Na porção central do estado de Minas Gerais, está localizada a área de proteção ambiental Carste Lagoa Santa, onde ocorre uma série de lagoas associadas ao grande sistema fluvial do rio das Velhas, pertencente à bacia do rio São Francisco. Esta região abriga a Área de Proteção Ambiental (APA) Carste de Lagoa Santa, uma das principais áreas de pesquisas relacionadas a arqueologia, paleontologia, espeleologia e hidrogeologia do território brasileiro. Marcada pelo turismo de grutas, a região é mundialmente conhecida por abrigar diversos sítios arqueológicos, entre os quais foi encontrado o fragmento de esqueleto humano mais antigo das Américas, um crânio com cerca de 11 mil anos apelidado de Luzia (Feathers *et al.*, 2010).

Nos últimos anos, o governo de Minas Gerais promoveu estratégias de crescimento econômico para região, como a expansão do Aeroporto Estadual e novas instalações da Cidade Administrativa (sede do governo do estado), colocando a região sob novos conflitos de interesse ambiental. Dessa forma, a compreensão dos fatores geológicos e hidrogeológicos acrescenta conhecimento a essa área de rica diversidade científica e cultural e que hoje representa um dos principais vetores de crescimento demográfico da região metropolitana do município de Belo Horizonte, capital do estado.

A geomorfologia cárstica tem como principal característica, rochas carbonáticas passíveis de sofrerem dissolução química, gerando feições de relevo peculiares como: cavernas, espeleotemas, depressões, sumidouros, condutos entre

outras formas dissolutivas (Kohler, 1989; Ford & Williams, 2007). As depressões cársticas, comumente marcadas por dolinas e uvalas, podem ser caracterizadas em função de sua largura, comprimento e profundidade, e diferenciadas conforme as proporções entre estes parâmetros (White, 1988).

Estas depressões assumem particular importância na recarga de aquíferos cársticos-fissurais, uma vez que essas estruturas geomorfológicas favorecem a concentração de água de escoamento superficial para uma região específica. Não obstante, algumas depressões cársticas podem não contribuir tão veementemente para a recarga hídrica, pois devido as características litoestruturais e ou a menores espessuras da zona vadosa podem apresentar baixa permeabilidade ou mesmo se comportarem como zonas de descarga, e, neste caso, as águas subterrâneas seriam ascendentes. Ambas exibem espelhos d'água exercendo um papel excepcional na manutenção ecológica do bioma a que está inserida. Estas depressões inundadas constituem as lagoas abordadas neste estudo.

Prejuízos ao turismo ecológico são passíveis de ocorrer na eventualidade de comportamento errático destas lagoas. Ao longo das últimas décadas vem sendo observada uma diminuição do volume de algumas lagoas durante a estação úmida e um prolongamento da estação seca, o que representa uma ameaça para ecossistema local (Macedo, 2020), uma vez a região se localiza entre dois *hotspots* de biodiversidade, o Cerrado e a Mata Atlântica (Myers *et al.* 2000), e é importante refúgio para alimentação e repouso de aves migratórias (Warming, 1908; Nóbrega, 2015).

Os autores a seguir já pontuaram sobre a alta frequência de depressões cársticas na região, apresentando lagoas com padrões irregulares de variação do nível d'água, destacando complexos ciclos de comportamentos hídricos. Warming (1908) observou que a Lagoa de Quinta, localizada no Parque Estadual do Sumidouro, se torna bem grande no período chuvoso, a lagoa se torna bem grande, mas que no final do período de seca a água escoar por sumidouros e dutos até se tornar apenas um riacho. Kohler (1978) pontuou em seu estudo, que a Lagoa central de Lagoa Santa se encontra em estado de equilíbrio, tendo sido formada pela dissolução do pacote calcário sotoposto ao filito. Auler (1994) classificou três tipos de lagos na área: lagos estáveis sobre o filito; e lagos sazonais contendo sumidouros no fundo das dolinas nas porções topograficamente mais elevadas; e lagos de lençol freático que estão sobre o carbonato, em elevações mais baixas. Macedo & Alvarez (2021) analisaram

o comportamento hidrológico da Lagoa do Sumidouro, grande representante destes corpos hídricos na região, ao longo dos seus últimos 40 anos, por meio técnicas de geoprocessamento, hidrologia superficial, subterrânea e análises meteorológicas. Os autores observaram a relação causa-efeito entre a pluviometria e o volume da lagoa, e concluíram que há uma elevada dependência deste corpo hídrico com a quantidade de chuvas e o seu “secamento” desde o ano de 2013 foi atribuído ao aumento considerável das temperaturas médias anuais do ar.

Com o avanço tecnológico e aperfeiçoamento das metodologias das ciências geológicas, a compreensão da evolução do meio físico pode se tornar mais assertiva, satisfazendo as diferentes necessidades impostas pelo homem (Malagutti & Cottas, 1993).

Junior *et al.* (2008) destaca que o sensoriamento remoto constitui boa ferramenta para descrever padrões exocársticos e para entender os mecanismos que condicionam a evolução desse sistema. Assim, o presente estudo tem como objetivo o entendimento da evolução geomorfológica e da dinâmica hídrica das lagoas presentes na APA Carste de Lagoa Santa e região ao redor, com ênfase na utilização de ferramentas de análise geoespaciais. O uso de análises espaciais em terrenos cársticos vem se mostrando uma ferramenta extremamente precisa e adequada para diversos tipos de estudos nestes terrenos, que possuem como característica uma constante transformação.

Nesse contexto, Luo *et al.* (2021) investigou mudanças erosivas em três bacias de rochas carbonáticas localizadas no sudoeste da China, por meio de imagens espaço-temporais entre os anos de 1985 e 2014. Papadopoulou-Vinotti *et al.* (2013) produziram um mapa de susceptibilidade ao colapso numa região cárstica no norte da Grécia combinando estatísticas multivariadas e o Sistema de Informação Geográfica. O sensoriamento remoto, alinhado ao monitoramento da evolução geomorfológica cárstica, também é amplamente utilizado em bacias hidrográficas costeiras, conforme apresentado em estudos na Itália (Teofilo *et al.*, 2019) e no Marrocos (Theilen-Willige *et al.*, 2014). Junior (2008) destaca que o sensoriamento remoto constitui uma boa ferramenta para descrever padrões exocársticos e na compreensão dos mecanismos que controlam a evolução deste sistema.

Assim, o objetivo principal deste estudo é compreender a evolução geomorfológica e a dinâmica hídrica das lagoas presentes na APA Carste de Lagoa

Santa e região circundante, com ênfase na utilização de ferramentas de análise geoespacial. Para isso, foram traçados três objetivos específicos: (i) identificar todas as lagoas presentes na região de estudo nos últimos 35 anos; (ii) definir o comportamento hídrico dessas lagoas, quais são perenes e quais são intermitentes; e (iii) apresentar as principais características geológicas e morfoestruturais de cada lagoa identificada na região.

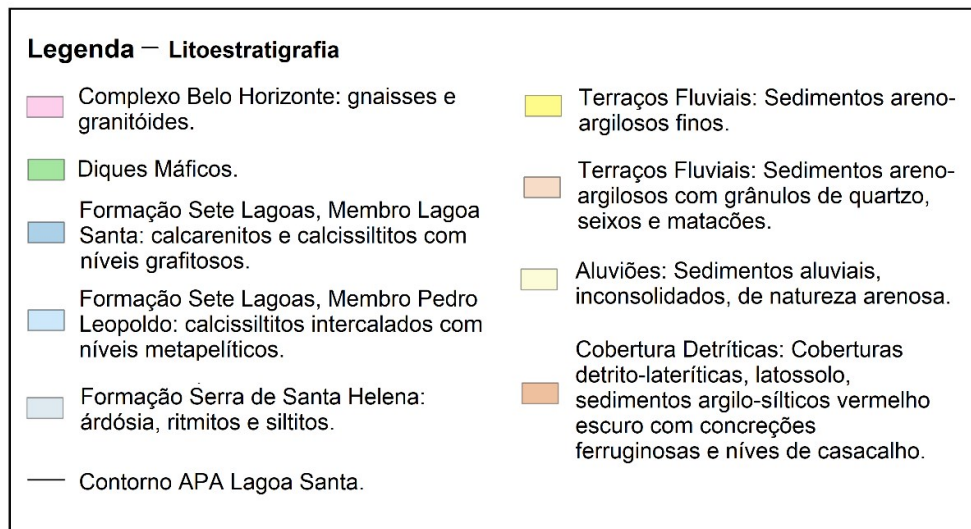
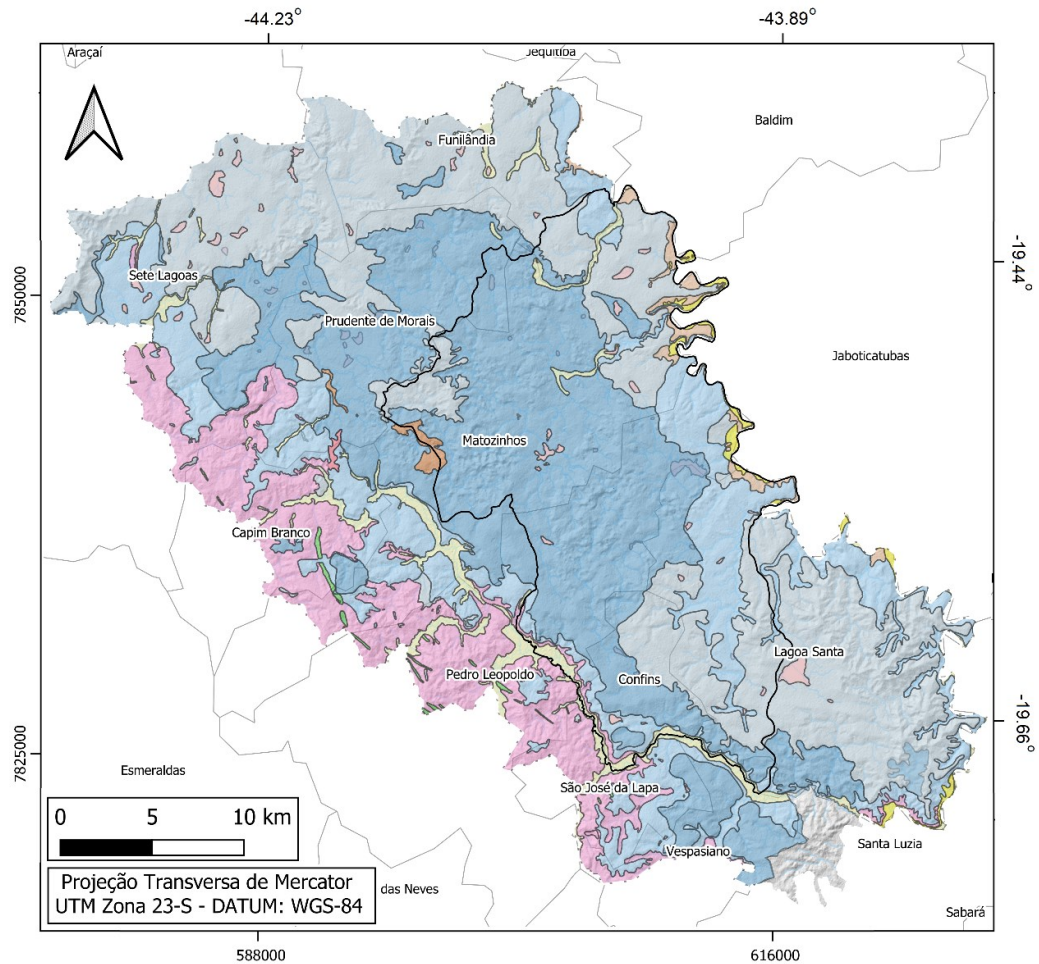
4.2 Caracterização da área de estudo

A área de estudo localiza-se 30 km a norte de Belo Horizonte, capital do estado de Minas Gerais (Figura 4.1). Apresenta uma área de 1197,5 km², englobando 11 municípios na região e toda extensão Área de Proteção Ambiental (APA) Carste de Lagoa Santa, denominada por Kohler (1978) como “região cárstica de Lagoa Santa”, sendo um dos ambientes amplamente estudado desde o século XIX (Pessoa, 2005).

sobreposto por unidades basais neoproterozoicas das formações Sete Lagoas e Serra de Santa Helena, do Grupo Bambuí (Supergrupo São Francisco). Estas formações podem estar cobertas por porções significativas de coberturas sedimentares de idade mais jovem (Alkmim & Martins Neto, 2001) (Figura 4.2). O Cráton São Francisco serviu como base para a deposição de sedimentos pelito-carbonáticos marinhos sobre a plataforma epicontinental estável, sendo este, um ambiente continental afetado por regressões e transgressões marinhas, com idade mínima relativa de 630 Ma (Neoproterozoico) (Dardenne, 1978; Schobbenhaus *et al.*, 1984; Zalán & Romeiro Silva, 2007).

O complexo Belo Horizonte aflora nas porções oeste e sul da área e é composto essencialmente por granito-gnaiss e migmatitos, datados entre o Arqueano e o Paleoproterozoico (Ribeiro *et al.*, 2003; Ribeiro *et al.*, 2016). O Grupo Bambuí, na área de estudo, é composto por unidades litoestratigráficas que foram depositadas desde o embasamento do Cráton até os cinturões móveis marginais.

Figura 4.2: Mapa Geológico da área de estudo sobre um modelo digital de elevação (MDE).



Fonte: Adaptado de “Projeto VIDA” (Cabral, 1994; Ribeiro et al., 2003).

A Formação Sete Lagoas, é representada por uma sucessão carbonática composta por calcários, dolomitos e metapelitos intercalados. Esta formação é subdividida em dois membros: Membro basal Pedro Leopoldo e o Membro de topo

Lagoa Santa (Viana *et al.*, 1998; Ribeiro *et al.*, 2003; Uhlein *et al.*, 2018). Os litotipos que caracterizam o Membro Pedro Leopoldo são calcissiltitos e ou microesparitos, esparitos, micritas, subordinadamente calcarenitos muito finos, margas e milonitos protoderivados (Ribeiro *et al.*, 2003). Já o Membro Lagoa Santa, o qual apresenta maior expressão na área de estudo é constituído de um calcário cinza-escuro a preto quando “fresco” e cinza médio a claro quanto mais alterado, de granulometria fina a grossa (Ribeiro *et al.*, 2016). Estas formações se encontram espalhadas na porção central da área de estudo.

A Formação Serra de Santa Helena ocorre tipicamente na serra homônima em Sete Lagoas, estendendo a norte da área de estudo e também na porção sudeste. Nesta formação predominam litótipos de origem siliciclástica e mais raramente sedimentos carbonáticos. Os siliciclásticos predominantemente muito finos, correspondem a siltitos e argilitos, em grande parte decompostos a semi-alterados, mas são encontrados frescos em pedreiras (Ribeiro *et al.*, 2003). As demais unidades presentes no Grupo Bambuí não serão descritas por não aflorarem na região de estudo, não sendo importantes para esta pesquisa.

As Coberturas Terciárias se fazem presentes na região em formas de capas de alteração limonitizadas e ou representando colúvios de solos ferruginosos laterizados. Ocorrem ainda terraços aluviais e aluviões nas porções que margeiam os principais rios e córregos.

4.2.2 Geomorfologia

A Geomorfologia da região é reflexo das estruturas e alterações intempéricas das rochas carbonáticas da Formação Sete Lagoas e dos metapelitos da Formação Serra de Santa Helena. Essa relação litológica reflete nitidamente nas características morfológicas de superfície, tornando-se importantes ferramentas na compreensão da paisagem. As altitudes variam de 900 metros, na porção oeste da área, a valores entre 600 e 650 metros na porção leste, onde se encontra com o curso do Rio das Velhas. Neste trabalho optou-se pela classificação geomorfológica realizada por Kohler (1989) e Hermann (1998), em dois compartimentos geomorfológicos denominados: domínio cárstico e domínio não cárstico.

O domínio cárstico, constituído de rochas carbonáticas, é marcado por altos paredões rochosos, desfiladeiros e abismos, dolinas de abatimento que ligam o

exocarste ao endocarste, presentes em quase toda extensão da área, principalmente nas regiões centrais. Herrmann (1998) pontua que este compartimento, predomina entre as altitudes de 800 a 650 metros, apresentando mudanças hipsométricas bruscas marcadas por feições cársticas em superfície e em profundidade. As formas superficiais e subsuperficiais quase sempre se apresentam intimamente ligadas entre si.

Nesta unidade são observados desfiladeiros e abismos com altos paredões e grande maciços rochosos com uma elevada concentração de cavernas, vales fechados, vales cegos, torres, arcos e pontes ruiniformes. Outras feições típicas deste domínio são: cinturões de uvalas, planalto de dolinas, depressões largas de fundo aplainado (poljés), depressões formadas por dissolução e ou por colapso, com formas amebóides, côncavas (tigela), cônicas (funil), cilíndricas (caldeirão) grandes ou pequenas, apresentando encostas com declividades íngremes e ou suaves, com ou sem paredões ou maciços coligados, além de lagoas, com água perene ou intermitente (Kohler, 1989; Herrmann *et al.*, 1998; Ribeiro *et al.*, 2003).

O domínio não cárstico, controlado por rochas cristalinas, metamórficas e sedimentares, está presente nas porções de borda da área (norte, oeste e sudeste) e é onde afloram as rochas do complexo Granítico-Gnáissico arqueano e as rochas da Formação Serra de Santa Helena. Este domínio tende a se localizar nas cotas topográficas mais altas, podendo atingir altitudes acima de 800 metros, caracterizada predominantemente por colinas com topos alongados e convexos entalhadas por um padrão de drenagem dendrítico. Raras feições cársticas são observadas sobre este domínio, tais como dolinas, paredões e vertentes com rugosidades, atestando a manifestação superficial de carstificação em profundidade dos carbonatos de cálcio (Herrmann *et al.*, 1998).

O comportamento geomorfológico dita as características dos cursos d'água presentes na região, como consequência da alta permeabilidade causada pela porosidade secundária das rochas locais, poucos cursos d'água são observados, e em alguns locais, principalmente condicionados às grandes irregularidades de relevo, desenvolvem-se sumidouros, surgências e ressurgências (Amaral, 2018).

4.2.3 Clima

A região de estudo está associada às condições médias gerais da circulação atmosférica sob o domínio do sistema estacionário denominado Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul. Este sistema apresenta elevado grau de umidade absoluta e elevada temperatura interior devido à intensa radiação solar incidente. No entanto, apresenta condições de estabilidade atmosférica devido aos efeitos de subsidência ou correntes verticais descendentes. De acordo com a classificação de Köppen & Geiger (1928) a área é enquadrada na categoria Awi, definida como um clima quente, com temperatura no mês mais frio superior a 18 °C, e duas estações alternadas, uma chuvosa (verão), e outra seca (inverno), com amplitudes térmicas anuais inferiores a 5 °C (IEF, 2010).

A média termométrica anual é da ordem de 20,9 °C com o inverno ameno, às vezes com temperaturas mais baixas associadas à invasão de frentes frias advindas do anticiclone polar, e o verão quente e prolongado. O regime de ventos segundo Kohler (1989), tem total de 16,02% direcionados para norte, e 52,74% direcionados para nordeste. O déficit hídrico ocorre dos meses de abril a setembro, com um máximo de 42mm em agosto. Já o excedente ocorre entre novembro e março, com um máximo de 183 mm em janeiro. A estação chuvosa é bem definida e estende-se entre outubro e março, passando por períodos de transição entre o seco e o chuvoso nos meses de setembro e abril.

De acordo com os dados históricos do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) registrados pela estação convencional de Sete Lagoas, Ponte Raul Soares, Pedro Leopoldo e Vespasiano, pertencente ao próprio Instituto e presentes da área de influência desta pesquisa, apresenta média anual pluviométrica, considerando o período escolhido neste trabalho, de 1985 a 2020, de 1212,7 mm. Entretanto, destaca-se o ano de 2014 com o registo anual de 551 mm, valor de precipitação bem abaixo da média histórica. Meneses (2003) ressalta que a variação climática gera consequências diretas para a região cárstica, acometendo suas características hídricas, como o fluxo e a composição química da água, além do grau e modo de atuação dos processos morfogenéticos, incluídos nestes a dissolução de rochas.

4.2.4 Hidrologia e Hidrogeologia

A área localiza-se na depressão do Alto-Médio Rio São Francisco e integra-se à sub-bacia do rio das Velhas (IBGE, 2006). A rede de drenagem superficial e subterrânea da APA Carste de Lagoa Santa é caracterizada pela grande variedade de condutos e cavernas, frequentemente interligados com feições cársticas, como dolinas, uvalas, sumidouros e surgências (Teodoro, 2020). Essas particularidades a torna um sistema complexo e interconectado, com a necessidade de sucessivos e detalhados estudos para a sua compreensão. A rede de drenagem é predominantemente subterrânea, com baixa densidade de escoamento superficial.

De uma forma geral, as nascentes dos rios existentes na área de estudo estão presentes em terrenos carbonáticos, e devido a uma geomorfologia cárstica bem desenvolvida as águas superficiais junto com maior parte da água pluvial, são drenadas para condutos subterrâneos e tem como destino os níveis de base local (rio das Velhas e ribeirão da Mata) (Ribeiro *et al.* 2016; De Paula, 2019). Os principais cursos d'água da área são exatamente os coincidentes com os limites da APA, ou seja, o rio das Velhas no limite leste da área, sendo o exutório do sistema e o ribeirão da Mata, seu afluente, no limite sul e sudoeste (De Paula, 2019), Figura 4.2.

As sub-bacias hidrográficas mais representativas das zonas carstificadas são definidas pelos córregos Samambaia, o qual drena suas águas para a lagoa do sumidouro, o córrego Palmeiras, localizado a norte da cidade de Matozinhos, onde suas águas são drenadas pelo maciço calcário da Cimento Mauá Minerações (Vieira, 2018). As sub-bacias dos córregos Jaguará e Gordura, são responsáveis por alimentar direta e indiretamente o rio das Velhas (Meneses, 2003).

Warming (1908), Lund (1950) e Kohler *et al.* (1978) descrevem sobre a alta frequência de lagoas na região de estudo, as quais podem apresentar padrões irregulares de variação de nível d'água. Destacando complexos ciclos e comportamentos hídricos, a exemplo da existência de ciclos secos de 15 anos encontrado por Kohler e seus colaboradores. O monitoramento das lagoas é imprescindível para a compreensão do seu comportamento hídrico.

Auler (1994), explana sobre a ocorrência de três tipos de lagoas na região da APA Carste Lagoa Santa:

- i) Lagoas sobre filitos;
- ii) Lagoas tipo dolina;

iii) Lagoas tipo nível d'água do aquífero aflorante.

As lagoas dos tipos dolina e nível d'água aflorante são restritas às rochas calcárias, em que as lagoas tipo dolina ocorrem primordialmente em altas topografias no fundo de depressões cársticas profundas, e as lagoas do tipo nível d'água aflorante ocorrem em locais de baixa elevação topográfica. Em geral as lagoas sobre filitos apresentam-se estáveis, enquanto as sobre rochas calcárias possuem níveis d'água oscilantes, podendo secar em certas ocasiões. A cota do nível d'água das últimas lagoas citadas, está relacionada com a quantidade de precipitação pluvial e com a permeabilidade da cobertura pedológica no fundo dos lagos (Auler, 1994).

Na região da APA Carste de Lagoa Santa predominam os aquíferos cársticos semi-confinados a livres, caracterizados por uma intrincada rede de condutos subterrâneos que estão interconectados a numerosas feições cársticas superficiais, como dolinas, uvalas, cavernas, surgências e sumidouros (Viana *et al.*, 1998). São definidas quatro unidades hidrogeológicas distintas, a citar, da base para o topo: (i) o aquífero fissural representado pelas das rochas do Complexo Belo Horizonte; (ii) o aquífero cárstico-fissural composto pelas rochas carbonáticas da Formação Sete Lagoas; (iii) o aquífero constituído pelos metapelitos da Formação Serra de Santa Helena; e (iv) os aquíferos granulares representado pelas coberturas terciárias detrito-lateríticas e cenozoicas aluvionares (De Paula, 2019).

O aquífero fissural do embasamento cristalino é o de menor expressão na área de estudo e está sobre domínio das rochas do complexo gnáissico migmatítico Belo Horizonte. Trata-se de um aquífero confinado em grande parte da área pelos metassedimentos do grupo Bambuí, em uma pequena porção da área de estudo, ele pode ser aflorante, adquirindo caráter de aquífero livre (De Paula, 2019). A recarga deste aquífero se dá pelo encaixe de parte dos cursos d'água em sistemas de fratura do embasamento cristalino e à infiltração de água através das coberturas coluvionares (Pessoa, 1996). Este é o aquífero de menor expressão existente na área de estudo.

O aquífero cárstico-fissural, de maior importância e representatividade na região, faz parte do Sistema Aquífero Sete Lagoas (SACSL) e sua composição é predominantemente carbonática com intercalação pelítica e influência tectônica (Pessoa, 2005; Galvão, 2015). Este aquífero encontra-se limitado na base pelo Complexo Belo Horizonte e no topo pelos metapelitos da Formação Serra de Santa Helena. Onde as rochas da Formação Sete Lagoas afloram, o aquífero adquire um

caráter livre e onde é sotoposto pelo aquífero Serra de Santa Helena, sua característica pode mudar para um aquífero semi-confinado (De Paula, 2019). A recarga deste aquífero se dá principalmente nas porções de calcários aflorantes, incluindo diversas estruturas cársticas de abatimento na região (dolinas e uvalas), a outra parte da recarga é vinculada as coberturas das regiões planas e planaltos cársticos anteriormente pontuada por Auler (1994).

Os calcários do membro Lagoa Santa constituem a porção mais carstificada do sistema aquífero cárstico-fissural, e devido à maior concentração de calcita, o processo de dissolução é favorecido, aumentando a concentração de sais na água, principalmente carbonato de cálcio, e conseqüentemente, a elevação da dureza e a alcalinidade (Mourão *et al.* 2001). A facilitação do processo de dissolução é também agente de formação de feições cársticas em subsuperfície, as quais propiciam uma série de características peculiares quanto à transmissividade do aquífero. O membro Pedro Leopoldo, representado por metassiltitos, filitos, calciofilitos, calcários silicosos cinza escuros, constitui a outra porção dos aquíferos cárstico-fissurais. Possui maior potencial hídrico nas porções tectonizadas, quando presentes, devido à permeabilidade secundária.

Os metapelitos da Formação Serra de Santa Helena possuem uma menor potencialidade aquífera, a qual é mais elevada em zonas de fraturas e em zonas de contato com a Formação Sete Lagoas. O Aquífero Serra de Santa Helena apresenta baixa permeabilidade, mas capacidade de armazenamento relativamente elevada. Possui porosidade fissural pouco desenvolvida, o que deve propiciar baixos valores de condutividade hidráulica (Ribeiro *et al.*, 2003). Os Aquífero granulares de Cobertura incluem aluviões, cangas e lateritas, situado majoritariamente na zona não saturada, onde parte da recarga dos aquíferos subjacentes é processada.

4.3 Métodos

Inicialmente foram detectados, por meio de geoprocessamento, os espelhos d'água das lagoas da área de estudo. Essas feições foram aferidas por sensoriamento remoto, junto com a parametrização e medição de variáveis morfológicas e estruturais existentes na região do projeto. Em seguida foi realizada a análise do comportamento hídrico por meio do monitoramento dos espelhos d'água dos anos hidrológicos

distintos, entre 1984-1985 e 2019-2020. O conjunto de dados hídricos, morfológicos e estruturais foram processados por ferramentas de estatística descritiva e de similaridade. Para cada ano hidrológico foram escolhidas duas imagens, uma na estação seca, onde foi escolhida a melhor imagem entre os meses junho a setembro, e outra na estação chuvosa, onde foi escolhida a melhor imagem entre os meses dezembro a março.

Todos os Mapas, *Rasters* e arquivos vetoriais foram geoprocessados no sistema de coordenada Universal Transversa de Mercator, com Datum WGS-1984, Zona 23S. Todas as atividades de geoprocessamento foram realizadas utilizando ferramentas do GRASS 7.8.3 do *software* QGIS® (GRASS PROJECT, 2013).

4.3.1 Identificação e detecção das lagoas

Foram selecionadas cenas dos satélites Landsat de cobertura terrestre fornecidas no site do Serviço Geológico Norte Americano (USGS, 2021). Essas cenas compreenderam as estações seca e chuvosa de cada ano hidrológico entre 1984 e 2020, com baixa interferência de nuvens (menor que 30%). Foram selecionadas imagens do satélite *Landsat 5 TM*, *Landsat 7 ETM+* e *Landsat 8 OLI/TIRS*. No *software* QGIS, o processamento inicial foi a partir da criação de mosaicos de imagens *Landsat*, unindo cenas de mesma data e mesma órbita, com objetivo de obter cenas únicas cobrindo toda área de estudo.

Para cada mosaico anual gerado foi realizada a composição de bandas espectrais visando o aumento dos contrastes entre água e as demais coberturas presentes nas imagens. As composições coloridas adotadas foram a de falsa cor: *Red-Green-Blue* (RGB) com as bandas espectrais 5, 4 e 3 nas *Landsat 5 TM*, bandas 7, 4 e 2 nas *Landsat 7 ETM+* e 6, 5 e 4 para as *Landsat 8 OLI/TIRS*. As sequências de empilhamento de bandas foram diferentes entre as *Landsat 5 TM*, *Landsat 7 ETM+* e *Landsat 8 OLI/TIRS* devido aos diferentes intervalos entre os comprimentos de onda (bandas espectrais) dos sensores (Silva *et al.*, 2005; Martins *et al.*, 2007 e Rosa *et al.*, 2011).

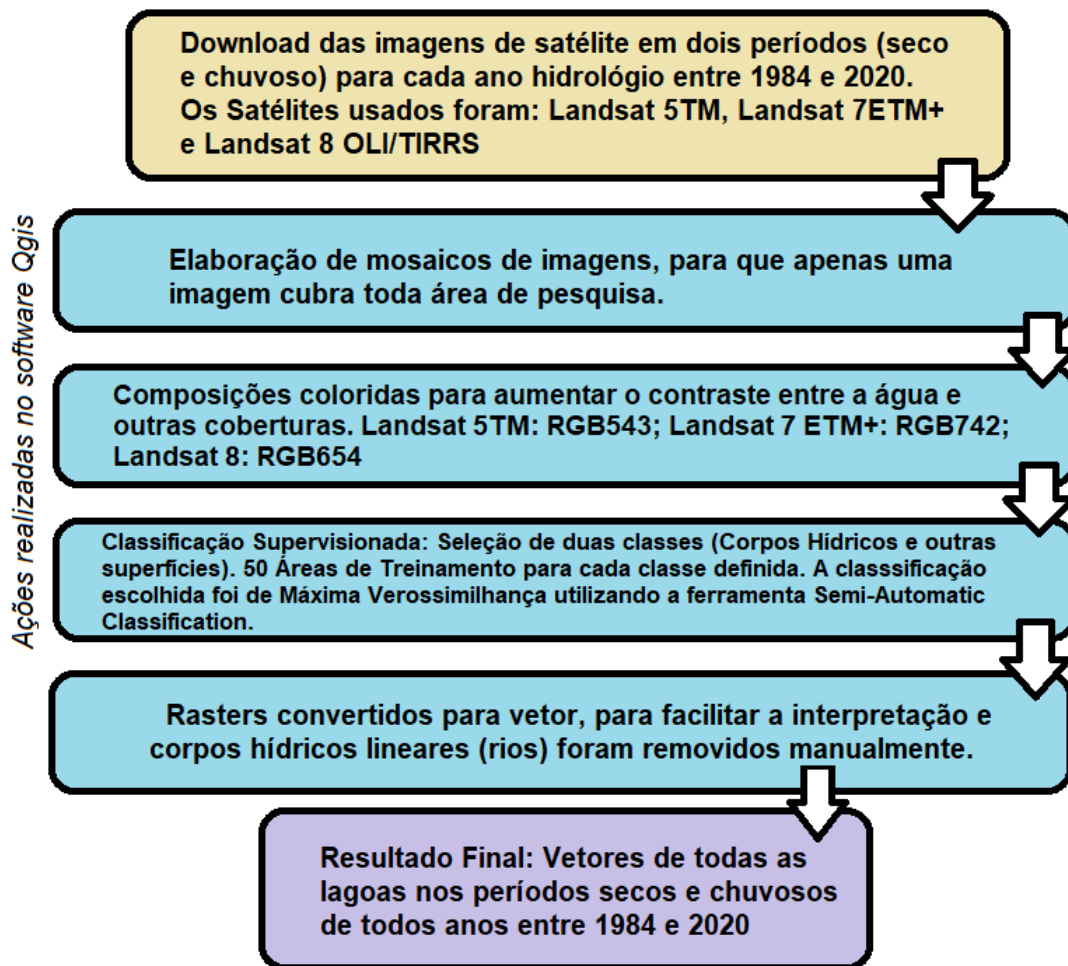
Com as composições coloridas realizadas, foram definidas duas classes para a classificação supervisionada, denominadas ROIs (*Region of Interest*): corpos d'água e demais superfícies. Para cada uma destas classes foram selecionadas

aproximadamente 50 áreas de treinamento, com características particulares das classes selecionadas, este treinamento é fundamental para obter uma boa representatividade de cada superfície definida. A classificação aqui foi fundamentada na cor, textura, tonalidade e sombras, estas características são fundamentais para auxiliar na separabilidade das áreas de treinamento das classes pré-definidas (Meneses & Almeida, 2012).

Seguiu-se a classificação por meio do classificador de Máxima Verossimilhança utilizando-se a ferramenta *Semi-Automatic Classification* para efetuar a classificação por meio do classificador da Máxima Verossimilhança, que calcula a probabilidade que um dado pixel tem de pertencer a uma classe específica e rotula a classe que tem mais alta probabilidade (Meneses & Almeida, 2012 e Andrade, Francisco & Almeida, 2014).

Os corpos d'água com padrões lineares foram descartados manualmente por se assemelharem mais a rios e não a lagoas, e o resultado obtido no final do processo foi a geração de imagens *Raster* da cobertura das estações seca e chuvosa para todos os anos entre 1984 e 2020. Os *Rasters* foram transformados em arquivos vetoriais para facilitar a interpretação destes dados. Um fluxograma simplificado das atividades de geoprocessamento pode ser observado na Figura 4.3.

Figura 4.3: Fluxograma das atividades de geoprocessamento realizadas para identificar a existência das lagoas na área de estudo durante períodos secos e chuvosos entre 1984 e 2020.



Fonte: Autor.

4.3.2 Periodicidade das Lagoas

Com os espelhos d'água definidos para os períodos seco e chuvoso entre os anos hidrológicos de 1984 e 2020, foi possível observar o comportamento de todas as lagoas em termos de frequência com que aparecem cheias ou secas. Nesta etapa foram definidos quais lagoas teriam comportamento perene, intermitente ou as que se secaram totalmente, bem como o surgimento de novas lagoas.

Lagoas perenes são aquelas que nunca secaram no intervalo utilizado neste estudo. As intermitentes são aquelas que apresentavam água nos períodos da década de 1980 e mostram o comportamento periódico de apresentar água ou não, em anos diferentes. As lagoas que desapareceram, secaram em determinado período e nunca mais encheram, e foram classificadas como lagoas que secaram. Por fim, as novas

lagoas definidas neste estudo não existiam nos primeiros 10 anos pesquisados (1984-1994) e em algum momento, após esse intervalo, apareceram. Estas podem ser perenes ou intermitentes.

4.3.3 Identificação e detecção de parâmetros morfológicos e estruturais

Inicialmente foi adquirida a imagem de radar ALOS (*Advanced Land Observing Satellite*) PALSAR (*Phase Array L-band Synthetic Aperture Radar*), com resolução (12,5 metros) pela *Japan Aerospace Exploration Agency* (JAXA, 2021). A partir desta imagem foi gerado um modelo digital de elevação (MDE) que deu suporte para a aferição da posição de cada lagoa existente na área de estudo com seus valores de altimetria. Essa imagem também forneceu embasamento para a determinação das curvas de nível e para identificar as depressões de relevo existentes na região, as quais foram aferidas por meio de uma análise sistemática fundamentada em sensoriamento remoto visual através de imagens RGB do *software* Google Earth® (GOOGLE, 2022) e descartadas as falsas depressões que ocasionalmente são erros topográficos.

O *software* Google Earth® forneceu embasamento para definir as depressões cársticas em arquivos vetoriais, permitindo classificar o estágio de evolução destas depressões cársticas, sendo quando se apresentavam em formatos fechados circulares ou elípticos eram definidos como dolinas (Cvijić, 1893) e quando essas depressões se alargavam, gerando grandes conexões, foram definidas como uvalas (Ćalić, 2011), contendo a união de uma ou mais dolinas, algumas depressões mais alongadas também foram consideradas referentes a pontos de absorção que poderiam estar capturando um curso d'água.

Neste *software* ainda foi possível definir, visualmente, a presença ou não de maciços rochosos próximos aos diversos tipos de lagoas definidas neste estudo. As depressões e maciços não cársticos foram separados, pois as regiões não se mostram relevantes para a análise do carste enfatizada neste estudo, assim como depressões geradas por barramentos antrópicos, também foram retiradas pela análise manual sistemática no *software* citado anteriormente.

Cada imagem ALOS PALSAR foi apresentada em relevo sombreado sob quatro azimutes distintos (0°, 45°, 90° e 135°), isto é, com diferentes iluminações, as quais

foram utilizadas para a extração automática de lineamentos estruturais através do algoritmo *Line* da ferramenta *PCI Geomatics*, após esta extração, uma filtragem sistemática manual foi realizada, descartando feições lineares não naturais que foram geradas. Esses lineamentos, bem como a altimetria, geologia, depressões altimétricas e maciços rochosos foi relacionado com as lagoas levantadas nesta pesquisa.

Por fim, foi calculado o perímetro destas lagoas, correspondendo ao comprimento da margem mais externa dos espelhos d'água, variando de acordo com seu tamanho e formato. Os valores de perímetro foram obtidos a partir da ferramenta *Calculate Geometry/perimeter* da tabela de atributos do *software* QGIS dos arquivos vetoriais levantados. Com os valores perimétricos das lagoas obtidos em diversos anos, neste estudo optou-se por escolher o perímetro médio dos momentos em que estes corpos hídricos apresentavam água em seu interior.

4.3.4 Análise de Similaridade entre as Lagoas

Para o entendimento da distribuição e o comportamento das variáveis geológicas, altimétricas, morfológicas e estruturais nas lagoas foi realizada uma estatística descritiva (valores mínimos, máximos, mediana, média, desvio padrão e erro padrão), com intuito de identificar algum tipo de similaridade entre as 153 lagoas definidas nesta análise espacial e observar padrões semelhantes entre os corpos hídricos. Por fim, essas análises forneceram embasamento para uma avaliação estatística de padrões, realizadas aqui de forma manual, podendo correlacionar subgrupos de similaridade entre si.

4.4 Resultados

4.4.1 Identificação e periodicidade das lagoas

Foram identificadas 153 depressões que apresentaram espelho d'água em algum momento dentro do intervalo temporal definido neste estudo, de 1984 a 2020. A partir da análise do comportamento dos espelhos d'água durante esse período, foram identificadas quatro classes principais de lagoas, quais são: lagoas perenes, as

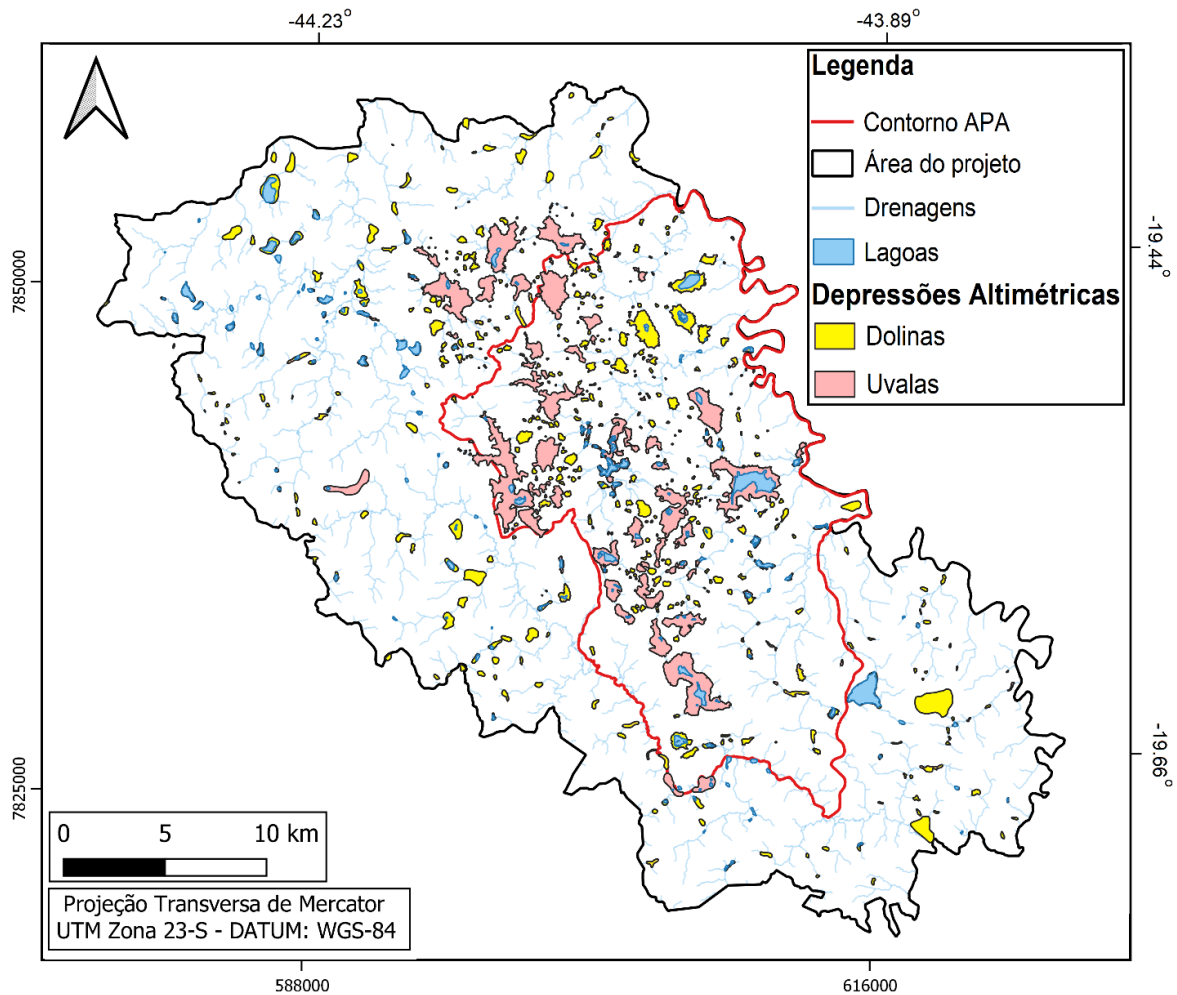
quais apresentaram lâmina d'água nas estações chuvosa e seca de todos os anos hidrológicos; lagoas intermitentes, as quais apresentam forte variação do espelho d'água mediante as estações seca e chuvosa, chegando a se apresentarem totalmente secas na estação seca ou mesmo permanecerem secas durante vários anos hidrológicos e vindo a surgirem novamente; lagoas novas, que não existiam em 1984 e vieram a surgir dentro do intervalo de tempo correspondente às imagens; e lagoas que secaram, as quais representam os espelhos d'água que secaram e não apareceram até o ano de 2020.

As 153 lagoas foram segregadas a partir do comportamento de seu espelho d'água em: 40 Lagoas Perenes, 89 Lagoas Intermitentes, 19 Lagoas Novas e 5 Lagoas que não existem atualmente na região. De modo a verificar o método de identificação aqui proposto, 44 lagoas foram visitadas em campo, sendo que apenas uma dessas não foi previamente identificada pela metodologia proposta, apontando a eficiência das técnicas utilizadas.

4.4.2 Identificação e detecção de parâmetros morfológicos e estruturais

A morfologia das depressões (Figura 4.4), os maciços rochosos (Figura 4.5) e os principais lineamentos estruturais negativos (Figura 4.6), foram identificados, e relacionados, visualmente, com todas as lagoas identificadas.

Figura 4.4: Depressões Altimétricas destacando as lagoas existentes na área de estudo. As lagoas representadas correspondem a todos os 153 espelhos d'água identificados ao longo do período de pesquisa das imagens – 1984 a 2020.



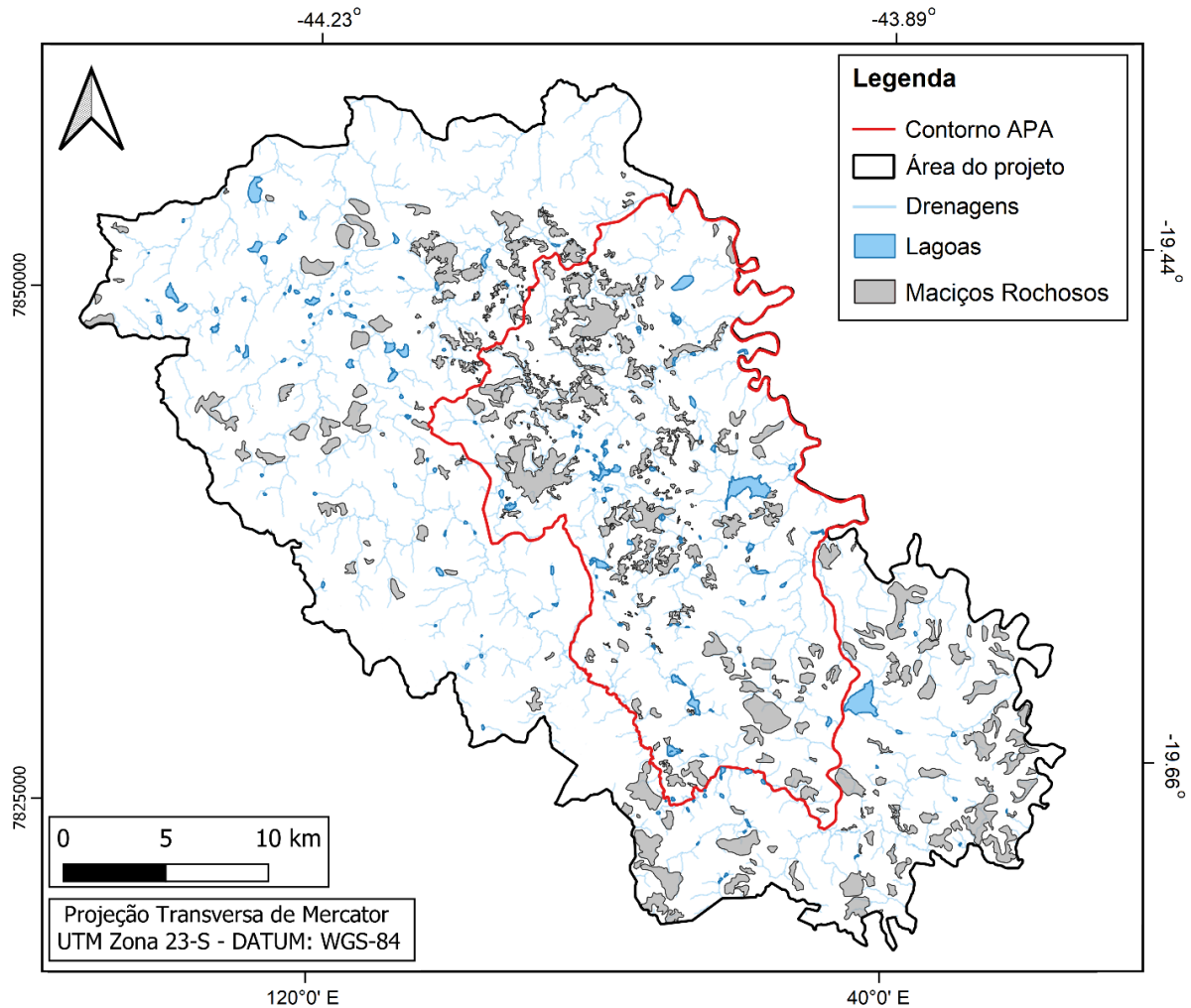
Fonte: Autor.

As depressões altimétricas identificadas foram classificadas morfologicamente como dolinas e como uvalas (Figura 4.4). As dolinas correspondem a depressões menores e apresentam formato mais arredondado e completamente fechado. As uvalas representam as maiores depressões altimétricas identificadas, e geralmente possuem formatos mais alongados e irregulares representando a coalescência de duas ou mais dolinas.

Cabe ressaltar que as feições cársticas do tipo poljes não foram aqui classificadas à parte, mas foram englobadas junto as uvalas, pois a classificação adotada das depressões se deu apenas pela forma. Os padrões morfológicos das depressões levantadas podem trazer informações de sua influência sobre a dinâmica

do comportamento das lagoas observadas no seu interior, estas relações serão discutidas a frente.

Figura 4.5: Maciços rochosos carbonáticos e lagoas presentes na área de estudo.

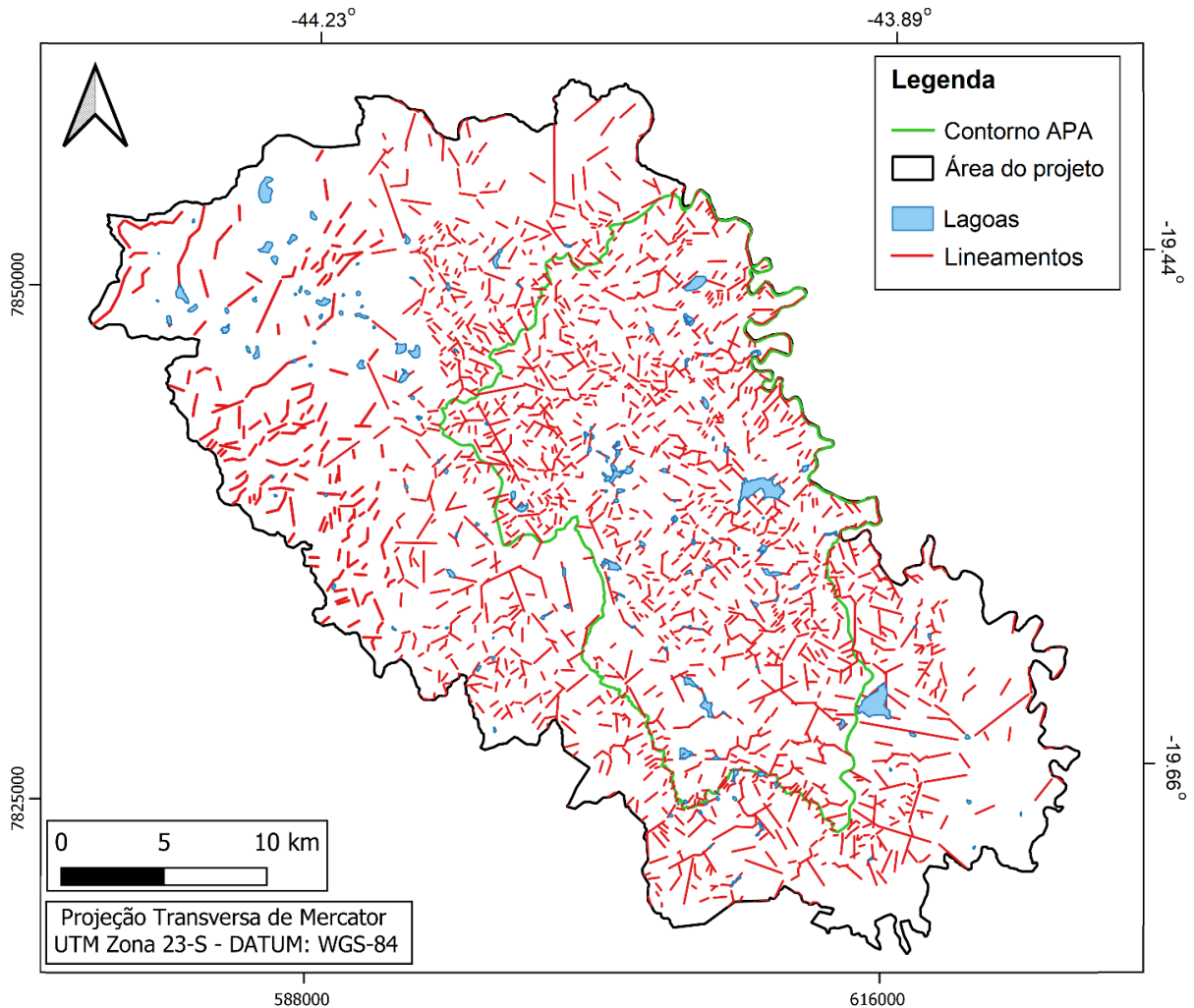


Fonte: Autor.

Os maciços rochosos carbonáticos identificados a partir das imagens analisadas por sensoriamento remoto (Figura 4.5) ocorrem como aflorantes e exumados (sem a presença de vegetação) e também cobertos por vegetação de diferentes portes.

A proximidade destes maciços com as lagoas foi levada em consideração devido ao elevado potencial desses corpos rochosos influenciarem na dinâmica hídrica das lagoas, principalmente devido a composição carbonática destes maciços que, devido a fraturas alargadas pela dissolução mineral podem atuar como meio facilitador de recarga gradual do aquífero, podendo constituir um dos fatores que influenciam na perenidade das lagoas.

Figura 4.6: Fotolineamentos estruturais e lagoas presentes existentes na área de estudo.



Os fotolineamentos estruturais negativos principais foram identificados (Figura 4.6) e enquadrados em quatro classes de direção principais: NW-SE, N-S, NE-SW e W-E. Estas estruturas podem representar a direção das discontinuidades que potencialmente favorecem o desenvolvimento de feições de dissolução e a percolação da água, podendo influenciar na dinâmica hídrica das lagoas. Optou-se por analisar apenas os lineamentos negativos neste estudo, pois eles são facilitadores para o movimento das águas, e os positivos, muitas vezes, podem funcionar como barreiras hidráulicas.

Segundo Ribeiro *et al.* (2016) e Amaral (2018), os fotolineamentos de direção NW-SE se relacionam com os azimutes das medidas de fraturas do embasamento cristalino da região e constituem a primeira fase de deformação geotectônica, onde foram geradas falhas normais de estilo *horst* e *grabens* no assoalho da bacia, ocasionando diferenças topográficas que apontam o forte controle das estruturas do

embasamento no desenvolvimento de feições cársticas em superfície. Os mesmos autores relacionam as direções estruturais de direção NE-SW e W-E, com as fraturas medidas nos metacalcários e metapelitos da Formação Sete Lagoas e Lagoa Santa, onde são principalmente correlacionadas com as direções dos dutos de dissolução.

Segundo Pessoa (2005), as direções N-S estariam associadas a diversos processos assinados nos carbonatos, como planos de cisalhamento interestratais, planos de acamamento, juntas e foliações tectônicas. Essas direções identificadas foram às de menor frequência neste estudo.

A partir dos resultados obtidos foi possível determinar todas as características geológicas e morfoestruturais que cada tipo de lagoa apresenta. Os resultados estão resumidos na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Tipos de lagoas existentes na região e suas características geológicas e morfoestruturais.

Total de lagoas e suas litologias: 153					
Unidades Geológicas	Lagoas Perenes (40)	Lagoas Intermitentes (89)	Lagoas Novas (19)	Lagoas que secaram permanentemente (5)	Nº Lagoas por característica analisada
Complexo Belo Horizonte	5	2	6	0	13
Diques Máficos	14	57	2	2	75
Fm. Sete Lagoas, Membro Lagoa Santa	11	10	2	0	23
Fm. Sete Lagoas, Membro Pedro Leopoldo	8	11	2	2	23
Fm Serra de Santa Helena	2	7	6	1	16
Aluviões	0	2	1	0	03
Total de lagoas no interior de Depressões Cársticas: 118					
Dolinas	28	38	11	4	81
Uvalas	5	31	1	0	37
Total de lagoas com maciços carbonáticos nas proximidades:					
Maciços	6	14	0	1	21
Total de lagoas: 153					
600-650 m	2	5	0	0	7
650-700 m	7	36	7	2	52
700-750 m	18	36	7	2	63
750-800 m	11	11	1	1	24
800-850 m	1	1	1	0	3
850-900 m	1	0	3	0	4
Total de lagoas associadas a fotolineamentos: 92					
NW-SE	5	15	3	2	25
N-S	5	7	0	0	12
NE-SW	11	22	4	0	37
W-E	2	13	3	0	18
Total de lagoa e seus tamanhoss: 153					
< 500 m	4	15	2	2	23
500 < x < 1000 m	17	38	13	2	70
1000 < x < 1500 m	4	16	2	1	23
> 1500 m	15	20	2	0	37

Fonte: Autor.

4.5 Discussão

4.5.1 Correlação entre características analisadas e dinâmica hídrica das lagoas

Do total de 153 lagoas identificadas, 75 (49%) estão sobre o Membro Lagoa Santa, da Formação Sete Lagoas, perfazendo o maior número por unidade geológica, e 23 (15%) estão sobre o Membro Pedro Leopoldo (Tabela 4.1). As lagoas vinculadas ao Membro Lagoa Santa são em maioria intermitentes (57 lagoas, 76%) e representam 64% de todas as lagoas intermitentes da área.

O Membro Lagoa Santa, mais carstificado, é a unidade geológica que abriga o principal aquífero cárstico na região, cujo calcário é mais puro e com feições de dissolução mais evoluídas, levando a uma maior dificuldade no armazenamento da água superficial, corroborando o caráter cíclico destas lagoas.

De 23 lagoas associadas ao Membro Pedro Leopoldo, menos carstificado, 10 (43,5%) são intermitentes e 11 (47,8%) são perenes. A maior representatividade de lagoas perenes neste membro, proporcionalmente ao total de lagoas de cada membro, pode ser atribuída ao caráter impuro do calcário que o torna menos permeável e, conseqüentemente, com maior capacidade de retenção.

De 23 lagoas ligadas à Formação Serra de Santa Helena a maior proporção é de lagoas intermitentes, 11 (47,8%), seguida das lagoas perenes, com 8 (34,7%). As lagoas intermitentes sobre a Formação Serra de Santa Helena podem ser fruto do abatimento dos pacotes carbonáticos abaixo que se tornaram lagoas de característica sedimentar (fundo pelítico) em depressões de relevo, podendo ter maiores influências das variações do nível de base regional.

As lagoas novas estão presentes em maior número junto as rochas graníticas do Complexo Belo Horizonte (6 lagoas) e junto aos aluviões (6 lagoas) das coberturas sedimentares, totalizando 63,1% de todas as lagoas novas deste estudo. Nas coberturas sedimentares, a existência de lagoas mais recentes pode estar associada a faixa onde estão presentes na região de estudo, uma vez que estas coberturas estão localizadas próximo aos rios e os eventos pluviométricos tem grande capacidade de alterar o nível dos rios, conseqüentemente armazenando águas em faixas menos

permeáveis, formando novas lagoas situadas nas bacias de inundação dos rios da região.

O número de lagoas próximas a maciços rochosos carbonáticos totalizou 21 (13,7%), sendo 14 lagoas intermitentes, 6 lagoas perenes e 01 lagoa que secou permanentemente (Tabela 4.1). Os maciços rochosos carbonáticos aqui, podem estar influenciando a perenidade das lagoas pela presença de fraturas alargadas pela dissolução mineral, facilitando a recarga e descarga gradual do aquífero. Os maciços rochosos na área de estudo estão mais associados as lagoas intermitentes (14 lagoas), nestes casos, podem estar influenciando na não permanência das águas nestes corpos hídricos.

As lagoas no interior das depressões cársticas perfazem 118 (77,1%), entre dolinas (81) e uvalas (37), ressaltando-se que, das 40 lagoas perenes, 28 (70%) encontram-se no interior de dolinas, ao passo que das 89 lagoas intermitentes, 38 (43%) possuem afinidade com as uvalas. Essa associação aponta para uma possível influência do tipo de depressão cárstica na perenidade ou intermitência das lagoas, uma vez que dolinas são formas cársticas menos evoluídas, podendo apresentar maior capacidade de retenção das águas em seus interiores. A permanência da água em depressões menos evoluídas também é destacada no estudo de densidade cárstica realizado por Aguilar *et al.* (2016) no México.

As lagoas ocorrem em todos os intervalos altimétricos definidos neste estudo, assim distribuídas: 7 lagoas (4,6%) entre 600 m - 650 m, 52 lagoas (33,9%) entre 650 m - 700 m, 63 lagoas (41,1%) entre 700 m – 750 m e 24 lagoas (15,7%) entre 750 m - 800 m, 3 lagoas (1,9%) entre 800 m - 850 m e 4 lagoas (2,7%) entre 850 m - 900 m. A presença de lagoas intermitentes é mais comum (80,9%) em menores altimetrias, nos intervalos entre 650 m - 700 m e 700 m – 750 m, já as lagoas perenes se fazem mais presentes (72,5%) em cotas topográficas mais altas (nos intervalos entre 700 m - 750 m e 750 m - 800 m).

Dentre todas as 153 lagoas estudadas, 37 (25%) possuem no seu interior ou na sua borda pelo menos um fotolineamento estrutural NE-SW (Tabela 4.1), de maior frequência entre os associados às lagoas, tido também, como o mais frequente na região (Ribeiro, 2003; Ribeiro *et al.*, 2016). A segunda direção mais importante associada às lagoas é a NW-SE, ocorrendo em 25 lagoas (16%) de todas as lagoas estudadas. As lagoas perenes apresentam maior afinidade com os lineamentos de

direção NE-SW, apresentando 11 lagoas com esta direção (44%) dentre todas as lagoas perenes associadas aos fotolineamentos.

Por outro lado, as lagoas intermitentes estão mais fortemente associadas aos fotolineamentos de direção NW-SE, apresentando 22 lagoas com esta direção (38%) dentre todas as lagoas intermitentes associadas a fotolineamentos. Esses lineamentos também são observados por Amaral (2018) salientando o forte controle estrutural no desenvolvimento das feições cársticas.

Lineamentos estruturais são componentes importantes de aquíferos maduros, sendo o fator fundamental para a conexão e movimento das águas nestes ambientes. Essa relação também foi observada em estudos evolutivos realizados por Theilen-Willige *et al.* (2014), afirmando o controle estrutural como fundamental em diferentes tipos de carstes. O fato de as lagoas perenes apresentarem maior associação aos lineamentos de direção preferencial da região (NE-SW) corrobora ao fato de lagoas perenes estarem conectadas a aquíferos mais evoluídos, mais carstificados e de maior estabilidade hídrica.

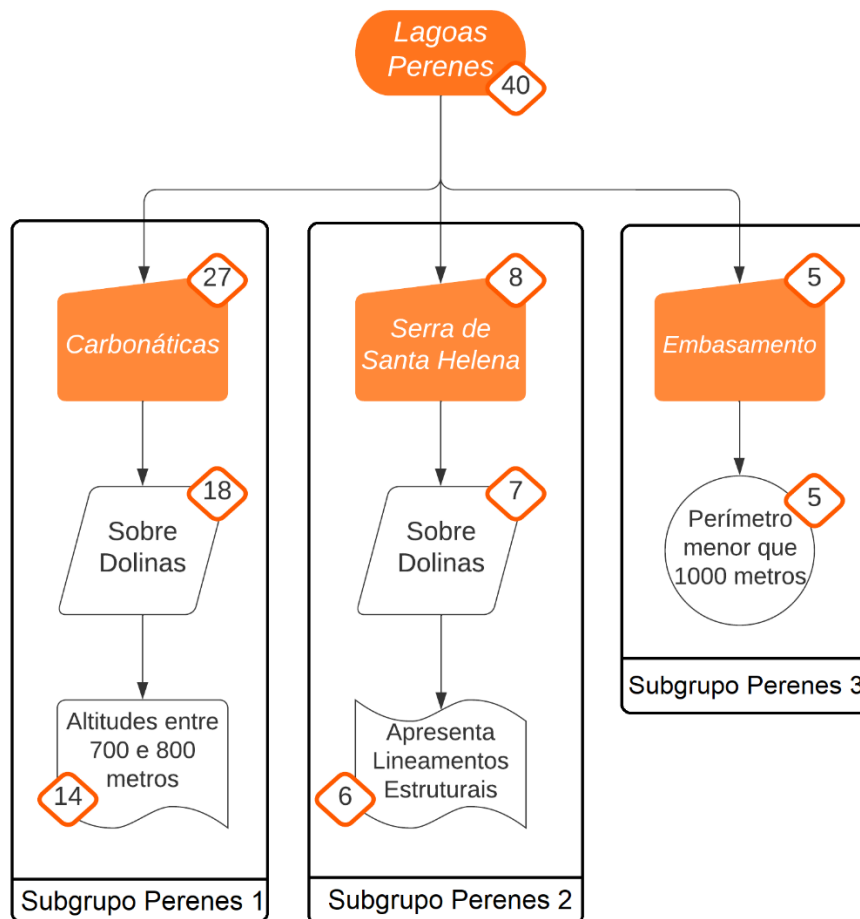
A dimensão das lagoas foi expressa pelo perímetro do maior espelho d'água observado dentro do período estudado, determinado em quatro intervalos: menor que 500m (23 lagoas), entre 500 m e 1000 m (70 lagoas), entre 1000 m e 1500 m (23 lagoas) e maior que 1500 m (37 lagoas). As lagoas perenes (40) possuem mais representantes com tamanho entre 500m e 1000m (17 lagoas) e também maiores que 1500 m (15 lagoas). As lagoas intermitentes (89) ocorrem mais frequentemente entre 500 e 1000 m (38 lagoas), com grande dispersão nos demais tamanhos. As lagoas novas são mais frequentes com tamanhos entre 500 e 1000m (13 lagoas).

Neste estudo foram consideradas diversas características físicas naturais que os lagos poderiam apresentar. Contudo, características não naturais podem ser analisadas para estudos futuros sobre a dinâmica hídrica desses lagos. O fator antrópico pode muitas vezes influenciar a presença ou não de água em lagoas de diferentes tipos de aquíferos. Isso é mostrado por Gao *et al.* (2020), em que a exploração de água próxima a bacias hidrográficas carbonáticas influenciou severamente a dinâmica cárstica da região, baixando o nível de diversos corpos hídricos.

4.5.2 Análise de Similaridade

A fim de se obter, dentre os fatores geológico, morfológico e estrutural, os que de fato influenciam no comportamento das lagoas perenes, intermitentes e novas, as lagoas foram agrupadas, segundo esses fatores, em 8 subgrupos a saber (Figuras 4.7, 4.8 e 4.9): 3 subgrupos de lagoas perenes, 4 subgrupos de lagoas intermitentes, e 1 subgrupo de lagoas novas. Todas as lagoas que não apresentaram padrões de similaridade associados a tais subgrupos foram alocadas em um subgrupo à parte. As lagoas que secaram permanentemente não foram contempladas nesta divisão devido ao seu pequeno número (5).

Figura 4.7: Subclasses de lagoas perenes, agrupando por similaridade as características morfoestruturais e geológicas mais comuns entre as lagoas perenes estudadas.



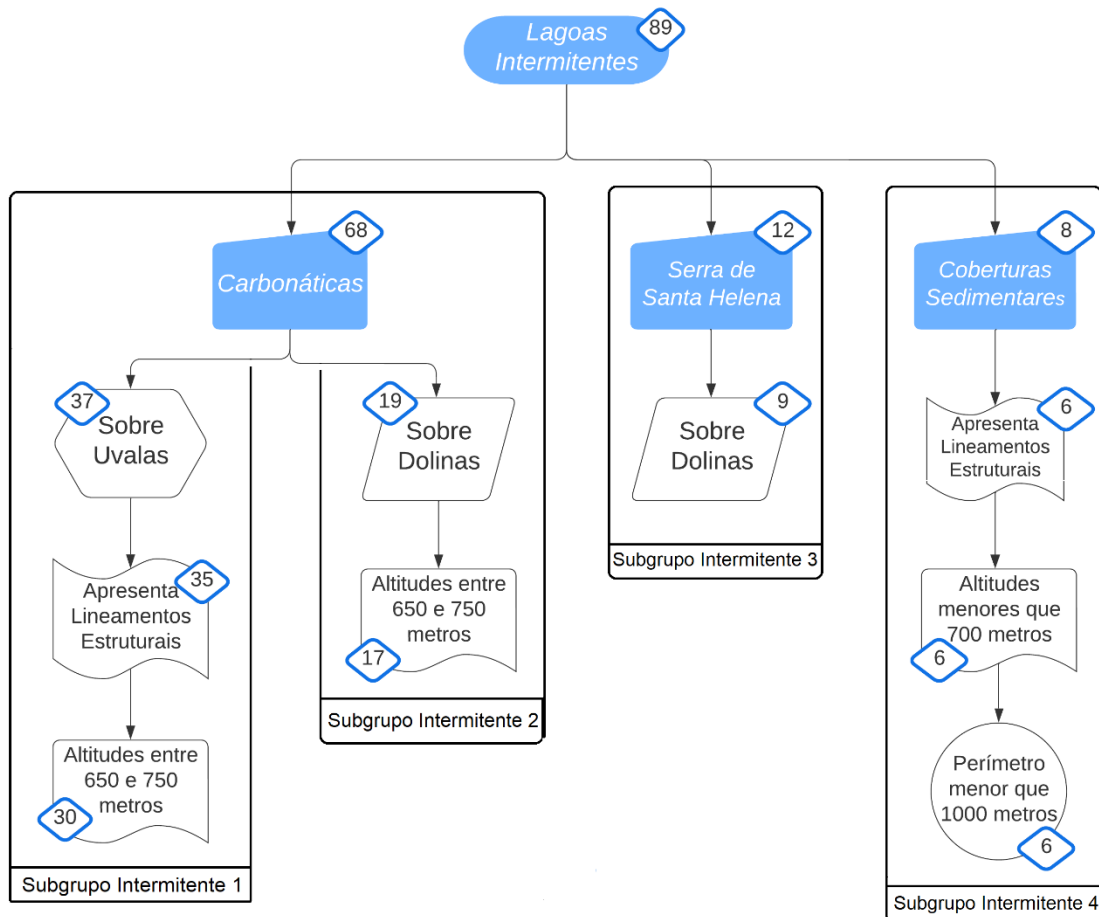
Fonte: Autor.

Os três subgrupos obtidos para as lagoas perenes (40) envolveram 25 lagoas (62,5%), assim distribuídas (Figura 4.7): 14 lagoas (35%) que estão concomitantemente sobre litologia carbonática, sobre dolinas e em altitudes entre 700

e 800 m (Subgrupo Perene 1); 6 lagoas (15%) que estão concomitantemente sobre a Formação Serra de Santa Helena, sobre dolinas, e associadas a fotolineamentos (Subgrupo Perene 2); e, 5 lagoas (12,5%) que estão sobre o embasamento e possuem perímetros menores que 1km (Subgrupo Perene 3). Um total de 15 lagoas perenes (37,5%) não puderam ser enquadradas em nenhum subgrupo, por apresentar características distintas citadas anteriormente.

É importante destacar a importância dos lineamentos no Subgrupo Perene 2, para a existência destes corpos hídricos permanentes sobre as rochas pelíticas da Formação Serra de Santa Helena, uma vez que esta, é definida como um aquífero na área de estudo (De Paula, 2019). Segundo o mesmo autor, o embasamento na região é definido como um aquífero fissural, sendo este aquífero uma das condições para a existência de lagoas perenes sobre essas litologias (Subgrupo Perene 3).

Figura 4.8: Subclasses de Lagoas Intermitentes, agrupando por similaridade as características morfoestruturais e geológicas mais comuns entre as lagoas intermitentes estudadas.



Fonte: Autor.

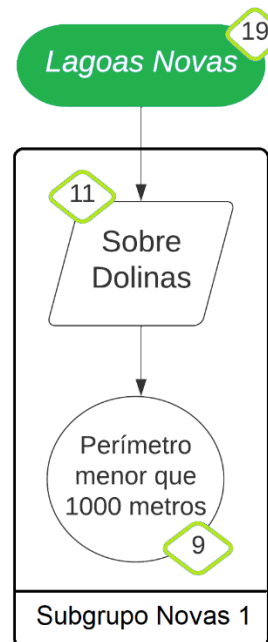
Os quatro subgrupos obtidos para as lagoas intermitentes (89) envolveram 62 lagoas (69,6%), assim distribuídas (Figura 4.8): 30 lagoas intermitentes (33,7%), as quais estão concomitantemente sobre litologia carbonática, sobre uvalas, associadas a fotolineamentos e em altitudes entre 650 e 750m (Subgrupo Intermitente 1); 17 lagoas (19,1%) estão, concomitantemente, sobre carbonato, sobre dolinas e em altitudes entre 650 e 750m (Subgrupo Intermitente 3); 9 lagoas (10,1%) sobre a Formação Serra de Santa Helena, e também sobre dolinas (Subgrupo Intermitente 3); e, 6 lagoas (6,7%) concomitantemente associadas às coberturas sedimentares fotolineamentos, baixas altitudes (< 700m) e com perímetros menores que 1km (Subgrupo Intermitente 4). Um total de 27 lagoas (30,4%) não puderam ser enquadradas em nenhum subgrupo, por apresentar características distintas citadas anteriormente.

Os subgrupos intermitentes 1 e 2 podem representar uma relação evolutiva das lagoas existentes na região, onde o subgrupo intermitente 1 encontra-se em um estágio de evolução mais avançado do carste, por estar sobre uvalas e ser associado a fotolineamentos, já o subgrupo Intermitente 2 está sobre dolinas e não associado a nenhum tipo de lineamento, indicando estar num estágio inicial destas lagoas. Lagoas sobre depressões mais evoluídas, como uvalas, têm uma forte tendência a intermitência, devido aos maiores níveis de carstificação ao redor destes corpos hídricos (Subgrupo intermitente 1).

O Subgrupo Intermitente 3 (Figura 4.8) é semelhante ao Subgrupo Perene 2 (Figura 4.7). Porém, este último não apresenta associação aos fotolineamentos, sugerindo consistir em um dos fatores destas lagoas serem intermitentes e não perenes. A associação a fotolineamentos se mostrou fator fundamental para a perenidade das lagoas sobre a Formação Serra de Santa Helena, uma vez que estas lagoas sobre dolinas e associadas aos fotolineamentos são perenes (Subgrupo perene 2) e as sobre dolinas sem associação a fotolineamentos são intermitentes (Subgrupo intermitente 3). Como a Formação Serra de Santa Helena tem característica litológica siliclástica (siltitos e argilitos), que provavelmente não conseguiriam armazenar águas pluviométricas, os lineamentos podem estar fornecendo os caminhos preferências para a água abastecer este aquífero e manter as águas confinadas nestas lagoas, possibilitando o comportamento perene destas lagoas.

Foi possível observar que a altitude influencia indiretamente sobre a perenidade das lagoas, pois lagoas sobre litologia carbonática (Mb. Pedro Leopoldo e Mb. Lagoa Santa) que estão sobre dolinas, tendem a ser perenes quando se encontram em cotas mais altas, entre 700 m e 800 m - Subgrupo Perenes 1 (Figura 4.7), e tendem a ser intermitentes quando ocorrem em cotas mais baixas, entre 650 m e 750 m - Subgrupo Intermitente 2 (Figura 4.8).

Figura 4.9: Subgrupo lagoas novas, agrupando por similaridade as características morfoestruturais e geológicas mais comuns entre as lagoas novas estudadas.

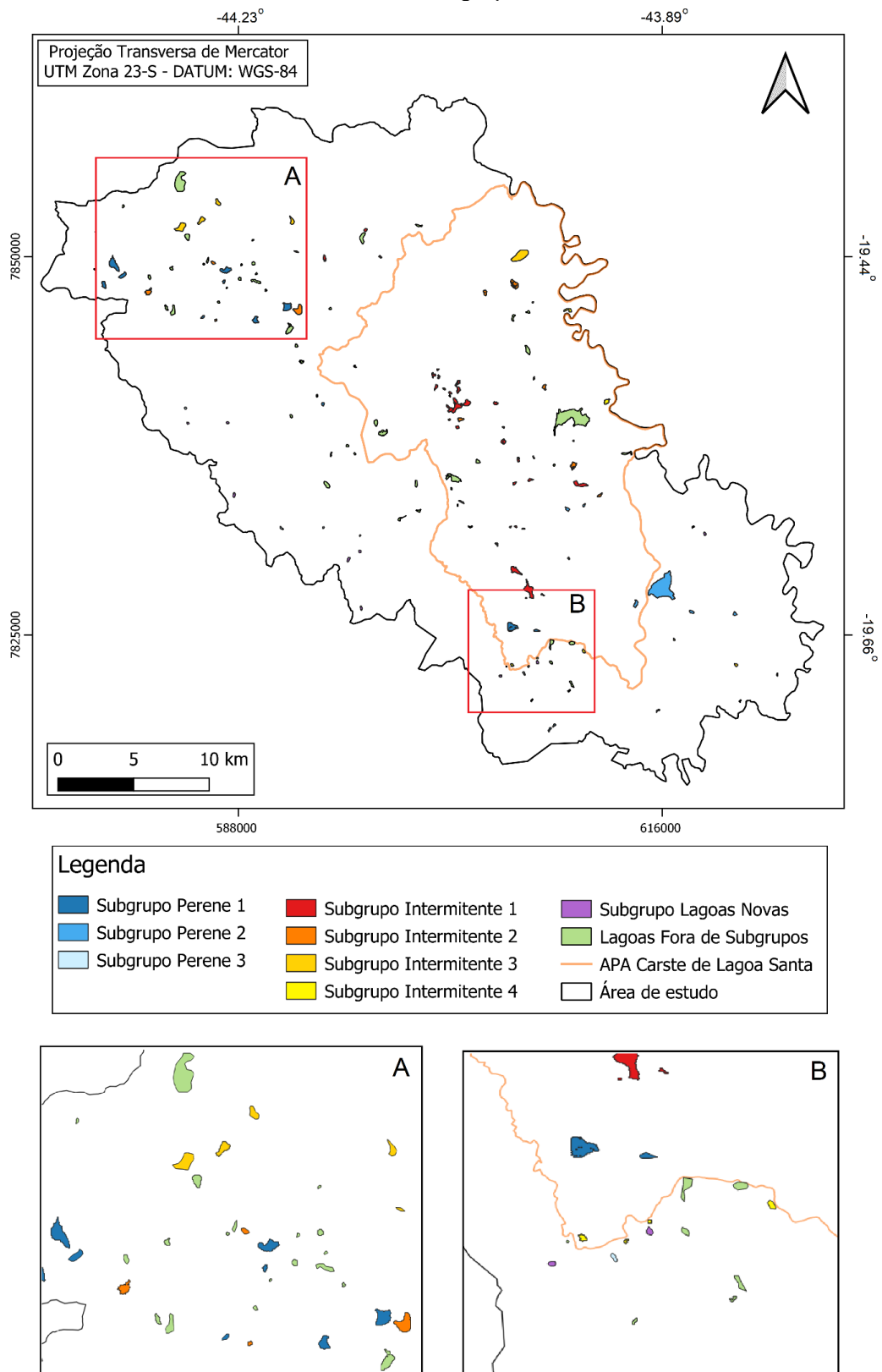


Fonte: Autor.

O Subgrupo Lagoas Novas (19) é constituído de 9 lagoas (47,3%) que estão sobre dolinas e com perímetros entre 500 e 1000m (Figura 4.9). Os pequenos perímetros observados podem indicar o estágio inicial de evolução destas lagoas, podendo no futuro evoluir para grandes lagoas perenes ou intermitentes, dependendo do movimento e confinamento das águas. Outras 10 lagoas (52,7%) não puderam ser enquadradas neste subgrupo definido para esta classe.

No mapa contido na Figura 4.10, pode ser observado todas as lagoas existentes na região de estudo divididas em suas subclasses, totalizando 96 lagoas (64,8% de todas lagoas existentes). Em azul no mapa estão representadas as 52 lagoas (35,2%) fora dos subgrupos definidos neste trabalho.

Figura 4.10: Subgrupos de lagoas existentes na região de estudo e na APA Carste Lagoa Santa, com destaque em dois pontos na região para melhor visualização das lagoas de cada subgrupo.



Fonte: Autor.

4.6 Conclusão

A análise exploratória realizada por meio de imagens multiespectrais Landsat se mostrou assertiva na identificação e detecção de padrões morfológicos e estruturais das lagoas na área. O uso de técnicas de sensoriamento remoto, aplicadas em imagens de períodos hidrológicos distintos (estação seca e estação chuvosa) de anos progressos, viabilizou a aferição da periodicidade da presença do espelho d'água nas lagoas, e a uma classificação supervisionada (classificador da Máxima Verossimilhança), a qual tornou a detecção dos espelhos d'água nas cenas Landsat menos subjetivas e mais seguras. Dessa forma os espelhos d'água detectados permitiram a análise do comportamento hídrico das depressões.

De modo a verificar o método de identificação proposto foi verificado 28% das lagoas em campo, ou seja, 44 das 153 identificadas, obtendo uma aderência de 98%, mostrando um método eficiente para identificação por meio de imagens de satélite. Apenas uma lagoa observada em campo, não foi previamente detectada nas etapas desenvolvidas de geoprocessamento, sendo possível que exista uma falha de identificação próximo a 2%, podendo existir um número maior de lagoas na região

As análises de similaridade realizada de forma manual permitiram agrupar as lagoas em subgrupos a partir da observação dos corpos hídricos frente as características geológicas e morfoestruturais, indicando os fatores que mais condicionam a existência destas lagoas de fato. Essas observações foram muito importantes para o conhecimento geral e específico da distribuição dos dados e das variáveis medidas. O entendimento do carste existente na região de estudo e a evolução superficial e subterrânea dos padrões hídricos deve ser entendida como um fenômeno complexo.

A divisão das lagoas em subgrupos se mostrou positiva, contabilizando um total de 64,8% das lagoas em 8 subgrupos definidos neste estudo. A partir dos dados levantados pode-se pontuar um *trend* que condiciona uma lagoa ser perene ou intermitente.

A existência de depressões de relevo cárstico é um fator relevante para a presença de lagoas em seu interior, e a evolução desta feição dita o seu comportamento hídrico, visto que as lagoas posicionadas sobre uvalas em baixas altitudes (650 m – 750 m) tendem a serem intermitentes, devido ao maior potencial

para escoamento das águas para o meio subterrâneo. Por outro lado, lagoas no interior de depressões pouco evoluídas, como dolinas, tendem a ser perenes. Neste contexto estão as lagoas nos membros carbonáticos Pedro Leopoldo e Lagoa Santa em cotas topográficas mais altas (700 m – 800 m), e lagoas sobre a Formação Serra de Santa Helena associadas a fotolineamentos.

Outro fator importante na análise destes corpos hídricos, foi a associação com os fotolineamentos, podendo condicionar a presença de água em lagoas que estão sobre dolinas e ser uma das condições de permanência das águas em algumas depressões, fato que ocorre com as lagoas presentes sobre a Formação Serra de Santa Helena.

Por fim, deve-se ressaltar a importância desta região e a imprescindibilidade de sua conservação natural, além de garantir a existência de recursos hídricos superficiais de qualidade para a população que depende de seu uso. Aprofundar os levantamentos iniciados neste estudo faz-se necessário, com objetivo de enquadrar de forma mais segura as lagoas presentes na região. A análise hidroquímica e isotópica das águas presentes nas lagoas pode ser uma alternativa interessante para poder levantar mais características intrínsecas que estes corpos hídricos têm em comum. Uma análise estatística robusta dos parâmetros morfológicas e estruturais das lagoas garantiria uma maior assertividade no agrupamento dos corpos hídricos e seus padrões de flutuação hídrica.

5 CONEXÕES HIDROGEOLÓGICAS ENTRE AS LAGOAS E O SISTEMA HIDROGEOLÓGICO NEOPROTEROZOICO ENTRE OS ANOS DE 1985-2020, LAGOA SANTA – MINAS GERAIS, BRASIL

Wallace Maciel Pacheco Neto ¹; Rodrigo Sérgio de Paula ¹; Paulo Galvão¹

1- Universidade Federal de Minas Gerais

Artigo publicado na revista Water. A versão original pode ser encontrada nos apêndices deste trabalho.

Resumo

O estudo aborda uma complexa área Neoproterozoico com características cársticas (hidro)geológicas e geomorfológicas, composta por rochas sedimentares metapelíticas-carbonáticas com idade entre aproximadamente 740 e 590 milhões de anos, resultando na maior sequência carbonática do país. No centro da área localiza-se a Área de Proteção Ambiental (APA) Carste de Lagoa Santa, situada próxima à capital do estado de Minas Gerais, Belo Horizonte, e apresenta uma série de lagoas associadas ao grande sistema fluvial do rio das Velhas sob a influência, localmente, de rochas carbonáticas. A compreensão da hidrodinâmica de lagoas carbonáticas é enigmática, e diversos fatores podem influenciar o comportamento desses corpos hídricos. Este trabalho analisou o comportamento hidrológico de 129 lagoas dentro e fora da APA com o objetivo de entender possíveis conexões com o principal aquífero cárstico, o aquífero cárstico-fraturado e o aquífero poroso, bem como seus padrões evolutivos deste ambiente físico. Foram realizados levantamentos pluviométricos e análises de imagens de satélite entre os anos de 1984 a 2020, para observar como as margens das lagoas se comportaram em resposta às variações meteorológicas. A avaliação temporal para compreensão da evolução da paisagem mostrou-se uma ferramenta eficaz e forneceu informações importantes sobre a interação entre águas subterrâneas e superficiais. As 129 lagoas foram agrupadas em 8 classes representando os padrões de conexão hidrológica com os aquíferos da região, sendo as classes definidas para lagoas perenes: 1) constantemente conectadas; 2) sazonalmente desconectadas; e 3) desconectadas. Para lagoas intermitentes, as

classes: 4) desconectaram em algum momento, adquirindo intermitência; 5) sazonalmente conectadas; 6) desconectadas; 7) extremamente desconectadas; e 8) lagoas intermitentes que se conectaram e pararam de se secar. Os padrões observados na variação das margens das lagoas sob a influência de diferentes momentos pluviométricos mostraram uma correlação positiva, especialmente em períodos secos, nos quais esses corpos d'água podem estar funcionando como zonas de recarga ou descarga do aquífero cárstico. Essas entradas e saídas de água são condicionadas à porosidade terciária bem desenvolvida do carste, onde o fluxo de água no epicarste se movimenta de acordo com a direção das fraturas ampliadas pela carstificação, planos de foliação da rocha e contatos litológicos. Outros fatores podem influenciar o comportamento hidrológico das lagoas, como as taxas de evapotranspiração, a intensidade das chuvas durante os períodos chuvosos e a exploração excessiva da água.

Palavras-chave: Dinâmica hidrológica; hidrogeologia cárstica; análise pluviométrica; SIG; lagoas cársticas.

5.1 Introdução

A Área de Proteção Ambiental do Carste de Lagoa Santa é uma das principais regiões de pesquisa relacionadas a arqueologia, paleontologia, espeleologia e hidrogeologia no Brasil, localizada próxima à capital do estado de Minas Gerais, Belo Horizonte. Os sítios arqueológicos da região de Lagoa Santa são mundialmente conhecidos, apresentando descobertas notáveis, como o fragmento do esqueleto humano mais antigo das Américas e um crânio com aproximadamente 11.000 anos, apelidado de Luzia (Feathers *et al.*, 2010).

As terras de Lagoa Santa e sua geomorfologia cárstica representam uma característica de destaque na região e fazem do local um ambiente clássico para estudos em geologia cárstica no Brasil, onde as rochas carbonáticas, ao se dissolverem, dão origem a cavernas, depressões, dolinas e diversas outras formas de relevo típicas desses ambientes (Kohler, 1989; Ford & Williams, 2007). Ao longo dos anos, diversos autores desenvolveram pesquisas voltadas à geologia, geomorfologia e dinâmica hidrológica dessa região, como Kohler (1989), Auler (1994), Berbert-Born (1998), Pessoa (2005), Galvão *et al.* (2015a; 2015b; 2016; 2017) e De Paula *et al.* (2019; 2020a; 2020b), além de projetos da CPRM (Projeto APA Carste Lagoa Santa

– 1998 e Projeto Vida – 2003) e trabalhos relacionados ao Projeto PAN Cavernas do São Francisco (Velásquez *et al.*, 2018).

A compreensão da dinâmica hidrológica e o fluxo de águas subterrâneas na região é o foco principal de diversos estudos, resultando em modelos conceituais complexos para o carste local. Notavelmente, o estudo de Pessoa (2005) destaca a presença de um aquífero cárstico extremamente ativo sob o manto de alteração, onde o controle é exercido, principalmente, pela distribuição espacial das ocorrências de calcário puro. A matriz recristalizada dessas rochas resulta em uma porosidade primária muito baixa (~3%, Penaranda, 2016), sendo o fluxo subterrâneo de água influenciado por porosidades secundária e terciária, como fraturas/falhas e condutos cársticos dentro do aquífero (Galvão *et al.*, 2015a).

A região ainda carece de estudos que relacionem a dinâmica hidrológica entre o carste subterrâneo e sua parcela superficial. Nesse contexto, as lagoas tornam-se particularmente significativas, pois essas depressões cársticas são fundamentais para a recarga dos aquíferos da região. Segundo Piló (2000), a gênese das lagoas em ambientes cársticos está condicionada à dissolução das rochas e é fortemente influenciada por fatores que podem ampliar ou reduzir esse processo, como a estrutura das rochas, incluindo suas falhas e fraturas.

Poucos estudos combinaram esforços para entender a dinâmica de evolução superficial desses corpos hídricos, mas um estudo relevante foi realizado por Auler (1994), que classificou três tipos de lagoas na região: lagoas estáveis sobre filitos; lagoas sazonais com sumidouros no fundo de dolinas localizadas em áreas topograficamente mais elevadas; e lagoas suspensas sobre carbonato, em cotas mais baixas. Estudos mais recentes têm utilizado ferramentas como sensoriamento remoto, geoprocessamento, testes de bombeamento, geofísica, análises isotópicas e meteorológicas na modelagem dos padrões evolutivos das lagoas cársticas (Assunção, 2019; Alves *et al.*, 2021; Macedo & Alvarez, 2021).

Recentemente, a região enfrentou uma seca severa, fazendo com que muitas lagoas secassem ou tivessem reduções significativas em seus níveis d'água, enquanto outras não apresentaram qualquer alteração visível em seus espelhos d'água. A falta de conhecimento sobre a dinâmica hidrológica dessas lagoas motivou fortemente a realização deste estudo, assim como a necessidade de compreender os

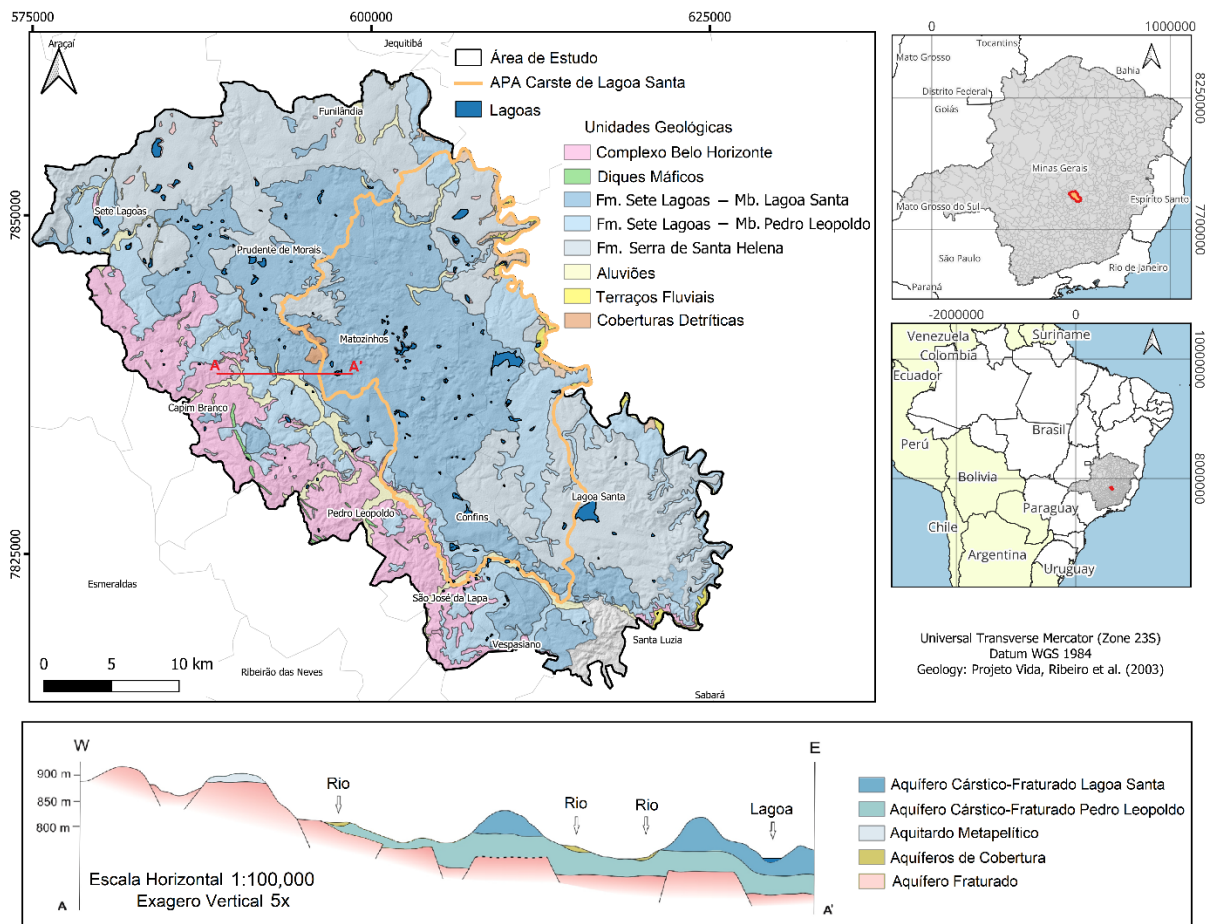
fatores que influenciam a conexão entre esses corpos hídricos e os aquíferos profundos.

Este trabalho analisou o comportamento hidrológico de 129 lagoas dentro e nas redondezas da APA Carste de Lagoa Santa, para entender possíveis conexões com o aquífero cárstico, o aquífero cárstico-fraturado e o aquífero poroso superficial, bem como seus padrões de evolução do ambiente físico. Foram realizados levantamentos pluviométricos e análises de imagens de satélite no período de 1984 a 2020 para observar como as margens das lagoas se comportaram em resposta às variações meteorológicas. A avaliação temporal para compreensão da evolução da paisagem mostrou-se uma ferramenta eficaz e forneceu informações importantes sobre a interação entre as águas subterrâneas e superficiais.

5.2 Caracterização da área de estudo

Referida por Kohler (1978) como a "Região Cárstica de Lagoa Santa", a área deste estudo é um dos ambientes cársticos mais extensivamente estudados desde o século XIX, onde sedimentos carbonáticos argilo-arenosos deram origem ao Grupo Bambuí. Localizada a 30 km ao norte de Belo Horizonte, capital do estado de Minas Gerais, a região abrange uma área de 1.197,5 km² (Figura 5.1).

Figura 5.1: Mapa geológico e de localização da área de estudo, destacando a Área de Proteção Ambiental do Carste de Lagoa Santa, Minas Gerais, Brasil, e as lagoas analisadas neste trabalho.



Fonte: Geologia modificada do “Projeto Vida” (Ribeiro et al., 2003) e perfil modificado de Pacheco Neto et al., 2023b.

Geologicamente, a área de estudo está localizada na porção centro-sul do Cráton do São Francisco, composta predominantemente por coberturas sedimentares clásticas e carbonáticas do Neoproterozoico, pertencentes ao Grupo Bambuí (Alkmin & Martins-Neto, 2001), que recobrem um embasamento arqueano de rochas gnáissicas (Ribeiro *et al.*, 2003) (Figura 5.1). O cráton serviu como base para a deposição de pacotes sedimentares pelíticos-carbonáticos marinhos sobre uma plataforma epicontinental estável, com idade relativa mínima de 630 milhões de anos (Dardenne, 1978; Zalán & Romeiro Silva, 2007).

Localmente, a estratigrafia, da base para o topo, apresenta rochas cristalinas do embasamento descritas como um Complexo Granito-Gnaise-Migmatito Arqueano e Paleoproterozoico (Complexo Belo Horizonte) (Noce *et al.*, 1997), diretamente recoberto por rochas sub-horizontais do Grupo Bambuí (Ribeiro *et al.*, 2003; Ribeiro

et al., 2016; Teixeira *et al.*, 2020), que, na área de estudo, correspondem às Formações Sete Lagoas e Serra de Santa Helena.

A Formação Sete Lagoas, unidade inferior do Grupo Bambuí, é dividida em dois membros: o Pedro Leopoldo, na base, composto por metacarbonatos cristalinos impuros, com granulação fina a média, intercalados com camadas metapelíticas; e o Lagoa Santa, no topo, caracterizado por metacarbonatos cristalinos puros, com alto teor de calcita e granulação média a grossa. Ambos os membros apresentam recristalização parcial a total dos carbonatos (Ribeiro *et al.*, 2003; Ribeiro *et al.*, 2016).

A Formação Serra de Santa Helena recobre a Formação Sete Lagoas e é constituída por metapelitos (siltitos, folhelhos e lentes carbonáticas), que, mesmo alterados, podem exibir estruturas relictuais na superfície (Ribeiro *et al.*, 2016). No topo da estratigrafia, são comuns dois tipos de coberturas cenozoicas: coberturas detríticas-lateríticas e coberturas aluvionares, ocupando, respectivamente, porções topográficas mais elevadas e margens de drenagem (Ribeiro *et al.*, 2003).

As unidades do Grupo Bambuí na região apresentam grau de deformação de moderado a elevado. Como consequência, os processos erosivos são fortemente influenciados por famílias de fraturas, planos de estratificação, foliações horizontais e zonas de cisalhamento, que controlam as porosidades secundária e terciária dessas rochas (Teodoro *et al.*, 2019). A estruturação das rochas é um fator crucial, pois influencia a ampliação de condutos ao longo das principais rotas de fluxo de águas subterrâneas (Auler, 1994; Pessoa, 2005; Ribeiro *et al.*, 2019).

As seguintes unidades hidrogeológicas são descritas na região: aquífero granular de coberturas inconsolidadas, aquícluíde nos saprolitos e pelitos da Formação Serra de Santa Helena, aquífero cárstico e aquífero cárstico-fraturado nos carbonatos da Formação Sete Lagoas, e aquífero fraturado e aquífugo no domínio dos granitos gnáissico-migmatíticos (Dantas *et al.*, 2023). Uma seção geológica esquemática pode ser observada na Figura 5.1, representando algumas das unidades hidrogeológicas. O principal aquífero da região é o aquífero cárstico-fraturado, composto pelo Membro Lagoa Santa, que apresenta maior potencial hidrológico, diretamente relacionado a processos mais intensos de carstificação, os quais promovem a ampliação de fraturas e a formação de condutos maiores (Pessoa & Mourão, 1998; De Paula & Velásquez, 2019).

Na área de estudo, feições cársticas são amplamente observadas e constituem fatores importantes na determinação da hidrografia local, com componentes tanto fluviais quanto cársticos (Berbert-Born, 2002). Feições como dolinas, depressões cársticas e cavernas drenam água para ambientes subterrâneos, refletindo um ambiente cárstico evoluído que influencia a recarga e o fluxo de águas subterrâneas nos aquíferos da região (Pessoa, 2005; De Paula & Velásquez, 2019; Teodoro, 2020). As depressões cársticas desempenham papel significativo na dinâmica hidrológica da região e neste estudo, uma vez que muitas delas abrigam lagoas, sejam estas temporárias ou permanentes. No carste de Lagoa Santa, há uma série de lagoas associadas ao grande sistema do rio das Velhas, que integra a bacia hidrográfica do rio São Francisco.

A região abriga diversas lagoas cársticas, tanto perenes quanto intermitentes, regidas por uma dinâmica hidrológica complexa, que pode apresentar padrões irregulares de variação no nível da água, evidenciando ciclos e comportamentos hidrológicos igualmente complexos (Kohler *et al.*, 1978; Berbert-Born, 1998; Pacheco Neto *et al.*, 2023a). A alta complexidade do comportamento hidrológico dessas lagoas continua sendo uma questão significativa, já que essas depressões inundadas podem funcionar como pontos de recarga do aquífero ou como locais de surgência ou ressurgência de alto fluxo.

Auler (1994) classificou três tipos de lagoas na área: lagoas estáveis sobre filitos; lagoas sazonais com sumidouros no fundo de dolinas situadas em áreas topograficamente mais elevadas; e lagoas suspensas sobre carbonato, em cotas mais baixas.

Lagoas do tipo dolina e lagoas de lençol suspenso são restritas a rochas calcárias, com as do tipo dolina ocorrendo principalmente em topografias elevadas, no fundo de depressões cársticas profundas, e as de lençol suspenso ocorrendo em altitudes mais baixas. Em geral, as lagoas sobre filitos são estáveis, enquanto as sobre calcário apresentam níveis d'água flutuantes, podendo secar em certos períodos. O nível da água destas últimas está relacionado à quantidade de precipitação e à permeabilidade da cobertura pedológica do fundo das lagoas (Auler, 1994).

O controle pluviométrico pode ser decisivo para algumas dessas lagoas. Meneses (2003) destaca que a variação climática tem consequências diretas sobre a região cárstica, alterando tanto as características da água quanto a atividade dos

processos morfogenéticos das feições cársticas. Recentemente, a região enfrentou uma seca significativa, resultando em uma redução acentuada da precipitação e fazendo com que muitas lagoas secassem ou tivessem seus níveis d'água drasticamente reduzidos (Assunção, 2019; Macedo & Alvarez, 2021).

5.3 Métodos

Este estudo foi estruturado em quatro etapas: 1) levantamento climatológico com dados de estações pluviométricas existentes na área de estudo, no período de 1984 a 2020; 2) identificação das lagoas existentes na área por meio de geoprocessamento de imagens de satélite *Landsat*; 3) detecção da periodicidade dessas lagoas entre 1984 e 2020, bem como a medição das dimensões da superfície d'água de cada uma; 4) avaliação do comportamento hidrológico das lagoas por meio de diversas análises centradas na variação dos níveis d'água em diferentes períodos climatológicos, dentro do intervalo de tempo selecionado para este estudo. As etapas serão detalhadas a seguir.

Todos os mapas, arquivos raster e vetoriais foram geoprocessados no sistema de coordenadas Universal Transversa de Mercator (UTM), com Datum WGS-1984, Zona 23S. Todas as atividades de geoprocessamento foram realizadas utilizando as ferramentas do GRASS 7.8.3 no software QGIS® (GRASS PROJECT, 2013). Tabelas, gráficos e quadros foram elaborados com Microsoft Excel (Versão 2019 MSO) e CoreIDRAW (Graphics Suite Versão 2024).

5.3.1 Levantamento Climatológico

Os dados climatológicos foram obtidos em estações pluviométricas localizadas na área de estudo. Os dados brutos das estações de Sete Lagoas (código 01944052), Pedro Leopoldo (código 01944009), Raul Soares (código 01943049), Vespasiano (código 01943009), Vargem Bonita (código 01944024), Taquaraçu (código 01943023) e Jaboticatubas (código 01943004) foram baixados do portal HidroWeb (snirh.gov.br/hidroweb) da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA).

Foi necessário o preenchimento de lacunas, pois algumas séries apresentavam períodos incompletos. Para isso, foram realizadas correlações estatísticas entre estações vizinhas e aplicada a metodologia de massa dupla. A correlação entre duas

variáveis foi calculada utilizando o coeficiente linear de Pearson, que, segundo Yamamoto e Landim (2015), representa a relação mútua entre as variáveis.

O método da massa dupla foi desenvolvido para analisar e agrupar conjuntos de estações meteorológicas correlacionadas, por meio da observação de diagramas de precipitação acumulada. De acordo com Starcy & Hardison (1996), a precipitação sofre menor influência de ações antrópicas, o que facilita a verificação da consistência entre dois conjuntos de dados de diferentes estações meteorológicas.

Segundo Tucci (2001), o método consiste na acumulação dos valores mensais ou anuais de precipitação e sua plotagem em um gráfico. O eixo x representa os valores da estação de referência, e o eixo y representa os valores da estação a ser validada. Se os valores das duas estações forem proporcionais, o gráfico será uma linha única, sendo sua inclinação representativa da proporcionalidade entre as séries. Caso contrário, se o gráfico apresentar mudanças de inclinação, isso indica que as séries não são correlacionáveis, ocorreu uma alteração no regime de precipitação ou pertencem a regimes distintos.

Em seguida, foi calculado o valor pluviométrico que afetou a área em cada ano hidrológico estudado (de outubro de um ano a setembro do ano seguinte). Utilizou-se o método de Thiessen (1911), que exige a determinação das áreas de influência de cada pluviômetro das estações selecionadas. Esse método gera uma média ponderada das alturas registradas pelos pluviômetros, diretamente proporcional à área de influência da bacia, considerando a distribuição espacial não uniforme das estações e desconsiderando a topografia da bacia (Tucci, 2001).

Foram traçados polígonos de Thiessen na área para todos os anos hidrológicos analisados, de 1984/1985 a 2019/2020, com base na distribuição das estações na região. Com os dados de precipitação medidos para cada ano hidrológico, foram estimadas as variações históricas no volume de precipitação que afetou a região, bem como a precipitação média dos 36 anos (1984 a 2020).

Com os dados pluviométricos calculados para cada ano hidrológico, foram realizadas análises de homogeneidade e tendência dos dados. Para a homogeneidade, foi utilizado o teste não paramétrico de Pettitt (1979), que identifica mudanças abruptas nos dados temporais, ou seja, pontos de descontinuidade na série, conforme as Equações (1) e (2). As hipóteses testadas foram: $H_0: F_1(X) = F_2(X)$ (não há ponto de mudança); $H_1: F_1(X) \neq F_2(X)$ (existe ponto de mudança).

$$U_{t,n} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^n \operatorname{sgn}(x_t - x_j) \quad (1)$$

$$\operatorname{sgn}(x_t - x_j) = \begin{cases} 1 & \text{if } (x_t - x_j) > 0 \\ 0 & \text{if } (x_t - x_j) = 0 \\ -1 & \text{if } (x_t - x_j) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

A hipótese nula (H_0) assume a ausência de um ponto de mudança na série temporal. K_t representa o ponto máximo de mudança de tendência da série, calculado por meio do valor máximo de $U_{t,n}$, que está associado a um nível de significância (ρ) calculado pelas Equações (3) e (4). Assim, dado um nível de significância α , se $\rho < \alpha$, a hipótese nula (H_0) é rejeitada, sendo n o número de anos da série temporal e ρ o nível de confiança. Neste estudo, o nível de significância adotado foi de 5%.

$$K_t = U_{t,n} = \max|U_{t,n}|, 1 \leq t < n \quad (3)$$

$$\rho = 2 \exp\left(\frac{-6K_n^2}{n^3 + n^2}\right) \quad (4)$$

O teste não paramétrico de Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975) foi realizado para avaliar a significância estatística (crescente ou decrescente) da série temporal climática, distinguindo entre flutuações naturais e processos de tendência determinística (Li *et al.*, 2019). Esse método baseia-se na estatística S , que envolve a comparação de cada valor da série com os demais, sempre em ordem sequencial, conforme as Equações (5) e (6).

$$S = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{i-1} \operatorname{sgn}(x_i - x_j) \quad (5)$$

$$\operatorname{sgn}(x_t - x_j) = \begin{cases} 1 & \text{if } (x_i - x_j) > 0 \\ 0 & \text{if } (x_i - x_j) = 0 \\ -1 & \text{if } (x_i - x_j) < 0 \end{cases} \quad (6)$$

Segundo Bartels *et al.* (2019), o teste correlaciona as classificações das observações dentro de uma sequência temporal, ou seja, compara cada valor da série com os valores anteriores em ordem sequencial para determinar a variável estatística. Na Eq. (5), sgn representa a soma dos sinais das diferenças pareadas de todos os valores da série (x_i) em relação aos demais valores em ordem sequencial (x_j), onde j são os valores dos dados sequenciais e n é o tamanho da série temporal analisada. Os resultados dessa soma irão variar de acordo com as condições da Eq. (6).

Em seguida, calcula-se a variância estatística de S , $Var(S)$, utilizando a Eq. (7), onde n é o número de anos da série temporal, t é a duração de qualquer período de tempo, e $\sum t$ é a soma de todos os valores do número de períodos de tempo. A Eq. (8) então calcula a estatística de Mann-Kendall Z para esse teste, onde valores positivos de Z indicam tendências de aumento, enquanto valores negativos indicam tendências de redução na série temporal.

O nível de confiança adotado foi de 95%, e o nível de significância, assim como no teste de Pettitt, foi de 5%, ou seja, a probabilidade de rejeitar a hipótese nula (H_0) quando ela for verdadeira.

$$Var(S) = \frac{1}{n} \left[n(n-1)(2n+5) - \sum_t t(t-1)(2t+5) \right] \quad (7)$$

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{Var(S)}} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{Var(S)}} & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (8)$$

Além dos testes estatísticos, foi adotada outra abordagem para observar variações nos dados temporais de precipitação. Utilizando dados históricos de precipitação e a média histórica da precipitação, foram definidos os ciclos de chuva ocorridos ao longo do período de estudo. Sabe-se que, dentro de um único ano, há variações entre períodos secos e chuvosos, mas a quantidade anual de precipitação, quando comparada com outros totais anuais, pode fornecer informações importantes sobre como anos sucessivos representam um ciclo de chuvas.

Anos subsequentes com valores de precipitação abaixo da média histórica para o período analisado foram agrupados como ciclos secos ou de escassez hídrica. Por outro lado, sequências de anos com valores de precipitação acima da média histórica foram agrupadas como ciclos úmidos. Períodos sucessivos nos quais não há uma tendência predominante dos valores anuais de precipitação estarem consistentemente acima ou abaixo da média histórica foram categorizados como “períodos mistos”.

Esses ciclos são de extrema importância na avaliação de dados pluviométricos em longos intervalos de tempo, especialmente ao se analisar o comportamento temporal de um objeto, como as lagoas neste estudo. Torna-se evidente que a avaliação da dinâmica hidrológica das lagoas é facilitada quando se observam as

variações de precipitação em intervalos mais curtos. Assim, o objetivo deste estudo foi identificar o maior número possível de ciclos pluviométricos com características semelhantes.

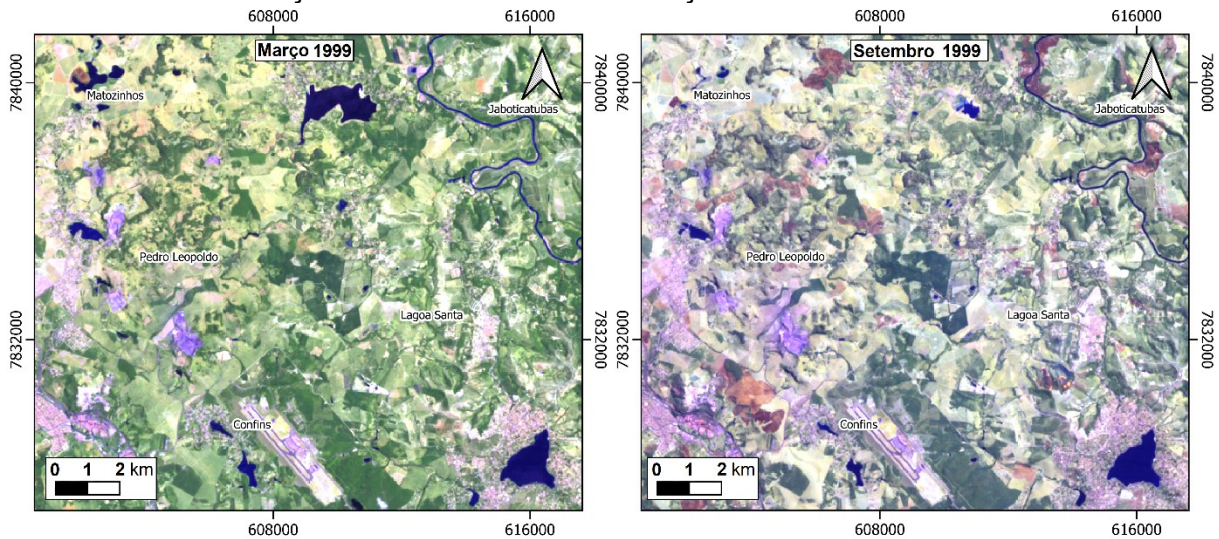
Todos os dados de precipitação foram processados graficamente no Microsoft Excel para facilitar a observação e a interpretação dos resultados. Os gráficos gerados a partir dos ciclos mencionados forneceram subsídios para a criação de linhas de tendência linear. Uma linha de tendência linear é uma representação estatística útil para dados que estão aumentando ou diminuindo a uma taxa constante (Magalhães & De Lima, 2002), e sua representação gráfica é uma linha reta que melhor se ajusta a um conjunto simples de dados. Assim, cada ciclo de chuva apresentou uma linha de tendência, representando a variação de crescimento ou redução dos dados pluviométricos sucessivos.

Adicionalmente, dentro do Microsoft Excel, foram analisadas as equações dessas linhas de tendência. Uma informação importante extraída dessas equações é o coeficiente angular, que se relaciona com a inclinação da linha e com a forma como os dados variam sucessivamente em um plano cartesiano (Magalhães & De Lima, 2002). Os coeficientes angulares obtidos das linhas de tendência de cada ciclo pluviométrico indicam padrões de aumento ou redução das chuvas ao longo dos anos dentro de um ciclo. Também foram calculadas as médias harmônicas de cada ciclo de precipitação, com o objetivo de comparar os valores de cada ciclo com a média histórica da precipitação.

5.3.2 Identificação das Lagoas

Foram seguidos os procedimentos para identificação de lagoas descritos por Pacheco Neto *et al.* (2023a). Inicialmente, foram selecionadas cenas de cobertura do solo de diferentes satélites Landsat (USGS, 2021) para as estações seca e chuvosa de cada ano hidrológico, no período de 1984 a 2020. Em seguida, foram criadas composições coloridas das bandas espectrais para aumentar o contraste entre os corpos d'água e as demais coberturas do solo presentes nas imagens (Figura 5.2).

Figura 5.2: Exemplo de imagens de satélite Landsat utilizadas neste estudo, representando a estação chuvosa de 1999 e a estação seca do mesmo ano.



Fonte: USGS, 2021.

As composições coloridas serviram de base para a realização de uma classificação supervisionada, denominada *Region of Interest (ROI)*, com o objetivo de separar duas classes: corpos d'água e outras superfícies. Essa classificação foi baseada em cor, textura, tonalidade e sombras, que são características fundamentais para auxiliar na distinção das áreas de treinamento para as classes pré-definidas (Meneses & Almeida, 2012). Foram selecionadas diversas áreas de treinamento para cada classe, a fim de se obter maior representatividade de cada superfície.

Utilizando a ferramenta de Classificação Semiautomática no software QGIS, foi realizada uma Classificação por Máxima Verossimilhança. Essa classificação calcula a probabilidade de um determinado pixel pertencer a uma classe específica e atribui a classe com maior probabilidade (Andrade *et al.*, 2014). O resultado dessa etapa foram rasters de cobertura do solo classificados em corpos d'água e outras superfícies para as estações seca e chuvosa de todos os anos entre 1984 e 2020. Esses rasters foram então convertidos em arquivos vetoriais para facilitar o manuseio dos dados e para excluir corpos d'água com padrão linear, que se assemelham mais a rios do que a lagoas, foco deste estudo.

5.3.3 Periodicidade das lagoas

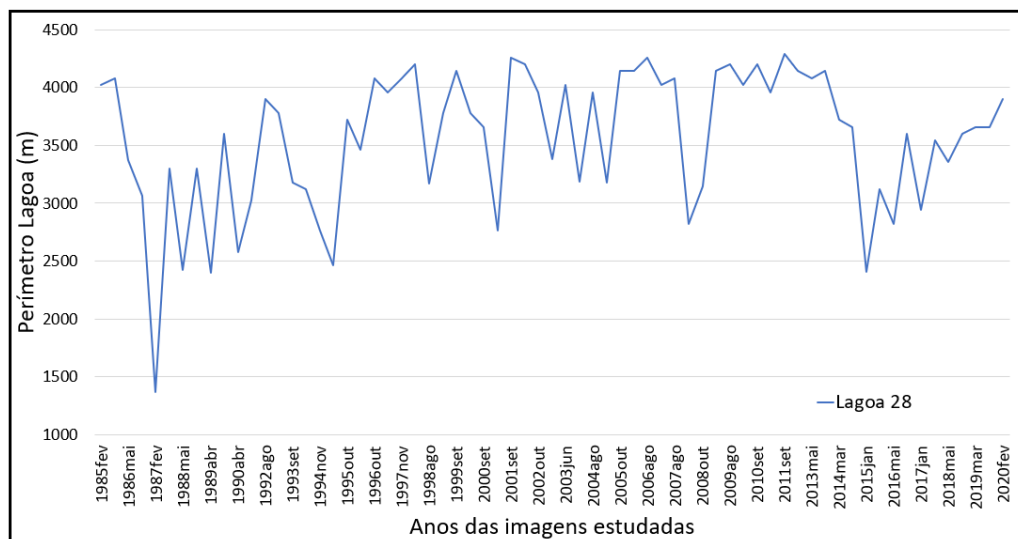
Com os corpos d'água definidos para as estações seca e chuvosa entre os anos hidrológicos de 1984 e 2020, foi observado o comportamento de todas as lagoas quanto à sua periodicidade de estarem cheias ou secas. Essa etapa permitiu definir

quais lagoas apresentavam comportamento perene ou intermitente. Lagoas perenes são aquelas que nunca secaram durante o período do estudo. Lagoas intermitentes são aquelas que existiam nos anos 1980 e apresentam comportamento periódico de presença ou ausência de água em diferentes anos entre 1984 e 2020. Nessa fase, também foi calculado o perímetro dessas lagoas, correspondente ao comprimento da borda externa dos corpos d'água, variando conforme seu tamanho e forma. Os valores de perímetro foram obtidos com a ferramenta Calcular Geometria/Perímetro, da tabela de atributos dos arquivos vetoriais no QGIS

5.3.4 Avaliação do comportamento hidrológico

Para a análise do comportamento hidrológico, os dados de perímetro das lagoas para cada ano hidrológico foram inicialmente processados graficamente no Microsoft Excel. Foram elaborados gráficos para representar cada lagoa e como seu corpo d'água se expandiu ou retraiu numericamente ao longo do período estudado. Essa etapa envolveu a definição das médias e dos perímetros das lagoas, indicando o que seria considerado seu comportamento normal ao longo dos anos (Figura 5.3).

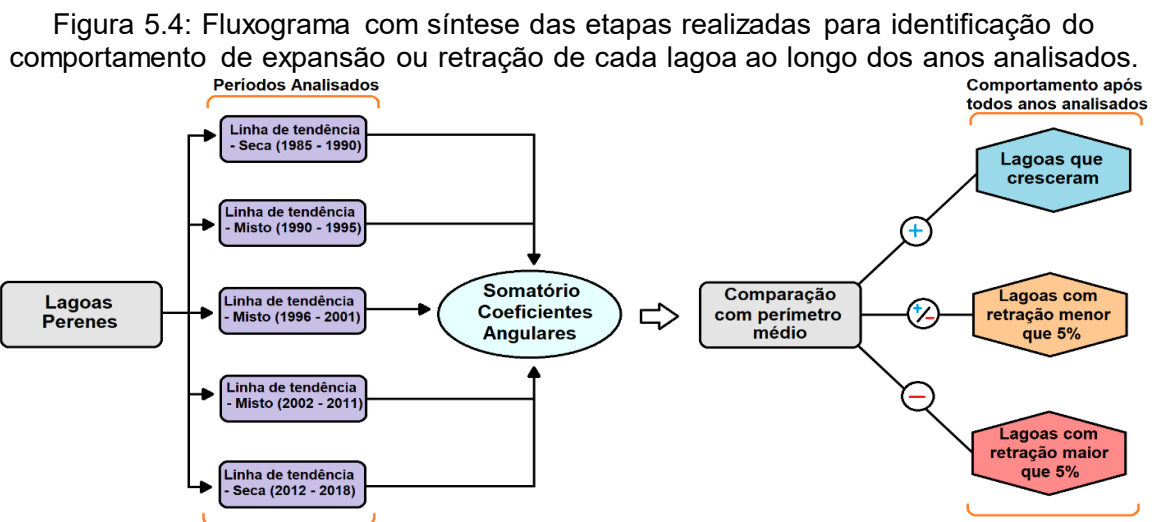
Figura 5.3: Representação gráfica da variação do perímetro ao longo dos anos para as lagoas estudadas (exemplo da Lagoa 28).



Fonte: Autor.

Os dados de perímetro foram analisados em relação aos ciclos de precipitação previamente definidos, e novas linhas de tendência representando a variação sucessiva dos perímetros foram observadas para cada um dos ciclos secos, úmidos

ou mistos. Os coeficientes angulares nessa análise foram importantes, pois indicam o quanto as lagoas se expandiram ou se contraíram durante cada ciclo de chuva. A soma desses coeficientes pode ser interpretada como um reflexo das mudanças no corpo d'água de uma lagoa e ser comparada com o perímetro médio de cada lagoa para observar o comportamento de cada uma ao longo dos anos analisados. Contrações inferiores a 5% do tamanho médio da lagoa foram consideradas pequenas, enquanto contrações superiores a 5% foram consideradas significativas. Um fluxograma dessa etapa pode ser visto na Figura 5.4.



Fonte: Autor.

Para observar o comportamento hidrológico das lagoas durante mudanças abruptas na precipitação, foi proposta uma nova abordagem. Os perímetros das lagoas foram analisados em relação às mudanças nos ciclos de chuva, destacando como o comportamento de cada lagoa foi afetado por alterações significativas na precipitação. O período escolhido foi a transição entre o ciclo chuvoso e o ciclo seco, um evento que ocorre apenas uma vez no intervalo temporal utilizado. O final do ciclo chuvoso foi definido como o ano de 2011, e o início do ciclo seco, como 2012. Graficamente, a precipitação foi comparada com as variações de perímetro que cada lagoa pode apresentar.

Esse método se mostrou mais eficaz para lagoas perenes do que para lagoas intermitentes, o que está relacionado à possível conexão das primeiras com os corpos subterrâneos de água. Lagoas perenes têm maior probabilidade de estarem conectadas aos aquíferos e receberem recarga constante de água subterrânea. Assim, lagoas que não apresentam distúrbios em seus corpos d'água em resposta a

mudanças abruptas na precipitação podem ser lagoas conectadas. Por outro lado, lagoas que são afetadas pela precipitação e mostram variações de perímetro podem não estar tão conectadas ao sistema aquífero regional. Lagoas intermitentes ficam frequentemente secas, e a precipitação é fundamental para que armazenem água. Portanto, foi utilizada uma análise abrangente ao longo de todos os anos de pesquisa para essas lagoas, com o objetivo de identificar momentos em que seu comportamento hidrológico se alterou.

A análise focada nas lagoas perenes comparou as duas abordagens propostas descritas nesta seção: a primeira relacionada ao comportamento final das lagoas ao longo dos anos, identificando quais se expandiram e quais se contraíram com o tempo, bem como quantificando esse crescimento ou redução; a segunda relacionada ao comportamento das lagoas durante a transição entre um ciclo chuvoso e um período de escassez de precipitação, demonstrando possíveis conexões ou desconexões entre as lagoas perenes e a água subterrânea. Se essas abordagens forem validadas, espera-se que lagoas com maior conexão com o aquífero apresentem contração mínima ou até expansão de seus corpos d'água ao final do estudo. Em contrapartida, lagoas desconectadas devem apresentar maior contração de seus corpos d'água ao longo dos anos sucessivos.

Diferente das lagoas perenes, a análise de linhas de tendência e seus coeficientes angulares para lagoas intermitentes não foi útil. Isso porque quase todas as lagoas intermitentes exibem linhas de tendência negativas, já que frequentemente permanecem secas em vários períodos ao longo dos anos analisados — uma característica definidora desse tipo de lagoa. Assim, a análise do comportamento hidrológico das lagoas intermitentes foi realizada por meio da observação gráfica de seus corpos d'água (perímetro) ao longo de todo o período do estudo (36 anos), comparando com a precipitação. Lagoas com comportamento semelhante foram agrupadas em classes com base em sua conexão hidrológica.

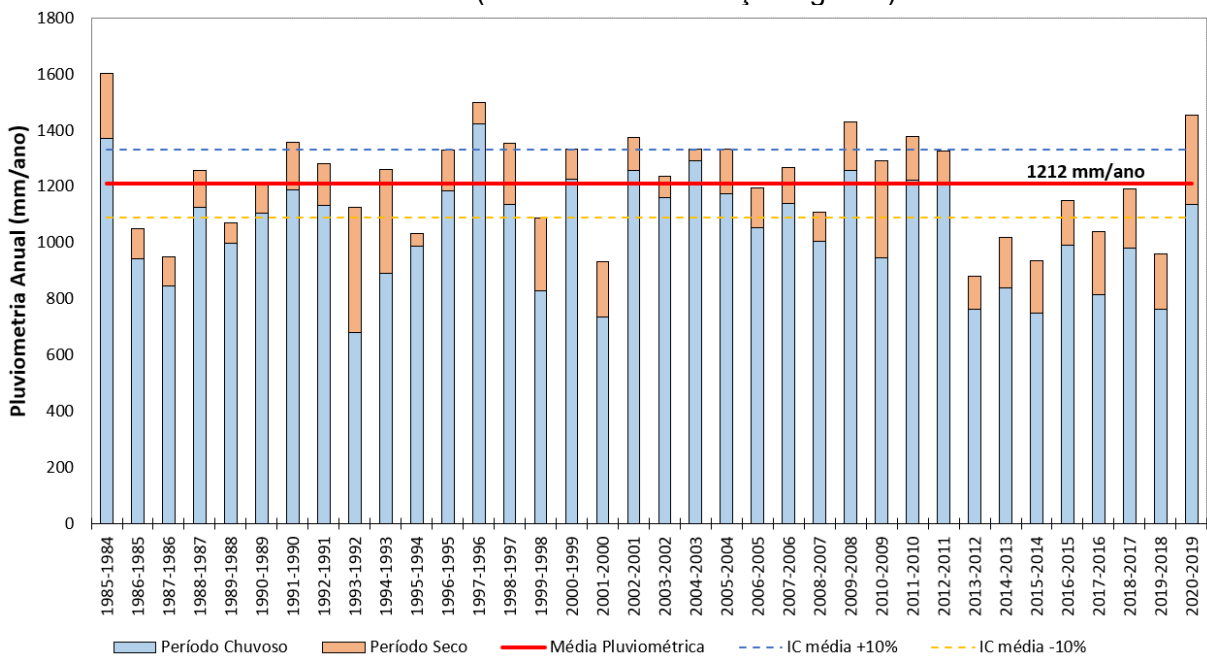
5.4 Resultados e Discussão

5.4.1 Histórico pluviométrico

Utilizando os dados das estações pluviométricas, foi criado um gráfico para representar a média anual histórica de precipitação para todos os anos hidrológicos entre 1984-1985 e 2019-2020 (Figura 5.5).

Com as médias anuais calculadas, foi realizada uma nova operação para representar a média histórica de precipitação ao longo dos anos estudados, resultando em um valor de 1212 mm. Esse valor é de grande importância, pois ajuda a identificar os anos hidrológicos com baixa precipitação e aqueles com alta precipitação, representando ciclos significativos de cheia e de escassez hídrica nos anos recentes.

Figura 5.5: Gráfico de barras representando as médias pluviométricas anuais entre os anos hidrológicos 1984-1985 e 2019-2020, em laranja nas barras, pode ser observado o aporte pluviométrico durante os meses de seca (abril a setembro) e em azul o aporte pluviométrico durante os meses chuvosos (outubro a março). A linha em vermelho marca a média pluviométrica dos 36 anos analisados no estudo, e seus intervalos de confiança estão representados pela linha tracejada em azul (intervalo de confiança positivo) e linha tracejada em amarelo (intervalo de confiança negativo).



Fonte: Autor.

Um total de 20 anos hidrológicos apresentaram precipitação acima da média histórica do período analisado, muitos dos quais ocorreram entre os anos hidrológicos

de 2001-2002 e 2011-2012. Por outro lado, 16 anos hidrológicos registraram precipitação abaixo da média histórica, com o período mais notável ocorrendo entre os anos de 2012-2013 e 2018-2019. O intervalo de confiança negativo, representado por 10% abaixo da média de 1212 mm, apresentou um bom ajuste aos dados, não alterando significativamente o comportamento dos anos hidrológicos analisados.

5.4.2 Ciclos pluviométricos

A homogeneidade climática foi testada (Teste de Pettitt) para a série temporal dos anos hidrológicos entre 1984-1985 e 2019-2020, indicando que não há pontos de mudança na precipitação ao longo do intervalo selecionado. Com base no nível de significância de 5%, aceita-se H_0 ; ou seja, não há ponto de mudança, pois $p > \alpha = 0,05$ foi verificado nesses parâmetros, demonstrando um comportamento homogêneo. Os resultados do teste de tendência de Mann-Kendall indicaram comportamento semelhante ao do teste de Pettitt para a precipitação, já que H_0 também é aceita ($p > \alpha = 0,05$), não indicando tendência significativa (Tabela 5.1).

Tabela 5.1: Resultados estatísticos não paramétricos com base na homogeneidade (teste de Pettitt) e na análise de tendência (teste de Mann-Kendall).

Método	Parâmetro	Precipitação
Teste de Pettitt	K	124
	t	28
	p-valor (two-tailed)	0.39
	alpha	0.05
	Interpretação ^a	Aceita-se H_0
Teste de tendência de Mann-Kendall	Kendall's tau	-0.06
	S	-38
	Var(S)	5390
	p-valor (two-tailed)	0.61
	alpha	0.05
	Interpretação ^b	Aceita-se H_0

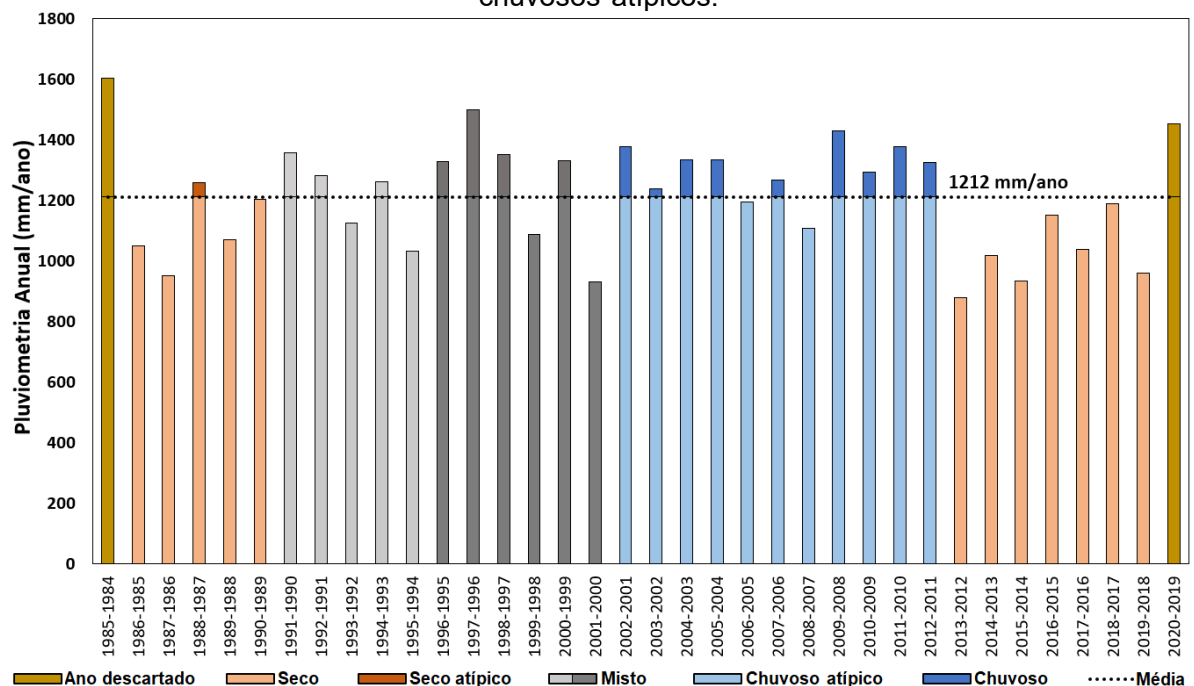
^a Duas hipóteses: H_0 = não há ponto de mudança; H_1 = há ponto de mudança. Com base no nível de significância de 5%, se $p < \alpha = 0,05$, rejeita-se H_0 (há ponto de mudança); se $p > \alpha = 0,05$, aceita-se H_0 (não há ponto de mudança).

^b Duas hipóteses: H_0 = não há tendência; H_1 = há tendência significativa de aumento ou diminuição. Com base no nível de significância de 5%, se $\rho < \alpha = 0,05$, rejeita-se H_0 (há tendência nos dados); se $\rho > \alpha = 0,05$, aceita-se H_0 (não há tendência nos dados).

Os testes estatísticos, portanto, não foram eficazes para diagnosticar mudanças significativas na precipitação ou para identificar tendências de aumento ou diminuição nos dados de chuva. Conseqüentemente, uma abordagem alternativa foi proposta para identificar as nuances nos dados de precipitação ao longo dos anos.

Com base no histórico de precipitação e na média histórica, definiram-se os ciclos de chuva e escassez hídrica. Os anos hidrológicos consecutivos com precipitação acima da média histórica (1212 mm/ano) foram agrupados como ciclos de chuva, enquanto os anos hidrológicos subsequentes com valores abaixo da média histórica foram categorizados como ciclos de seca. Os anos que apresentaram inconsistência em relação à média histórica foram agrupados como ciclos “mistos” (Figura 5.6). Os primeiros e últimos anos hidrológicos do conjunto de dados foram excluídos devido à impossibilidade de se analisar o comportamento dos anos anteriores e posteriores a esses anos.

Figura 5.6: Gráfico de barras representando os ciclos pluviométricos de chuva e seca. Valores acima da média histórica (linha tracejada preta), durante ciclos pluviométricos secos, foram definidos como anos hidrológicos secos atípicos, e valores abaixo da média histórica (linha tracejada preta), durante ciclos chuvosos, foram definidos como anos chuvosos atípicos.



Fonte: Autor.

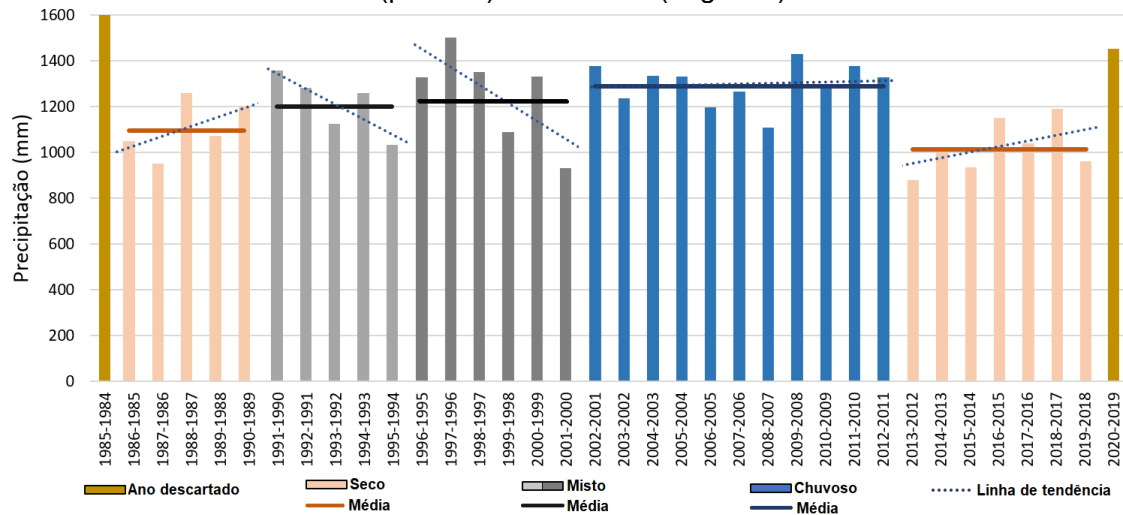
Ao longo da série histórica, foram identificados cinco ciclos, com duração variando de 5 a 11 anos. A série histórica começa com um período seco de 5 anos, um dos ciclos mais curtos do conjunto (1984/1985 a 1989/1990), apresentando apenas um ano hidrológico (1987-1988) acima da média histórica. Em seguida, ocorrem dois ciclos mistos, um com duração de 5 anos (1990/1991 a 1994/1995) e outro com duração de 6 anos (1995/1996 a 2000/2001).

Essa sequência de anos hidrológicos dificilmente representa um agrupamento de anos de escassez ou abundância de água, pois os anos não mostram um padrão de anos consecutivos acima ou abaixo da precipitação média. Assim, foram categorizados como ciclos de precipitação mistos. A decisão de separar em dois ciclos mistos, em vez de um único, deve-se às flutuações de precipitação observadas, com cada ciclo misto começando com valores elevados de precipitação que diminuem ao longo dos anos. As variações da precipitação dentro desses ciclos são cruciais para entender o comportamento hidrológico das lagoas.

Em seguida, ocorre um grande ciclo úmido, o mais longo do conjunto, com duração de 11 anos (2001/2002 a 2011/2012). Esse ciclo teve apenas 2 anos (2005-2006 e 2007-2008) com precipitação abaixo da média histórica. O ciclo final é um ciclo de seca com duração de 7 anos (2012/2013 a 2018/2019). Durante esse ciclo, todos os anos hidrológicos apresentaram precipitação abaixo da média histórica, mostrando volumes muito baixos de precipitação; essa redução significativa na precipitação na região também é observada nos trabalhos de Amaral (2018), Tavares (2020) e Macedo e Alvarez (2021).

Os primeiros (1984-1985) e últimos (2019-2020) anos hidrológicos do intervalo analisado foram excluídos, pois incluí-los em qualquer ciclo não seria coerente devido ao comportamento desconhecido dos anos anteriores ao intervalo escolhido, assim como dos anos posteriores ao período do estudo. Os períodos úmidos, secos e mistos foram tratados graficamente para observar as linhas de tendência de cada ciclo e os valores de precipitação média harmônica que abrangem apenas os valores de precipitação de cada período (Figura 5.7).

Figura 5.7: Gráfico dos ciclos pluviométricos, contendo suas médias e linhas de tendência que representam a variação pluviométrica de ciclo. Abaixo tabela que sintetiza as médias e equações das linhas de tendência de cada ciclo, com seus coeficientes angulares em azul (positivo) e vermelho (negativo).



Ciclos	Seca (1985-1990)	Misto (1990-1995)	Misto (1995-2001)	Chuva (2001-2012)	Seca (2012-2018)
Coefficientes Angulares	$y = 43,21x + 977,07$	$y = -66,56x + 1411,2$	$y = -78,709x + 1531,2$	$y = 1,68x + 1286,1$	$y = 24,571x + 926,41$
Média	1095,8	1200,2	1223,9	1288,5	1014

Fonte: Autor.

A precipitação média para os dois períodos secos ficou bem abaixo da média histórica (1212 mm/ano) previamente apresentada, sendo que o primeiro período seco registrou 1095,8 mm/ano e o segundo 1014 mm/ano. Em contraste, o período úmido (2001 a 2012) apresentou uma média de 1288,5 mm/ano, significativamente acima da média histórica (1212 mm/ano), o que é esperado para um ciclo de precipitação úmido.

A observação da média para cada um dos ciclos mistos revela um padrão interessante: a precipitação média durante os anos de cada ciclo está próxima da média histórica de precipitação (1212 mm/ano). Isso reflete a natureza desses períodos, caracterizados por variações de precipitação alta e baixa ao longo dos anos, como observado na análise de todo o período estudado (1984 a 2020). O primeiro período misto teve uma média de 1200,2 mm/ano, e o segundo uma média de 1223,9 mm/ano.

As linhas de tendência para cada tipo de ciclo (seco, úmido e misto) mostram comportamentos semelhantes. Durante os períodos secos, as linhas de tendência exibem uma tendência positiva, indicando um aumento anual da precipitação dentro desses ciclos. Isso sugere que o início dos ciclos de escassez de precipitação é mais severo, com a precipitação tendendo a se aproximar da média histórica ao longo do

tempo. O aumento anual da precipitação ao longo do ciclo é de 43,2 mm/ano (primeiro ciclo seco) e 24,5 mm/ano (segundo ciclo seco).

Os ciclos mistos apresentam comportamento oposto aos ciclos secos, com as linhas de tendência mostrando valores negativos. Isso indica que esses ciclos começam com valores de precipitação mais altos e apresentam uma redução da precipitação ao longo do ciclo, com uma queda de 66,5 mm/ano (primeiro ciclo misto) e 78,7 mm/ano (segundo ciclo misto).

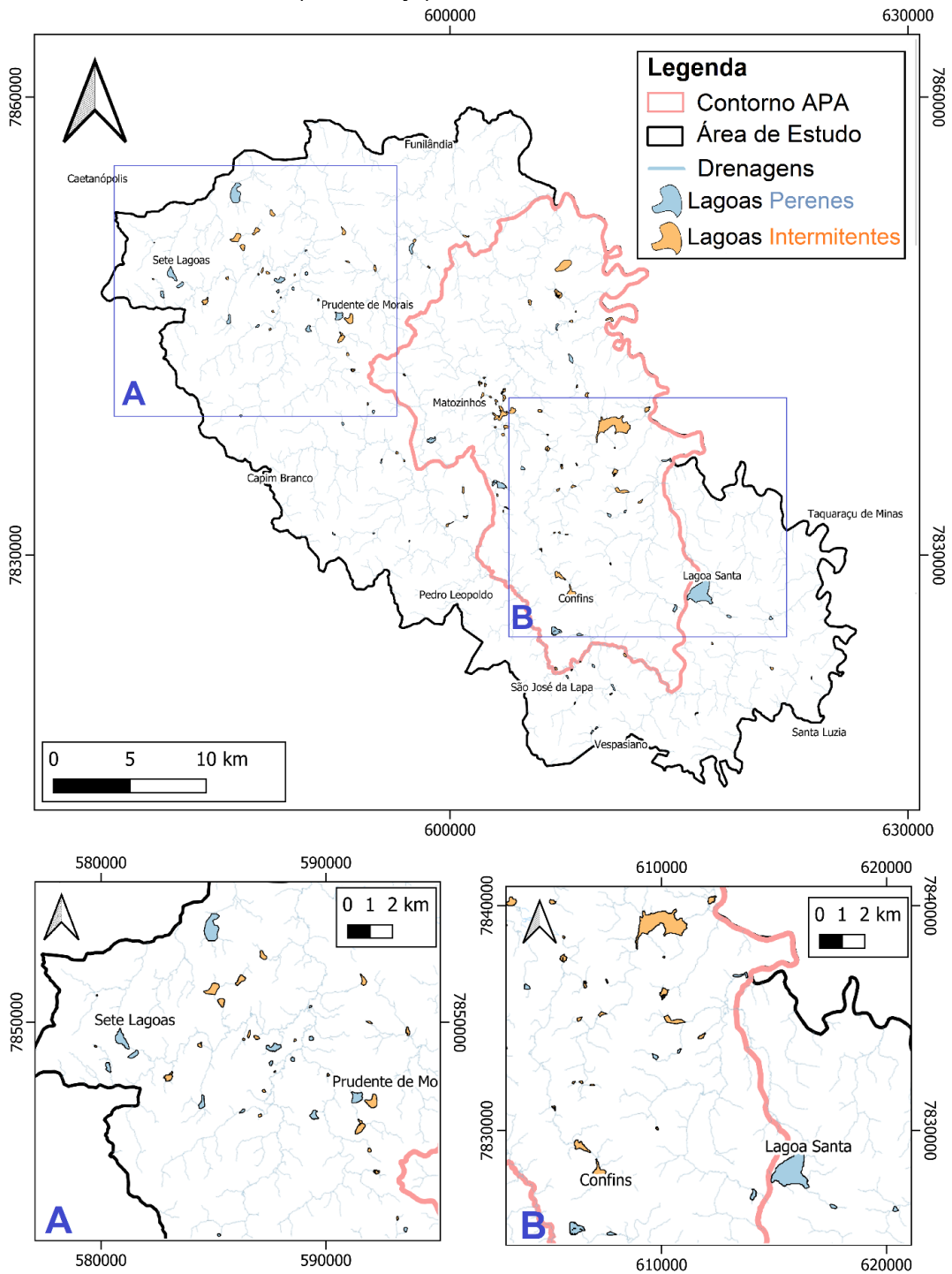
Por fim, o ciclo úmido apresenta uma linha de tendência constante, indicando um ciclo bem definido, com a maioria dos seus anos hidrológicos marcados por altos valores de precipitação. A linha de tendência é positiva, mostrando um aumento de 1,6 mm/ano ao longo do ciclo.

5.4.3 Identificação e Periodicidade das Lagoas

Com base na análise do comportamento dos corpos d'água durante esse período, 129 lagoas foram classificadas em dois tipos principais: 40 lagoas perenes, que apresentaram corpos d'água tanto na estação chuvosa quanto na estação seca de todos os anos hidrológicos; e 89 lagoas intermitentes, que apresentam variação significativa nos corpos d'água entre as estações seca e chuvosa, às vezes secando completamente na estação seca ou permanecendo secos por vários anos hidrológicos antes de reaparecerem (Figura 5.8).

O valor do perímetro de cada lago também foi determinado, representando o comprimento da borda mais externa dos corpos d'água em cada imagem utilizada, variando conforme seu tamanho e forma. Essa medida forneceu a base para as etapas subsequentes desta pesquisa.

Figura 5.8: Identificação e distribuição das lagoas perenes (em azul) e lagoas intermitentes (em laranja) na área de estudo.



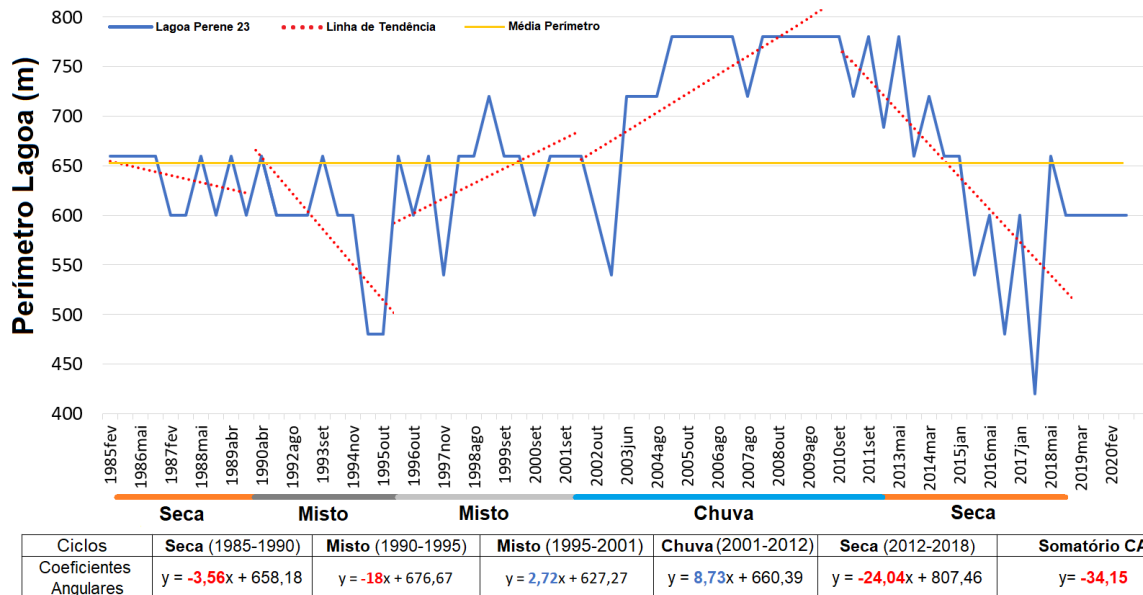
Fonte: Autor.

5.4.4 Comportamento Hídrico das Lagoas

Foi observada a variação do perímetro, bem como as linhas de tendência dessa variação dentro dos ciclos de precipitação, e os coeficientes angulares foram calculados, representando como as lagoas se expandiram e contraíram em cada um

dos ciclos de precipitação. A soma desses coeficientes angulares pode ser interpretada como a mudança no corpo d'água de um lagoa ao longo do período de 36 anos coberto neste estudo. A Figura 5.9 ilustra a variação do perímetro de um dos lagoas perenes, onde a tabela representa a equação da linha de tendência para a variação do perímetro do corpo d'água ao longo de cada ciclo analisado, junto com a soma dos coeficientes angulares dessa variação em todos os ciclos. Para visualização, um lago foi escolhido, e essa medição foi realizada para 40 lagoas perenes e 89 lagoas intermitentes na região de foco.

Figura 5.9: Representação gráfica da variação de perímetro da lagoa perene 23 ao longo do intervalo temporal utilizado nesta pesquisa. Pode-se observar os ciclos pluviométricos e as linhas de tendência de variação perítrica em cada ciclo. A tabela abaixo informa as equações das linhas de tendência dentro de cada um dos ciclos, assim como os seus coeficientes angulares positivos e negativos.



Fonte: Autor.

Na Figura 5.9, pode-se observar o comportamento da lagoa perene número 23 e como seu perímetro variou de 1985 a 2020. Como lagoa perene, ela nunca secou durante o intervalo analisado; no entanto, apresentou variações significativas em seu corpo d'água, com muitas mudanças registradas durante os ciclos úmidos e secos previamente definidos. Durante o primeiro ciclo seco, a lagoa apresentou uma variação considerada normal, em que seu corpo d'água expandiu e contraiu de acordo com as variações de precipitação entre as estações seca e chuvosa dentro de um ano

hidrológico. Ao final desse ciclo, o coeficiente angular gerado pela equação da linha de tendência indicou uma perda de 3,56 m em seu corpo d'água.

Os dois ciclos mistos subsequentes tiveram influências distintas no perímetro da lagoa. Durante o primeiro ciclo misto, a lagoa sofreu uma contração de 18 m, enquanto no segundo ciclo misto, ela se expandiu em 2,72 m.

O ciclo úmido entre 2002 e 2011 representou uma variação positiva significativa no perímetro da lagoa, que pode estar relacionada à maior precipitação ocorrida nesse ciclo. Durante esse período, a lagoa atingiu seu maior corpo d'água dentro do intervalo analisado, totalizando 780 m de perímetro, valor mantido por vários anos. Ao final desse ciclo, a equação da linha de tendência indicou que a lagoa teve uma expansão de 8,73 m ao longo do ciclo úmido.

Por fim, a lagoa enfrentou um último ciclo seco, onde seu corpo d'água se reduziu drasticamente, alcançando valores de 425 m durante a estação seca de 2017, o período de maior contração da lagoa no intervalo analisado. Ao final desse ciclo, a lagoa começou a se expandir novamente, porém não o suficiente para apresentar uma variação positiva ao longo do ciclo. A linha de tendência representou uma redução de 24 m para a lagoa durante os anos analisados. A soma de todos os coeficientes angulares obtidos para cada ciclo resultou em uma contração total de 34,15 m para a lagoa ao longo dos anos analisados.

5.4.5 Classes de lagoa quanto à conexão hídrica

Os dados anteriores forneceram a base para definir as classes de conexão hidrológica que representam lagoas perenes e intermitentes, que apresentam comportamento similar em resposta à variação do perímetro relacionada às mudanças nos padrões de precipitação. Diferentes abordagens foram usadas para analisar a conexão hidrológica de lagoas perenes e intermitentes. Os resultados para cada tipo de lagoa serão discutidos a seguir, começando pelas lagoas perenes e depois as intermitentes.

5.4.5.1 Lagoas Perenes – Análise dos coeficientes angulares

Para a análise da conexão hidrológica das 40 lagoas perenes, primeiro foi observada a soma dos coeficientes angulares para todos os ciclos de precipitação

previamente definidos. Essas somas indicaram quais lagoas cresceram ou encolheram durante os 36 anos analisados neste estudo. Interpretar esse comportamento em relação à evolução dos corpos d'água é crucial para identificar lagoas que estão conectadas ao aquífero. Essas lagoas, independentemente das variações de precipitação, foram reabastecidas por água subterrânea e apresentaram aumento em sua superfície d'água. Por outro lado, lagoas que podem estar desconectadas podem estar perdendo água por infiltração e percolação, incapazes de manter seus níveis de água em suas depressões apenas pela precipitação.

As equações das linhas de tendência e seus coeficientes angulares, bem como a soma desses coeficientes, estão detalhadas na Tabela 1A, contida no apêndice deste artigo. Um subconjunto dessa tabela pode ser visto na Tabela 5.2.

A soma dos coeficientes angulares foi comparada com o perímetro médio de cada lagoa para estabelecer os limites de contração da superfície d'água experimentada por cada corpo d'água ao longo dos anos. Somas negativas indicam contração das lagoas durante o intervalo analisado. Lagoas que diminuíram mais de 5% do seu perímetro médio apresentaram contração significativa, enquanto lagoas que diminuíram menos de 5% exibiram contração menor da superfície d'água. Lagoas com somas positivas dos coeficientes angulares apresentaram aumento de suas superfícies d'água ao longo dos anos analisados. O fluxograma que representa essa etapa pode ser visto na Figura 5.4.

Tabela 5.2: Exemplos de lagoas perenes e seus comportamentos de variação do perímetro em cada um dos ciclos de precipitação definidos neste estudo, bem como seu comportamento final após todos os anos analisados. Somatórios em azul representam expansão do espelho d'água, e os em vermelho representam retrações.

Lagoa Perene	Linhas de Tendência					Análise das lagoas durante todo os períodos				
	Seca (1985-1990)	Misto (1990-1995)	Misto (1996-2001)	Chuva (2002-2010)	Seca (2012-2018)	Somatório de todos Coeficientes Angulares	Perímetro Lagoas (m)	Lagoas que cresceram	Lagoas que diminuíram menos de 5%	Lagoas que diminuíram mais de 5%
1	$y = -4,8112x + 767,94$	$y = 7x + 758,33$	$y = 813,33$	$y = -4,7678x + 835,29$	$y = -3,2253x + 804,12$	$y = -5,79$	784			X
6	$y = -34,213x + 1008,5$	$y = 2,3333x + 660,78$	$y = 16,157x + 578,89$	$y = -1,9628x + 791,54$	$y = 27,615x + 592,08$	$y = 9,92$	767	X		
8	$y = 76,759x + 1165,2$	$y = -0,9667x + 2025,6$	$y = -94,259x + 2988,7$	$y = 0,3798x + 1957,1$	$y = -5,6044x + 1992,5$	$y = -23,69$	1999			X
10	$y = 116,72x + 1340$	$y = 21,483x + 1905,4$	$y = -16,416x + 1228,1$	$y = -9,6502x + 1043,5$	$y = 5,0165x + 1115,1$	$y = 117,15$	1348	X		
13	$y = -90,633x + 2299,4$	$y = -84,4x + 1739,9$	$y = -6,8531x + 1382,2$	$y = 22,118x + 1206,7$	$y = -25,286x + 1776,5$	$y = -184,78$	1501			X
20	$y = -42,587x + 921,82$	$y = -15x + 635$	$y = -37,385x + 916$	$y = -8,6357x + 670,48$	$y = -7,9341x + 535,46$	$y = -111,52$	582			X
35	$y = 2,8147x + 2329,8$	$y = -175,05x + 3936,5$	$y = -138,74x + 4006,2$	$y = -39,089x + 2999,4$	$y = -218,05x + 3599,2$	$y = -568,11$	2529			X
36	$y = -47,916x + 3679,6$	$y = 102,75x + 2912,6$	$y = -37,182x + 3562,7$	$y = 43,744x + 2801,7$	$y = -4,4176x + 3381,3$	$y = 56,99$	3349	X		

Obs: Equação reduzida da reta ($y = mx + b$). Onde, y é a variável dependente; x é a variável independente; m é o coeficiente angular, que representa a inclinação da reta; e b é o coeficiente linear, que indica o ponto onde a reta cruza o eixo vertical. Fonte: Autor.

A Tabela 5.2 ilustra o comportamento de algumas das lagoas perenes estudadas, mostrando três exemplos de lagoas cujas superfícies d'água se expandiram ao longo dos anos analisados. É possível notar que, apesar da expansão, essas lagoas apresentaram diferentes graus de aumento, que podem ser comparados com seus tamanhos médios. Por exemplo, a expansão de 56,99 m da Lagoa 36, embora represente um aumento de tamanho, pode não ser considerada significativa devido ao seu perímetro médio de 3349 m. Por outro lado, a expansão da Lagoa 10, que cresceu 117,15 m em relação ao seu perímetro médio de 1348 m, pode ser considerada significativa, com seu tamanho aumentando quase 10% ao longo dos 36 anos.

As lagoas que apresentaram contração em suas superfícies d'água foram categorizadas em duas classes: aquelas com contrações inferiores a 5% e aquelas com contrações superiores a 5% em relação ao seu perímetro médio. Por exemplo, a Lagoa 8 apresentou uma contração de 23,69 m, mas seu perímetro médio é de 1999 m, tornando a contração observada ao longo dos anos relativamente baixa. Por outro lado, a Lagoa 20 sofreu uma contração de 111,52 m em sua superfície d'água, valor considerado alto para uma lagoa com perímetro médio de 582 m.

Na análise das 40 lagoas perenes, 12 lagoas apresentaram aumento em suas superfícies d'água ao longo dos anos, enquanto 28 lagoas experimentaram uma diminuição em suas superfícies d'água entre 1985 e 2020. Dentre essas 28 lagoas que se contraíram, 15 apresentaram contração inferior a 5% em relação ao seu perímetro médio, e 13 apresentaram contração superior a 5%. Os dados completos de todas as lagoas perenes analisadas nesta etapa podem ser encontrados nos apêndices deste artigo, na Tabela 1A.

5.4.5.2 Lagoas Perenes – Análise comportamental durante a transição de ciclos pluviométricos

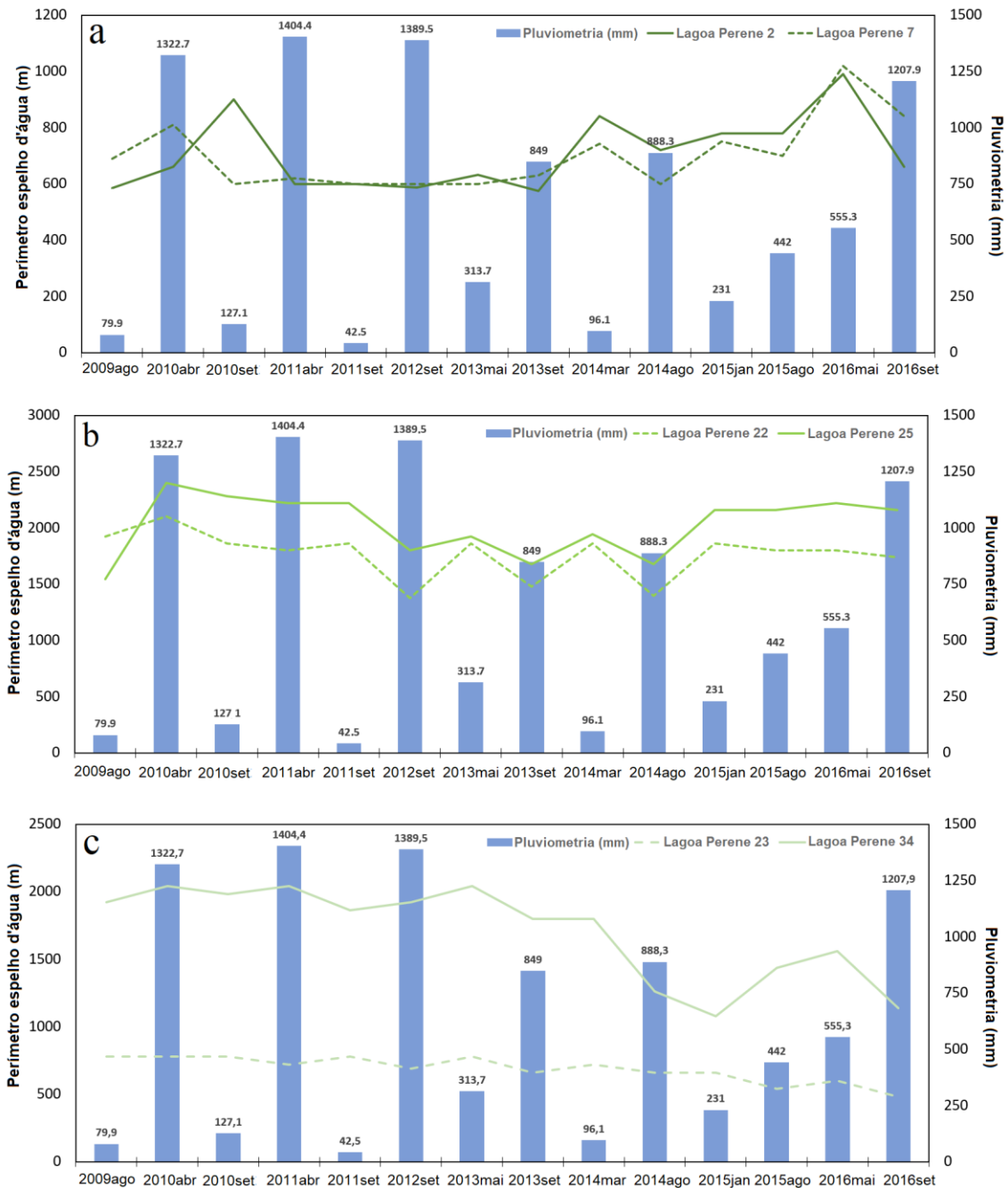
A extensão em que cada lagoa perene cresceu ou encolheu durante o período do estudo já foi observada anteriormente (Tabela 5.2 e Tabela 1A do apêndice A). Outro resultado interessante surgiu ao comparar cada lagoa perene em termos de sua resposta às mudanças nos ciclos de precipitação, destacando como o comportamento da lagoa reage a mudanças abruptas na precipitação. Portanto, o período de 2009 a 2016 foi escolhido para demonstrar graficamente essas mudanças.

Esse intervalo não foi escolhido aleatoriamente; esses anos são altamente representativos da variação da precipitação na região, abrangendo o final do ciclo úmido (2001-2012) e o início do último ciclo seco (2012-2018). Consequentemente, a forte redução da precipitação pode impactar diretamente a superfície d'água das lagoas cársticas, especialmente se essas lagoas perenes estiverem desconectadas do aquífero. Nesses casos, as variações em suas superfícies d'água estão totalmente relacionadas à quantidade de chuva que afeta suas depressões. Amaral (2018), ao analisar a ocorrência de água em algumas depressões cársticas na região da APA Karst Lagoa Santa, observou que durante recessões hidrológicas, especialmente de

2010 a 2014, muitas lagoas tiveram suas superfícies d'água reduzidas ou até secaram devido à menor precipitação.

Com base nesse resultado, três comportamentos distintos foram identificados para as lagoas perenes da região em resposta às mudanças na precipitação. Das 40 lagoas perenes analisadas, 37 foram categorizadas em três grupos que esclarecem seu comportamento em relação à conexão hidrológica com os aquíferos da região. Para representar esses padrões, algumas lagoas que ilustram efetivamente sua resposta a uma sequência de anos com alta precipitação média seguida por uma redução na precipitação média foram selecionadas. A representação gráfica das variações de perímetro dessas lagoas ao longo dos anos pode ser observada na Figura 5.10.

Figura 5.10: Representação gráfica com exemplos do comportamento de lagoas perenes constantemente conectadas (a), lagoas perenes desconectadas sazonalmente (b) e lagoas perenes desconectadas (c).



Fonte: Autor.

O gráfico da Figura 5.10a representa o grupo de lagoas que não apresentam alterações em sua superfície d'água durante a transição de um ciclo úmido para um ciclo seco. Ele ilustra duas lagoas perenes que, durante a transição do ciclo (setembro de 2012 a maio de 2013), mantiveram um perímetro constante e, ao entrarem no ciclo seco, apresentaram aumento em seu perímetro ao longo dos anos. Isso sugere que

essas lagoas são melhor abastecidas por água subterrânea, provavelmente devido aos altos níveis do aquífero mesmo durante períodos de baixa precipitação. Segundo Legrand & Lamoreaux (1975), um fenômeno que pode ocorrer em aquíferos cársticos é a recarga tardia, onde os níveis de água em piezômetros podem subir apenas após eventos de precipitação, exibindo respostas mais lentas devido à complexidade do sistema aquífero. Isso pode estar acontecendo com os níveis d'água nessas lagoas. Esse grupo de lagoas foi classificado em termos de conexão hidrológica como lagoas perenes constantemente conectadas e inclui 19 lagoas que não dependem da precipitação para sua permanência.

O gráfico da Figura 5.10b representa o grupo de lagoas que apresentam alterações em sua superfície d'água durante a transição de um ciclo úmido para um ciclo seco. Mostra duas lagoas perenes que, durante a transição do ciclo (setembro de 2012 a maio de 2013), exibem uma perturbação em seu perímetro, interpretada aqui como uma desconexão temporária. Ao longo dos anos, a superfície d'água tende a retornar ao seu comportamento normal, indicando que a lagoa se reconecta com o aquífero e/ou que o nível do lençol freático é restabelecido, mantendo seu abastecimento padrão durante os anos subsequentes do ciclo de baixa precipitação. Esse grupo foi classificado como lagoas perenes desconectadas sazonalmente e inclui 9 lagoas que dependem menos da precipitação para sua permanência.

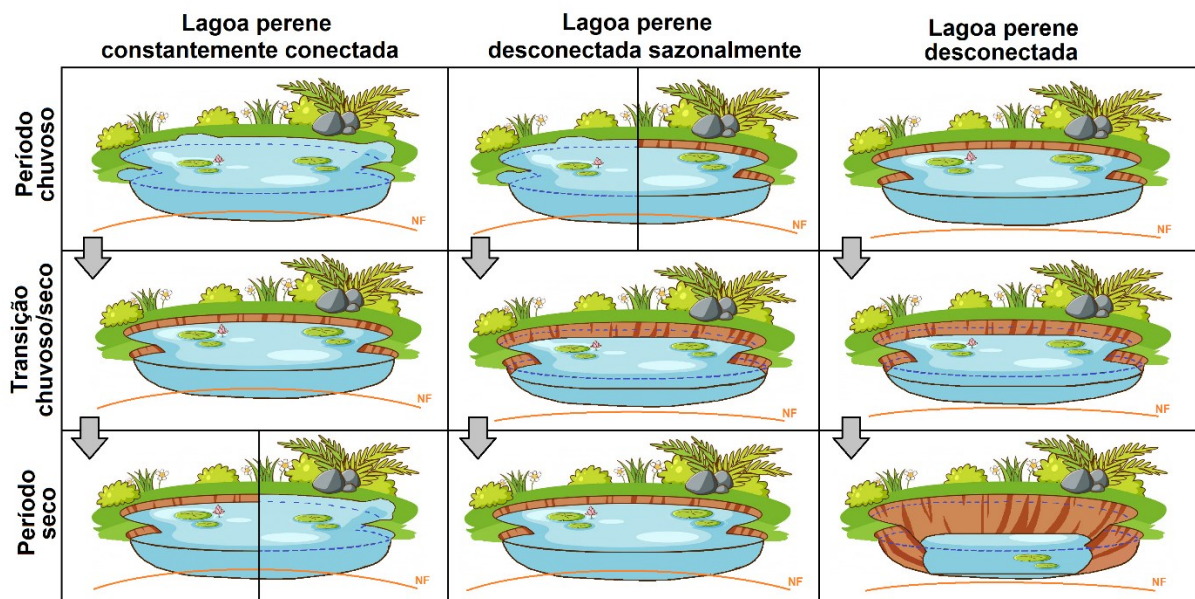
O gráfico da Figura 5.10c representa o grupo de lagoas que apresentaram alterações em sua superfície d'água durante a transição de um ciclo úmido para um ciclo seco. Ilustra duas lagoas perenes que, durante a transição do ciclo (setembro de 2012 a maio de 2013), exibem uma perturbação em seu perímetro, com contração significativa da superfície d'água ao entrarem nos anos de baixa precipitação. Essas lagoas não retornam ao seu comportamento normal dentro do intervalo analisado e são interpretadas como lagoas altamente influenciadas pelo balanço de precipitação. Esse grupo foi classificado como lagoas perenes desconectadas e inclui 9 lagoas que são altamente dependentes da precipitação para determinar sua permanência.

Outra perspectiva sobre essas feições cársticas poderia ser interpretá-las como áreas de recarga, como lagoas de detenção e infiltração, onde a água acumulada durante as estações úmidas é lentamente drenada para os corpos de água subterrâneos, ou como lagoas com sumidouros, uma feição comum de recarga cárstica em lagoas carbonatadas (Ford & Williams, 2007). Lagoas que recarregam o

aquífero já foram estudadas anteriormente na área de estudo, como a Lagoa Grande estudada por Pizani *et al.* (2021) e Alves *et al.* (2021), que mostrou que essa lagoa perene sofreu uma contração de sua superfície d'água entre 2013 e 2017, e os dados coletados neste estudo não indicam aumento subsequente em seu volume.

Por fim, 3 lagoas, das 40 lagoas perenes estudadas, não se enquadraram nesses comportamentos. Uma representação ilustrativa do comportamento de cada classe de conexão hidrológica para as lagoas pode ser vista na Figura 5.11, que mostra como as lagoas se comportam durante os períodos úmidos e secos (ou ciclos), bem como o que acontece com esses corpos d'água durante a transição de alta para baixa precipitação.

Figura 5.11: Ilustração das classes de conexão hídrica proposta para as lagoas perenes analisadas.



Fonte: Autor.

5.4.5.3 Lagoas Perenes – Compatibilidade entre as análises

As duas abordagens discutidas anteriormente resultaram em achados distintos. A primeira análise identificou quais lagoas perenes apresentaram crescimento, contração leve e contração acentuada de suas superfícies d'água ao longo dos anos. A segunda análise demonstrou o comportamento de cada lagoa perene durante a transição de um ciclo úmido para um ciclo seco, definindo classificações com base em sua conexão com o aquífero.

Para validar esses dados, os resultados das duas análises foram correlacionados com a seguinte premissa: lagoas constantemente conectadas ao

aquífero devem apresentar maiores variações positivas na superfície d'água e, caso haja contração, ela deve ser leve; lagoas desconectadas devem apresentar maiores variações negativas, já que uma lagoa não conectada ao aquífero não pode aumentar sua superfície d'água; e lagoas desconectadas sazonalmente podem apresentar qualquer comportamento — contração ou expansão — influenciado pela duração e frequência da desconexão ao longo do período de estudo.

Entre as 19 lagoas definidas como constantemente conectadas ao aquífero, 8 apresentaram aumento em sua superfície d'água ao longo dos anos, e outras 8 apresentaram contração leve (menor que 5%), o que reforça a hipótese de que lagoas conectadas ao aquífero recebem aporte hídrico e, portanto, tendem ao crescimento ou apresentam variações mínimas nos valores de perímetro. Essas lagoas são ótimos exemplos de corpos d'água que funcionam como pontos de descarga do aquífero, com perda de água ocorrendo por evapotranspiração das águas superficiais. Apenas 3 lagoas mostraram comportamento inesperado para essa classe de conexão, com contração significativa da superfície d'água. Assim, a correlação entre as duas metodologias adotadas foi considerada válida em 84%.

Entre as 9 lagoas classificadas como desconectadas do aquífero, 4 apresentaram contração leve (menos de 5%) e 5 apresentaram contração significativa (mais de 5%) em suas superfícies d'água durante o período estudado, o que reforça a hipótese de que lagoas desconectadas não recebem o suprimento hídrico necessário e, portanto, apresentam variações negativas em seus perímetros ao longo do tempo. Essas lagoas possuem o maior potencial de contribuir com a recarga do aquífero na região, conforme indicado pela sua contração durante eventos de baixa precipitação. Nenhuma lagoa apresentou comportamento diferente do esperado para essa classe de conexão. Assim, a correlação entre os dois métodos adotados foi de 100%.

As 9 lagoas definidas como desconectadas sazonalmente estão distribuídas entre os três comportamentos identificados, com 3 lagoas em cada tipo de variação da superfície d'água ao longo dos anos. Um estudo mais detalhado sobre quantos anos essas lagoas permaneceram desconectadas e com que frequência isso ocorreu poderia ajudar a entender melhor as variações de suas superfícies. Ainda assim, acredita-se que essas lagoas alternem entre estados conectados e desconectados do aquífero.

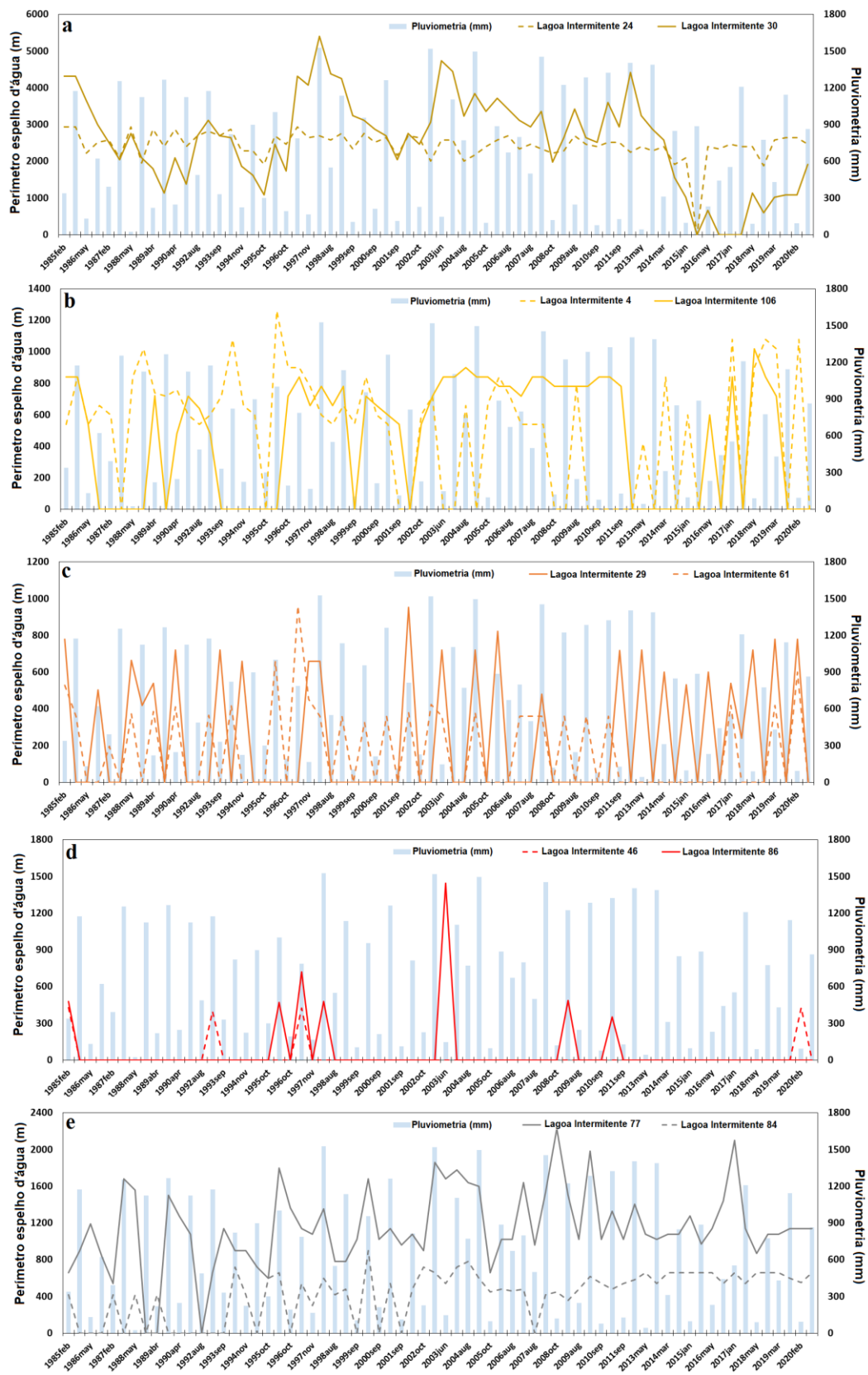
5.4.5.4 Lagoas Intermitentes – Análise da variação perimétrica

Diferentemente das lagoas perenes, a análise das linhas de tendência e de seus coeficientes angulares não foi útil para definir o comportamento das lagoas intermitentes. Isso ocorre porque quase todas as lagoas intermitentes apresentam linhas de tendência negativas, já que muitas vezes essas lagoas ficaram secas durante os anos do estudo — uma característica típica das lagoas intermitentes, que exibem flutuações sazonais nos níveis de água durante os períodos úmidos e secos (Linkens, 2010).

Portanto, foi adotada outra abordagem para determinar as possíveis conexões dessas lagoas com o aquífero ao longo dos anos analisados, classificando-as com base em comportamentos hidrológicos semelhantes.

Para definir os principais tipos de lagoas intermitentes, foi realizada uma análise gráfica do comportamento da superfície d'água de todas essas lagoas ao longo de todo o período de estudo, permitindo o agrupamento das 89 lagoas intermitentes em 5 grupos ou classes que apresentam comportamento hidrológico semelhante em termos de variação do perímetro. Duas lagoas de cada classe de conexão hidrológica foram selecionadas para representar seus comportamentos (Figura 5.12).

Figura 5.12: Representação gráfica com exemplos do comportamento das lagoas intermitentes que se desconectaram do aquífero em algum momento (a), lagoas intermitentes com conexão sazonal (b), lagoas intermitentes desconectadas (c), lagoas intermitentes extremamente desconectadas (d) e lagoas intermitentes totalmente conectadas (e).



Fonte: Autor.

O gráfico da Figura 5.12a mostra duas lagoas classificadas como lagoas intermitentes que se desconectaram do aquífero em algum momento, representando

o comportamento de 13 lagoas intermitentes na área de estudo. Essas lagoas permaneceram constantemente cheias durante sua história hidrológica, mas se desconectaram do aquífero e secaram em determinado momento, mudando de um comportamento típico de lagoa perene (que não seca) para intermitente. A figura ilustra as lagoas 24 e 30; elas permaneceram com água por muitos anos e depois secaram em 2015. A lagoa 24 secou por apenas um período (estação seca de 2015), enquanto a lagoa 30 apresentou outros anos secos antes de voltar a acumular água. Vale destacar que muitas lagoas com esse comportamento tiveram o último evento de secagem como o momento em que não conseguiram mais reter água. Curiosamente, as lagoas desse grupo são geralmente muito grandes, com perímetros médios próximos de 2000 m, bem acima da média regional de 870 m. A Lagoa do Sumidouro é um bom exemplo dessa classe, com perímetro médio de 6504 m no período analisado, tendo secado completamente durante o último ciclo seco — algo inédito em sua história hidrológica. O comportamento da Lagoa do Sumidouro também foi observado por Tavares (2020) e Macedo e Alvarez (2021).

O gráfico da Figura 5.12b mostra duas lagoas classificadas como lagoas com conexão sazonal ao aquífero, representando o comportamento de 27 lagoas intermitentes na área de estudo. Essas lagoas secam regularmente, mas em certos períodos deixam de secar e apresentam comportamento semelhante ao de lagoas perenes, provavelmente por uma conexão temporária com o aquífero. Eventualmente, se desconectam novamente e voltam a secar — comportamento típico de lagoas intermitentes. Na figura, a lagoa 4 se conecta em certos períodos, como entre 1987 e 2001, secando apenas uma vez, e novamente entre 2005 e 2008, mantendo-se com água. A lagoa 106, também representada, permaneceu conectada por um longo período, de 2002 a 2012. Observou-se que as lagoas desse grupo exibem comportamento de conexão temporária com o aquífero apenas durante períodos de precipitação média a alta, ou seja, durante os ciclos úmidos e mistos. Isso sugere que a chuva também influencia a persistência da água nessas depressões, possivelmente por elevação do nível freático em algumas áreas.

O gráfico da Figura 5.12c mostra duas lagoas classificadas como lagoas intermitentes desconectadas do aquífero, representando o comportamento de 25 lagoas intermitentes na área de estudo. São lagoas intermitentes “clássicas” que secam com frequência, comportamento considerado “normal” para esse tipo de lagoa,

que se enchem e secam regularmente (Likens, 2010), especialmente influenciadas por chuvas nos períodos úmidos. Essas lagoas são semelhantes às descritas por Auler (1994), situadas sobre rochas calcárias com níveis de água flutuantes com maior frequência de oscilações. Na figura, as lagoas 29 e 61 demonstram períodos alternados de enchimento e secagem, além de curtos períodos de aumento do nível de água devido à alta precipitação, e secagem durante anos de baixa pluviosidade.

O gráfico da Figura 5.12d mostra duas lagoas classificadas como lagoas intermitentes extremamente desconectadas do aquífero, representando o comportamento de 21 lagoas intermitentes da área de estudo. Essas lagoas permanecem secas quase todo o tempo, apresentando água apenas em eventos extremos de alta precipitação. Como as anteriores, exibem comportamento semelhante ao de lagoas sobre rochas calcárias descritas por Auler (1994). A dificuldade da água em permanecer nessas depressões sugere que essas lagoas são excelentes pontos de recarga local para aquíferos profundos. Na figura, as lagoas 46 e 86 aparecem secas na maioria dos anos, mostrando água apenas durante os períodos úmidos do ano hidrológico e secando logo em seguida.

O gráfico da Figura 5.12e mostra duas lagoas classificadas como lagoas intermitentes que se conectaram com o aquífero em algum momento, representando o comportamento de 3 lagoas intermitentes da área de estudo. Essas lagoas, historicamente com comportamento intermitente de enchimento e secagem alternados, eventualmente se conectaram ao aquífero e passaram a se comportar como lagoas perenes, não secando durante o período de estudo. Na figura, as lagoas 77 e 84 demonstram o momento exato em que deixaram de secar e passaram a manter uma lâmina d'água constante por vários anos consecutivos. Uma possível explicação para esse comportamento é o aumento do nível freático nas proximidades, resultando em permanência da água nessas depressões cársticas.

Por fim, é importante destacar a característica única das lagoas da região, intimamente relacionada ao comportamento peculiar do carste. Como mencionado anteriormente, a região se desenvolve sobre rochas calcárias do Neoproterozoico, com porosidade primária praticamente ausente — cerca de 3% na matriz rochosa (Peñaranda, 2016). Assim, o fluxo de água no sistema ocorre principalmente em porosidades secundárias (fraturas verticais) e terciárias (condutos nas rochas

carbonáticas). Muitas lagoas, portanto, estão sujeitas a um fluxo de água complexo e irregular nos aquíferos cársticos e cárstico-fraturados da região.

5.5 Conclusão

A análise dos dados de precipitação identificou ciclos úmidos e secos que influenciam os corpos d'água superficiais da região, assim como impactam os níveis do aquífero, sendo categorizados em cinco ciclos de precipitação: seco, dos anos hidrológicos de 1984/1985 a 1989/1990; misto, de 1990/1991 a 1994/1995; outro ciclo misto, de 1995/1996 a 2000/2001; úmido, de 2001/2002 a 2011/2012; e um novo ciclo seco, de 2012/2013 a 2018/2019.

O uso da classificação supervisionada por sensoriamento remoto (classificador de máxima verossimilhança) tornou a detecção de superfícies d'água nas imagens Landsat menos subjetiva e mais confiável, permitindo identificar lagoas perenes ou intermitentes e medir de forma satisfatória as variações em suas margens.

A flutuação dos níveis das lagoas perenes ao longo de 36 anos (1984–2020), comparada com o comportamento durante as transições dos ciclos de chuva, permitiu identificar três classes que resumem a influência das águas subterrâneas, abrangendo 92,5% de um total de 37 lagoas: 1) lagoas constantemente conectadas, que expandem ou apresentam contrações mínimas em sua história hidrológica, com a precipitação tendo pouco impacto direto em suas superfícies; 2) lagoas sazonalmente desconectadas, que apresentam distúrbios em suas superfícies devido às mudanças nos padrões de chuva, mas eventualmente voltam a expandir suas superfícies mesmo em anos de baixa precipitação; e 3) lagoas desconectadas, que sofrem contrações significativas e continuam perdendo água ao longo do tempo, sendo fortemente influenciadas pelas chuvas, com esse comportamento sendo evidente durante as transições entre os ciclos de precipitação.

Um total de 89 lagoas intermitentes foi categorizado em cinco classes que representam padrões de conexão hidrológica com o aquífero: 1) lagoas que se desconectaram, lagoas que estavam sempre cheias e depois secaram completamente em algum momento do intervalo temporal analisado; 2) lagoas com conexão sazonal, que secam, mas periodicamente apresentam comportamento perene por alguns anos antes de voltarem a secar; 3) lagoas desconectadas, que apresentam presença cíclica de água influenciada pelas variações anuais de precipitação; 4) lagoas extremamente

desconectadas, que permanecem constantemente secas, exceto durante eventos raros de alta precipitação; e 5) lagoas que se conectaram com o aquífero, que eram intermitentes no passado, mas que posteriormente se conectaram com o aquífero e passaram a apresentar comportamento perene, não secando até os últimos anos do estudo.

Deve-se enfatizar a complexidade da análise desses sistemas hídricos. Poucos dos corpos d'água estudados haviam sido analisados detalhadamente em trabalhos anteriores, mas já se havia observado que esses corpos podem desempenhar diferentes papéis no carste local, funcionando ora como nascentes ou pontos de descarga do aquífero, ora como sumidouros ou áreas de recarga. Alguns desses padrões também foram observados neste trabalho.

Destaca-se a importância de estudos sobre corpos d'água superficiais como as lagoas cársticas, que exigem cuidados delicados de preservação. Diversos fatores podem influenciar as flutuações de seus componentes hídricos. Embora este trabalho tenha esclarecido as influências da precipitação e das águas subterrâneas, são recomendadas investigações adicionais sobre outros fatores que possam ser cruciais para compreender o real comportamento dessas depressões alagadas. Uma análise das influências antrópicas, especialmente no uso da água, no sistema hidrogeológico cárstico local, é o objetivo da continuidade deste estudo.

6 INFLUÊNCIA DA EXPLOTAÇÃO DE ÁGUA SOBRE A VARIAÇÃO VOLUMÉTRICA DAS LAGOAS NO SISTEMA HIDROGEOLÓGICO CÁRSTICO DO GRUPO BAMBUÍ, LAGOA SANTA, MINAS GERAIS – BRASIL

Este capítulo apresenta uma análise da influência de poços tubulares sobre a variação volumétrica das lagoas na região de Lagoa Santa, inserida no sistema hidrogeológico cárstico do Grupo Bambuí. A investigação tem como base um banco de dados pré-existente que reúne informações sobre número de poços, vazões, tempo de bombeamento e outros parâmetros operacionais. A metodologia inclui o uso do conceito de raio de interferência, análise do balanço hídrico volumétrico das lagoas, levantamento da distribuição dos poços e sua relação espacial com os corpos hídricos, além da avaliação de condicionantes geológicos, morfológicos e estruturais. Os resultados apresentados servirão como base para a elaboração de um terceiro artigo científico, a ser submetido a revista especializada em hidrogeologia e recursos hídricos.

6.1 Introdução

As lagoas localizadas no sistema hidrogeológico cárstico do Grupo Bambuí, na região de Lagoa Santa, Minas Gerais, vêm apresentando, ao longo dos anos, variações volumétricas expressivas, as quais têm despertado a atenção de pesquisadores e órgãos ambientais. A complexidade desse sistema, caracterizado pela elevada heterogeneidade hidrogeológica típica de ambientes cársticos, torna desafiadora a identificação precisa dos fatores que influenciam essas variações. Neste contexto, além dos aspectos climáticos e naturais já reconhecidos, a pressão antrópica decorrente da exploração de água subterrânea surge como um possível vetor de transformação do comportamento hidrológico das lagoas.

O crescimento dos centros urbanos é uma das grandes causas relacionadas com problemas ambientais. O uso indevido e excessivo das águas superficiais e subterrâneas pode causar diversos problemas aos corpos hídricos, desde sua contaminação até o esgotamento de suas reservas. Com base nestes princípios, esta etapa está embasada. Como visto anteriormente, foi proposto a influência das águas superficiais e das águas subterrâneas como fatores que estão influenciando no comportamento hídrico destas lagoas, porém o fator antrópico não deve ser excluído.

Auler (1994), há 30 anos já pontuava sobre o crescimento descontrolado das cidades e observou como exemplo a cidade de Matozinhos, município incluso na região deste estudo, com expansão diretamente sobre coberturas cársticas. Nesta cidade, algumas ruas estão sendo construídas sobre dolinas e as lagoas cada vez mais estão sendo englobadas por centros urbanos. Em estudos mais recentes temos o trabalho de Assunção (2019) e Alves (2020), ambos com foco direcionado a lagoas no município de Sete Lagoas, também dentro da área de abrangência deste trabalho.

A lagoa do Matadouro, próximo a zona urbana do município de Sete Lagoas, foi estudada por Assunção (2019), o autor ao observar a superfície potenciométrica regional, ao longo do tempo, notou um significativo cone de rebaixamento no centro urbano periférico a lagoa. Com as condições de precipitação e evapotranspiração real estáveis, o autor concluiu que o rebaixamento da lagoa é influenciado pela superexploração da água subterrânea e esta seria uma das justificativas para a mudança de condição de perene para intermitente da lagoa do Matadouro.

Os estudos de Alves (2020) foram dedicados a lagoa Grande, também no município de Sete Lagoas. A autora utilizou diferentes metodologias, como análise isotópica, testes de aquífero e método geofísicos, para analisar as possíveis influências sobre o comportamento da lagoa. Com as abordagens utilizadas, Alves (2020) concluiu que a lagoa apresenta uma conexão evidente com as águas subterrâneas e o esgotamento deste corpo hídrico tem como principal fator a alta demanda por água existente na região.

Neste sentido, esta etapa busca uma análise da influência de poços tubulares sobre as lagoas existentes na região, com intuito de observar um novo fator que possa estar influenciando na mudança comportamental das lagoas e identificar quais lagoas mudaram seu comportamento devido as ações antrópicas. Será utilizado um banco de dados já existente para região que contém: número de poços, vazão, tempo de bombeamento e demais informações sobre os poços disponíveis. Nesta análise será utilizado o conceito de raio de interferência (De Paula, 2019), para verificar se as lagoas estão sofrendo por exploração de água em seus sistemas.

6.2 Métodos

A parte metodológica deste capítulo foi baseada em seis etapas: 1) Levantamentos pluviométricos a partir de dados de estações pluviométricas existentes na região de estudo entre os anos 1984 a 2020; 2) Identificação das lagoas existentes na região por meio de geoprocessamento, utilizando dados de satélites *Landsat*; 3) Caracterização geológica, morfológica e estrutural de cada lagoa analisada neste trabalho a partir de técnicas de sensoriamento remoto; 4) Detecção da periodicidade das lagoas entre os anos de 1984 a 2020, dimensionando os espelhos d'água de cada lagoa; 5) Análise volumétrica das lagoas ao longo do intervalo analisado, apontando os volumes de entrada e saída no balanço hídrico destes mananciais; 6) Enquadramento das lagoas que tiveram seu comportamento hídrico afetado por poços e levantar os motivos para algumas lagoas serem mais ou menos afetadas pela exploração de água no Carste de Lagoa Santa.

Todos os mapas, *rasters* e arquivos vetoriais foram geoprocessados no sistema de coordenada Universal Transversa de Mercator, com Datum WGS-1984, Zona 23S. Todas as atividades de geoprocessamento foram realizadas utilizando ferramentas do GRASS 7.8.3 do *software* QGIS® (GRASS PROJECT, 2013). O conjunto de tabelas, gráficos e tabelas foram realizados utilizando os *softwares* Microsoft Excel e CorelDRAW.

As quatro primeiras etapas metodológicas realizadas neste capítulo são correlatas as análises realizadas e descritas anteriormente nas metodologias dos capítulos 4 e 5 deste trabalho, publicadas nos artigos “Caracterização e classificação das lagoas dos sistema hidrogeológico cárstico do Grupo Bambuí na região de Lagoa Santa – Minas Gerais, a partir de análises geoespaciais” (Pacheco Neto *et al.*, 2023a) e “Conexões hidrológicas cársticas entre as lagoas e o sistema hidrogeológico neoproterozoico entre os anos de 1985-2020, Lagoa Santa – Minas Gerais, Brasil” (Pacheco Neto, De Paula & Galvão, 2024). As etapas 5 e 6, exclusivas deste capítulo, serão descritas a seguir.

6.2.1 Balanço Hídrico das Lagoas

A fim de possibilitar as análises realizadas nesta etapa, as lagoas foram relacionadas a um corpo geométrico fechado, onde as variações de volume neste

corpo, estão subordinadas as entradas e saídas que podem existir neste ambiente hídrico. O balanço de massa de água de uma lagoa, foi inicialmente relacionado com a equação do balanço hídrico (1):

$$P = ETR + INF + ESC \quad (1)$$

Onde:

P – Precipitação;

ETR – Evapotranspiração;

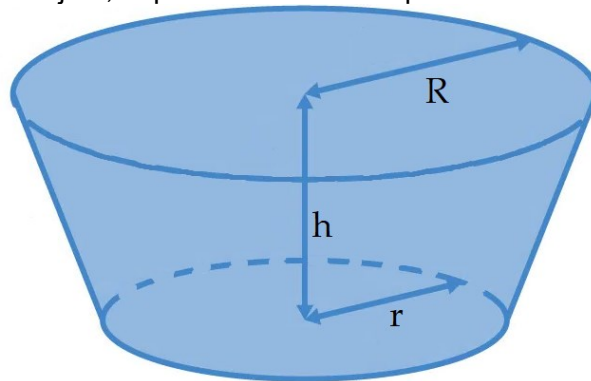
INF – Infiltração;

ESC – Escoamento.

Tem-se então que a quantidade de água que entra neste corpo hídrico está relacionada com a precipitação de água da chuva e as saídas estão relacionadas com a evapotranspiração, infiltração e o escoamento da água. Além disso, os valores de entrada são equivalentes ao somatório dos valores de saída, representando o princípio da conservação de massa de água em um sistema hidrológico (Shuttleworth, 1993).

Como mencionado previamente, o objeto que representa as lagoas estudadas é um corpo geométrico, neste caso, o que mais representa este corpo hídrico, é um tronco de um cone, com sua maior face voltada para cima, esta analogia já foi utilizada anteriormente em estudos como o de Pessoa (2005) e Alves *et al.* (2021). Vale ressaltar que, normalmente, as lagoas não apresentam uma forma perfeita, como aqui descrita, porém, para possibilitar a análise aqui descrita, admitiu-se esta forma geométrica para representar as lagoas analisadas neste trabalho. A Figura 6.1 representa este objeto.

Figura 6.1: Tronco de cone invertido, objeto geométrico escolhido para representar os volumes contidos nas lagoas deste estudo. As setas indicam o raio maior (R), raio menor (r) e a altura (h) do objeto, importantes medidas para o cálculo de seu volume.



Fonte: Autor.

Para entender a quantidade de água que cada lagoa poderia armazenar, foi realizado o cálculo do volume desta forma geométrica. A equação (2) utiliza a área da face superior e a área da face inferior do tronco de um cone, relacionada com sua altura, para determinar o volume de água existente na geometria que, aqui, representa uma lagoa.

$$V = \left(\frac{h}{3}\right) * (At + Ab + \sqrt{At * Ab}) \quad (2)$$

Onde:

V – Volume;

h – Altura;

At – Área Topo;

Ab – Área Base.

Por meio de geoprocessamento, o espelho d'água, aqui denominada de área do topo, para cada lagoa ao final dos anos hidrológicos foram obtidas (Pacheco Neto *et al.*, 2023a). Foi utilizado a altura média das lagoas levantadas por sensoriamento remoto nos dois estudos realizados por Amaral (2018). Os valores de área da base ou fundo da lagoa foram calculados a partir de outra equação, utilizando a área do topo e a declividade média destes corpos hídricos, também determinado por Amaral (2018). A equação (3) para determinar a área da base de um tronco de cone foi:

$$Ab = At * 1 - \left(\frac{Declv}{100}\right)^2 \quad (3)$$

Onde:

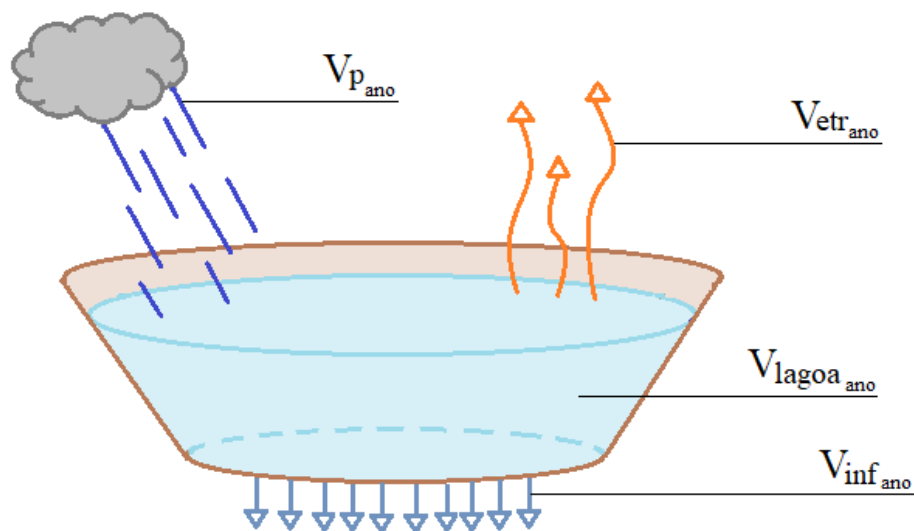
Ab – Área Base;

A_t – Área Topo;

$Decl_v$ – Declividade.

Portanto, com as informações do volumétricas da lagoa ao final de cada ano hidrológico, e a com os dados das áreas do topo e da base destes mananciais, foi possível calcular volumetricamente, o quanto de água participou no preenchimento e na retirada de água na lagoa, ao final dos anos hidrológicos analisados. A Figura 6.2 auxilia na visualização dos volumes de entrada e saída anteriormente discutidos que contribuem no balanço de massas de água na lagoa, ou seja, na variação volumétrica dos corpos geométricos analisados.

Figura 6.2: Fatores contribuintes na mudança de volume da lagoa (V_{lagoa_ano}) nos anos analisados. V_{p_ano} representa os volumes pluviométricos de entrada no sistema e V_{etr_ano} e V_{inf_ano} representam os volumes de saída pela evapotranspiração e pela infiltração, respectivamente.



Fonte: Autor.

Reforçando que as análises foram feitas em um corpo fechado, o volume de água que entra é, apenas, a quantidade de chuva que cai sobre a área do topo desta lagoa. Desta forma, o somatório do aporte pluviométrico anual foi obtido a partir de dados de estações pluviométricas, sendo escolhida a estação mais próxima de cada lagoa analisada. Este somatório foi multiplicado pela área do topo dos mananciais em diferentes anos hidrológicos, resultando assim, no total de volume aportado para a lagoa no ano hidrológico analisado, a equação (4) representa estes cálculos. As estações utilizadas neste trabalho foram Sete Lagoas (01944052), Pedro Leopoldo (01944009), Raul Soares (01943049), Vespasiano (01943009), Vargem Bonita

(01944024), Taquaraçu (01943023) e Jaboticatubas (01943004) fornecidas no portal virtual *HidroWeb* (snirh.gov.br/hidroweb).

Já nas retiradas de água deste sistema, a infiltração é representada pela quantidade de água que sai na base desta lagoa e a evapotranspiração real é a quantidade de água que sai do sistema a partir da área do topo deste corpo hídrico. No cálculo do volume infiltrado, foi utilizado como base a taxa média de recarga calculada por Teixeira *et al.* (2023). A autora pontua que as superfícies das depressões cársticas existentes na APA Carste de Lagoa Santa apresentam uma taxa média de recarga hídrica de 45%; desta forma, este valor foi multiplicado com a área da base de cada lagoa em diferentes anos hidrológicos. A equação (5) representa o cálculo para o volume hídrico retirado pela infiltração no ano hidrológico em análise.

Neste momento, o volume de água do escoamento superficial que por ventura poderia chegar no espelho d'água da lagoa, foi desconsiderado, pois foi admitido um sistema fechado e a contribuição média deste escoamento, já esta indiretamente inserido na variação do nível d'água da lagoa representado pelos espelhos levantados nas imagens entre os anos analisados. O volume de água retirado do sistema pertencente à parcela da evapotranspiração foi calculado com base nos valores de volume da precipitação e da infiltração, uma vez que, segundo a equação (1) do balanço hídrico, as entradas são equivalentes ao somatório de valores as saídas. Desta forma, a equação (6), isola a variável do volume retirado pela evapotranspiração, para determiná-lo. Cabe lembrar, que nesta equação o volume escoado anualmente é zero, pois a análise foi feita em um sistema fechado, como discutido anteriormente.

As equações (4), (5) e (6) utilizadas para representar a concentração volumétrica de cada membro do balanço hidrológico envolvido no balanço de massas de uma lagoa durante um ano hidrológico estão representados a seguir:

$$Vp_{ano} = Pluviometria_{ano} * At_{ano} \quad (4)$$

$$Vinf_{ano} = Taxa Recarga * Ab_{ano} \quad (5)$$

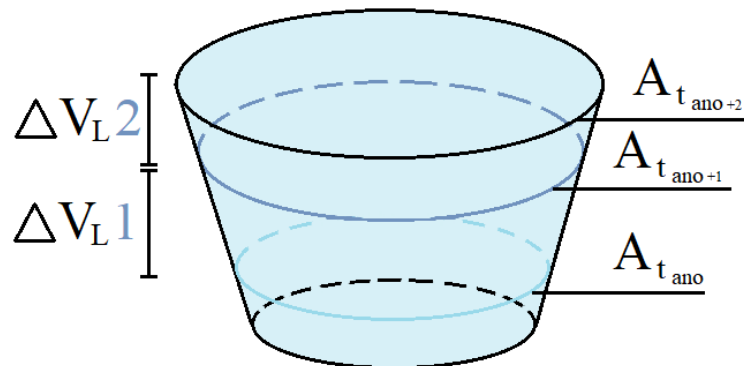
$$Vetr_{ano} = Vp_{ano} - Vinf_{ano} - Vesc_{ano} \quad (6)$$

Onde:

- Vp_{ano} – Volume precipitado anualmente sobre a lagoa;
 At_{ano} – Área do topo da lagoa;
 $Vinf_{ano}$ – Volume infiltrado anualmente no fundo da lagoa;
 Ab_{ano} – Área da base da lagoa;
 $Vetr_{ano}$ – Área da base da lagoa;
 $Vesc_{ano}$ – Volume escoado anualmente.

Em sequência, se buscou observar a variação volumétrica de água das lagoas ao longo dos anos hidrológicos no intervalo de 35 anos deste estudo e comparar se este volume aumentou ou diminuiu, representando então, se a lagoa ficou mais cheia ou mais vazia, em uma análise de anos consecutivos, a Figura 6.3 demonstra essas alterações volumétricas entre os anos e a equação (7) foi utilizada para quantificar estas variações.

Figura 6.3: Variações volumétricas (ΔV_L) ao longo dos anos analisados e variações no espelho d'água da lagoa, representados pela área do topo ($A_{t_{ano}}$) do objeto geométrico.



Fonte: Autor.

$$\Delta VL = VL_{ano+1} - VL_{ano} \quad (7)$$

Onde:

ΔVL – Variação Volumétrica;

VL_{ano} – Volume lagoa no ano analisado.

As variações volumétricas de um ano para outro neste corpo geométrico fechado só poderiam estar relacionadas com as entradas e saídas pertencentes ao balanço hídrico que ocorreram ao longo último ano analisado. Neste sentido, relacionando a equação (7) com os volumes pertencentes a equação do balanço hídrico (1), temos a Equação (8):

$$\Delta VL_{ano/ano+1} = Vp_{ano+1} - (Vinf_{ano+1} + Vetr_{ano+1}) \quad (8)$$

Onde:

$\Delta VL_{ano/ano+1}$ – Variação Volumétrica de um ano ao outro;

Vp_{ano} – Volume precipitado anualmente sobre a lagoa;

$Vinf_{ano}$ – Volume infiltrado anualmente no fundo da lagoa;

$Vetr_{ano}$ – Volume evaporado anualmente da lagoa.

Porém, se os valores de entrada por chuva equivalem aos valores retirados pela evapotranspiração, infiltração e escoamento (nulo nesta análise), assim, outras entradas ou saídas são esperadas neste sistema, condicionando as variações volumétricas das lagoas ao longo dos anos. Um dos agentes que possivelmente pode estar contribuindo na variação volumétrica das lagoas é a exploração de água realizada em poços.

A retirada de água por poços próximos ao corpo hídrico tem potencial influência, uma vez que seus cones de rebaixamento podem ter raios de influência superiores à distância do poço e o manancial hídrico analisado. Portanto, para o cálculo do cone de rebaixamento dos poços na região foi utilizada a equação empírica de Kyrieleis & Sichardt (1930), descrita na Equação (9):

$$Rpç = 3000 * s * \sqrt{K} \quad (9)$$

Onde:

$Rpç$ – Raio de influência dos poços;

s – Rebaixamento;

K – Condutividade Hidráulica.

Esta equação pontua que o raio de influência de um poço é condicionado ao rebaixamento (s) deste poço fruto de um teste de bombeamento, onde é observado a diferença do nível dinâmico e nível estático deste poço, e também a condutividade hidráulica (K) da formação em que o poço está locado, os valores de condutividade hidráulica utilizados neste trabalho foram calculados por De Paula (2019), a partir do método de Hvorslev (1951).

Na avaliação das captações de água por poços, foi utilizado um banco de dados compilado, disponibilizado pelo Sistema Integrado de Informação Ambiental (SIAM, 2024), a partir do ano de 1985 até 2020, e em seguida realizado tratamento e validação dos dados manualmente, descartando todas as informações incompletas, incorretas ou duplicadas.

Conforme a portaria IGAM nº 48 de 04 de outubro de 2019, do Instituto Mineiro de Gestão das Águas, a validade de uma outorga de recursos hídricos subterrâneos é de 10 anos para uso destinado ao saneamento básico, incluindo-se o abastecimento público, nos demais usos a validade pode ser menor, devendo ser renovada após este período. O tratamento dos dados disponíveis para este trabalho incluiu a estimativa do período de funcionamento das outorgas a partir da data de instalação, e grande parte das informações coletadas na base para cada poço possuíam dados faltantes após os 25 anos de funcionamento destes instrumentos. Desta forma, adotou-se uma validade de 25 anos, levando em consideração a vida útil média de um poço. Após estes anos, o poço tende a ter sua sua produção considerada reduzida ou finalizada. Além disto, foi assumido a renovação das outorgas caso o poço ainda estivesse sendo monitorado nas bases do SIAM.

Outro fator que se levantou como possível influenciador na variação volumétrica das lagoas, foram entradas relacionadas a recarga subterrânea, volumes de água que o aquífero pode estar descarregando sobre as lagoas, em casos de conexão deste corpo hídrico com os aquíferos da região. Neste caso, pode ocorrer, de não ser um suprimento constante, uma vez que as flutuações no aquífero podem ocorrer e nem sempre estas lagoas permanecem conectadas com as massas de água em subsuperfície.

Considerando as novas variáveis de entradas e saídas observadas e aplicadas na equação (8), pode-se incluir no cálculo de variação volumétrica anual destas lagoas, o somatório dos poços que influenciam na retirada de água e as entradas relacionadas a recarga subterrânea, representadas na Equação (10):

$$\Delta VL_{ano/ano+1} = Vp_{ano+1} + Vaq_{ano+1} - (\sum Vp\zeta_{ano+1} + Vinf_{ano+1} + Vetr_{ano+1}) \quad (10)$$

Onde:

$\Delta VL_{ano/ano+1}$ – Variação Volumétrica de um ano ao outro;

Vp_{ano} – Volume precipitado anualmente sobre a lagoa;

Vaq_{ano} – Volume anual da recarga subterrânea;

$\sum Vp\zeta_{ano}$ – Volume anual explotado pelo somatório dos poços;

$Vinf_{ano}$ – Volume infiltrado anualmente no fundo da lagoa;

$Vetr_{ano}$ – Volume evaporado anualmente da lagoa.

Os volumes das entradas pluviométrica e de retiradas por evapotranspiração, infiltração foram e escoamento foram zerados, pois são equivalentes, uma vez que pela equação (1) do balanço hídrico o balanço de massa precipitado é igual ao somatório das outras variáveis. Desta forma, as variações volumétricas das lagoas de um ano para outro estarão condicionadas apenas as entradas, pela recarga subterrânea e as saídas, pelo somatório das vazões retiradas por poços próximos aos corpos hídricos, representados na equação (11), a seguir:

$$\Delta VL_{ano/ano+1} = Vaq_{ano+1} - (\sum Vp\zeta_{ano+1}) \quad (11)$$

Onde:

$\Delta VL_{ano/ano+1}$ – Variação Volumétrica de um ano ao outro;

Vaq_{ano} – Volume anual da recarga subterrânea;

$\sum Vp\zeta_{ano}$ – Volume anual explotado pelo somatório dos poços.

Sendo assim, variações volumétricas positivas em anos consecutivos poderão representar lagoas que estão recebendo maiores entradas aquíferas subterrâneas do que retiradas de poços, já lagoas com perda de volume, podem estar relacionadas a lagoas desconectadas, onde as entradas aquíferas subterrâneas são nulas, ou onde a retirada de água dos poços é maior do que a recarga subterrânea.

A partir destes apontamentos, foi reajustada a equação (11), isolando uma das variáveis, para determinar as entradas, sendo estas, os valores de volumétricos de recarga subterrânea, representados na Equação (12):

$$Vaq_{ano+1} = \pm \Delta VL_{ano/ano+1} + \sum Vp\zeta_{ano+1} \quad (12)$$

Onde:

Vaq_{ano} – Volume anual da recarga subterrânea;

$\Delta VL_{ano/ano+1}$ – Variação Volumétrica de um ano ao outro;

$\sum Vp\zeta_{ano}$ – Volume anual explotado pelo somatório dos poços.

Como já foram calculadas as variações volumétricas entre os anos e os dados dos poços próximos a cada lagoa também foram levantados, ao isolar o volume da recarga subterrânea foi possível, determina-la e observar quando esta recarga foi suficiente para controlar os níveis das lagoas ou em casos que ela se apresentasse negativa, foi admitido a possibilidade de uma desconexão das lagoas com o aquífero, podendo até contribuir na drenagem de água destes mananciais.

6.2.2 Influência dos poços frente as características das lagoas

Ao fim das análises propostas anteriormente, foram levantadas as lagoas que passaram por influência dos poços na região de estudo, durante o intervalo temporal analisado. As 129 lagoas perenes e intermitentes analisadas foram agrupadas em grupos relacionados ao grau de exploração de água em suas redondezas, como: Lagoas sem poços em sua proximidade, lagoas com proximidade a poços, mas estes não interferindo em seu comportamento hídrico e lagoas com poços em sua proximidade que apresentaram papel fundamental na alteração de seu comportamento hídrico.

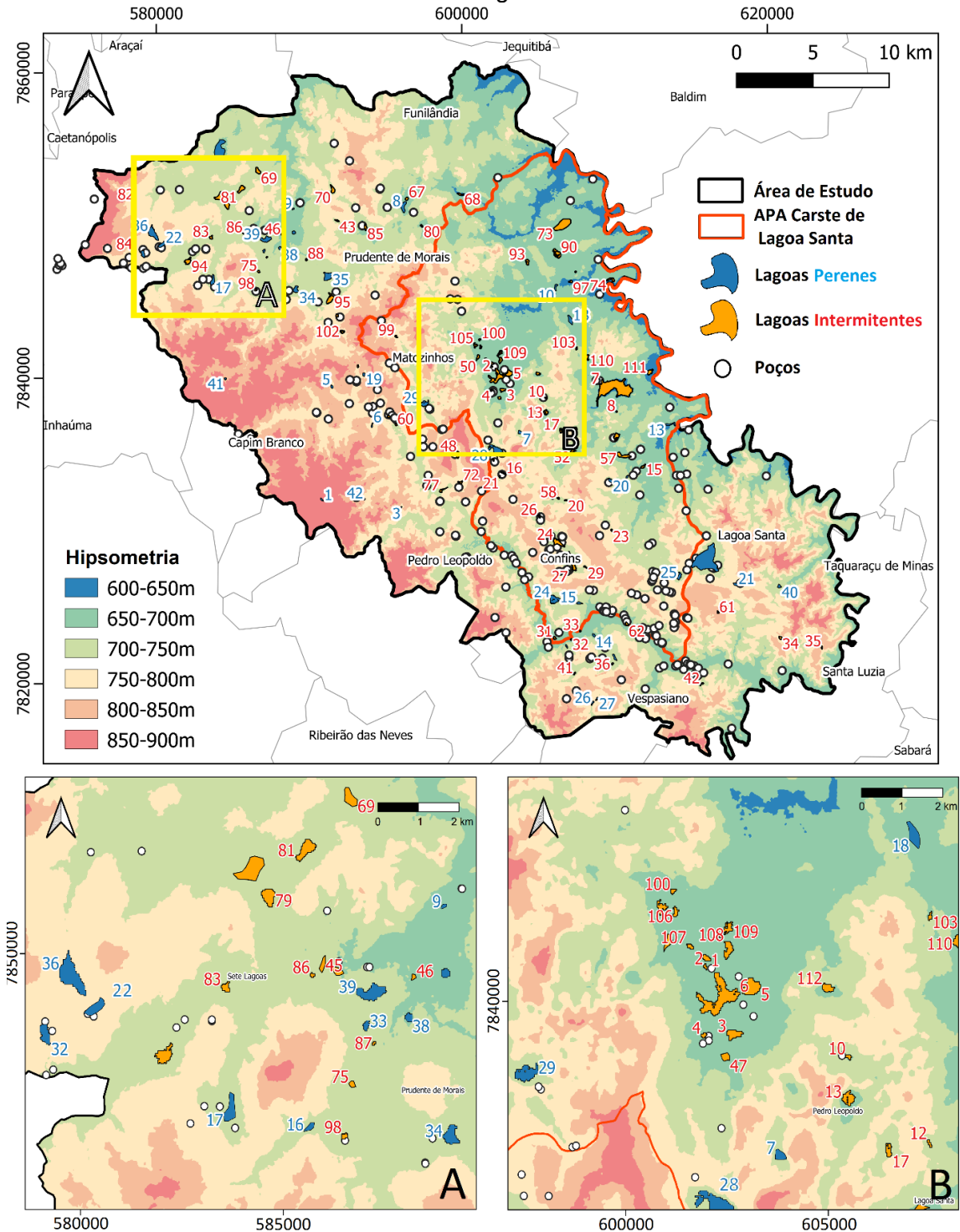
Além destes agrupamentos, neste momento, se buscou um maior entendimento dos motivos de certas lagoas serem mais ou menos influenciadas por poços. Desta forma, as lagoas foram caracterizadas a partir dos seus parâmetros geológicos, geomorfológicos e estruturais, com intuito de observar padrões entre estas características singulares de cada corpo hídrico e o grau de influência dos poços sobre as lagoas contidas no Carste de Lagoa Santa.

6.3 Resultados e Discussão

6.3.1 Levantamento dos Poços

Um total de 715 poços foram catalogados na área de estudo, este foi um recorte de poços fornecidos pela SIAM (2024) e que tiveram atuação dentro do intervalo temporal escolhido neste estudo, entre 1985 e 2020. Em posse destes dados, foi realizada uma primeira filtragem, onde foram selecionados apenas poços que estariam a uma distância máxima de 1500 m das lagoas existentes na região. Esta filtragem auxiliou a tornar o banco de dados mais enxuto e desta forma, trabalhar apenas com os poços que teriam potencial de afetar as lagoas. A distribuição destes poços e das lagoas perenes e intermitentes existentes na área de estudo podem ser observadas na Figura 6.4.

Figura 6.4: Mapa contendo a identificação das lagoas perenes e intermitentes analisadas, a distribuição, após a filtragem, dos poços que estão localizados próximos as lagoas, além da hipsometria da região estudada. Em (A) pode-se observar com mais detalhe estas informações próximo ao município de Sete Lagoas, e em (B) na porção central da APA Carste de Lagoa Santa.



Fonte: Autor.

Após a filtragem, o número de poços analisados totalizaram 292 e foram levantadas o máximo de informações disponíveis de cada um dos poços, como:

código; coordenadas UTM; ano de instalação; ano de produção reduzida; vazão de estabilização; capacidade específica; nível dinâmico; nível estático; rebaixamento; profundidade final de perfuração; uso da água; unidade aquífera. A Tabela 6.1 exemplifica as informações para alguns dos poços analisados.

Tabela 6.1: Amostra de poços analisados neste trabalho e as informações disponíveis consideradas relevantes para cada um destes poços.

Código	UTM-E	UTM-N	Ano da Instalação	Ano de produção reduzida	Vazão Estabilização (m ³ /h)	Capacidade Específica (m ³ /h/m)	Nível Dinâmico (m)	Nível Estático (m)	Rebaixamento (m)	Profundidade Perfuração (m)	Uso da Água	Unidade Aquífera
C-03-SC	605692	7828760	1986	2011	43,356	3,33	34,39	21,36	13,03	87	Abastecimento público	LS
03025-PT	592650	7854250	1990	2015	12,00	0,50	38	14	24	150	Pecuária	SH
C-01-LLS	609936	7836112	1984	2009	31,284	2,07	36,63	21,55	15,08	92	Abastecimento público	PL
03203-PT	602150	7834530	1974	1999	3,00	0,25	66	54	12	103	Abastecimento industrial	LS
00886-2002	602883	7826338	1996	2021	13,8	0,55	29	4	25	80	Dessedentação de animais	G
14212-2010	616255	7826901	2009	2034	1,1	0,10	15	4	11	42	Irrigação	P

Obs: Unidades Aquíferas – LS: Lagoa Santa; SH: Serra de Santa Helena; PL: Pedro Leopoldo; G: Granito/Gnaiss; P: Poroso/Coberturas. Fonte: Modificado de SIAM, 2024.

Em seguida, foram calculados os cones de rebaixamento dos poços, pois apenas a proximidade com a lagoa não atestaria a sua influência dos poços sobre elas, o cálculo foi feito com base na equação empírica de Kyrieleis & Sichardt (1930) utilizando o rebaixamento de cada poço e a condutividade hidráulica da formação que o poço está inserido.

Após o cálculo, as lagoas que se apresentavam a uma distância menor que o raio do cone de rebaixamento calculado foram separadas e colocadas em um grupo com a possibilidade de um ou mais poços estarem afetando a sua dinâmica hídrica. Das 129 lagoas perenes e intermitentes analisadas, 82 lagoas estavam a uma distância significativa do cone de rebaixamento de um ou mais poços. Cabe ressaltar que o fato do cone de rebaixamento dos poços alcançar estes corpos hídricos, ainda não foi diagnóstico para atestar a influência direta na variação volumétrica de certa lagoa, esta influência só foi constatada após a análise dos volumes de entrada e saída ao longo dos anos neste corpo hídrico, e o volume retirado pelos poços está

condicionado a vazão de cada instrumento e é apenas uma das possíveis retiradas que ocorrem neste ambiente.

6.3.2 Análise Volumétrica

Esta etapa foi composta por diversos cálculos volumétricos, tanto do volume de água das lagoas ao passar dos anos hidrológicos, quanto das possíveis entradas e saídas de água que ocorrem nestes corpos hídricos.

6.3.2.1 Volume das Lagoas

Com base na área superficial do espelho d'água de cada lagoa, a altura média de cada lagoa da região, definida por Amaral (2018) e a área do fundo calculada, o volume de todos corpos hídricos perenes e intermitentes foram obtidos para cada ano hidrológico. A Tabela 6.2 apresenta o recorte de alguns anos da Lagoa Perene 5, apresentando suas variações de área superficial, de volume hídrico e a diferença volumétrica existentes ano após ano. Esta demonstração exemplifica como foram levantados os dados de todas as lagoas estudadas neste trabalho.

Tabela 6.2: Análise volumétrica de uma das lagoas estudadas neste trabalho (Lagoa Perene 5), entre os anos hidrológicos 1987-1988 e 1994-1995, contendo suas informações de área superficial, volume da lagoa e as variações volumétricas (ΔV_L) que ocorre entre os anos demonstrados. As variações volumétricas em azul, representam valores positivos que quantificam o ganho de volume neste ano hidrológico, já as em vermelho, representam valores negativos, nestes casos, a lagoa apresentou perdas em sua massa d'água.

Ano Hidrológico (Outubro-Setembro)	Área Superficial Lagoa (m²)	Volume Anual Lagoa (m³)	ΔV_L (Variação Volumétrica) (m³)
1987-1988	19.812	185.329	-
1988-1989	31.572	295.019	109.689
1989-1990	11.707	109.682	-185.336
1990-1991	13.508	126.497	16.814
1991-1992	14.408	134.898	8.401
1992-1993	49.431	461.517	326.619
1993-1994	11.707	109.682	-351.835
1994-1995	6.411	60.206	-49.476

Fonte: Autor.

Com intuito de entender a variação volumétrica (ΔV_L) que ocorre nas lagoas entre os anos, nesta etapa também foram calculados os possíveis volumes de entrada e saída para cada ano hidrológico, representados a seguir.

6.3.2.2 Volume de Entradas e Saídas

Assim como discutido na metodologia, as entradas e saídas são responsáveis pela variação volumétrica da lagoa, seguindo os princípios do balanço hídrico. Desta forma, as variações volumétricas estão subordinadas as entradas do volume de água precipitado anualmente sobre a lagoa somada as estradas do volume proveniente da recarga subterrânea, já as retiradas temos o volume infiltrado anualmente no fundo da lagoa, o volume evaporado anual sobre o espelho d'água da lagoa e o somatório dos volumes retirados por poços que influenciam sobre estes corpos hídricos. A Tabela 6.3 sumariza os volumes de entrada e saída para a mesma lagoa apresentada anteriormente (Lagoa Perene 5), em um recorte de alguns anos hidrológicos analisados.

Tabela 6.3: Análise dos volumes de entrada e saída de uma das lagoas estudadas neste trabalho (Lagoa Perene 5), entre os anos hidrológicos 1987-1988 e 1994-1995, contendo informações anuais dos volumes de saída (infiltrado, evaporado e explotado pelos poços) e volumes de entrada (precipitado e recarga subterrânea). Os valores positivos em azul representam ganhos volumétricos, enquanto os valores negativos em vermelho, representam perdas volumétricas na lagoa.

Ano Hidrológico (Outubro-Setembro)	Volume Infiltrado Anual (m ³)	Volume Evaporado Anual (m ³)	Volume Σ Poços Anual (m ³)	Volume Precipitado Anual (m ³)	Volume Recarga Subterrânea (m ³)
1987-1988	-9.951	-15.727	-274.012	25.678	349.659
1988-1989	-15.535	-24.552	-274.012	40.087	383.702
1989-1990	-6.070	-9.593	-274.012	15.664	88.676
1990-1991	-6.643	-10.499	-274.012	17.143	290.827
1991-1992	-7.901	-12.487	-274.012	20.388	282.414
1992-1993	-17.012	-26.887	-274.012	43.899	600.631
1993-1994	-3.730	-5.895	-274.012	9.625	-77.822
1994-1995	-2.860	-4.520	-274.012	7.381	224.536

Fonte: Autor.

Pode-se observar que na tabela os volumes de saída são negativos, pois estão teoricamente, retirando água da lagoa e os volumes de entrada são positivos, pois são responsáveis de crescer no volume de água dos corpos hídricos analisados. No

ano de 1993-1994 o volume da recarga subterrânea foi negativo, isto ocorre pois ao calcular este volume de entrada ele não foi participativo no aumento volumétrico da lagoa, na verdade ele teve uma participação de retirada de água nestes corpo hídrico, podendo estar relacionado com um momento de desconexão da lagoa com o meio subterrâneo, fato mais bem evidenciado na Tabela 6.4 a seguir.

Tabela 6.4: Entradas e saídas volumétricas representativas da variação volumétrica da lagoa analisada (Lagoa Perene 5), entre os anos hidrológicos 1987-1988 e 1994-1995, contendo informações anuais dos volumes de entrada referente a recarga subterrânea e os volumes de saída referentes ao somatório das vazões retirada pelos poços, além das variações volumétricas (ΔV_L) anuais, inerente a estas entradas e saídas. Os valores em azul, representam ganhos em volume, já os em vermelho, representam perdas no volume da lagoa, no ano hidrológico analisado.

Ano Hidrológico (Outubro-Setembro)	Volume Recarga Subterrânea (m ³)	Volume Σ Poços Anual (m ³)	ΔV_L (Variação Volumétrica) (m ³)
1987-1988	349.659	-274.012	-
1988-1989	383.702	-274.012	109.689
1989-1990	88.676	-274.012	-185.336
1990-1991	290.827	-274.012	16.814
1991-1992	282.414	-274.012	8.401
1992-1993	600.631	-274.012	326.619
1993-1994	-77.822	-274.012	-351.835
1994-1995	224.536	-274.012	-49.476

Fonte: Autor.

Os volumes de entrada pluviométricos são equivalentes aos volumes retirados pela infiltração e pela evaporação, seguindo os princípios do balanço hídrico aplicados em um ambiente fechado. Desta forma, as variações volumétricas entre os anos hidrológicos estão subordinadas à recarga subterrânea e ao volume retirado pelos poços. A variação volumétrica que ocorre no ano de 1993-1994 pode ser explicado por essa não participação de entrada de volume advindo da recarga subterrânea e um incremento na retirada de água pela desconexão com o meio aquífero. Cabe ressaltar que a lagoa no ano anterior estava com um aporte de água muito elevado, desta forma, esta desconexão temporária não afetou a perenidade deste corpo hídrico.

6.3.3 Comportamento Hídrico das Lagoas

Os resultados demonstrados anteriormente compreendem a avaliação de apenas uma lagoa existente na região, porém, estes resultados e interpretações foram feitas para todas lagoas perenes e intermitentes na área de estudo. Ao fim desta avaliação, pode-se levantar todas lagoas perenes e intermitentes que sofrem forte influência da atuação de poços em sua proximidade, influência suficiente para ocasionar possíveis mudanças no comportamento hídrico das lagoas. A Tabela 6.5, sumariza o somatório de lagoas perenes e intermitentes que estão próximas a poços ou não, e pontua quantos corpos hídricos estão sendo realmente influenciados por estes poços, sendo uma possível interpretação destas, como corpos hídricos que tem volumes retirados por poços superiores a recarga subterrânea.

Tabela 6.5: Quantificação das lagoas perenes e intermitentes sobre influência ou não dos poços localizados na região de estudo.

	Total	Lagoas com distância inferior ao cone de rebaixamento de algum dos poços	Lagoas com comportamento hídrico influenciada por poços	Lagoas com comportamento hídrico não influenciada por poços	Lagoas sem poços em sua proximidade
Lagoas Perenes	40	27	5	22	13
Lagoas Intermitentes	89	55	21	34	34

Fonte: Autor.

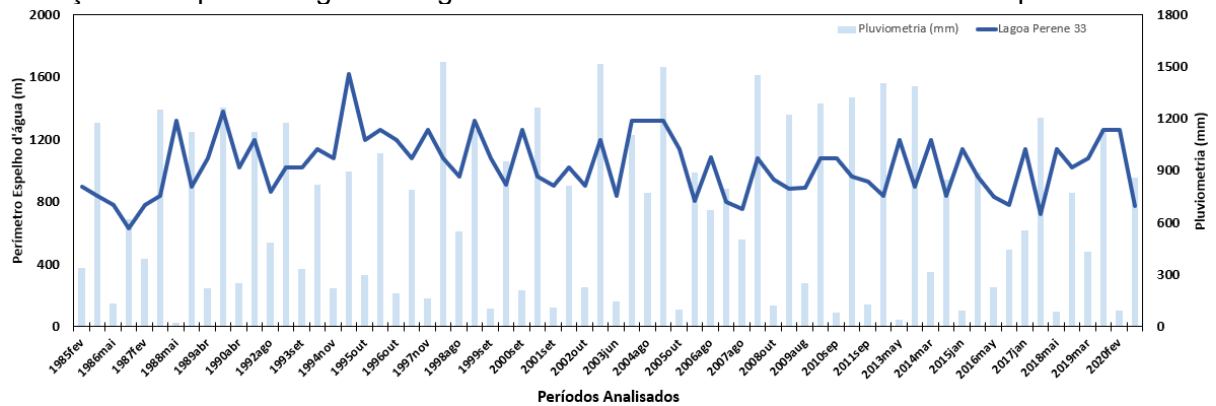
6.3.3.1 Lagoas Perenes

Como pontuado na Tabela 6.5, das 40 lagoas perenes analisadas, 13 lagoas não apresentam poços em sua proximidade e 27 lagoas estão em distâncias menores do que o cone de rebaixamento dos poços. Porém, apenas 5 lagoas tiveram mudança fortemente marcadas em seu comportamento hídrico devido a atuação destes poços. A seguir serão demonstradas algumas lagoas analisadas que representam o comportamento hídrico em três diferentes categorias, sendo estas: Lagoas perenes que não apresentam poços em sua proximidade; Lagoas perenes que apresentam poços próximos, mas estes não influenciam suficientemente no comportamento hídrico destes corpos; e Lagoas perenes onde os poços próximos influenciam na mudança dos seus padrões hídricos. Cada lagoa apresenta informações singulares

perante a quantidade de poços próximos e ao volume retirado pelo somatório destes poços, assim como o tamanho destes corpos hídricos e as demais singularidades sobre a geologia, geomorfologia e estruturação onde estes corpos hídricos estão inseridos, porém, algumas particularidades foram semelhantes quando analisado o comportamento da variação volumétrica nestes corpos hídricos e a relação de entradas e saídas volumétricas.

O primeiro grupo de lagoas analisadas compreende 13 lagoas perenes que não tem poços em suas proximidades e desta forma, seu comportamento hídrico não é interferido por um fator antrópico, como se espera quando um poço atua próximo a um corpo hídrico. A lagoa escolhida para representar as lagoas deste grupo é a Lagoa Perene 33 e, na Figura 6.5 podemos observar o comportamento hídrico desta lagoa e as variações pluviométricas ao longo do intervalo de anos avaliados neste estudo.

Figura 6.5: Comportamento hídrico da Lagoa Perene 33, representando as lagoas perenes que não apresentam poços em sua proximidade. A linha contínua azul escuro marca a variação do espelho d'água da lagoa e as barras em azul claro os montantes pluviométricos.



Fonte: Autor.

O espelho d'água da Lagoa Perene 33 apresenta variações ao se expandir e retrair ao longo dos anos, algumas vezes influenciados pela variação pluviométrica, onde, em momentos de baixa pluviometria ela tem uma redução de sua área, e, em momentos de alta pluviometria, ocorre uma expansão em seu espelho.

Outro fator que influencia na variação destes corpos são as conexões hídricas com os aquíferos, lagoas perenes normalmente são mananciais que apresentam momentos mais frequentes de conexão e recebem um grande aporte de água advinda da recarga hídrica subterrânea (Pacheco Neto, De Paula & Galvão, 2024). Estes volumes de entrada estão na Tabela 6.6.

Tabela 6.6: Valores volumétricos obtidos para a Lagoa Perene 33 ao longo dos anos hidrológicos analisados, assim como sua variação volumétrica entre os anos e os montantes de saída e entrada, referentes a exploração de água pelos poços e a recarga subterrânea, respectivamente. Os valores em azul, representam ganhos em volume, já os em vermelho, representam perdas no volume da lagoa, no ano hidrológico analisado.

Lagoa Perene 33				
Ano Hidrológico (Outubro-Setembro)	Volume Anual Lagoa (m³)	ΔV_L (Variação Volumétrica) (m³)	Volume Σ Poços Anual (m³)	Volume Recarga Subterrânea (m³)
1984-1985	286.132	-	0	-
1985-1986	148.722	-137.410	0	-137.410
1986-1987	269.336	120.614	0	120.614
1987-1988	286.132	16.796	0	16.796
1988-1989	395.286	109.154	0	109.154
1989-1990	353.304	-41.981	0	-41.981
1990-1991	395.286	41.981	0	41.981
1991-1992	382.001	-13.285	0	-13.285
1992-1993	395.286	13.285	0	13.285
1993-1994	395.286	0	0	0
1994-1995	395.286	0	0	0
1995-1996	420.474	25.189	0	25.189
1996-1997	395.286	-25.189	0	-25.189
1997-1998	412.075	16.790	0	16.790
1998-1999	420.474	8.399	0	8.399
1999-2000	403.676	-16.799	0	-16.799
2000-2001	363.439	-40.237	0	-40.237
2001-2002	508.523	145.084	0	145.084
2002-2003	390.140	-118.383	0	-118.383
2003-2004	227.337	-162.803	0	-162.803
2004-2005	302.926	75.589	0	75.589
2005-2006	693.858	390.931	0	390.931
2006-2007	310.022	-383.835	0	-383.835
2007-2008	554.854	244.831	0	244.831
2008-2009	434.084	-120.769	0	-120.769
2009-2010	386.886	-47.198	0	-47.198
2010-2011	514.833	127.947	0	127.947
2011-2012	277.729	-237.103	0	-237.103
2012-2013	302.926	25.197	0	25.197
2013-2014	294.524	-8.402	0	-8.402
2014-2015	554.593	260.068	0	260.068
2015-2016	235.732	-318.861	0	-318.861
2016-2017	210.537	-25.195	0	-25.195
2017-2018	336.512	125.975	0	125.975
2018-2019	437.263	100.751	0	100.751
2019-2020	302.367	-134.896	0	-134.896

Fonte: Autor.

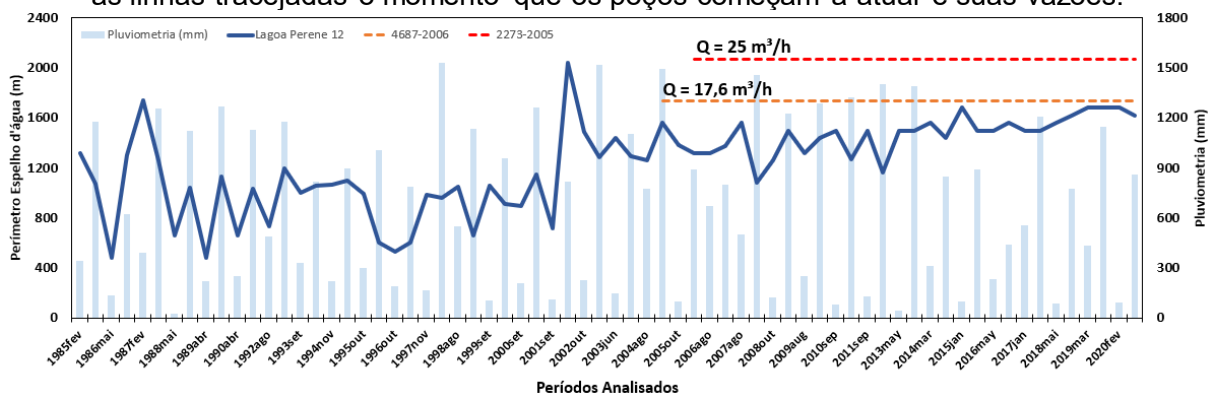
Avaliando a Tabela 6.6, pode-se pontuar que a lagoa não apresenta retirada advinda dos poços e desta forma a variação volumétrica deste corpo hídrico ao longo dos anos é retrato dos anos em que o aquífero aportou água a partir da recarga hídrica subterrânea e desta forma as lagoas tiveram ou incremento em seu volume, quando esta recarga se mostrou positiva ou redução do seu volume, nos momentos em que esta recarga se apresentou negativa, demonstrando momentos de desconexão com

o aquífero e drenagem na água para o meio subterrâneo resultando em uma retração deste corpo hídrico analisado. Estas variações de conexão que refletem nas entradas e saídas de água das lagoas são consideradas naturais. A partir desta análise volumétrica, também foi observado, que mesmo a lagoa apresentando vários momentos de desconexão hídrica, os momentos de conexão são suficientes para o aumento volumétrico de água na lagoa e desta forma o aquífero consegue manter o nível de água destes corpos hídricos, o que reflete em sua perenidade.

Em sequência, 22 lagoas perenes foram enquadradas em um grupo que apresentam poços atuando sobre estes corpos hídricos, porém esta exploração não demonstrou uma efetividade na mudança na sua dinâmica hídrica, não influenciando diretamente no comportamento destas lagoas, reduzindo seus níveis d'água, fato que se espera com poços atuando próximo a mananciais superficiais. A Figura 6.6 apresenta o comportamento hídrico da Lagoa Perene 12 ao longo dos anos, assim como os valores pluviométricos e o momento em que diferentes poços começaram a atuar próximo a este corpo hídrico.

A análise deste corpo hídrico irá representar as lagoas pertencentes a este grupo, pela similaridade observada entre suas variações volumétricas frente recarga hídrica subterrânea e a retirada pela exploração dos poços.

Figura 6.6: Comportamento hídrico da Lagoa Perene 12, representando as lagoas perenes que apresentam poços em sua proximidade, mas não sofrem alteração em seu comportamento hídrico pela exploração de água. A linha contínua azul escuro marca a variação do espelho d'água da lagoa, as barras em azul claro os montantes pluviométricos e as linhas tracejadas o momento que os poços começam a atuar e suas vazões.



Fonte: Autor.

Ao analisar o gráfico da Lagoa Perene 12, pode-se pontuar que a lagoa nunca se secou, porém teve seus anos como níveis mais baixos na primeira metade do intervalo escolhido neste estudo e os seus períodos mais cheios na segunda metade.

Este fato observado, já corrobora com a não influência da retirada hídrica a partir da exploração de água subterrânea pelos poços, uma vez que os dois poços com cones de rebaixamento próximo a esta lagoa começaram a atuar nos anos de 2005 e 2006, em momentos em que a lagoa tinha seus níveis mais elevados em sua história hidrológica. De uma forma geral, a lagoa apresenta comportamento hídrico influenciado pelas suas conexões hídricas, não respeitando também os aportes de água advindo da pluviometria, pois em diversos momentos marcados por muita chuva, este corpo hídrico está mais vazio e em outros com pouca chuva a lagoa se apresenta expandida. A Tabela 6.7 contém as informações dos poços que estão próximos a este manancial hídrico.

Tabela 6.7: Poços próximos a Lagoa Perene 12 e suas informações utilizadas para determinar a influência sobre a lagoa.

Lagoa Perene 12							
Código / Poços	Vazão (m ³ /h)	Ano Instalação	Ano de produção reduzida	Rebaixamento (s)	Condutividade Hidráulica (K)	Raio do Cone de Rebaixamento (m)	Distância do Poço até a Lagoa (m)
4687-2006	25	2006	2031	9,2	0,001	872	790
2273-2005	17,6	2005	2030	22	0,0001	660	630

Fonte: Autor.

Ao analisar as participações das entradas e saídas volumétricas que ocorreram ao longo dos anos hidrológicos e condicionaram as variações volumétricas na lagoa, novamente a participação dos poços não demonstrou influenciar no comportamento deste corpo hídrico. Estas informações podem ser observadas na Tabela 6.8 a seguir.

Tabela 6.8: Valores volumétricos obtidos para a Lagoa Perene 12 ao longo dos anos hidrológicos analisados, assim como sua variação volumétrica entre os anos e os montantes de saída e entrada, referentes a exploração de água pelos poços e a recarga subterrânea, respectivamente. Na última coluna estão evidenciados os momentos em que a retirada volumétrica dos poços foi maior que o aporte fornecido pelo aquífero. Os valores em azul, representam ganhos em volume, já os em vermelho, representam perdas no volume da lagoa, no ano hidrológico analisado.

Lagoa Perene 12					
Ano Hidrológico (Outubro-Setembro)	Volume Anual Lagoa (m³)	ΔV. (Variação Volumétrica) (m³)	Volume Σ Poços Anual (m³)	Volume Recarga Subterrânea (m³)	Anos em que a retirada dos poços foi maior que a recarga subterrânea
1984-1985	426.795	-	0	-	
1985-1986	474.791	47.996	0	47.996	
1986-1987	30.596	-444.195	0	-444.195	
1987-1988	379.512	348.916	0	348.916	
1988-1989	689.897	310.386	0	310.386	
1989-1990	379.512	-310.386	0	-310.386	
1990-1991	176.540	-202.972	0	-202.972	
1991-1992	160.107	-16.433	0	-16.433	
1992-1993	294.263	134.156	0	134.156	
1993-1994	569.076	274.812	0	274.812	
1994-1995	474.959	-94.117	0	-94.117	
1995-1996	176.540	-298.419	0	-298.419	
1996-1997	424.865	248.325	0	248.325	
1997-1998	472.936	48.071	0	48.071	
1998-1999	346.228	-126.708	0	-126.708	
1999-2000	470.690	124.462	0	124.462	
2000-2001	160.107	-310.582	0	-310.582	
2001-2002	951.559	791.452	0	791.452	
2002-2003	403.639	-547.921	0	-547.921	
2003-2004	492.845	89.207	0	89.207	
2004-2005	336.475	-156.370	-154.176	-2.194	x
2005-2006	336.475	0	-373.176	373.176	
2006-2007	341.361	4.886	-373.176	378.062	
2007-2008	341.547	186	-373.176	373.362	
2008-2009	350.489	8.941	-373.176	382.117	
2009-2010	512.745	162.256	-373.176	535.432	
2010-2011	386.849	-125.896	-373.176	247.280	x
2011-2012	560.259	173.410	-373.176	546.586	
2012-2013	560.343	84	-373.176	373.260	
2013-2014	569.830	9.488	-373.176	382.664	
2014-2015	583.446	13.616	-373.176	386.792	
2015-2016	583.847	401	-373.176	373.577	
2016-2017	589.998	6.151	-373.176	379.327	
2017-2018	611.479	21.481	-373.176	394.657	
2018-2019	649.706	38.227	-373.176	411.403	
2019-2020	529.531	-120.175	-373.176	253.001	x

Fonte: Autor.

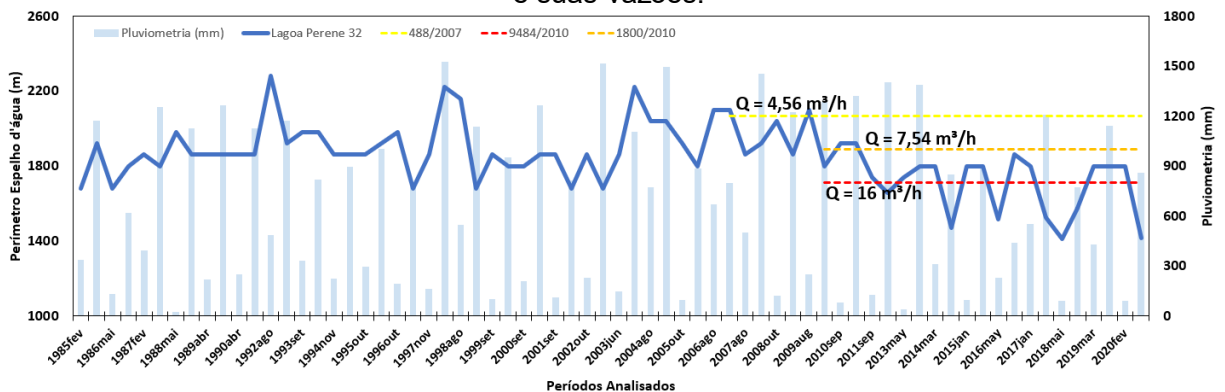
As informações volumétricas da Tabela 6.8 indicam uma lagoa perene com ciclos de conexão hídrica, até o ano de 2003-2004 a lagoa não tinha a atuação de poços em sua proximidade, e a recarga subterrânea ora participava incrementando água na lagoa, ora não participava neste incremento e facilitava o esvaziamento de

água neste corpo, reflexo dessas conexões e desconexões que são comuns nestes ambientes cársticos. Cabe ressaltar que o aquífero sempre recarregou a lagoa, e esta descarga do aquífero sempre foi capaz de manter o nível da lagoa, mesmo com as desconexões observadas, mantendo assim, a perenidade da lagoa. O que pode-se pontuar nitidamente, que a partir do ano 2004-2005, quando os poços começaram a explorar água próximo a este corpo hídrico, que o aquífero adquire um comportamento de elevar os valores de aporte hídrico subterrâneo que esta lagoa recebe, refletindo num alto controle deste ambiente na manutenção da perenidade deste manancial, esta participação ainda reflete em uma progressiva expansão da lagoa nos momentos em que os poços poderiam estar interferindo. Durante a atuação dos poços, poucas vezes a retirada pela exploração foi maior que a recarga subterrânea, comportamento bem diferente das lagoas que são influenciadas por poços, como será visto a frente.

O terceiro grupo, e último grupo de lagoas perenes analisado totaliza 5 lagoas que tiveram seu comportamento hídrico influenciado pela retirada volumétrica de poços e foi escolhido duas lagoas para representar este grupo.

O gráfico da Figura 6.7 representa o comportamento hídrico da Lagoa Perene 32 ao longo dos anos avaliados neste estudo, nele pode ser observado a variação perimétrica deste corpo hídrico, os montantes pluviométricos em cada período analisado e o momento em que diferentes poços começaram a atuar próximo a este corpo hídrico e como esta nova perturbação influenciou no comportamento da lagoa.

Figura 6.7: Comportamento hídrico da Lagoa Perene 32, representando as lagoas perenes que apresentam poços que influenciam em seu comportamento hídrico. A linha contínua azul escuro marca a variação do espelho d'água da lagoa, as barras em azul claro os montantes pluviométricos e as linhas tracejadas o momento que os poços começam a atuar e suas vazões.



Fonte: Autor.

Ao longo dos anos a Lagoa Perene 32 apresentava variações volumétricas consideradas normais para uma lagoa perene, onde em momentos de baixa pluviometria apresentava certas retrações em seu espelho d'água e em outros momentos apresentava-se mais expandida, a recarga subterrânea administrava o seu volume não permitindo grandes retrações neste corpo hídrico, porém a partir de 2007 um poço foi instalado próximo a este manancial e em 2010 mais dois poços começaram a atuar, apresentando cones de rebaixamento com distancia superiores a distância desta lagoa e estes poços. Com a atuação destes poços, mesmo ao longo de períodos de elevada pluviometria, a lagoa sofreu sequentes episódios de retração em seu espelho d'água e a partir de 2014 onde vivenciou momentos de baixa pluviometria teve vários anos com os menores espelho d'água no intervalo analisado. A Tabela 6.9 contém as informações dos poços que estão influenciando sobre este corpo hídrico.

Tabela 6.9: Poços próximos a Lagoa Perene 32 e suas informações utilizadas para determinar a influência sobre a lagoa.

Lagoa Perene 32							
Código / Poços	Vazão (m³/h)	Ano Instalação	Ano de produção reduzida	Rebaixamento (s)	Condutividade Hidráulica (K)	Raio do Cone de Rebaixamento (m)	Distância do Poço até a Lagoa (m)
488/2007	4,65	2007	2032	9,5	0,0001	285	70
9484/2010	7,54	2010	2035	30	0,0001	900	800
1800/2010	16	2010	2035	20	0,0001	600	530

Fonte: Autor.

Outro resultado que esclareceu a participação destes poços no comportamento hídrico da lagoa foi a partir da análise dos volumes de entrada e saída. A Tabela 6.10 sumariza os valores do volume da lagoa anualmente, a sua variação volumétrica entre os anos hidrológicos e as entradas e saídas referentes a recarga subterrânea e a retirada pelo somatório das vazões dos poços que estão influenciando neste corpo hídrico.

Tabela 6.10: Valores volumétricos obtidos para a Lagoa Perene 32 ao longo dos anos hidrológicos analisados, assim como sua variação volumétrica entre os anos e os montantes de saída e entrada, referentes a exploração de água pelos poços e a recarga subterrânea, respectivamente. Na última coluna estão evidenciados os momentos em que a retirada volumétrica dos poços foi maior que o aporte fornecido pelo aquífero. Os valores em azul, representam ganhos em volume, já os em vermelho, representam perdas no volume da lagoa, no ano hidrológico analisado.

Lagoa Perene 32					
Ano Hidrológico (Outubro-Setembro)	Volume Anual Lagoa (m ³)	ΔV_L (Variação Volumétrica) (m ³)	Volume Σ Poços Anual (m ³)	Volume Recarga Subterrânea (m ³)	Anos em que a retirada dos poços foi maior que a recarga subterrânea
1984-1985	1.049.883	-	0	-	
1985-1986	1.024.711	-25.172	0	-25.172	
1986-1987	1.158.944	134.232	0	134.232	
1987-1988	1.091.833	-67.110	0	-67.110	
1988-1989	1.125.389	33.555	0	33.555	
1989-1990	1.091.833	-33.555	0	-33.555	
1990-1991	1.049.883	-41.949	0	-41.949	
1991-1992	1.125.389	75.505	0	75.505	
1992-1993	1.200.892	75.502	0	75.502	
1993-1994	1.125.389	-75.502	0	-75.502	
1994-1995	1.100.218	-25.171	0	-25.171	
1995-1996	1.184.115	83.896	0	83.896	
1996-1997	1.091.833	-92.281	0	-92.281	
1997-1998	1.259.615	167.782	0	167.782	
1998-1999	1.209.285	-50.330	0	-50.330	
1999-2000	1.142.167	-67.118	0	-67.118	
2000-2001	1.125.389	-16.777	0	-16.777	
2001-2002	1.058.268	-67.120	0	-67.120	
2002-2003	1.075.046	16.778	0	16.778	
2003-2004	1.158.944	83.897	0	83.897	
2004-2005	1.049.883	-109.060	0	-109.060	
2005-2006	1.100.218	50.334	0	50.334	
2006-2007	1.083.440	-16.777	-40.734	23.956	x
2007-2008	1.041.490	-41.950	-40.734	-1.216	x
2008-2009	1.100.218	58.727	-40.734	99.461	
2009-2010	1.125.389	25.171	-246.944	272.115	
2010-2011	1.007.933	-117.456	-246.944	129.488	x
2011-2012	1.359.528	351.595	-246.944	598.540	
2012-2013	1.016.317	-343.211	-246.944	-96.266	x
2013-2014	1.112.589	96.271	-246.944	343.216	
2014-2015	1.058.268	-54.321	-246.944	192.623	x
2015-2016	1.091.833	33.565	-246.944	280.509	
2016-2017	1.082.657	-9.176	-246.944	237.768	x
2017-2018	934.696	-147.961	-246.944	98.982	x
2018-2019	902.665	-32.031	-246.944	214.913	x
2019-2020	867.120	-35.554	-246.944	211.400	x

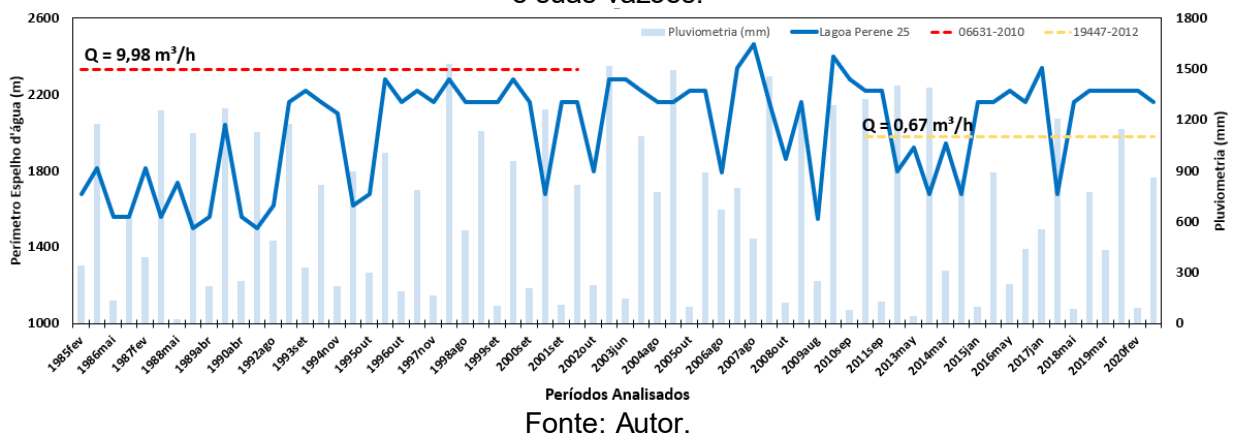
Fonte: Autor.

Ao analisar a Tabela 6.10, as variações desta lagoa perene até o ano hidrológico de 2005-2006 estavam subordinadas ao aporte ou não de água advindo da recarga subterrânea advindas do aquífero, com seus momentos de conexão e desconexão, com recargas atuando na manutenção do nível desta lagoa, porém, nos anos subsequentes temos a atuação dos poços e um novo fator que influencia na

dinâmica da lagoa. A retirada de água dos poços vem acompanhada com um maior aporte de água da recarga subterrânea, mas em diversos anos esta recarga não é maior que a retirada volumétrica dos poços e conseqüentemente, durante este período a lagoa apresenta as maiores retrações observadas e o aquífero enfraquece seu potencial de manter o nível da lagoa, mesmo não secando, até o último ano hidrológico do intervalo analisado.

O gráfico da Figura 6.8 representa o comportamento hídrico da Lagoa Perene 25 ao longo dos anos avaliados neste estudo, nele pode ser observado a variação perimétrica deste corpo hídrico, os montantes pluviométricos em cada período analisado e o momento em que diferentes poços começaram a atuar próximo a este corpo hídrico e como esta nova perturbação influenciou no comportamento da lagoa.

Figura 6.8: Comportamento hídrico da Lagoa Perene 25, representando as lagoas perenes que apresentam poços que influenciam em seu comportamento hídrico. A linha contínua azul escuro marca a variação do espelho d'água da lagoa, as barras em azul claro os montantes pluviométricos e as linhas tracejadas o momento que os poços começam a atuar e suas vazões.



No gráfico da Lagoa Perene 25, os períodos em que esta lagoa se apresentava mais retraída são coincidentes com a atuação dos poços próximos a esta lagoa, mesmo em momentos em que o aporte pluviométrico é elevado. Os anos de 1996 a 2011 representam os momentos onde este corpo hídrico apresenta seus maiores tamanhos de espelho d'água, por mais que um dos poços esteja ainda atuando sobre este corpo hídrico, ele está próximo ao seu momento de redução de produção hídrica, já que é um poço que foi instalado em 1977, antes do intervalo analisado neste estudo e é comum poços perderem sua intensidade de exploração ao longo dos anos de atividade. A Tabela 6.11 contém as informações dos poços que estão influenciando sobre este corpo hídrico.

Tabela 6.11: Poços próximos a Lagoa Perene 25 e suas informações utilizadas para determinar a influência sobre a lagoa.

Lagoa Perene 25							
Código / Poços	Vazão (m ³ /h)	Ano Instalação	Ano de produção reduzida	Rebaixamento (s)	Condutividade Hidráulica (K)	Raio do Cone de Rebaixamento (m)	Distância do Poço até a Lagoa (m)
06631-2010	9,98	1977	2002	57,8	0,0001	1734	980
19447-2012	0,67	2011	2036	120,6	0,00001	1144	470

Fonte: Autor.

A Tabela 6.12 traz as informações das variações volumétricas da lagoa Perene 25, das entradas e saídas que ocorrem neste corpo hídrico.

Tabela 6.12: Valores volumétricos obtidos para a Lagoa Perene 25 ao longo dos anos hidrológicos analisados, assim como sua variação volumétrica entre os anos e os montantes de saída e entrada, referentes a exploração de água pelos poços e a recarga subterrânea, respectivamente. Na última coluna estão evidenciados os momentos em que a retirada volumétrica dos poços foi maior que o aporte fornecido pelo aquífero. Os valores em azul, representam ganhos em volume, já os em vermelho, representam perdas no volume da lagoa, no ano hidrológico analisado.

Lagoa Perene 25					
Ano Hidrológico (Outubro-Setembro)	Volume Anual Lagoa (m ³)	ΔV . (Variação Volumétrica) (m ³)	Volume Σ Poços Anual (m ³)	Volume Recarga Subterrânea (m ³)	Anos em que a retirada dos poços foi maior que a recarga subterrânea
1984-1985	1.236.011	-	-87.425	-	
1985-1986	647.003	-589.008	-87.425	-501.583	x
1986-1987	663.787	16.783	-87.425	104.208	
1987-1988	504.347	-159.439	-87.425	-72.015	x
1988-1989	789.638	285.290	-87.425	372.715	
1989-1990	563.092	-226.545	-87.425	-139.120	x
1990-1991	647.003	83.911	-87.425	171.336	
1991-1992	722.521	75.517	-87.425	162.942	
1992-1993	923.870	201.350	-87.425	288.774	
1993-1994	789.638	-134.233	-87.425	-46.808	x
1994-1995	647.003	-142.634	-87.425	-55.209	x
1995-1996	915.485	268.482	-87.425	355.906	
1996-1997	865.146	-50.340	-87.425	37.085	x
1997-1998	907.091	41.945	-87.425	129.370	
1998-1999	856.760	-50.331	-87.425	37.094	x
1999-2000	890.320	33.560	-87.425	120.985	
2000-2001	856.760	-33.560	-87.425	53.865	x
2001-2002	655.400	-201.360	-87.425	-113.936	x
2002-2003	974.208	318.808	0	318.808	
2003-2004	831.594	-142.614	0	-142.614	
2004-2005	781.252	-50.343	0	-50.343	
2005-2006	1.348.686	567.435	0	567.435	
2006-2007	722.521	-626.166	0	-626.166	
2007-2008	605.049	-117.472	0	-117.472	
2008-2009	871.733	266.684	0	266.684	
2009-2010	1.016.150	144.417	0	144.417	
2010-2011	856.760	-159.390	-5.869	-153.521	x
2011-2012	1.272.080	415.319	-5.869	421.189	
2012-2013	764.470	-507.609	-5.869	-501.740	x
2013-2014	747.689	-16.782	-5.869	-10.912	x

2014-2015	839.980	92.291	-5.869	98.160	
2015-2016	881.926	41.946	-5.869	47.815	
2016-2017	789.638	-92.288	-5.869	-86.419	x
2017-2018	965.814	176.176	-5.869	182.045	
2018-2019	974.208	8.394	-5.869	14.263	
2019-2020	957.429	-16.779	-5.869	-10.910	x

Fonte: Autor.

Na Tabela 6.12, assim como na Lagoa Perene 32 (Tabela 6.10), existe esforços do aquífero para manter o nível da lagoa nos períodos em que os poços estão atuando, porém nem sempre este volume de entrada de recarga subterrânea é suficiente para acrescer a lagoa, apresentando redução no seu volume. Este é outro exemplo de uma lagoa que sofre forte influência da exploração de água região e caso estes poços não estivessem atuando, a lagoa possivelmente teria um comportamento muito mais linear perante a sua perenidade.

Vale ressaltar que esta é uma análise conservadora, já que as lagoas perenes nunca se secaram no intervalo analisado. Este não secamento pode estar relacionado as maiores conexões hídricas que estes corpos apresentam com o aquífero, fato mais evidenciado quando relacionado com as variações volumétricas nas lagoas intermitentes.

6.3.3.2 Lagoas Intermitentes

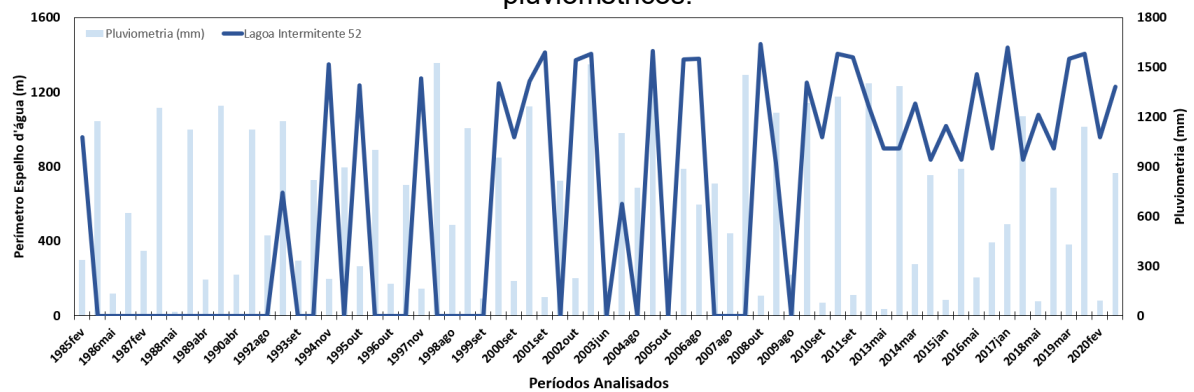
Em relação as lagoas intermitentes, sumarizado na tabela 6.5, tem-se 89 lagoas intermitentes analisadas, sendo destas, 34 lagoas que não apresentam poços em sua proximidade e 55 que estão em distâncias menores do que o cone de rebaixamento dos poços. Assim como nas perenes, temos lagoas que estão sofrendo influência notável dos poços e outras que não estão. Desta forma, das 55 lagoas próximas aos poços, 21 apresentaram potencial influência e 34 lagoas foi notada mudança em seu comportamento hídrico pela exploração de água.

A seguir serão demonstradas algumas lagoas analisadas que representam o comportamento hídrico em três diferentes categorias, sendo estas: Lagoas intermitentes que não apresentam poços em sua proximidade; Lagoas intermitentes que apresentam poços próximos, mas estes não influenciam suficientemente no comportamento hídrico destes corpos; e Lagoas intermitentes onde os poços próximos influenciam na mudança dos seus padrões hídricos.

Cada lagoa apresenta informações singulares perante a quantidade de poços próximos e ao volume retirado pelo somatório destes poços, assim como o tamanho destes corpos hídricos e as demais singularidades sobre a geologia, geomorfologia e estruturação onde estes corpos hídricos estão inseridos, porém, algumas particularidades foram semelhantes quando analisado o comportamento da variação volumétrica nestes corpos hídricos e a relação de entradas e saídas volumétricas.

As lagoas intermitentes que não apresentam poços em sua proximidade compreendem o primeiro grupo analisado, totalizando 34 lagoas. Assim como as lagoas perenes analisadas anteriormente, estas lagoas têm seu comportamento hídrico condicionado a variações naturais, como a mudança dos padrões pluviométricos e o balanço de conectividade das lagoas com os aquíferos. A lagoa escolhida para representar as lagoas deste grupo é a Lagoa Intermitente 52 e na Figura 6.9 fica evidente o comportamento hídrico desta lagoa e as variações pluviométricas ao longo do intervalo de anos avaliados neste estudo.

Figura 6.9: Comportamento hídrico da Lagoa Intermitente 52, representando as lagoas intermitentes que não apresentam poços em sua proximidade. A linha contínua azul escuro marca a variação do espelho d'água da lagoa e as barras em azul claro os montantes pluviométricos.



Fonte: Autor.

Ao analisar o gráfico da Figura 6.8, fica evidente um comportamento hídrico complexo desta lagoa, apresentando momentos em que está cheia e que está vazia. Segundo Pacheco Neto, De Paula & Galvão (2024), lagoas intermitentes podem estar extremamente desconectadas com o aquífero, sendo mais dependentes da água da chuva, ou podem também apresentar certos momentos de conexão hídrica e receber um aporte de água advindo das recargas subterrâneas. Esta lagoa foi escolhida pelo fato dela ser uma lagoa intermitente que pode representar os diversos tipos de lagoas intermitentes sem influência antrópica que existe na região. Temos grandes períodos

em que ela está totalmente seca, momentos em que ela tem a característica de se encher e secar em anos subsequentes e até momentos em que ela se estabiliza e não se seca novamente.

Estes comportamentos são frutos de uma dinâmica natural que pode ocorrer em aquíferos cársticos, devido a mudança de fluxos hídricos nestes ambientes, novas conexões hídricas que podem surgir ou até deixar de existir. Os momentos de conexão hídrica são marcados por um acréscimo no volume desta lagoa devido a uma recarga subterrânea, estas variações volumétricas estão presentes na Tabela 6.13 a seguir.

Tabela 6.13: Valores volumétricos obtidos para a Lagoa Intermitente 52 ao longo dos anos hidrológicos analisados, assim como sua variação volumétrica entre os anos e os montantes de saída e entrada, referentes a exploração de água pelos poços e a recarga subterrânea, respectivamente. Os valores em azul, representam ganhos em volume, já os em vermelho, representam perdas no volume da lagoa, no ano hidrológico analisado.

Lagoa Intermitente 52				
Ano Hidrológico (Outubro-Setembro)	Volume Anual Lagoa (m³)	ΔV_L (Variação Volumétrica) (m³)	Volume Σ Poços Anual (m³)	Volume Recarga Subterrânea (m³)
1984-1985	0	-	0	-
1985-1986	0	0	0	0
1986-1987	0	0	0	0
1987-1988	0	0	0	0
1988-1989	0	0	0	0
1989-1990	0	0	0	0
1990-1991	0	0	0	0
1991-1992	0	0	0	0
1992-1993	118.086	118.086	0	118.086
1993-1994	0	-118.086	0	-118.086
1994-1995	0	0	0	0
1995-1996	0	0	0	0
1996-1997	0	0	0	0
1997-1998	0	0	0	0
1998-1999	0	0	0	0
1999-2000	451.432	451.432	0	451.432
2000-2001	403.704	-47.728	0	-47.728
2001-2002	0	-403.704	0	-403.704
2002-2003	443.490	443.490	0	443.490
2003-2004	92.854	-350.636	0	-350.636
2004-2005	540.193	447.339	0	447.339
2005-2006	766.297	226.103	0	226.103
2006-2007	0	-766.297	0	-766.297
2007-2008	0	0	0	0
2008-2009	189.919	189.919	0	189.919
2009-2010	751.267	561.348	0	561.348
2010-2011	556.568	-194.699	0	-194.699
2011-2012	566.802	10.233	0	10.233
2012-2013	143.299	-423.503	0	-423.503
2013-2014	237.476	94.177	0	94.177
2014-2015	134.889	-102.587	0	-102.587
2015-2016	143.299	8.410	0	8.410
2016-2017	143.299	0	0	0
2017-2018	160.107	16.808	0	16.808

2018-2019	435.072	274.965	0	274.965
2019-2020	320.242	-114.831	0	-114.831

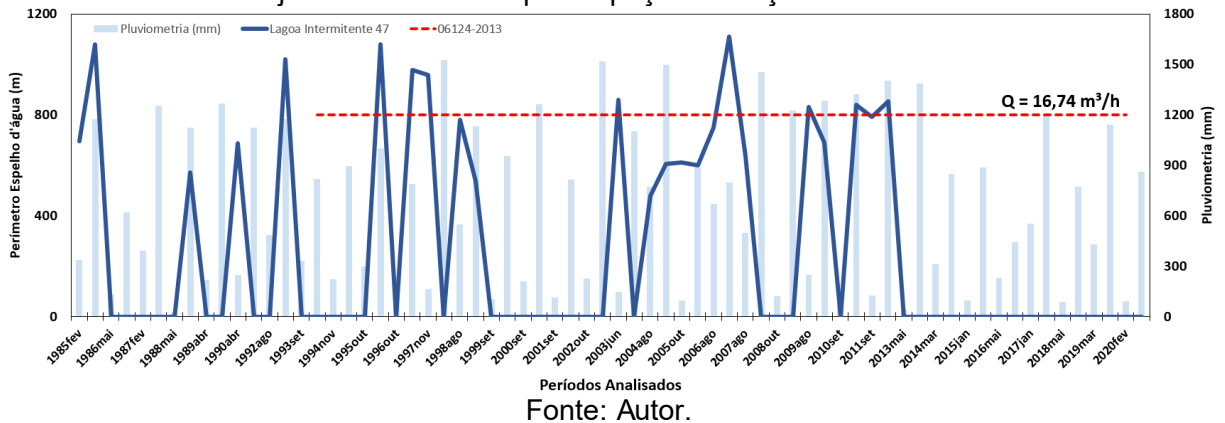
Fonte: Autor.

A Tabela 6.13 revela os diferentes momentos que esta lagoa apresenta em sua história hidrológica. Primeiro que não apresentando poços, suas variações são condicionadas as variações volumétricas advindas da recarga hídrica subterrânea. Nos primeiros anos analisados a lagoa vivencia muitos anos hidrológicos em que se apresenta seca, depois vivencia momentos em que se enche por alguns períodos e depois se seca, e por fim apresenta espelho d'água por diversos anos consecutivo, adquirindo certa perenidade, deixando para trás a característica de intermitência. Este último momento é bem marcado por episódios mais frequentes de conexão hídrica com o aquífero, refletindo em entradas volumétricas positivas advindo da recarga subterrânea, possibilitando manter o nível da lagoa nos últimos anos analisados.

O segundo grupo analisado, apresentou 34 lagoas intermitentes com poços atuando em suas proximidades, porém com explorações que não demonstraram serem efetivas na mudança de comportamento destes corpos hídricos. A Figura 6.10 apresenta o comportamento hídrico da Lagoa Intermitente 47 ao longo dos anos escolhidos neste trabalho, assim como os valores pluviométricos e o momento em que diferentes poços começaram a atuar próximo a este corpo hídrico.

Cabe ressaltar que os padrões e os períodos que as lagoas intermitentes se secam são singulares para cada corpo hídrico, porém o comportamento volumétrico das entradas provenientes do aquífero e das retiradas pela exploração de água que se demonstrou similar para o agrupamento destes corpos hídricos.

Figura 6.10: Comportamento hídrico da Lagoa Intermitente 47, representando as lagoas intermitentes que apresentam poços em sua proximidade, mas não sofrem alteração em seu comportamento hídrico pela exploração de água. A linha contínua azul escuro marca a variação do espelho d'água da lagoa, as barras em azul claro os montantes pluviométricos e as linhas tracejadas o momento que os poços começam a atuar e suas vazões.



A Lagoa Intermitente 47, como todo corpo hídrico que apresenta intermitência, apresenta períodos que se apresenta cheia e períodos que se seca totalmente, característica que fica nítida ao observar a Figura 6.10. Ao relacionar a variação do espelho d'água da lagoa ao longo dos anos e os momentos de atuação dos poços existentes próximo a ela, fica evidente que os momentos em que a lagoa apresentou seus períodos mais cheios em sua história hidrológica é concomitante com a exploração de água dos instrumentos.

É interessante pontuar também que a lagoa tem uma flutuação bem evidenciada pelas baixas pluviometrias, onde muito dos seus momentos seca, estão em anos consecutivos de pouca chuva. A Tabela 6.14 contém as informações dos poços que estão próximos a esta lagoa.

Tabela 6.14: Poços próximos a Lagoa Intermitente 47 e suas informações utilizadas para determinar a influência sobre a lagoa.

Lagoa Intermitente 47							
Código / Poços	Vazão (m ³ /h)	Ano Instalação	Ano de produção reduzida	Rebaixamento (s)	Condutividade Hidráulica (K)	Raio do Cone de Rebaixamento (m)	Distância do Poço até a Lagoa (m)
06124-2013	16,74	1994	2019	19,3	0,0001	579	510

Fonte: Autor.

Ao analisar as participações das entradas e saídas volumétricas que ocorreram ao longo dos anos hidrológicos e condicionaram as variações volumétricas na lagoa, os momentos de secamento desta lagoa estão muito mais relacionados com uma

desconexão com o aquífero do que uma influência direta dos poços. Estas informações estão na Tabela 6.15 a seguir.

Tabela 6.15: Valores volumétricos obtidos para a Lagoa Intermitente 47 ao longo dos anos hidrológicos analisados, assim como sua variação volumétrica entre os anos e os montantes de saída e entrada, referentes a exploração de água pelos poços e a recarga subterrânea, respectivamente. Na última coluna estão evidenciados os momentos em que a retirada volumétrica dos poços foi maior que o aporte fornecido pelo aquífero. Os valores em azul, representam ganhos em volume, já os em vermelho, representam perdas no volume da lagoa, no ano hidrológico analisado.

Lagoa Intermitente 47					
Ano Hidrológico (Outubro-Setembro)	Volume Anual Lagoa (m³)	ΔV_L (Variação Volumétrica) (m³)	Volume Σ Poços Anual (m³)	Volume Recarga Subterrânea (m³)	Anos em que a retirada dos poços foi maior que a recarga subterrânea
1984-1985	336.485	-	0	-	
1985-1986	0	-336.485	0	-336.485	
1986-1987	0	0	0	0	
1987-1988	153.743	153.743	0	153.743	
1988-1989	0	-153.743	0	-153.743	
1989-1990	0	0	0	0	
1990-1991	0	0	0	0	
1991-1992	173.302	173.302	0	173.302	
1992-1993	218.923	45.621	0	45.621	
1993-1994	0	-218.923	-146.642	-72.281	x
1994-1995	0	0	-146.642	0	
1995-1996	487.784	487.784	-146.642	634.427	
1996-1997	631.534	143.750	-146.642	290.392	
1997-1998	0	-631.534	-146.642	-484.892	x
1998-1999	194.603	194.603	-146.642	341.245	
1999-2000	0	-194.603	-146.642	-47.960	x
2000-2001	0	0	-146.642	0	
2001-2002	0	0	-146.642	0	
2002-2003	0	0	-146.642	0	
2003-2004	0	0	-146.642	0	
2004-2005	190.050	190.050	-146.642	336.692	
2005-2006	101.269	-88.781	-146.642	57.861	x
2006-2007	524.097	422.828	-146.642	569.471	
2007-2008	0	-524.097	-146.642	-377.455	x
2008-2009	0	0	-146.642	0	
2009-2010	150.737	150.737	-146.642	297.380	
2010-2011	193.717	42.979	-146.642	189.621	
2011-2012	331.328	137.612	-146.642	284.254	
2012-2013	0	-331.328	-146.642	-184.686	x
2013-2014	0	0	-146.642	0	
2014-2015	0	0	-146.642	0	
2015-2016	0	0	-146.642	0	
2016-2017	0	0	-146.642	0	
2017-2018	0	0	-146.642	0	
2018-2019	0	0	-146.642	0	
2019-2020	0	0	-146.642	0	

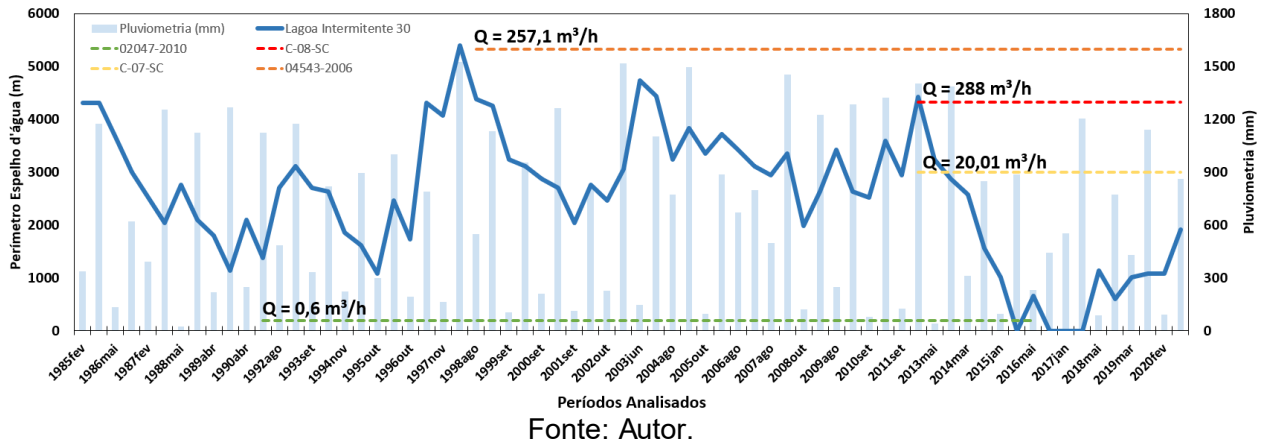
Fonte: Autor.

Ao analisar a Tabela 6.15, até o ano hidrológico 1993-1994 não existiam poços atuando próximo a lagoa, sendo, sua variação volumétrica totalmente subordinada as conexões hídras, tendo momentos onde o aquífero se apresentava conectado e aportava água para este corpo hídrico o expandindo. Esta conexão e desconexão com o aquífero continua a ocorrer nos próximos anos hidrológicos, mesmo com a atuação dos poços, momentos em que a lagoa tem seu volume aumentado, fruto de conexões hídras e grandes aportes de água pela recarga hídrica subterrânea. Quando os momentos em que a retirada dos poços foi maior que a recarga subterrânea fica evidente que pelos valores negativos estas lagoas se desconectaram com o aquífero, apenas em um momento a lagoa apresentou retração em seu espelho d'água ainda conectada com o aquífero que foi no ano hidrológico 2005-2006. Devido a essas interpretações, nota-se que os poços não influenciaram diretamente na dinâmica hídrica desta lagoa e de diversas outras lagoas presentes neste grupo. O fato da desconexão hídrica com o aquífero já seria suficiente para o secamento destes corpos hídricos em grande parte das lagoas intermitentes, que tem suas drenagens muito mais evidenciadas.

O último agrupamento de lagoas intermitentes totaliza 21 lagoas que tiveram seu comportamento hídrico fortemente influenciado pela retirada volumétrica de poços, onde muitas vezes se secaram devido a ação destes poços. Foram escolhidas duas lagoas para representar este grupo.

A Figura 6.11 apresenta o comportamento hídrico da Lagoa Intermitente 30 ao longo dos anos avaliados, nele pode ser observado a variação perimétrica deste corpo hídrico, os montantes pluviométricos em cada período analisado e o momento em que diferentes poços começaram a atuar próximo a este corpo hídrico e como esta nova perturbação influenciou no comportamento da lagoa.

Figura 6.11: Comportamento hídrico da Lagoa Intermittente 30, representando as lagoas intermitentes que apresentam poços que influenciam em seu comportamento hídrico. A linha contínua azul escuro marca a variação do espelho d'água da lagoa, as barras em azul claro os montantes pluviométricos e as linhas tracejadas o momento que os poços começam a atuar e suas vazões.



O gráfico da Figura 6.11 apresenta a história hidrológica da Lagoa Intermittente 30. Nos primeiros anos de sua história, esta lagoa demonstra uma grande redução em seus níveis, em momentos distintos pluviométricos, diminuindo durante os períodos de menos chuva e seguindo este comportamento mesmo em momentos de alta pluviometria em sequência. Este comportamento reflete momentos de desconexão, onde este corpo hídrico não está recebendo aporte de água do aquífero e sua água está constantemente sendo drenada. Porém, esta lagoa volta a apresentar expansão e logo em seguida poços começam a explorar água em sua proximidade. Estes poços de alta vazão podem estar influenciando no comportamento desta lagoa, resultando até, neste caso, alterando a perenidade desta lagoa, onde nunca tinha se secado, até se secar totalmente por alguns anos, nos últimos anos analisados. Os períodos de maior redução desta lagoa, são marcados por momentos de atividade dos poços. A mudança dos padrões de perenidade, devido a ação antrópica, também foram observadas nas lagoas estudadas por Assunção (2019) e Alves (2020) no município de Sete Lagoas, ambas inclusas no agrupamento aqui descrito. A Tabela 6.16 contém as informações dos poços que estão próximos a Lagoa Intermittente 30.

Tabela 6.16: Poços próximos a Lagoa Intermitente 30 e suas informações utilizadas para determinar a influência sobre a lagoa.

Lagoa Intermitente 30							
Código / Poços	Vazão (m ³ /h)	Ano Instalação	Ano de produção reduzida	Rebaixamento (s)	Condutividade Hidráulica (K)	Raio do Cone de Rebaixamento (m)	Distância do Poço até a Lagoa (m)
02047-2010	0,6	1991	2016	60	0,00001	569	390
C-08-SC	288	2012	2037	16,86	0,0001	505	330
C-07-SC	20,01	2012	2037	80,67	0,0001	2420	320
04543-2006	257,1	1999	2024	18,56	0,0001	556	210

Fonte: Autor.

Para esclarecer a partição destes poços no comportamento hídrico da lagoa, foram analisados os volumes de entrada e saída que ocorrem neste corpo hídrico, neste sentido, a Tabela 6.17 sumariza essas entradas e saídas, assim como a variação volumétrica entre os anos hidrológicos analisados.

Tabela 6.17: Valores volumétricos obtidos para a Lagoa Intermitente 30 ao longo dos anos hidrológicos analisados, assim como sua variação volumétrica entre os anos e os montantes de saída e entrada, referentes a exploração de água pelos poços e a recarga subterrânea, respectivamente. Na última coluna estão evidenciados os momentos em que a retirada volumétrica dos poços foi maior que o aporte fornecido pelo aquífero. Os valores em azul, representam ganhos em volume, já os em vermelho, representam perdas no volume da lagoa, no ano hidrológico analisado.

Lagoa Intermitente 30					
Ano Hidrológico (Outubro-Setembro)	Volume Anual Lagoa (m ³)	ΔV_L (Variação Volumétrica) (m ³)	Volume Σ Poços Anual (m ³)	Volume Recarga Subterrânea (m ³)	Anos em que a retirada dos poços foi maior que a recarga subterrânea
1984-1985	2.785.772	-	0	-	
1985-1986	1.762.697	-1.023.075	0	-1.023.075	
1986-1987	798.061	-964.636	0	-964.636	
1987-1988	680.597	-117.463	0	-117.463	
1988-1989	344.876	-335.721	0	-335.721	
1989-1990	512.754	167.878	0	167.878	
1990-1991	397.122	-115.632	-5.256	-110.376	x
1991-1992	330.927	-66.195	-5.256	-60.939	x
1992-1993	2.039.447	1.708.520	-5.256	1.713.776	
1993-1994	1.251.065	-788.383	-5.256	-783.127	x
1994-1995	470.792	-780.272	-5.256	-775.016	x
1995-1996	1.032.966	562.174	-5.256	567.430	
1996-1997	2.903.169	1.870.203	-5.256	1.875.459	
1997-1998	3.708.106	804.937	-5.256	810.193	
1998-1999	3.087.639	-620.467	-2.256.576	1.636.109	x
1999-2000	2.005.901	-1.081.738	-2.256.576	1.174.838	x
2000-2001	1.309.778	-696.123	-2.256.576	1.560.453	x
2001-2002	1.427.210	117.432	-2.256.576	2.374.008	
2002-2003	1.737.531	310.321	-2.282.856	2.593.177	
2003-2004	2.911.550	1.174.019	-2.282.856	3.456.875	
2004-2005	2.433.587	-477.963	-2.282.856	1.804.893	x
2005-2006	2.475.512	41.925	-2.282.856	2.324.781	
2006-2007	1.670.434	-805.078	-2.282.856	1.477.778	x

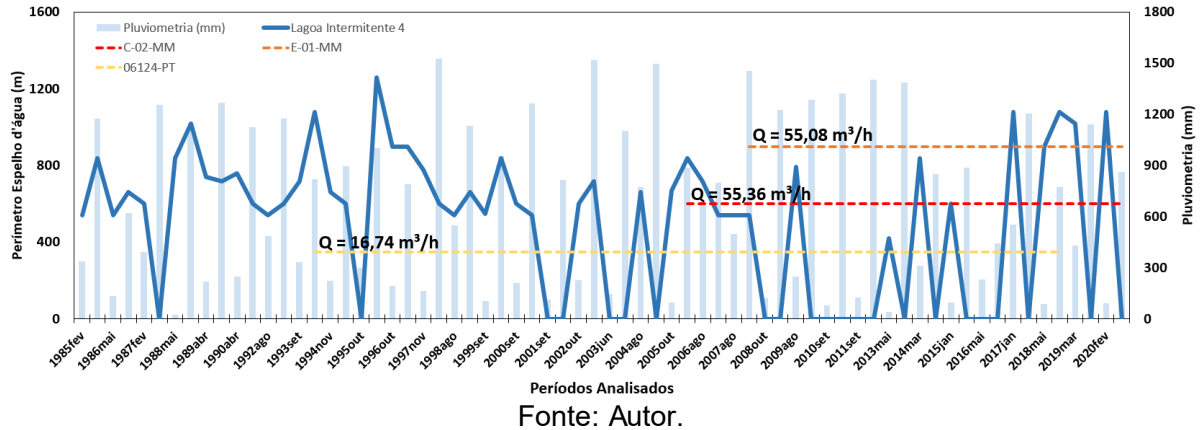
2007-2008	1.024.581	-645.853	-2.282.856	1.637.003	x
2008-2009	1.267.841	243.260	-2.282.856	2.526.116	
2009-2010	1.267.841	0	-2.282.856	0	x
2010-2011	2.106.539	838.698	-2.282.856	3.121.554	
2011-2012	4.778.487	2.671.948	-4.980.936	7.652.884	
2012-2013	1.511.087	-3.267.400	-4.980.936	1.713.536	x
2013-2014	512.754	-998.333	-4.980.936	3.982.603	x
2014-2015	0	-512.754	-4.980.936	4.468.182	x
2015-2016	0	0	-4.980.936	0	x
2016-2017	0	0	-4.980.936	0	x
2017-2018	143.299	143.299	-4.975.680	5.118.979	
2018-2019	344.876	201.577	-4.975.680	5.177.257	
2019-2020	705.767	360.891	-4.975.680	5.336.571	

Fonte: Autor.

Assim como foi evidenciado na Figura 6.11, a Tabela 6.17 mostra uma redução no volume da lagoa nos primeiros anos, marcado por uma desconexão hídrica, pois os valores de recarga subterrânea se apresentaram negativo e neste momento ainda, não existiam poços atuantes. Cabe ressaltar, que a lagoa não se secou pelo grande volume de água que este corpo apresenta. Estas desconexões ainda ocorrem quando o primeiro poço começa a atuar, porém o aquífero volta a aportar grande volume de água para este corpo hídrico nos seus momentos de conexão. Quando a lagoa começa a ser influenciada por poços com maiores vazões, a lagoa passa por um momento de grande conexão hídrica, porém em muitos destes momentos, a água aportada pelo aquífero não é suficiente, sendo menor que a retirada pela exploração de água e desta forma a lagoa experimenta diversos momentos de retração. A partir de 2012, outro poço começa a atuar nesta lagoa e, desta forma, com vazões de exploração se elevando muito, a lagoa sofre uma severa redução em seu volume, até se secar totalmente, este período é marcado por subsequentes anos hidrológicos com retiradas maiores que entradas. O que se pode pontuar, que mesmo o aquífero mantendo a sua conexão neste caso, a lagoa sofre para manter seus níveis até se secar totalmente, tendo os poços como um dos responsáveis por sua intermitência.

A segunda lagoa escolhida para representar o grupo de lagoas intermitentes fortemente influenciadas por poços foi a Lagoa Intermitente 4, e seu comportamento hídrico ao longo dos anos pode ser visualizado na Figura 6.12, assim como o momento em que cada poço começou a explorar água próximo a este manancial.

Figura 6.12: Comportamento hídrico da Lagoa Intermitente 4, representando as lagoas intermitentes que apresentam poços que influenciam em seu comportamento hídrico. A linha contínua azul escuro marca a variação do espelho d'água da lagoa, as barras em azul claro os montantes pluviométricos e as linhas tracejadas o momento que os poços começam a atuar e suas vazões.



O comportamento hídrico da Lagoa Intermitente 4 apresentado na Figura 6.12, mostra momentos em que este corpo hídrico se apresenta cheio e vazio ao longo da sua história. A primeira metade do intervalo analisado a lagoa tem seus níveis mais cheios por períodos consecutivos e apresenta um ano vazia após a instalação de um poço próximo a este manancial. A partir de 2001 a lagoa enfrenta anos mais secas e principalmente após 2006 e 2008, onde dois poços com considerável vazão exploram água e esta lagoa enfrenta diversos anos com pouca ou nenhuma água, mesmo estando em um período considerado de elevada pluviometria para a região. Com base nesta análise, foi possível atestar a influência antrópica nos momentos de intermitência desta lagoa, e a análise volumétrica feita contida na Tabela 6.19, confirma mais uma vez esta influência. As informações dos poços que atuam próximo a esta lagoa estão contidas na Tabela 6.18.

Tabela 6.18: Poços próximos a Lagoa Intermitente 4 e suas informações utilizadas para determinar a influência sobre a lagoa.

Lagoa Intermitente 4							
Código / Poços	Vazão (m ³ /h)	Ano Instalação	Ano de produção reduzida	Rebaixamento (s)	Condutividade Hidráulica (K)	Raio do Cone de Rebaixamento (m)	Distância do Poço até a Lagoa (m)
C-02-MM	55,36	2006	2031	0,62	0,001	59	40
E-01-MM	55,08	2008	2033	2,04	0,001	193	120
06124-PT	16,74	1994	2019	15,23	0,0001	456	125

Fonte: Autor.

A Tabela 6.19 sumariza as variações volumétricas da Lagoa Intermitente 4 e os volumes de entradas e saídas que ocorrem neste corpo hídrico, indicando também, os momentos em que a retirada dos poços foi maior que a recarga subterrânea.

Tabela 6.19: Valores volumétricos obtidos para a Lagoa Intermitente 4 ao longo dos anos hidrológicos analisados, assim como sua variação volumétrica entre os anos e os montantes de saída e entrada, referentes a exploração de água pelos poços e a recarga subterrânea, respectivamente. Na última coluna estão evidenciados os momentos em que a retirada volumétrica dos poços foi maior que o aporte fornecido pelo aquífero. Os valores em azul, representam ganhos em volume, já os em vermelho, representam perdas no volume da lagoa, no ano hidrológico analisado.

Lagoa Intermitente 4					
Ano Hidrológico (Outubro-Setembro)	Volume Anual Lagoa (m ³)	ΔV _L (Variação Volumétrica) (m ³)	Volume Σ Poços Anual (m ³)	Volume Recarga Subterrânea (m ³)	Anos em que a retirada dos poços foi maior que a recarga subterrânea
1984-1985	260.914	-	0	-	
1985-1986	143.299	-117.615	0	-117.615	
1986-1987	0	-143.299	0	-143.299	
1987-1988	294.506	294.506	0	294.506	
1988-1989	193.717	-100.789	0	-100.789	
1989-1990	101.269	-92.448	0	-92.448	
1990-1991	117.311	16.042	0	16.042	
1991-1992	136.905	19.595	0	19.595	
1992-1993	160.107	23.202	0	23.202	
1993-1994	218.923	58.816	-146.642	205.458	
1994-1995	134.898	-84.025	-146.642	62.618	x
1995-1996	294.506	159.607	-146.642	306.250	
1996-1997	269.317	-25.188	-146.642	121.454	x
1997-1998	143.299	-126.018	-146.642	20.624	x
1998-1999	143.299	0	-146.642	0	x
1999-2000	185.320	42.021	-146.642	188.663	
2000-2001	109.673	-75.647	-146.642	70.996	x
2001-2002	0	-109.673	-146.642	36.969	x
2002-2003	160.107	160.107	-146.642	306.750	
2003-2004	0	-160.107	-146.642	-13.465	x
2004-2005	0	0	-146.642	0	
2005-2006	227.318	227.318	-631.596	858.914	
2006-2007	126.488	-100.831	-631.596	530.765	x
2007-2008	109.673	-16.815	-1.114.097	1.097.282	x
2008-2009	0	-109.673	-1.114.097	1.004.424	x
2009-2010	0	0	-1.114.097	0	x
2010-2011	0	0	-1.114.097	0	x
2011-2012	0	0	-1.114.097	0	x
2012-2013	0	0	-1.114.097	0	x
2013-2014	0	0	-1.114.097	0	x
2014-2015	0	0	-1.114.097	0	x
2015-2016	0	0	-1.114.097	0	x
2016-2017	0	0	-1.114.097	0	x
2017-2018	269.317	269.317	-1.114.097	1.383.414	
2018-2019	0	-269.317	-1.114.097	844.779	x
2019-2020	0	0	-1.114.097	0	x

Fonte: Autor.

Como demonstrado na Figura 6.12, a Tabela 6.19 aponta os momentos em que a lagoa preservou o nível de água da Lagoa Intermitente 4 e os momentos em que este corpo hídrico se secou totalmente. Até o ano hidrológico 1993-1994 a lagoa não sofria influência por nenhum dos poços e sua variação volumétrica era subordinada aos momentos de conexão e desconexão que este corpo hídrico apresentava com o aquífero, assim como foi visto em várias outras lagoas analisadas neste trabalho. Os momentos de conexão hídrica eles continuam nos anos seguintes, porém, um dos poços próximos começa a explorar água próximo a este manancial e em diversos anos, esta retirada de água é superior a recarga subterrânea, resultando em diversos anos de perda de volume de água na lagoa e até o seu secamento em alguns anos analisados. No ano hidrológico 2007-2008, mais dois poços de elevada vazão começaram a interferir nas variações de retirada hídrica da lagoa, e desta a forma, a lagoa não consegue mais manter seus níveis e se seca em vários anos hidrológicos seguidos, apontando assim a influência volumétrica da retirada de água por poços na lagoa, resultando em momentos de intermitência.

6.3.4 Características relacionadas a influência dos poços

Como pontuado anteriormente, cada lagoa analisada neste trabalho tem características singulares perante o ambiente em que se situa. É particularidade de cada corpo hídrico: a litologia; os momentos de conexão hídrica; a influência de lineamentos estruturais; a proximidade de maciços rochosos e as características geomorfológicas, como: altimetria, tamanho da lagoa e presença de depressões cársticas. Foi muito discutido ao longo desta etapa a influência ou não da ação antrópica sobre os corpos hídricos existentes na janela cárstica de Lagoa Santa, porém, o motivo de algumas lagoas serem mais influenciadas do que outras, foi uma das questões que permeou ao longo das análises. Ao analisar as diversas lagoas existentes na região, foi observado que não só o número de poços, a vazão explorada e a proximidades destes poços aos mananciais são características determinantes para a retração destas lagoas. As diversas características particulares de cada corpo hídrico têm papel fundamental sobre a influência destes poços em seu comportamento hídrico.

Perante as lagoas perenes, as características que se mostraram mais determinantes para um corpo hídrico ser influenciado ou não pelos poços em sua

proximidade foram: a presença de lineamentos estruturais sobre as lagoas, a altimetria de cada corpo hídrico e os momentos de conexão e desconexão hídrica com o aquífero sobre os mananciais.

Todas as lagoas perenes que tiveram reduções constatadas pela influência dos poços, estão sobre influência de lineamentos estruturais. Este comportamento é totalmente coerente, uma vez que esta estruturação atua como facilitadora ao movimento em ambientes cársticos, fraturas, falhas e condutos podem atuar como a conexão entre a lagoa e o cone de rebaixamento de um poço próximo ao manancial, facilitando assim o fluxo de retirada hídrica.

Ao observar os momentos de conexão hídrica que as lagoas perenes apresentam com o aquífero, pode-se constatar uma grande influência destes sobre a facilidade de um poço interferir ou não sobre estes corpos hídricos. Todas as lagoas influenciadas por poços têm grandes momentos de desconexão hídrica, constatado nos agrupamentos levantados no capítulo 5 desta tese (Pacheco Neto, De Paula & Galvão, 2024), quanto nos resultados da quantificação volumétrica de entrada e saída de cada lagoa, observados neste capítulo. Ao observar os resultados das lagoas perenes não influenciadas por poços, 16 de 22 lagoas, apresentaram grandes momentos de conexão com o aquífero, mostrando um grande esforço do aquífero em manter o nível destes mananciais mesmo com grandes vazões exploradas em sua proximidade, atestando novamente que lagoas perenes tendem a manter a sua perenidade devido a um constante aporte de água subterrâneo.

Por fim, a altimetria se mostrou um fator relevante para a facilidade de um poço influenciar sobre os corpos hídricos perenes, onde todos os corpos hídricos influenciados por poços, estão em altitudes entre 700 a 750 m, altitudes consideradas baixas a médias, uma vez que o intervalo de altimetria existente na região vai de 650 a 900 m. Porém, não se pode desconsiderar o fato, de que, grande parcela dos poços localizados na região de estudo, estão presentes em menores topografias, como pode ser observado na Figura 6.4, facilitando esta influência sobre estes corpos hídricos.

Estas lagoas localizadas em cotas mais baixas, também foram observadas por Auler (1994) que apontou como lagoas de nível d'água de aquífero aflorante, com níveis oscilantes mais susceptíveis as variações volumétricas, seja pelo aquífero, ou como aqui observado, pela exploração dos poços. É correto associar estas flutuações nas lagoas em regiões de baixas altitudes como uma maior influência do gradiente

hidráulico existente no aquífero. Cabe ressaltar que este padrão também foi observado nas lagoas intermitentes, como será discutido logo a frente, demonstrando assim um fator primordial da topografia no comportamento hídrico das lagoas no Carste de Lagoa Santa.

Em relação as lagoas intermitentes, as características que apresentaram maior relevância direta em lagoas influenciadas ou não por poços em suas redondezas foram: a litologia onde as lagoas estão situadas, os lineamentos estruturais sobre as lagoas, a altimetria e o tamanho de cada corpo hídrico.

Uma característica que se mostrou muito relevante nas lagoas intermitentes não influenciadas por poços, foi a sua associação com os carbonatos puros do Membro Lagoa Santa da Formação Sete Lagoas, onde das 34 lagoas não influenciadas por poços, 31 estão sobre este tipo litológico. Apontando de certa forma, que estes tipos de rochas estão menos susceptíveis a retirada de água dos poços, e a intermitência está mais ligada a fatores naturais, como conexões e desconexões com o nível de água subterrâneo. Por outro lado, das 21 lagoas influenciadas por poços, 13 estão sobre litologias diferentes do Membro Lagoa Santa, corroborando com este alto valor de susceptibilidade da não influência por poços em lagoas sobre este litotipo.

O Membro Lagoa Santa tem outro papel importante ao se analisar todas as lagoas sobre este litotipo na região. Das 73 lagoas perenes ou intermitentes que estão sobre influência destes tipos de rocha, 58 são intermitentes, isto é, quase 80% das lagoas sobre esta litologia apresentaram intermitência, se secando ao menos uma vez no intervalo de estudo analisado, apontando de certa forma, um fator extremamente relevante para diagnosticar o motivo de uma lagoa ser intermitente ou perene na área de estudo.

Assim como nas lagoas perenes, as lagoas intermitentes influenciadas por poços apresentaram grande aderência a presença de lineamentos estruturais sobre seus espelhos d'água, ou em suas proximidades. Como foi descrito anteriormente, estes lineamentos atuam como facilitadores para a conexão da água superficial contida nestes mananciais e os cones de rebaixamento formados devido a exploração de água em um poço, contribuindo assim para a influencia do poço na retirada de água deste corpo hídrico.

Outra característica que se mostrou semelhante entre as lagoas perenes influenciadas por poços e as lagoas intermitentes influenciadas por poços foi a altimetria. Todas lagoas as lagoas intermitentes influenciadas por poços estão em topografias com valores menores que 750 metros. Das 21 lagoas influenciadas por poços, 15 estão em altimetrias entre 700 a 750 metros e 6 estão em altimetrias entre 600 a 650 metros. Demonstrando uma facilidade de poços contribuírem na retirada de água das lagoas em baixas topografias.

A última característica que se mostrou relevante para a influência de poços sobre lagoas intermitentes foi o tamanho destes mananciais, onde 17 das 21 lagoas intermitentes influenciadas pela exploração de água na região, são pequenas ou muito pequenas, com perímetros médios menores que 1000 metros. Tamanho considerado pequeno ao comparar com grandes lagoas que existem na região. É plausível esta relação encontrada, pois as grandes lagoas da região possuem um maior aporte de água e muitas delas necessitam de uma conexão mais constante do aquífero para controlar seus níveis. É compreensível a aceitação que lagoas pequenas, com menos volume de água, serão mais afetadas por poços retirando água em sua proximidade.

Cabe reafirmar que todas as características levantadas para diagnosticar o motivo da influência de um poço sobre uma lagoa perene ou intermitentes são singulares em cada corpo hídrico analisado, ao mesmo passo que uma lagoa que se mostrou influenciada por poços pode apresentar todas as características aqui pontuadas, outro corpo hídrico pode apresentar apenas uma ou duas características levantadas.

6.4 Conclusão

A análise da influência antrópica sobre as lagoas pertencentes ao carste de Lagoa Santa se mostrou positiva e esclareceu o questionamento sobre quais os fatores não naturais poderiam e podem estar interferindo na dinâmica hídrica e na mudança dos padrões de perenidade de diversos corpos hídricos existentes na região. A superexploração de água é um risco real aos mananciais superficiais e o uso excessivo dos recursos hídricos ameaça diretamente estes ecossistemas, ultrapassando sua capacidade natural de renovação, comprometendo a disponibilidade e a qualidade da água a longo prazo.

Entre 1985 e 2020, um total de 715 poços exploraram água na janela cárstica de Lagoa Santa, um número considerado expressivo, podendo representar um sério impacto não só nas lagoas, objeto deste estudo, mas de todo sistema hídrico da região, contribuindo significativamente no esgotamento dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos. Para determinar a influência destes poços sobre as lagoas, a análise do cone de rebaixamento dos poços garantiu uma maior certeza da influência dos poços sobre as lagoas estudadas, totalizando 292 poços que poderiam estar com explorações afetando a dinâmica hídrica destes corpos hídricos.

A partir das ferramentas de sensoriamento remoto, foi possível identificar todas as lagoas existentes na região, detectar e dimensionar os espelhos d'água destes corpos hídricos, aferindo assim a periodicidade de cada manancial ao longo de suas histórias hidrológicas. Estas análises permitiram quantificar as grandezas em volume das lagoas da região e os condicionantes de entrada e saída de água que contribuíram na dinâmica hídrica destes corpos, nos últimos 35 anos. Nestas análises volumétricas, as entradas advindas da recarga subterrânea e as retiradas pelo somatório das vazões de poços atuantes próximo as lagoas, se mostraram como fatores determinantes nas mudanças de comportamento hídrico dos mananciais estudados.

As lagoas perenes e intermitentes foram divididas em três grupos principais: Lagoas sem poços em sua proximidade; Lagoas com poços em sua proximidade, porém não apresentaram mudanças em seu comportamento hídrico pela ação destes poços; e Lagoas com poços em sua proximidade onde a exploração de água afetou ou está afetando sua dinâmica hídrica.

Os dois primeiros grupos, representam lagoas que apresentam sua dinâmica hídrica majoritariamente afetada pelas conexões hídricas com o aquífero. Nestas lagoas, em diversos momentos em sua história hidrológica, a recarga subterrânea controlou a expansão destes corpos hídricos, com volumes de água capazes de manter o nível destes mananciais, mesmo com grande volume explorado por poços. Assim como, a desconexão com o aquífero e o não aporte de água para estes corpos, teve o papel principal, na retração destas lagoas e foi o real motivo do secamento de alguns mananciais. Das 129 lagoas estudadas, 47 não tem poços próximos e 56 estão próximas a poços, mas não são fortemente influenciadas por estes, apontando que o aquífero cárstico da região ainda é o principal agente no controle hídrico das lagoas da região.

O terceiro grupo, foi marcado por 21 lagoas intermitentes e 5 lagoas perenes, que foram ou estão sendo afetadas fortemente pela exploração de água em suas proximidades. Foi notado nestas lagoas, uma incapacidade das conexões aquíferas manterem os níveis destes corpos. Os cálculos realizados elucidaram diversos momentos em que a retirada de volume advinda dos poços foi superior as entradas subordinadas a recarga subterrânea e desta forma, as lagoas perenes apresentaram notadas retrações em seus espelhos d'água e as lagoas intermitentes tiveram momentos mais frequentes e intensos de secamento.

A proximidade dos poços as lagoas é um fator que realmente deve ser levado em consideração, das 129 lagoas estudadas, 26 apresentaram evidências significativas de influência antrópica associada à operação de poços próximos, manifestada por alterações nos regimes de perenidade e na estabilidade dos níveis d'água. Adicionalmente, identificaram-se 56 lagoas (22 perenes e 34 intermitentes) situadas em raio de influência potencial de poços, as quais, embora não tenham ainda demonstrado sinais claros de impacto, encontram-se em situação de risco latente. A ausência de resposta imediata não elimina a possibilidade de interferência futura, especialmente considerando se tratar de um sistema cársticos heterogêneos em constante transformação. O monitoramento hidrológico contínuo desta parcela de lagoas não afetada por poços é fundamental na avaliação de seus comportamentos hidrodinâmicos futuros.

Ao questionar os motivos de uma lagoa ser afetada por poços, foi observado que o somatório da vazão explorada dos poços e a proximidade com a lagoas não eram os únicos fatores que controlavam esta influência. As características geológicas, geomorfológicas e estruturais de cada lagoa, aferidas pelo geoprocessamento, tiveram papel fundamental no entendimento de algumas lagoas serem mais ou menos afetadas pela exploração de água.

Desta forma, pode-se concluir que grande parte das lagoas perenes e intermitentes influenciadas por poços estão sobre influência de lineamentos estruturais, apresentando papel fundamental na conexão das águas da lagoa com o cone de rebaixamento gerado pela retirada de água nos poços. Outra característica que ficou marcada entre as lagoas perenes e intermitentes influenciada por poços foram as suas altimetrias, onde todas estas lagoas se situaram em altitudes baixas na região, menores que 750 metros, demonstrando uma facilidade dos poços

contribuírem na retirada de água relacionadas as cotas altimétricas e um grande controle da topografia sobre os corpos hídricos no Carste de Lagoa Santa.

Em relação as lagoas intermitentes, a litologia e o tamanho destes corpos hídricos, também apresentou certa aderência com a influência ou não dos poços sobre estes mananciais. As lagoas intermitentes localizadas sobre os calcários do Membro Lagoa Santa da Formação Sete Lagoas, normalmente não são influenciadas por poços e lagoas sobre outras litologias tem maior susceptibilidade de serem influenciadas por poço, apontando um certo controle elevado das conexões aquíferas sobre as lagoas em rochas carbonáticas mais puras, com suas intermitências controladas por fatores naturais. Em relação ao tamanho, concluiu-se que lagoas intermitentes influenciadas por poços são em sua maioria, lagoas pequenas, com perímetros menores que 1000 metros. Fato coerente, uma vez que com menos volume, mais facilmente estas lagoas podem ser afetadas pela retirada de água.

A análise da exploração de água dos poços se mostrou de extrema relevância ao aprofundamento do conhecimento a cerca da dinâmica e da vulnerabilidade dos mananciais hídricos, tanto superficiais quanto subterrâneos. Ao compreender os impactos causados pela atividade humana e pela retirada contínua de água, é possível propor estratégias mais eficazes de manejo sustentável desses recursos, especialmente em contextos de crescente demanda e pressão antrópica. Uma possível abordagem que poderia contribuir mais veementemente nas investigações iniciadas neste trabalho, envolveriam a modelagem numérica dos fluxos subterrâneos, apoiando os resultados encontrados até aqui e dando suporte a uma avaliação mais precisas das interações entre aquíferos e os ecossistemas aquáticos superficiais, prevendo cenários futuros e auxiliando na conservação ambiental.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O comportamento perene ou intermitente das lagoas está diretamente condicionado às características morfológicas, geológicas e estruturais das depressões onde se instalam. Lagoas situadas em depressões fechadas, como dolinas, associadas a litologias carbonáticas mais puras, localizadas em altitudes elevadas, apresentaram maior tendência à perenidade, refletindo conexões mais frequentes com o aquífero e uma maior capacidade de retenção de água. Por outro lado, lagoas posicionadas em depressões mais carstificadas, como uvalas, em altitudes mais baixas, mostraram-se mais vulneráveis à perda de suas águas, abastecendo o meio subterrânea, favorecendo comportamentos intermitentes. A presença de estruturas geológicas, tais como fraturas, falhas e condutos, também têm papel determinante na recarga e manutenção dos níveis d'água, sendo fator-chave no comportamento dessas lagoas.

A partir da análise multitemporal de imagens Landsat, associada aos dados de precipitação de 1985 a 2020, foi possível identificar os ciclos climáticos que marcaram a região e como estes influenciaram o volume dos espelhos d'água. A alternância entre ciclos secos e úmidos afetou de forma distinta cada lagoa, conforme seu grau de conectividade com o aquífero. Esta abordagem permitiu classificar as lagoas em diferentes categorias que evidenciam a conexão destes corpos com o meio subterrâneo, como: lagoas conectadas, com conexões sazonais e desconectadas. A análise evidenciou que a variação pluviométrica, embora importante, não explica isoladamente os padrões de perenidade, sendo o sistema aquífero cárstico o principal controlador do comportamento hidrológico das lagoas.

Complementarmente, os resultados revelaram a crescente influência antrópica sobre o sistema, especialmente devido à intensa exploração de água subterrânea por meio de poços tubulares. Foram identificados 715 poços ativos entre 1985 e 2020, sendo que 292 apresentaram cones de rebaixamento potencialmente interferentes na dinâmica hídrica de lagoas próximas. A análise volumétrica das entradas e saídas de água, associada à proximidade de poços, permitiu evidenciar casos em que a exploração superou a recarga, resultando na retração ou secamento de lagoas anteriormente perenes.

A proximidade destes poços tubulares aos sistemas lacustres estudados representou, para muitas lagoas, um fator crítico na dinâmica hídrica destas feições.

No presente estudo, de um total de 129 lagoas analisadas, 26 (sendo 21 intermitentes e 5 perenes) apresentaram evidências significativas de influência antrópica associada à operação de poços próximos, manifestada por alterações nos regimes de perenidade e na estabilidade dos níveis d'água. Além destas, foram identificadas outras 56 lagoas (22 perenes e 34 intermitentes) situadas em áreas com potencial influência de poços, as quais, embora não tenham ainda demonstrado sinais claros de impacto, encontram-se em situação de risco latente. A ausência de resposta imediata não elimina a possibilidade de interferência futura, e o monitoramento destes corpos deve ser uma das prioridades na gestão hídrica sustentável destes mananciais superficiais.

As lagoas mais afetadas localizam-se em cotas altimétricas inferiores, sobre lineamentos estruturais que facilitam a drenagem para o aquífero. Verificou-se, ainda, que as lagoas de menor porte na região, são particularmente vulneráveis à perda de volume em função da exploração, devido à menor capacidade de armazenamento e à dependência direta da recarga subterrânea. As informações de todas as lagoas analisadas neste trabalho estão listadas no catálogo elaborado e presente no apêndice D desta tese.

Dessa forma, as hipóteses levantadas ao longo deste trabalho foram fundamentadas e constatou-se que a perenidade das lagoas está fortemente associada às condições morfoestruturais das depressões, à variação climática e à conectividade com o aquífero, bem como à intensidade da intervenção antrópica. A integração dessas variáveis permitiu o enquadramento das lagoas em classes representativas, contribuindo para uma compreensão mais clara dos mecanismos que governam a presença ou ausência de água nesses corpos ao longo do tempo.

Conclui-se, portanto, que o comportamento hídrico das lagoas do carste de Lagoa Santa não é determinado por um único fator isolado, mas sim por uma interação multifatorial entre geologia, clima e ação humana, que atua de forma sinérgica e dinâmica. Essa constatação reforça a importância de abordagens integradas e multidisciplinares no estudo de ambientes cársticos e destaca a urgência de políticas públicas voltadas à conservação e ao manejo sustentável dos recursos hídricos da região.

Recomenda-se, para futuras pesquisas, a adoção de modelagens numéricas de fluxo subterrâneo capazes de simular com maior precisão os padrões de movimentação da água no sistema cárstico e prever cenários de variação do nível

d'água diante de diferentes condições climáticas e níveis de exploração, o que permitiria validar as inferências feitas neste trabalho sobre a conexão entre lagoas e aquíferos e subsidiar estratégias mais eficazes de manejo hídrico. Sugere-se, ainda, a aplicação de análises isotópicas das águas das lagoas como ferramenta para diferenciar fontes de alimentação hídrica (chuva, escoamento superficial ou aporte subterrâneo) e compreender com maior detalhe a origem e o tempo de residência da água em cada corpo hídrico, além da incorporação de análises estatísticas mais robustas e multivariadas dos dados morfológicos, geológicos, estruturais e hidrológicos, capazes de conferir maior solidez às correlações estabelecidas e validar de forma mais coesa os agrupamentos e classificações propostos. Em conjunto, essas metodologias complementares têm o potencial de aprofundar significativamente a compreensão da dinâmica hídrica das lagoas em ambientes cársticos e fortalecer as bases científicas para sua conservação e gestão integrada.

REFERÊNCIAS

- AGUILAR, Y.; BAUTISTA, F.; MENDOZA, M. E.; FRAUSTO, O.; IHL, T. Density of karst depressions in Yucatán state, México. *Journal of Cave and Karst Studies*, v. 78, n. 2, 2016.
- ALKMIM, F. F.; MARTINS-NETO, M. A. A bacia intracratônica do São Francisco: arcabouço estrutural e cenários evolutivos. In: PINTO, C. P.; MARTINS-NETO, M. A. (org.). *A Bacia do São Francisco: geologia e recursos naturais*. Belo Horizonte: SBG, 2001. p. 9–30.
- ALVES, M. A. G. *Controles hidrogeológicos cársticos e efeitos antrópicos na Lagoa Grande, Sete Lagoas (MG)*. 2020. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020.
- AMARAL, D. G. P. *Análise do comportamento e desempenho hídrico das depressões cársticas da região da APA Carste Lagoa Santa (MG)*. 2018. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.
- AMARAL, D. G. P.; VELÁSQUEZ, L. N. M.; RODRIGUES, P. C. H. Comportamento hídrico das depressões cársticas da região de Lagoa Santa, MG. *Águas Subterrâneas*, v. 33, n. 2, p. 196–209, 2019.
- ANDRADE, A. C.; FRANCISCO, C. N.; ALMEIDA, C. M. Desempenho de classificadores paramétrico e não paramétrico na classificação da fisionomia vegetal. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 66, 2014.
- ANDRADE, I. B.; BARBOSA, J. A.; RIBEIRO, C. G.; DE PAULA, R. S.; VELÁSQUEZ, L. N. Relação hidráulica entre o Complexo Belo Horizonte e o Grupo Bambuí na porção sul da APA Carste de Lagoa Santa, MG. *Geonomos*, p. 38–45, 2019.
- ARAGÃO, F.; VELÁSQUEZ, L. N. M.; GALVÃO, P.; CASTRO TAYER, T.; LUCON, T. N.; AZEVEDO, Ú. R. Natural background levels and validation of the assessment of intrinsic vulnerability to contamination in the Carste Lagoa Santa Protection Unit, Minas Gerais, Brazil. *Environmental Earth Sciences*, v. 79, 2020.
- ASSUNÇÃO, P. H. da S. *Análise da zona de recarga e sua interação com o aquífero cárstico na Lagoa do Matadouro, zona urbana de Sete Lagoas: uma abordagem científica e ambiental*. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019.
- AULER, A. *Hydrogeological and hydrochemical characterization of the Matozinhos–Pedro Leopoldo karst, Brazil*. 1994. Dissertação (Mestrado) – Western Kentucky University, Bowling Green, 1994. 110 p.
- BATISTA, R. C. B. *Caracterização hidrogeológica do entorno do Centro Nacional de Pesquisa Milho e Sorgo (CNPMS) em Sete Lagoas – MG*. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009. 127 p.

BEAR, J. *Dynamics of fluids in porous materials*. Dallas: Society of Petroleum Engineers, 1972.

BEAR, J.; VERRUIJT, A. *Modeling groundwater flow and pollution*. Dordrecht: D. Reidel, 1987. 144 p.

BERBERT-BORN, M. L. C. *Geoquímica dos sedimentos superficiais da região cárstica de Sete Lagoas–Lagoa Santa (MG) e os indícios de interferências antrópicas*. 1998. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 1998.

BERBERT-BORN, M. L. C. Carste de Lagoa Santa – berço da paleontologia e da espeleologia brasileira. In: SCHOBENHAUS, C. et al. (org.). *Sítios geológicos e paleontológicos do Brasil*. Brasília: DNPM/CPRM, 2002. v. 1, p. 415–430.

BOGLI, A. Geomorfologia cárstica. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. (org.). *Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1994. p. 309–334.

CABRAL, J. A. L. *Projeto VIDA – viabilidade industrial e defesa ambiental: região de Sete Lagoas – Lagoa Santa: informações básicas para a gestão territorial*. Belo Horizonte: CPRM/CETEC, 1994. (Série Ordenamento Territorial, v. 3).

ĆALIĆ, J. Karstic uvala revisited: toward a redefinition of the term. *Geomorphology*, v. 134, p. 32–42, 2011.

CARNEIRO, F. A. *Modelagem hidrogeoquímica do sistema aquífero pelito-carbonático existente no CNPMS da Embrapa Sete Lagoas, MG, Brasil*. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Sanitária) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013. 338 p.

CETEC – CENTRO TECNOLÓGICO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. *Diagnóstico ambiental do Estado de Minas Gerais*. Belo Horizonte, 1983. (Série de Publicações Técnicas, n. 10).

CORBELLA, H.; LARA, H. L. Late Cenozoic–Quaternary volcanism in Patagonia and Tierra del Fuego. In: RABASSA, J. (ed.). *The Late Cenozoic of Patagonia and Tierra del Fuego*. Amsterdam: Elsevier, 2008. p. 95–120.

CUSTÓDIO, E.; LLAMAS, M. R. *Hidrología subterránea*. Barcelona: Editorial Omega, 1983. v. 1–2.

CVIJIC, J. *La géographie des terrains calcaires*. Belgrade: Serbian Academy of Sciences and Arts, 1960. (Monographs of the Serbian Academy of Sciences and Arts, v. 341, n. 26). 212 p.

DANTAS, J. C. M. *Compartimentação e modelagem hidrogeológica do sistema aquífero cárstico-fissural da região cárstica de Lagoa Santa*. 2023. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2023.

DANTAS, J. C. M.; DE PAULA, R. S.; VELÁSQUEZ, L. N. M.; PEREIRA, B. A. Groundwater flow modelling in Neoproterozoic carbonate karst based on dye tracer pathways. *Journal of Hydrology*, v. 635, p. 131182, 2024.

DANTAS, J. C. M.; VELÁSQUEZ, L. N. M.; DE PAULA, R. S. Horizontal and vertical compartmentalization in the fissure and karstic aquifers of the Lagoa Santa Karst Environmental Protection Area and surroundings, Minas Gerais, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 123, p. 104219, 2023.

DAY, T. *Lakes and rivers*. New York: Chelsea House Publishers, 2006. 273 p.

DARDENNE, M. A. Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 30., 1978, Recife. *Anais*. Recife: SBG, 1978. v. 2, p. 597–610.

DARWIN, C. *A origem das espécies*. Tradução de Daniel Moreira Miranda. São Paulo: Edipro, 1859.

DE PAULA, R. S. *Modelo conceitual de fluxo dos aquíferos pelítico-carbonáticos da região da APA Carste de Lagoa Santa, MG*. 2019. Tese (Doutorado em Hidrogeologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

DE PAULA, R. S.; TEIXEIRA, G. M.; RIBEIRO, C. G.; SILVA, P. H. P.; SILVA, T. G. A.; VIEIRA, L. C. M.; VELÁSQUEZ, L. N. M. Parâmetros hidrodinâmicos do aquífero cárstico-fissural da região de Lagoa Santa, Minas Gerais. *Águas Subterrâneas*, v. 34, n. 2, p. 221–235, 2020.

DE PAULA, R. S.; VELÁSQUEZ, L. N. M. Balanço hídrico em sistema hidrogeológico cárstico, região de Lagoa Santa, Minas Gerais. *Águas Subterrâneas*, 2019.

DIAS, F. S. *Estudo do aquífero carbonático da cidade de Barroso (MG): uma contribuição à gestão do manancial subterrâneo*. 2009. Tese (Doutorado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009. 94 p.

DOS SANTOS, G. B.; CASTRO, P. T. A. Sistemas lacustres interiores: avanços e técnicas de estudo. In: CARVALHO JÚNIOR, O. A. et al. (org.). *Revisões de literatura da geomorfologia brasileira* [recurso eletrônico]. Brasília: Universidade de Brasília, 2022. p. 163–192.

FEITOSA, F. A. C.; FEITOSA FILHO, J. M.; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. A. *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*. 3. ed. rev. ampl. Rio de Janeiro: Serviço Geológico do Brasil – CPRM, 2008. 835 p.

FEATHERS, J.; KIPNIS, R.; PILÓ, L.; ARROYO-KALIN, M.; COBLENTZ, D. How old is Luzia? Luminescence dating and stratigraphic integrity at Lapa Vermelha, Lagoa Santa, Brazil. *Geoarchaeology*, v. 25, n. 4, p. 395–436, 2010.

FLEURY, S. *Land use policy and practice on karst terrains: living on limestone*. Dordrecht: Springer, 2009. 187 p.

FIELD, M. S. *The QTRACER2 program for tracer-breakthrough curve analysis for tracer tests in karstic aquifers and other hydrologic systems*. Washington, D.C.: Environmental Protection Agency, 2002. 179 p.

FREEZE, R. A.; CHERRY, J. A. *Groundwater*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1979.

FORD, D. C.; WILLIAMS, P. W. *Karst geomorphology and hydrology*. London: Unwin Hyman, 1989.

FORD, D. C.; WILLIAMS, P. W. *Karst geomorphology and hydrology*. 2. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2007. 562 p.

GALVÃO, P. H. F. *Modelo hidrogeológico conceitual de Sete Lagoas (MG) e implicações associadas ao desenvolvimento urbano em regiões cársticas*. 2015. Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015. 124 p.

GAO, Z.; ZHANG, H.; FENG, J.; LU, T.; YANG, L.; SUN, J.; SHI, M. Dynamic evolution of karst water levels and its controlling and influencing factors in Northern China: a case study in the Dawu water source area. *Carbonates and Evaporites*, v. 35, p. 1–12, 2020.

GOLDSCHIEDER, N.; DREW, D. (ed.). *Methods in karst hydrogeology*. Boca Raton: CRC Press, 2007. (International Contributions to Hydrogeology, v. 26).

GOOGLE. *Google Earth Pro*. Imagem das imediações da APA Carste Lagoa Santa – MG. 2022. Acesso em: 12 jan. 2022.

GRASS PROJECT. *Geographic Resources Analysis Support System*. 2013. Disponível em: <https://grass.osgeo.org>. Acesso em: 2013.

GUARESCHI, V. D. *Feições de carste sobre a Formação Serra Geral no município de São Martinho da Serra – RS*. 2012. Dissertação (Mestrado em Geografia e Geociências) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

GUERRA, A. M. *Processos de carstificação e hidrogeologia do Grupo Bambuí na região de Irecê – Bahia*. 1985. Tese (Doutorado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1985. 132 p.

HARTMANN, A.; GOLDSCHIEDER, N.; WAGENER, T.; LANGE, J.; WEILER, M. Karst water resources in a changing world: review of hydrological modeling approaches. *Reviews of Geophysics*, v. 52, p. 218–242, 2014.

HARDT, R. Caracterização morfológica das cavernas Aroê-Jari, Lago Azul e Kiogo-Brado – MT. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 30., 2009. *Anais* (CD-ROM). São Paulo: Sociedade Brasileira de Espeleologia, 2009.

HERRMANN, G.; KOHLER, H. C.; DUARTE, J. C.; CARVALHO, P. G. S. (org.). *APA Carste de Lagoa Santa – gestão ambiental*. Belo Horizonte: IBAMA/CPRM, 1998. 57 p.

IEF – INSTITUTO ESTADUAL DE FLORESTAS. *Plano de manejo do Parque Estadual do Sumidouro*. Belo Horizonte: SEMAD, 2010.

JAXA – JAPAN AEROSPACE EXPLORATION AGENCY. ALOS. 2021. Disponível em: https://www.jaxa.jp/projects/sat/alos/index_e.html. Acesso em: 25 out. 2021.

JÚNIOR, L. O. S.; CAETANO, L. C. *Aquíferos*. Belo Horizonte: Sociedade Brasileira de Geologia, 2010. Disponível em: <https://www.sgb.gov.br/publique/SGB-Divulga/Canal-Escola/Aquiferos-1377.html>. Acesso em: 5 dez. 2023.

JONES, W. K.; HOBBS, H. H. III; WICKS, C. M.; CURRIE, R. R.; HOSE, L. D.; KERBO, R. C.; GOODBAR, J. R.; TROUT, J. *Recommendations and guidelines for managing caves on protected lands*. Charles Town: Karst Waters Institute, 2003. (Special Publication, n. 8).

JÚNIOR, A. de C. et al. Ambientes cársticos. In: FLORENZANO, T. G. (org.). *Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais*. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

KARMANN, I.; TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M. C. M.; FAIRCHILD, T. R.; TAIOLI, F. Ciclo da água, água subterrânea e sua ação geológica. In: TEIXEIRA, W. et al. (org.). *Decifrando a Terra*. São Paulo: Oficina de Textos, 2000.

KARAMOUZ, M.; AHMADI, A.; AKHBARI, M. *Groundwater hydrology: engineering, planning, and management*. Boca Raton: CRC Press; Taylor & Francis Group, 2011. 649 p.

KLEERELOPER, H. *Introdução ao estudo da limnologia*. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura, Departamento Nacional da Produção Animal, Divisão de Caça e Pesca, 1994. 329 p.

KOHLER, H. C.; COUTARD, J. P.; DE QUEIROZ NETO, J. P. Excursão à região cárstica ao norte de Belo Horizonte. In: COLÓQUIO INTERDISCIPLINAR FRANCO-BRASILEIRO: ESTUDO E CARTOGRAFAÇÃO DE FORMAÇÕES SUPERFICIAIS E SUAS APLICAÇÕES EM REGIÕES TROPICAIS, São Paulo. *Guia de excursões*. São Paulo: USP, 1978. v. 2, p. 20–43.

KOHLER, H. C. *Geomorfologia cárstica na região de Lagoa Santa – MG*. 1989. Tese (Doutorado em Geografia) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989. 113 p.

KÖPPEN, W.; GEIGER, R. *Klimate der Erde*. Gotha: Verlag Justus Perthes, 1928.

KYRIELEIS, W.; SICHARDT, W. *Grundwasserabsenkung bei Fundierungsarbeiten*. Berlin; Heidelberg: Springer, 1930.

LEGRAND, H. E.; LAMOREAUX, P. E. Hydrogeology and hydrology of karst. In: BURGER, A.; DUBERTRET, L. (ed.). *Hydrogeology of karstic terrains*. Paris: International Association of Hydrogeologists, 1975.

LIKENS, G. E. (ed.). *Lake ecosystem ecology: a global perspective*. San Diego: Academic Press, 2010.

LOPES, L. R.; VITAL, A. R. T.; FRANKEN, W. K.; FERREIRA, S. J. F.; MARQUES FILHO, A. D. O.; FAJARDO, J. D. V.; OLIVEIRA, J. D. Interceptação e ciclagem de nutrientes em floresta de encosta na Amazônia Central. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORTE E CENTRO-OESTE, 1., 2007. *Anais*. 2007.

LUND, P. W. *Memórias sobre a paleontologia brasileira*. Tradução, revisão e comentários de Carlos de Paula Couto. Rio de Janeiro: Instituto Nacional do Livro, 1950. 589 p.

LUO, Y.; WANG, H.; MEERSMANS, J.; GREEN, S. M.; QUINE, T. A.; FENG, S. Modeling soil erosion between 1985 and 2014 in three watersheds on the carbonate-rock-dominated Guizhou Plateau, SW China, using WaTEM/SEDEM. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, v. 45, n. 1, p. 53–81, 2021.

MACEDO, L. B. *Secas e molhadas: estratégias ecológicas e dinâmica de comunidades vegetais em lagoas temporárias*. 2020. Dissertação (Mestrado em Biologia) – Instituto de Ciências Biológicas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020. 62 p.

MACEDO, C. A. R.; ALVAREZ, G. C. *O desaparecimento da Lagoa do Sumidouro: análise do comportamento hidrogeológico da lagoa ao longo dos últimos 40 anos*. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021.

MACIEL FILHO, C. L.; NUMMER, A. V.; SILVÉRIO DA SILVA, J. L.; SANGOI, D. S.; DESCOVI FILHO, L. L. V. Feições de carste sobre a Formação Serra Geral na região de Vacaria, RS, e Lages, SC. *Caminhos de Geografia*, v. 14, p. 97–208, 2013.

MAGALHÃES, M. N.; LIMA, A. C. P. *Noções de probabilidade e estatística*. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2002. v. 5.

MALAGUTTI FILHO, W.; COTTAS, L. R. Aplicação de métodos geofísicos na geologia de planejamento urbano: abordagem metodológica. *Geociências*, v. 12, n. 2, p. 417–438, 1993.

MARTINS, E. S. P. R.; MENESCAL, R. de A.; SCHEREN-WARREN, M.; CARVALHO, M. S. B. de S.; MELO, M. S.; PERINI, D. S.; OLIVEIRA, F. de A. J. Utilização de imagens CBERS para mapeamento dos espelhos d'água do Brasil. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, Florianópolis. *Anais*. Florianópolis: INPE, 2007.

MENDONÇA, F. A.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. *Climatologia: noções básicas e climas do Brasil*. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

MENESES, I. C. R. R. C. de. *Análise geossistêmica na Área de Proteção Ambiental (APA) Carste de Lagoa Santa, MG*. 2003. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003. 187 p.

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. *Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto*. Brasília: Universidade de Brasília, 2012. p. 121–160.

MILANOVIĆ, P. *Water resources engineering in karst*. Boca Raton: CRC Press, 2004.

MINAS GERAIS. Instituto Mineiro de Gestão das Águas. *Portaria n.º 48, de 4 de outubro de 2019*. Estabelece normas suplementares para a regularização dos recursos hídricos de domínio do Estado de Minas Gerais e dá outras providências. Disponível em: <https://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=49719>. Acesso em: 25 nov. 2024.

MONROE, W. H. (comp.). *A glossary of karst terminology*. Washington, D.C.: U.S. Geological Survey, 1970. (Geological Survey Water-Supply Paper, 1899-K). 26 p.

MONTEIRO, R. C.; RIBEIRO, L. F. B. Espeleogênese de cavernas areníticas: algumas considerações aplicadas à Província Espeleológica da Serra de Itaqueri, Estado de São Paulo, Brasil. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF SPELEOLOGY, 13., 2001. *Anais*. Brasília: Sociedade Brasileira de Espeleologia, 2001.

MORAIS, F. Contexto geológico das cavernas em arenito do Estado do Tocantins. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 30., 2009. *Anais* (CD-ROM). São Paulo: Sociedade Brasileira de Espeleologia, 2009.

MOURÃO, M. A. A.; CRUZ, W. B.; GONÇALVES, R. L. F. Caracterização hidrogeológica da porção mineira da bacia hidrográfica do São Francisco. In: *Bacia do São Francisco: geologia e recursos naturais*. Belo Horizonte: SBG, 2001. p. 327–349.

MYERS, N.; MITTERMEIER, R. A.; MITTERMEIER, C. G.; FONSECA, G. A. B.; KENT, J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, v. 403, p. 853–858, 2000.

NIMER, E. *Climatologia do Brasil*. Rio de Janeiro: IBGE, 1989. 421 p.

NÓBREGA, P. F. A. *Aves aquáticas da Área de Proteção Ambiental Carste de Lagoa Santa: ecologia e conservação*. 2015. Dissertação (Mestrado em Ecologia, Conservação e Manejo da Vida Silvestre) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

PACHECO NETO, W. M.; DE PAULA, R. S.; VELÁSQUEZ, L. N. M.; MEIRA, G.; PENA, M. A. C. Characterization and classification of lakes based on geospatial analyses in the karst hydrogeological system of the Bambuí Group, Lagoa Santa, Minas Gerais, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 132, p. 104662, 2023.

PACHECO NETO, W. M.; MEIRA, G. T.; PENA, M. A. C.; SILVA, P. H. P.; UHLEIN, G. J.; VELÁSQUEZ, L. N. M.; DE PAULA, R. S. Avaliação da conectividade hidráulica entre os aquíferos cársticos na região da APA Carste de Lagoa Santa e suas imediações, MG. *Revista Estudos Geológicos*, v. 33, n. 1, 2023.

PACHECO NETO, W. M.; DE PAULA, R. S.; GALVÃO, P. Karst hydrological connections of lakes and Neoproterozoic hydrogeological system between the years 1985–2020, Lagoa Santa, Minas Gerais, Brazil. *Water*, v. 16, n. 18, p. 2591, 2024.

PAPADOPOULOU-VRYNIOITI, K.; BATHRELLOS, G. D.; SKILODIMOU, H. D.; KAVIRIS, G.; MAKROPOULOS, K. Karst collapse susceptibility mapping considering peak ground acceleration in a rapidly growing urban area. *Engineering Geology*, v. 158, p. 77–88, 2013.

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

PENA, M. A. C.; DE PAULA, R. S.; VELÁSQUEZ, L. N. M.; PACHECO NETO, W. M. Estimating transmissivity and storativity in a karst aquifer by direct and indirect methods. *Hydrological Processes*, v. 38, n. 4, p. e15116, 2024.

PESSOA, P. F. P. *Caracterização hidrogeológica da região cárstica de Sete Lagoas, MG: potencialidades e riscos*. 1996. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

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

PILÓ, L. B. Geomorfologia cárstica. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 1, n. 1, p. 88–102, 2000.

PIZANI, F. M. C.; PEREIRA, M. P. R.; SILVA, M. M.; ELMIRO, M. A. T. Técnicas de sensoriamento remoto para análise temporal do espelho d'água da Lagoa Grande na cidade de Sete Lagoas – MG. *Revista GEOgrafias*, v. 17, n. 1, p. 81–102, 2021.

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

RIBEIRO, C. G.; MEIRELES, C. G.; LOPES, N. H. B.; ARCOS, R. E. C. *Levantamento geológico estrutural aplicado aos fluxos dos aquíferos cárstico-fissurais da região da APA Carste de Lagoa Santa, Minas Gerais*. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016. 157 p.

RIBEIRO, C. G.; VELÁSQUEZ, L. N. M.; DE PAULA, R. S.; MEIRELES, C. G.; LOPES, N. H. B.; ARCOS, R. E. C.; AMARAL, D. G. P. Análise dos fluxos nos aquíferos cárstico-fissurais da região da APA Carste de Lagoa Santa, MG. *Águas Subterrâneas*, 2019.

RIBEIRO, C.; VELÁSQUEZ, L. N. M.; FLEMING, P. Origin of spring waters employing a multiparametric approach with special focus on stable isotopes ^2H and ^{18}O in the Lagoa Santa Karst region, Southern Brazil. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, v. 56, n. 2, p. 158–169, 2020.

RODET, J. Karst de la Craie et aquifère de Normandie. *European Journal of Water Quality*, v. 38, fasc. 1, 2007.

ROSA, L.; ALVES, M. de C.; SANCHES, L. Uso de composições de bandas do satélite Landsat 5 TM para caracterizar a dinâmica da variação de áreas alagadas no Pantanal mato-grossense. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15., 2011, Curitiba. *Anais*. Curitiba: INPE, 2011.

SALLUN FILHO, W.; KARMANN, I. Dolinas em arenitos da Bacia do Paraná: evidências de carste subjacente em Jardim (MS) e Ponta Grossa (PR). *Revista Brasileira de Geociências*, v. 37, p. 551–564, 2007.

SCHOBENHAUS, C.; CAMPOS, D. A.; DERZA, G. R.; ASMUS, G. E. *Geologia do Brasil: texto explicativo do mapa geológico do Brasil e da área oceânica adjacente, incluindo depósitos minerais, escala 1:2.500.000*. Brasília: DNPM, 1984. 501 p. il.

SHUTTLEWORTH, W. J. Hydrological processes and the water balance. In: MAIDMENT, D. R. (ed.). *Handbook of hydrology*. New York: McGraw-Hill, 1993. cap. 4.

SILVA, A. B. *Hidrogeologia de meios cársticos*. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2002. 39 p. il.

SILVA, A. B. da. Hidrogeologia de meios cársticos. In: FEITOSA, F. A. C.; FILHO, J. M. (org.). *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*. 3. ed. Rio de Janeiro: CPRM; LABHID, 2008. p. 153–174.

SILVA, A. B. da; MOREIRA, C. V. R.; AULER, A. S. *Estudo da dinâmica dos recursos hídricos da região cárstica dos municípios de Lagoa Santa, Pedro Leopoldo e Matozinhos*. Belo Horizonte: CETEC – Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais, 1987. 32 p.

SILVA, B. B.; LOPES, G. M.; AZEVEDO, P. V. Balanço de radiação em áreas irrigadas utilizando imagens Landsat 5 TM. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 20, n. 2, 2005.

SILVA, J. C. S. *Caracterização hidrogeológica ambiental da área de influência da Mina Lapa Vermelha, na região cárstica de Lagoa Santa, MG*. 2003. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003. 303 p.

SILVA, T. G. A. *Análise da aplicação de métodos europeus de vulnerabilidade intrínseca ao carste tropical da região da APA Carste de Lagoa Santa*. 2022. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2022.

SPERLING, E. V. *Morfologia de lagos e represas*. Belo Horizonte: DESA/UFMG, 1999. 138 p.

STARCY, J. R.; HARDISON, C. *Double-mass curves*. Washington, D.C.: United States Geological Survey, 1996. (Geological Survey Water-Supply Paper, 1541-B).

SWEETING, M. M. *Karst landforms*. London: Macmillan, 1972. 250 p.

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

TAYER, T. D. C.; VELÁSQUEZ, L. N. M. Assessment of intrinsic vulnerability to the contamination of karst aquifer using the COP method in the Carste Lagoa Santa Environmental Protection Unit, Brazil. *Environmental Earth Sciences*, v. 76, p. 1–13, 2017.

TEIXEIRA, G. M.; DE PAULA, R. S.; VELÁSQUEZ, L. N. M.; ANDRADE, I. B.; PACHECO NETO, W. M. Evaluation of recharge estimation methods applied to fissure and karst aquifers of the Lagoa Santa Karst Environmental Protection Area, Brazil. *Hydrological Processes*, v. 37, n. 8, p. e14971, 2023.

TEODORO, M. I. P. *Hidrodinâmica das zonas cárstica e cárstica-fissural do sistema aquífero da Formação Sete Lagoas por meio de traçadores corantes e da análise das estruturas rúptis na região de Lagoa Santa, Minas Gerais*. 2020. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.

TEODORO, M. I. P.; VELÁSQUEZ, L. N. M.; FLEMING, P. M.; DE PAULA, R. S.; SOUZA, R. T.; DOI, B. M. Hidrodinâmica do Sistema Aquífero Cárstico Bambuí, com uso de traçadores corantes, na região de Lagoa Santa, Minas Gerais. *Águas Subterrâneas*, v. 33, n. 4, p. 392–406, 2019.

TEOFILO, G.; GIOIA, D.; SPALLUTO, L. Integrated geomorphological and geospatial analysis for mapping fluvial landforms in Murge basse karst of Apulia (Southern Italy). *Geosciences*, v. 9, n. 10, p. 418, 2019.

THEILEN-WILLIGE, B.; AIT MALEK, H.; CHARIF, A.; EL BCHARI, F.; CHAIBI, M. Remote sensing and GIS contribution to the investigation of karst landscapes in NW-Morocco. *Geosciences*, v. 4, n. 2, p. 50–72, 2014.

THIESSEN, A. H. Precipitation averages for large areas. *Monthly Weather Review*, v. 39, n. 7, p. 1082–1089, 1911.

TRAVASSOS, L. E. P. *Considerações sobre o carste da região de Cordisburgo, Minas Gerais, Brasil*. Belo Horizonte: Tradição Planalto, 2010. Publicação eletrônica. Originalmente apresentada como dissertação (Mestrado em Geografia) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, 2007.

TRAVASSOS, L. E. P. Contribuições científicas do professor Dr. Heinz Charles Kohler para a geomorfologia cárstica tropical brasileira. *Sociedade & Natureza*, v. 22, p. 625–637, 2010.

TROPMAIR, H.; TAVARES, A. C. Observações geomorfológicas e biogeográficas na região espeleológica de Altinópolis. *Boletim de Geografia Teorética*, v. 15, n. 29–30, p. 329–336, 1985.

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

TUNDISI, J. G. Conservação e uso sustentável de recursos hídricos. In: BARBOSA, F. A. (org.). *Ângulos da água: desafios da integração*. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2008. p. 57–83.

UHLEIN, A.; CAXITO, F. A.; SANGLARD, J. C. D.; UHLEIN, G. J.; SUCKAU, G. L. Estratigrafia e tectônica das faixas neoproterozoicas da porção norte do Cráton do São Francisco. *Geonomos*, v. 19, n. 2, p. 8–31, 2018.

USGS – UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. *Landsat data continuity mission*. Reston: U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, 2021. (Open-File Report 2012–3066). Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em: 2 nov. 2021.

VAN BEYNEN, P. E. *Karst management*. Dordrecht: Springer, 2011. 489 p.

VAREJÃO-SILVA, M. A. *Meteorologia e climatologia*. 2. ed. Recife: edição digital, 2006.

VELÁSQUEZ, L. N. M.; ANDRADE, I. B.; RIBEIRO, C. G.; AMARAL, D. G. P.; VIEIRA, L. C. M.; CARDOSO, F. A.; DE PAULA, R. S.; SILVA, P. H. P.; SOUZA, R. T.; ALMEIDA, S. B. S. *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. Belo Horizonte: FUNDEP/GERDAU/UFMG, 2018. (Processo n. 22.317). Plano de Ação Nacional para a Conservação do Patrimônio Espeleológico nas áreas cársticas da Bacia do São Francisco.

VIANA, H. S.; KOHLER, H. C.; TAVARES, V. P. (org.). *APA Carste de Lagoa Santa – meio físico*. v. 1. Belo Horizonte: IBAMA/CPRM, 1998. 301 p.

VIEIRA, L. C. M. *Hidrogeoquímica dos aquíferos da região da APA Carste de Lagoa Santa, MG*. 2018. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

VIEIRA, L. C. M.; DUSSIN, T. M.; VELÁSQUEZ, L. N. M. Geoquímica e condições paleoambientais de deposição das rochas carbonáticas da Formação Sete Lagoas na região da Área de Proteção Ambiental Carste de Lagoa Santa, MG. *Geochimica Brasiliensis*, v. 32, n. 1, 2018.

VIEIRA, L. C. M.; VELÁSQUEZ, L. N. M.; DUSSIN, T. M.; BORBA, R. P. Caracterização hidrogeoquímica dos aquíferos da região da APA Carste de Lagoa Santa, MG. *Geosciences = Geociências*, v. 39, n. 4, p. 1087–1105, 2020.

WALTHAM, A. C.; FOOKES, P. G. Engineering classification of karst ground conditions. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, v. 36, n. 2, p. 101–118, 2003.

WARMING, E. *Contribuição para a geografia fitobiológica*. Tradução de Alberto Loefgren. Belo Horizonte: Imprensa Oficial do Estado de Minas Gerais, 1908. Reedição: São Paulo: EDUSP, 1973, 1982. 386 p.

WATER SCIENCE SCHOOL. *The natural water cycle*. 2019. Disponível em: <https://www.usgs.gov/media/images/natural-water-cycle-jpg>. Acesso em: 18 nov. 2023.

WERNICK, E.; PASTORE, E. L.; PIRES NETO, A. Cavernas em arenito. *Notícia Geomorfológica*, v. 13, p. 55–67, 1973.

WHITE, W. B. Karst hydrology: recent developments and open questions. *Engineering Geology*, v. 65, p. 85–105, 2002.

WHITE, W. B. Conceptual models for karstic aquifers. *Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers*, v. 1, n. 1, p. 2, 2003.

WILLEMS, L.; RODET, J.; POUCHET, A.; MELO, S.; RODET, M.; COMPÈRE, P.; HATERT, F.; AULER, A. S. Karst in sandstones and quartzites of Minas Gerais, Brazil. *Cadernos do Laboratório Xeolóxico de Laxe*, v. 33, p. 127–138, 2008.

WILLIAMS, P. W. The role of the subcutaneous zone in karst hydrology. *Journal of Hydrology*, v. 61, p. 45–67, 1983.

WORTHINGTON, S. R. H. *Karst hydrogeology of the Canadian Rocky Mountains*. 1991. Tese (Doutorado em Geologia) – McMaster University, Hamilton, Ontario, 1991. 227 p.

WORTHINGTON, S. R. H.; FORD, D. C. Self-organized permeability in carbonate aquifers. *Ground Water*, v. 47, p. 326–336, 2009.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. *Geoestatística: conceitos e aplicações*. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. 215 p.

ZALÁN, P. V.; ROMEIRO-SILVA, P. C. Bacia do São Francisco. *Boletim de Geociências da Petrobras*, v. 15, p. 561–571, 2007.

APÊNDICE A Lagoas perenes e seus comportamentos de variação perimétrica em cada um dos ciclos pluviométricos definidos neste estudo, assim como o comportamento final após todos os anos analisados.

Lagoas	Linhas de Tendência					Análise das lagoas durante todo os períodos				
	Períodos	Seca (1985-1990)	Misto (1990-1995)	Misto (1996-2001)	Chuva (2002-2010)	Seca (2012-2018)	Somatório de todos Coeficientes Angulares	Perímetro Lagoas (m)	Lagoas que cresceram	Lagoas que diminuiram menos de 5%
1	$y = -4,8112x + 767,94$	$y = 7x + 758,33$	$y = 813,33$	$y = -4,7678x + 835,29$	$y = -3,2253x + 804,12$	$y = -5,79$	784		x	
2	$y = -11,224x + 773,95$	$y = -24,467x + 718,33$	$y = 7,1x + 580,94$	$y = 5,9556x + 593,59$	$y = 18,231x + 584,77$	$y = -4,39$	669		x	
3	$y = 0,979x + 318,64$	$y = -2x + 335,56$	$y = 0,5x + 330,83$	$y = -0,5676x + 335,95$	$y = -0,4396x + 332,31$	$y = -1,52$	328		x	
5	$y = -30,927x + 718,94$	$y = -2,1667x + 414,17$	$y = 9,3706x + 370,76$	$y = 3,7131x + 454,5$	$y = -1,4286x + 551,54$	$y = -21,42$	493			x
6	$y = -34,213x + 1008,5$	$y = 2,3333x + 660,78$	$y = 16,157x + 578,89$	$y = -1,9628x + 791,54$	$y = 27,615x + 592,08$	$y = 9,92$	767	x		
7	$y = -4,9266x + 897,77$	$y = -19,5x + 904,17$	$y = -0,2797x + 821,82$	$y = -4,8194x + 783,01$	$y = 30,148x + 519,96$	$y = 0,64$	777	x		
8	$y = 76,759x + 1165,2$	$y = -0,9667x + 2025,6$	$y = -94,259x + 2988,7$	$y = 0,3798x + 1957,1$	$y = -5,6044x + 1992,5$	$y = -23,69$	1999		x	
9	$y = -4,5559x + 367,03$	$y = -0,05x + 383,81$	$y = 9,8706x + 316,92$	$y = -1,2663x + 346,97$	$y = -2,2198x + 386,69$	$y = 1,8$	356	x		
10	$y = 116,72x + 1340$	$y = 21,483x + 1905,4$	$y = -16,416x + 1228,1$	$y = -9,6502x + 1043,5$	$y = 5,0165x + 1115,1$	$y = 117,15$	1348	x		
11	$y = -130,97x + 3593,5$	$y = -7,55x + 2486,2$	$y = 297,86x + 1193,1$	$y = -111,64x + 3787,7$	$y = -94,335x + 3046,2$	$y = -46,63$	2751		x	
12	$y = -31,86x + 1221,8$	$y = 34,8x + 809,11$	$y = 29,738x + 649,45$	$y = -10,837x + 1515,8$	$y = 16,78x + 1357,9$	$y = 38,62$	1233	x		
13	$y = -90,633x + 2299,4$	$y = -84,4x + 1739,9$	$y = -6,8531x + 1382,2$	$y = 22,118x + 1206,7$	$y = -25,286x + 1776,5$	$y = -184,78$	1501			x
14	$y = -14,35x + 828,61$	$y = -4,7833x + 736,69$	$y = -4,8916x + 676,55$	$y = -4,8328x + 590,19$	$y = 1,978x + 566,54$	$y = -26,88$	639			x
15	$y = -32,727x + 1042,7$	$y = -16,883x + 785,19$	$y = 7,2727x + 636,06$	$y = -2,87x + 968,1$	$y = -17,319x + 848$	$y = -62,51$	781			x
16	$y = -3,3811x + 1028,4$	$y = -24,333x + 1128,2$	$y = -6,979x + 1171,7$	$y = -8,4211x + 1026,7$	$y = 6,5934x + 872,31$	$y = -36,51$	993		x	
17	$y = 8,8112x + 1813,7$	$y = 7x + 1912,7$	$y = -5,2448x + 1990,1$	$y = -14,747x + 2094,4$	$y = 13,516x + 1854,1$	$y = 9,34$	1943	x		
18	$y = -88,259x + 1597,3$	$y = -46,683x + 1487,2$	$y = 11,689x + 1325,6$	$y = -31,451x + 1513,8$	$y = -16,088x + 716,46$	$y = -170,78$	1137			x
19	$y = -12,657x + 523,94$	$y = 11,133x + 452,44$	$y = -17,063x + 674,24$	$y = -2,3024x + 592,82$	$y = -17,538x + 590,31$	$y = -38,38$	512			x
20	$y = -42,587x + 921,82$	$y = -15x + 635$	$y = -37,385x + 916$	$y = -8,6357x + 670,48$	$y = -7,9341x + 535,46$	$y = -111,52$	582			x
21	$y = -10,038x + 962,17$	$y = -8x + 1053,3$	$y = -15,105x + 1058,2$	$y = -1,7337x + 916,47$	$y = -8,6813x + 851,54$	$y = -43,54$	900		x	
22	$y = 10,07x + 1825,5$	$y = -6x + 1964,3$	$y = -3,021x + 1922,6$	$y = -8,1342x + 1969,7$	$y = 10,582x + 1656,8$	$y = 3,6$	1867	x		
23	$y = -3,5664x + 658,18$	$y = -18x + 676,67$	$y = 2,7273x + 627,27$	$y = 8,7307x + 660,39$	$y = -24,044x + 807,46$	$y = -34,15$	657			x
24	$y = -128,33x + 3915,2$	$y = -50,5x + 3455,9$	$y = -31,36x + 2322,8$	$y = 11,547x + 2305,5$	$y = -39,495x + 2613,5$	$y = -238,14$	2543			x

25	$y = -5,8322x + 1695,2$	$y = 30,033x + 1696,9$	$y = -20,381x + 2288,4$	$y = -1,6925x + 2155,5$	$y = 4,7967x + 1981,3$	$y = 6,92$	2018	x
26	$y = -8,3916x + 1064,5$	$y = -41,167x + 1153,1$	$y = -5,4545x + 955,45$	$y = -2,1672x + 870,59$	$y = 6,2857x + 812,08$	$y = -50,88$	909	x
27	$y = 9,3776x + 761,71$	$y = -8x + 886,67$	$y = -3,7762x + 844,55$	$y = -1,4087x + 769,1$	$y = 11,821x + 676,5$	$y = 8,02$	790	x
28	$y = -120,27x + 3929,5$	$y = -75,967x + 3536,1$	$y = -41,538x + 4003,5$	$y = -5,4912x + 3892,3$	$y = -121,65x + 4474$	$y = -364,86$	3569	x
29	$y = -59,451x + 1666,2$	$y = -15,45x + 1142,9$	$y = -9,8182x + 1335,8$	$y = -12,114x + 1332,2$	$y = 9,0989x + 1086,7$	$y = -87,73$	1217	x
30	$y = 149,38x + 7126,9$	$y = -246,7x + 9129,2$	$y = -19,93x + 8566,5$	$y = -13,167x + 8453,5$	$y = 17,242x + 7661,1$	$y = -113,17$	8112	x
32	$y = 11,119x + 1763,7$	$y = -4,9667x + 1912,3$	$y = 11,346x + 1717,2$	$y = 6,3158x + 1874,3$	$y = -10,626x + 1800,8$	$y = -13,18$	1821	x
33	$y = 42,727x + 694,61$	$y = 42,233x + 918,06$	$y = -21,647x + 1247$	$y = -8,8163x + 1109,9$	$y = -9,1099x + 1021,3$	$y = 45,4$	1034	x
34	$y = 4,6434x + 1790,8$	$y = 1874,3$	$y = -21,818x + 2092,8$	$y = -1,1146x + 1984,9$	$y = -67,082x + 2066,7$	$y = -85,36$	1807	x
35	$y = 2,8147x + 2329,8$	$y = -175,05x + 3936,5$	$y = -138,74x + 4006,2$	$y = -39,089x + 2999,4$	$y = -218,05x + 3599,2$	$y = -568,11$	2529	x
36	$y = -47,916x + 3679,6$	$y = 102,75x + 2912,6$	$y = -37,182x + 3562,7$	$y = 43,744x + 2801,7$	$y = -4,4176x + 3381,3$	$y = 56,99$	3349	x
37	$y = 0,6294x + 787,58$	$y = 6x + 776,67$	$y = -7,1329x + 826,36$	$y = -1,4087x + 769,1$	$y = -14,835x + 786,92$	$y = -16,64$	777	x
38	$y = -4,542x + 853,77$	$y = 5x + 721,67$	$y = -23,497x + 902,73$	$y = -3,0341x + 745,49$	$y = 3,4176x + 669$	$y = -22,65$	757	x
39	$y = 0,4545x + 2353,9$	$y = -5x + 2499,3$	$y = -0,4196x + 2433,7$	$y = -16,221x + 2547,7$	$y = -41,538x + 2530,2$	$y = -62,71$	2370	x
40	$y = -28,986x + 1121,7$	$y = -22,333x + 789,44$	$y = -14,021x + 878,64$	$y = -17,666x + 923,71$	$y = -5,0549x + 763,85$	$y = -88,04$	795	x
41	$y = -8,3217x + 427,92$	$y = -0,7167x + 341,47$	$y = -2,5769x + 339,33$	$y = -5,7245x + 391,44$	$y = 8,2198x + 240,69$	$y = -9,11$	332	x
42	$y = -11,979x + 559,53$	$y = 40,133x + 308,44$	$y = -18,745x + 537,92$	$y = -3,4675x + 439,27$	$y = 2,6978x + 411,58$	$y = 8,65$	444	x

APÊNDICE B Artigo elaborado com base no Capítulo 4 desta tese publicado na revista *Journal of South American Earth Science* no ano de 2023.

Journal of South American Earth Sciences 132 (2023) 104662



ELSEVIER

Contents lists available at [ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com)

Journal of South American Earth Sciences

journal homepage: www.elsevier.com/locate/jsames



Characterization and classification of lakes based on geospatial analyses in the karst hydrogeological system of the Banbuí group, Lagoa Santa, Minas Gerais, Brazil

Wallace Maciel Pacheco Neto^{*}, Rodrigo Sérgio de Paula, Leila Nunes Menegasse Velásquez, Gabriela Meira, Matheus Alonso Castelo Pena

Federal University of Minas Gerais, Brazil

ARTICLE INFO

Keywords:
Water dynamics
Karst evolution
Geoprocessing

ABSTRACT

The karst of Lagoa Santa is a protected area located near the city of Belo Horizonte, in Minas Gerais state (Brazil), namely Lagoa Santa Karst Environmental Protection Area (EPA), one of the main research areas related to archeology, paleontology, speleology and hydrogeology in the Brazilian territory. The region is comprised by several lakes, because of its complex water system due to karst evolution. In addition, the karstic nature of the rocks in the region allows the existence of several other typical dissolution morphologies, such as: caves, speleothems, sinkholes, uvalas, among others. The morpho-structural characteristics, combined with the local geology, can provide important information about the behavior of lakes in view of the cycles of expansion and retraction of the water surface. Thus, this work aims to understand the water dynamics of the lakes present in the Karst of Lagoa Santa through analysis of spatial data between the years 1984 and 2020. Based on the surveys, 153 lakes were identified in the study region in the last 35 years: 40 perennial lakes, 89 intermittent lakes, 19 new lakes and 5 lakes that dried up completely. Also, this study compares the relationship of each lake with the type of relief depressions (Sinkhole or Uvala), rock masses and the main negative structural lineaments. The data obtained allowed the identification of which characteristics are diagnostic for perennality or intermittence of existing lakes in the region, as well as the grouping of existing lakes into subgroups with similar geological and morpho-structural characteristics. The most important characteristics to define the water dynamics on lakes are the evolutionary state in karst depressions and the presence of structural lineaments, in which in more evolved depressions (uvalas) the lakes tend to be intermittent and in less evolved depressions (sinkholes) the lakes tend to be perennial. Finally, the water bodies associated with structural lineaments may be the condition for the permanence of water in some depressions, mainly in lakes over non-carbonate formations existing in the region.

1. Introduction

The Lagoa Santa Karst is located in the central region of the state of Minas Gerais, where a series of lakes occur associated with the large fluvial system of the Velhas River, in the São Francisco River basin. This region comprises the Lagoa Santa Karst Environmental Protection Area (EPA), one of the main areas of research related to archeology, paleontology, speleology and hydrogeology in the Brazilian territory. Marked by cave tourism, the region is known worldwide for hosting several archaeological sites, among which the oldest human skeleton fragment in the Americas was found, an approximately 11,000-year-old skull nicknamed Luzia (FEATHERS *et al.*, 2010). In recent years, the

Minas Gerais state government has promoted economic growth strategies for the region, such as the expansion of the State Airport and new facilities at the headquarters of the state government (Administrative City), placing the region under new conflicts of environmental interest. In this way, the comprehension of geological and hydrogeological factors adds knowledge to this scientific and cultural rich region, which represents today one of the main vectors of demographic growth in the metropolitan region of the municipality of Belo Horizonte, the state capital.

The main characteristic of karst geomorphology is carbonate rocks capable of undergoing chemical dissolution, generating peculiar relief features such as: caves, speleothems, depressions, sinkholes, conduits,

^{*} Corresponding author.

E-mail address: wallacemaciel.geo@gmail.com (W.M. Pacheco Neto).

<https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104662>

Received 30 June 2023; Received in revised form 16 October 2023; Accepted 18 October 2023

Available online 19 October 2023

0895-9811/© 2023 Elsevier Ltd. All rights reserved.

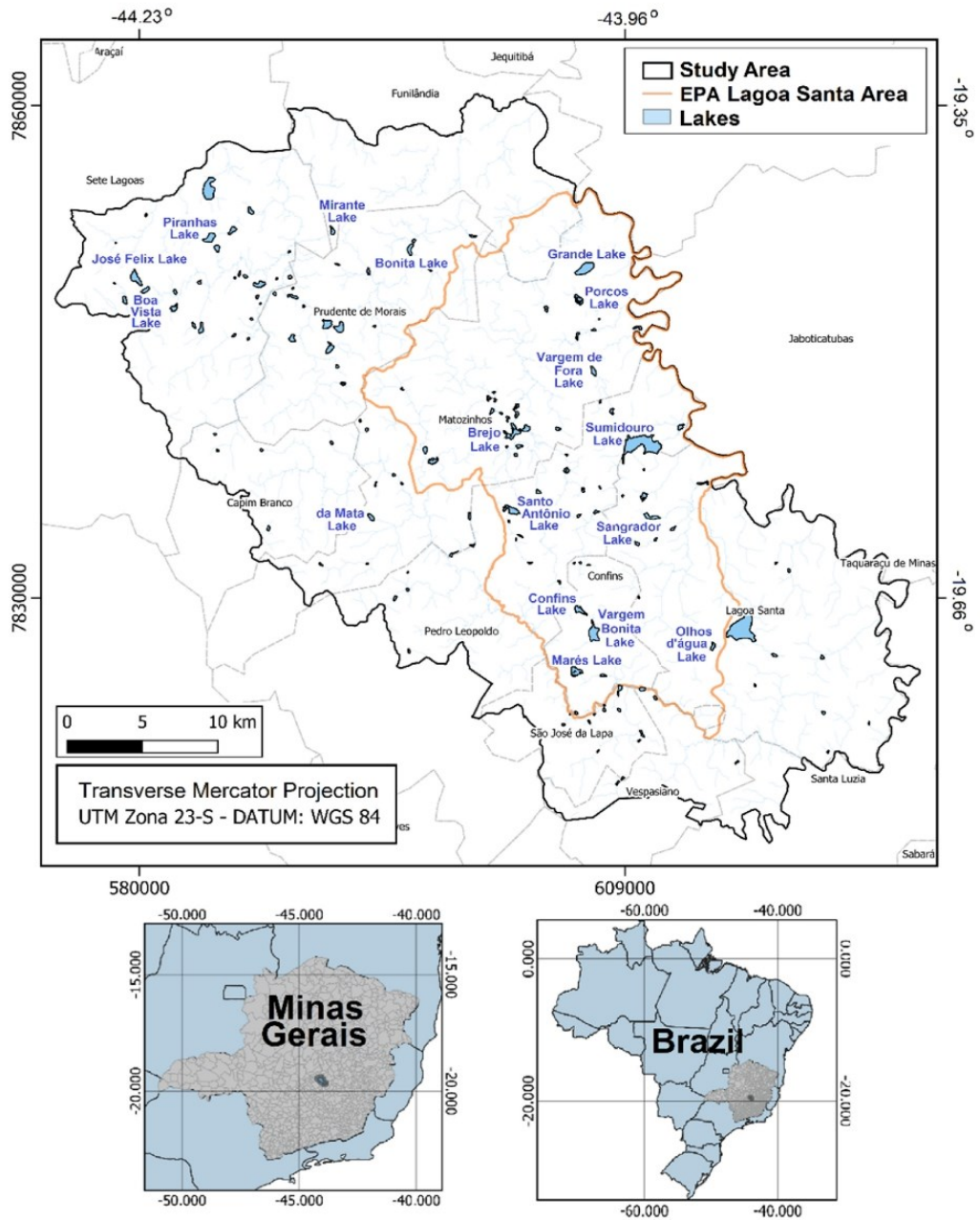


Fig. 1. Location of the study area highlighting the Lagoa Santa Karst Environmental Protection Area, Minas Gerais, Brazil and the lakes analyzed in this work.

among other dissolution forms (KOHLER, 1989; FORD & WILLIAMS, 2007). Karst depressions, commonly marked by sinkholes and uvalas, can be characterized according to their width, length and depth, and differentiated according to the proportions between these parameters (WHITE, 1988). These depressions assume particular importance in the recharge of karstic-fissured aquifers, since these geomorphological structures favor the concentration of surface runoff for a specific region. However, some karst depressions may not contribute so vehemently to

water recharge. Because of its lithostructural characteristics and/or smaller thicknesses of the vadose zone, these may have low permeability or even behave as discharge zones, and, in the latter, the groundwater would be ascending. Both display water mirrors playing an exceptional role in the ecological maintenance of the biome in which they are inserted. These flooded depressions constitute the lakes addressed in this study.

Damage to ecological tourism is likely to occur because of the erratic

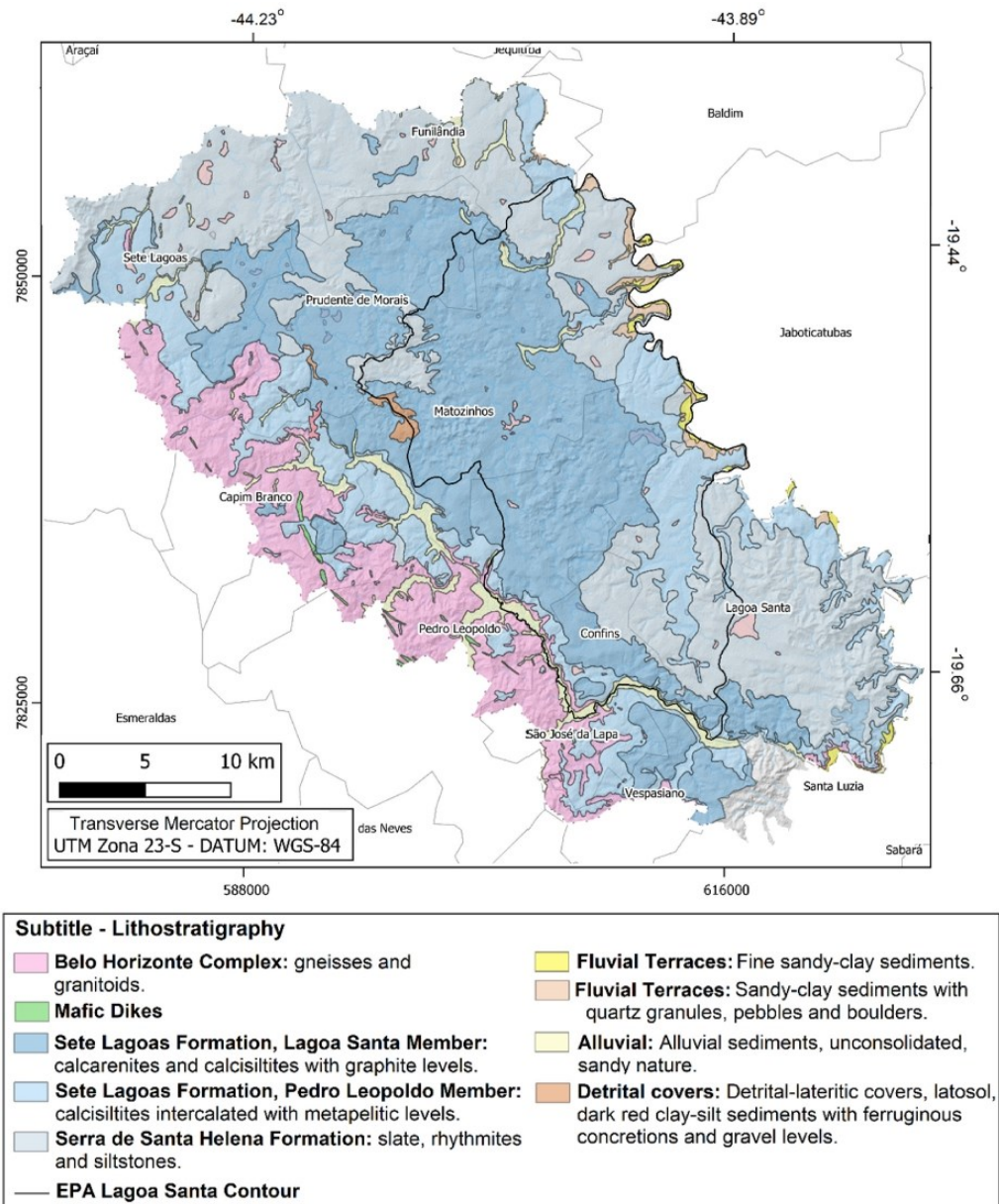


Fig. 2. Geological map of the study area over a digital elevation model (DEM). Extracted from "Projeto VIDA" (CABRAL, 1994; RIBEIRO et al., 2003).

behavior of these lakes. Over the last few decades, a volume decrease has been observed in some lakes during the wet season and in an extension of the dry season. These events represent a threat to the local ecosystem (MACEDO, 2020), since the region is located between two hotspots of biodiversity, the Cerrado and the Atlantic Forest (MYERS et al., 2000) and is an important refuge for feeding and resting for migratory birds (WARMING, 1908; NOBREGA, 2015).

The following authors have already pointed out the high frequency of karst depressions in the region, presenting lakes with irregular patterns of water level variation and highlighting complex cycles of water behavior. Warming (1908) observed that the Quinta Lake, located in Sumidouro state park, becomes quite large during the rainy season, but

at the end of the dry period the water flows through sinkholes and pipelines until it becomes just a stream. Kohler et al. (1978) states that the central lake of Lagoa Santa is in equilibrium state and been formed by the dissolution of the limestone beneath the phyllite sequence. Auler (1994) classified three types of lakes in the area: stable lakes over the phyllite; seasonal lakes containing sinkholes in the topographically higher portions; and groundwater lakes that are over the limestone at lower elevations. Macedo and Alvarez (2021) analyze the hydrological behavior of Sumidouro lake, a major representative of these water bodies in the region, using geoprocessing techniques, surface and underground hydrology and meteorological analysis over the last 40 years. The authors observe the cause-effect relationship between rainfall and

the lake volume and concluded that there is a high dependence of the rainfall, expressed by the “drying” since 2013 due to considerable increase in annual air temperatures averages.

Given the technological improvement of geosciences methodologies, understanding the evolution of the physical environment became more assertive, thus satisfying the different necessities imposed by man (Malagutti FILHO and Cottas, 1993). The application of spatial analysis in karst terrains has been proving to be an extremely accurate tool and is suitable for different types of studies in these terrains, which have as characteristic a constant transformation. In this context, Luo et al. (2021) investigates erosive changes in three basins on carbonate rocks located in southwest China, through temporal-spatial images between the years 1985 and 2014. Papadopoulou-Vrynioti et al. (2013) produced a collapse susceptibility map in a karst region in northern Greece combining multivariate statistics and the Geographic Information System. Remote sensing, aligned with monitoring the karst geomorphological evolution, is also widely used in basins coastal watersheds, as presented in studies in Italy (TEOFILO et al., 2019) and in Morocco (THEILEN-WILLIGE et al., 2014). Junior (2008) points out that remote sensing is a good tool to describe exokarst patterns and to understand the mechanisms that control the evolution of this system.

Thus, the main objective of this study is to understand the geomorphological evolution and water dynamics of the lakes present in the EPA Karst de Lagoa Santa and surrounding region, with emphasis on the use of geospatial analysis tools. To achieve this, three specific objectives are outlined: (i) identify all lakes present in the study region in the last 35 years; (ii) define the water behavior of these lakes, which are perennial and which are intermittent; and (iii) present the main geological and morphostructural characteristics of each lake identified in the region.

2. Study area

The study area is located 30 km north of Belo Horizonte, capital of Minas Gerais state in Brazil (Fig. 1). It has an area of 1197.5 km², encompassing 11 municipalities in the region and the entire extension of the Environmental Protection Area (EPA) Lagoa Santa Karst, named by Kohler et al. (1978) as “Lagoa Santa karst region”. The EPA Lagoa Santa Karst is one of most widely studied regions since the 19th century (PESSOA, 2005).

2.1. Local geology

The study area is located in the central-southern portion of the São Francisco Craton and is comprised by the crystalline basement of the Belo Horizonte Complex, which is superimposed by Neoproterozoic basal units of the Sete Lagoas and Serra de Santa Helena formations, from the Bambuí Group (São Francisco Supergroup). These formations may be covered by significant portions of sedimentary covers of younger age (ALKMIM & MARTINS NETO, 2001) (Fig. 2). The São Francisco Craton served as a base for the deposition of marine pelite-carbonate sediments on the stable epicontinental platform, which is a continental environment affected by marine regressions and transgressions, with a minimum relative age of 630 Ma (Neoproterozoic) (DARDENNE, 1978; SCHOBENHAUS et al., 1984; ZALÁN & ROMEIRO SILVA, 2007).

The Belo Horizonte complex outcrops in the western and southern portions of the area and is essentially composed of granite-gneiss and migmatites, dated between the Archean and Paleoproterozoic (RIBEIRO et al., 2003; RIBEIRO et al., 2016). The Bambuí Group, in the study area, is composed by lithostratigraphic units that were deposited on the Craton basement up to the marginal mobile belts.

The Sete Lagoas Formation is formed by a carbonate succession of limestones, dolomites and intercalated metapelites. This formation is subdivided into two members: Pedro Leopoldo, at the base; and Lagoa Santa, at the top (VIANA et al., 1998; RIBEIRO et al., 2003; UHLEIN et al., 2018). The lithotypes that characterize the Pedro Leopoldo Member are calcisiltites and/or microsparites, sparites, micrites, and

subordinately very fine calcarenites, marls and protoderived mylonites occur (RIBEIRO et al., 2003). The Lagoa Santa Member, which has the greatest expression in the study area, is composed by a dark gray to black limestone when “fresh”, and medium to light gray when more altered, with fine to coarse granulometry (RIBEIRO et al., 2016). These formations are scattered in the central portion of the study area.

The Serra de Santa Helena Formation typically occurs in the homonymous range in Sete Lagoas in the north of the study area and in the southeast portion. Lithotypes from siliciclastic origins predominate, and more rarely carbonate sediments occur. The siliciclastic rocks are predominantly very fine and correspond to siltstones and claystones, largely decomposed to semi-altered, but are found fresh in quarries (RIBEIRO et al., 2003). The other units of the Bambuí Group will not be described as they do not outcrop in the study region.

Tertiary Covers occur as limonitized alteration layers and/or representing colluviums of laterized ferruginous soils. There are also alluvial terraces and alluviums in the portions that border the main rivers and streams.

2.2. Geomorphology

The region geomorphology reflects the structures and weathering of the carbonate rocks of the Sete Lagoas Formation and the metapelites of the Serra de Santa Helena Formation. This lithological relationship is clearly expressed on the surface morphology and become important tools to understand the landscape. Altitudes vary from 900 m in the western portion of the area to 600 and 650 m in the eastern portion, where it meets the course of the Velhas River. In this work, two geomorphological compartments called: karst domain and non-karst domain are considered according to Kohler (1989) and Herrmann et al. (1998).

The karst domain, made up of carbonate rocks, is marked by high rocky walls, canyons, abysses and sinkholes that connect the exokarst to the endokarst, present in almost the entire extension of the area but mainly in the central regions. Herrmann et al. (1998) states that this compartment predominates between the altitudes of 800 to 650 m, presenting abrupt hypsometric changes marked by karstic features on the surface and in depth. Superficial and subsurface forms are often linked to each other. In this unit, canyons and abysses with high walls and large rocky massifs with a high concentration of caves, closed valleys, blind valleys, towers, arches and ruined bridges are observed. Other typical features of this domain are: belts of uvalas, plateau of sinkholes, wide depressions with a flattened bottom (poljes), depressions formed by dissolution and/or collapse with: amoeboid, concave (bowl), conical (funnel), cylindrical (cauldron) shapes; large or small dimensions; steep and/or gentle slopes; with or without walls, or connected massifs; and lakes that are perennial or intermittent (KOH-LER, 1989; HERRMANN et al., 1998; RIBEIRO et al., 2003).

The non-karst domain, controlled by crystalline, metamorphic and sedimentary rocks, is present in the edge portions of the area (north, west and southeast) and is where the rocks of the Archean Granitic-Gneissic complex and the rocks of the Serra de Santa Helena Formation occur. This domain tends to be located in the highest topographical levels, reaching altitudes above 800 m, predominantly characterized by hills with elongated and convex tops carved by a dendritic drainage pattern. Rare karst features are observed in this domain, such as sinkholes, walls, and slopes with roughness, which evidence the superficial manifestation of karstification in depth of calcium carbonates (HERRMANN et al., 1998).

The geomorphological behavior dictates the characteristics of the as a result of the high permeability caused by the secondary porosity of the local rocks. Few watercourses are observed, and in some places they develop there are sinks, surges and resurgences, mainly conditioned to the great relief irregularities (AMARAL et al., 2019).

2.3. Climate

The study region is associated with general average conditions of atmospheric circulation under the domain of the stationary system called the South Atlantic Subtropical Anticyclone. This system presents a high degree of absolute humidity and high interior temperature due to the intense incident solar radiation. However, it presents conditions of atmospheric stability due to the effects of subsidence or downward vertical currents. According to the classification of Köppen and Geiger (1928), the area is classified in the Awi category as: a hot climate, with a temperature in the coldest month above 18 °C; annual temperature range below 5 °C; and two alternating seasons, one rainy (summer), and another dry season (winter) (IEF – State Institute of Forests, 2010).

The annual thermometric average is around 20.9 °C with a mild winter, sometimes with lower temperatures associated with cold fronts invasion from the polar anticyclone, and a hot and prolonged summer. The wind regime according to Kohler (1989), has a total of 16.02% directed to the north, and 52.74% directed to the northeast. The water deficit occurs from April to September, with a maximum of 42 mm in August. The surplus occurs between November and March, with a maximum of 183 mm in January. The rainy season is well defined and extends between October and March, passing through periods of transition between dry and rainy in September and April.

According to historical data from INMET (National Institute of Meteorology) recorded by the conventional stations owned by the institute in Sete Lagoas, Ponte Raul Soares, Pedro Leopoldo and Vespasiano, show that the annual rainfall average is 1212.7 mm, considering the period chosen in this work from 1985 to 2020. However, the year 2014 stands out with the annual record of 551 mm, a precipitation value well below the historical average. Meneses (2003) points out that climate variation generates direct consequences for the karst region, affecting its water characteristics, such as the flow and chemical composition of water. In addition, it affects the degree and pattern of morphogenetic processes, including rock dissolution.

2.4. Hydrology and hydrogeology

The area is located in the depression of the Upper-Medium São Francisco River and is part of the sub-basin of the Velhas River (IBGE, 2006). The surface and underground drainage network of the Lagoa Santa Karst EPA is characterized by a wide variety of conduits and caverns, often interconnected with karst features, such as sinkholes, uvalas, sinkholes and springs (TEODORO, 2020). These particularities make it a complex and interconnected system, thus increasing the necessity for successive and detailed studies to consolidate its understanding. The drainage network is predominantly underground, with low surface runoff density.

In general, the sources of the existing rivers are present in carbonate soils. Also, due to a well-developed karst geomorphology, the surface waters along with most of the rainwater are drained into underground conduits and are destined for the levels locally based (Velhas River and Da Mata Stream) (RIBEIRO et al., 2016; DE PAULA, 2019). The main water courses in the area are exactly those that coincide with the boundaries of the EPA, i.e., the Velhas River on the eastern boundary of the area and the Da Mata stream, its affluent, on the south and southwest boundary (DE PAULA, 2019) (Fig. 2). The most representative hydrographic sub-basins of the karstified zones are defined by the Samambaia streams, which drain their waters to the Sumidouro lake in the Palmeiras stream, located north of the city of Matozinhos. The water is then drained by the limestone massif of Cement Mauá Mining (VIEIRA, 2018). The sub-basins of the Jaguará and Gordura streams are responsible for directly and indirectly feeding the Velhas River (MENESES, 2003).

Warming (1908), Lund (1950) and Kohler et al. (1978) describe the high frequency of lakes in the study region, which may present irregular patterns of water level variation. These highlight the complex water

cycles and behaviors, such as the 15-year dry cycles (KÖHLER et al., 1978).

Auler (1994), explains the occurrence of three types of lakes in the region of the EPA Lagoa Santa Karst:

- i) Ponds on phyllites;
- ii) Doline-type lakes;
- iii) Ponds like water level of the outcropping aquifer.

Doline-type lakes occur primarily in high topographies at the bottom of deep karst depressions, and upwelling water level occur in low-lying topographic elevation areas. These are restricted to limestone rocks. In general, ponds on phyllites are stable, whereas those on limestone rocks have fluctuating water levels and may dry out on certain periods. The water level of the latter is related to the amount of rainfall and the permeability of the pedological cover at the bottom of the lakes (AULER, 1994).

Semi-confined to free karst aquifers predominate in the EPA Karst region of Lagoa Santa and are characterized by an intricate network of underground conduits that are interconnected to numerous surface karst features, e.g., sinkholes, uvalas, caves and sinks (VIANA et al., 1998). Four distinct hydrogeological units are defined, namely, from base to top: (i) the fissure aquifer represented by the rocks of the Belo Horizonte Complex; (ii) the karstic-fissured aquifer composed by the carbonate rocks of the Sete Lagoas Formation; (iii) the aquitard constituted by the metapelites of the Serra de Santa Helena Formation; and (iv) the granular aquifers represented by tertiary detritus-lateritic and alluvial Cenozoic covers (DE PAULA, 2019).

The fissure aquifer is the least expressive in the study area and is under the domain of the Belo Horizonte migmatitic gneissic complex. It is an aquifer confined by the metasediments of the Bambuí group in a large part of the area, and can be outcropping in a small portion, thus acquiring the character of a free aquifer (DE PAULA, 2019). This aquifer recharge is due to the watercourses fitted in fracture systems of the crystalline basement and to the infiltration of water through the colluvial covers (PESSOA, 1996). This is the smallest aquifer in the study area.

The karstic-fissured aquifer, of greater importance and representativeness in the region, is part of the Sete Lagoas Aquifer System (SLAS) and is predominantly composed by carbonate with pelitic intercalations and tectonic influence (PESSOA, 2005; GALVÃO, 2015). This aquifer is bordered at the base by the Belo Horizonte Complex and at the top by the metapelites of the Serra de Santa Helena Formation. Where the rocks of the Sete Lagoas Formation outcrop, the aquifer acquires a character of free aquifer, and where it is superposed by the Serra de Santa Helena aquitard, it may change to a semi-confined aquifer (DE PAULA, 2019). The recharge of this aquifer occurs mainly in the outcropping limestone portions, including several karstic collapsing structures in the region (sinkholes and uvalas). The recharge is also linked to the coverage of the flat regions and karst plateaus previously pointed out by Auler (1994).

The limestones of the Lagoa Santa member constitute the most karstified portion of the karstic-fissured aquifer system. The dissolution process is favored given its higher concentration of calcite, increasing the concentration of salts in the water, mainly calcium carbonate, and consequently increasing its hardness and alkalinity (MOURÃO et al., 2001). The facilitation of the dissolution process is also an agent for the formation of karst features in the subsurface, which provides a series of peculiar characteristics regarding the transmissivity of the aquifer. The Pedro Leopoldo member, represented by metasiltites, phyllites, calcio-phyllites and dark-gray siliceous limestones, constitutes the other portion of the karstic-fissured aquifer. It has greater water potential in tectonized portions due to secondary permeability.

The metapelites of the Serra de Santa Helena Formation have a lower aquifer potential, which is higher in fractures and contact zones with the Sete Lagoas Formation. The aquitard of Serra de Santa Helena has low permeability, but relatively high storage capacity. It has poorly

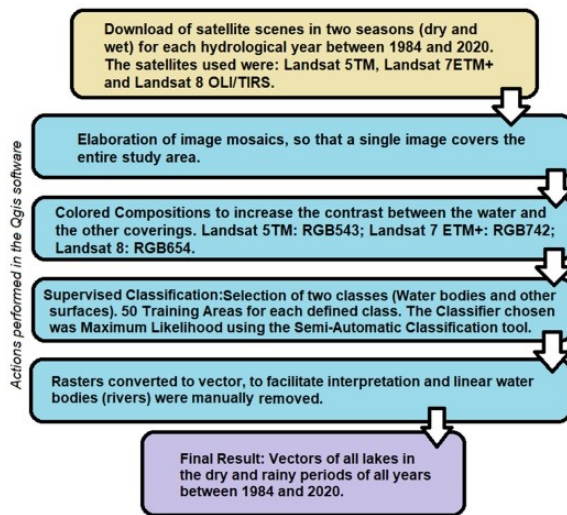


Fig. 3. Flowchart of geoprocessing activities to identify existing lakes in the study area during the dry and rainy periods between 1984 and 2020. Chosen for the research.

developed fissure porosity, which should provide low hydraulic conductivity values (RIBEIRO et al., 2003). The Granular Coverage Aquifer includes alluvium, cangas and laterites, located mostly in the unsaturated zone, where part of the recharge of the underlying aquifers is processed.

3. Methods

Initially, the water mirrors of the lakes in the study area were detected through geoprocessing. These features were measured by remote sensing, along with the parameterization and measurement of morphological and structural variables. Then, the analysis of the water behavior was carried out by monitoring the water mirrors of the different hydrological years, between 1984–1985 and 2019–2020. The set of water, morphological and structural data were processed by descriptive statistics and similarity tools. For each hydrological year, two images were chosen: one in the dry season, where the best image between the months of June and September was selected; and another in the rainy season, where the best image is from December and March.

All Maps, Rasters and vector files were geoprocessed in the Universal Transverse Mercator coordinate system, with Datum WGS-1984, Zone 23S. All geoprocessing activities were performed using GRASS 7.8.3 tools of the QGIS® software (GRASS PROJECT, 2013).

3.1. Identification and detection of lakes

Scenes of land coverage from Landsat satellites provided by the website of the North American Geological Survey (USGS – United States Geological Survey, 2021) were selected. These scenes comprised the dry and rainy seasons of each hydrological year between 1984 and 2020, with low cloud interference (less than 30%). Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM+ and Landsat 8 OLI/TIRS satellite images were selected. In the QGIS software, the initial processing was based on the creation of Landsat image mosaics, joining scenes from the same date and same orbit, in order to obtain unique scenes covering the entire study area.

For each annual mosaic generated, the composition of spectral bands was performed in order to increase the contrasts between water and the other coverings present in the images. The adopted color compositions were the false color: Red-Green-Blue (RGB) with spectral bands 5, 4 and

3 in Landsat 5 TM, bands 7, 4 and 2 in Landsat 7 ETM+ and 6, 5 and 4 for Landsat 8 OLI/TIRS. The band stacking sequences were different between LANDSAT 5 TM, Landsat 7 ETM+ and Landsat 8 OLI/TIRS due to the different intervals between the wavelengths (spectral bands) of the sensors (SILVA et al., 2005; MARTINS et al., 2007; ROSA et al., 2011).

With the colored compositions performed, two classes were defined for supervised classification, called ROIs (Region of Interest): bodies of water and other surfaces. For each class, approximately 50 training areas were selected with specific characteristics. This training is essential to obtain a good representation of each defined surface. The classification was based on color, texture, tonality and shadows, as these characteristics are fundamental to help in the separability of the training areas of the pre-defined classes (MENESES and ALMEIDA, 2012).

This was followed by classification using the Maximum Likelihood classifier following the Semi-Automatic Classification tool, which calculates the probability that a given pixel has to belong to a specific class and labels the class that has the highest probability (Meneses and Almeida, 2012; ANDRADE et al., 2014). Water bodies with linear patterns were removed manually as they were more likely to be rivers and not lakes. The result obtained was the generation of Raster images of the coverage of the dry and rainy seasons for all years between 1984 and 2020. Rasters were transformed into vector files to facilitate the interpretation of these data. A flowchart simplifying the geoprocessing activities can be seen in Fig. 3.

3.2. Lake periodicity

With the water mirrors defined for the dry and rainy seasons between the hydrological years of 1984 and 2020, it was possible to observe the behavior of all lakes in terms of frequency that they appear full or dry. At this stage, it was defined which lakes had perennial, intermittent or drying behavior, as well as the emergence of new ponds. Perennial ponds are those that never dried up in the interval used in this study. The intermittent ones are those that existed in the period of the 1980s and show the periodic behavior of presenting water or not in different years. The lakes that disappeared, dried up in a certain period and were never full again, are classified as drying behavior. Finally, the new lakes defined in this study did not exist in the first 10 years surveyed (1984–1994) and at some point, after this interval, appeared. These may be perennial or intermittent.

3.3. Identification and detection of morphological and structural parameters

The ALOS (Advanced Land Observation Satellite) PALSAR (Phase Array L-band Synthetic Aperture Radar) radar image was acquired with resolution of 12.5 m from the Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA – Japan Aerospace Exploration Agency, 2021). From this image, a digital elevation model (DEM) was generated to support the measurement of each pond position with its altimetry values. This image also provided a basis for defining contour lines and identifying existing relief depressions in the region, which were measured through a systematic analysis based on visual remote sensing through RGB images from Google Earth® software (GOOGLE, 2022).

The Google Earth® software provided the basis for defining karst depressions in vector files, which allow the classification of the evolution stage of these karst depressions. These were defined as sinkholes when presented in closed circular or elliptical formats (CVLJIĆ, 1893), and as uvalas when these depressions widened, generating large connections containing the union of one or more sinkholes (CALIĆ, 2011). In this software, it was also possible to define, visually, the presence or absence of rock masses near the different types of lakes. Depressions and non-karst massifs were removed by systematic manual analysis, as these regions are not relevant for the karst analysis emphasized in this study, as well as depressions generated by anthropic dams.

Each ALOS PALSAR image was presented in shaded relief under four

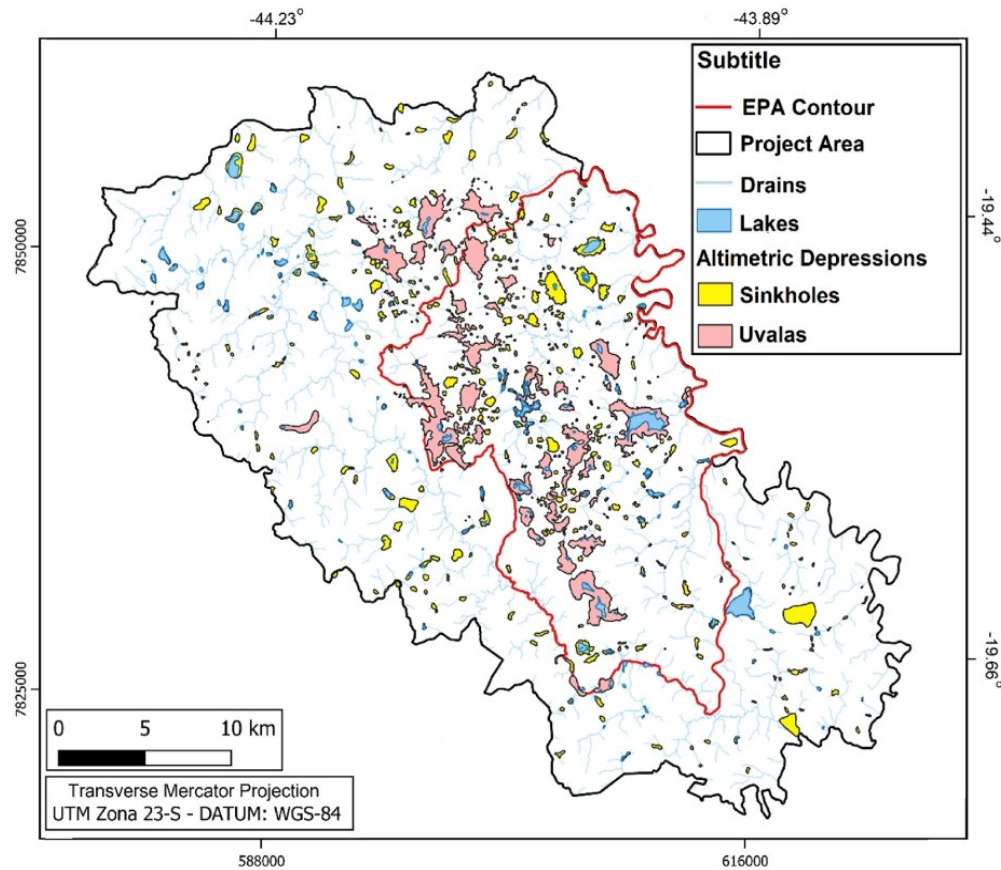


Fig. 4. Altimetric depressions highlighting existing lakes in the study area. The represented lakes correspond to all 153 water bodies identified throughout the image research period – 1984 to 2020.

different azimuths (0° , 45° , 90° e 135°), i.e., different illuminations, which were then used for the automatic extraction of structural lineaments through the Line algorithm of the PCI Geomatics tool. These lineaments, as well as altimetry, geology, altimetric depressions and rock masses were related to the lakes surveyed in this research. Finally, the perimeter of these ponds was calculated as the length of the outermost margin of the water mirrors, varying according to their size and shape. The perimeter values were obtained from the Calculate Geometry/Perimeter tool from the collected vector files using the attribute table of the QGIS software.

3.4. Similarity analysis between lakes

To understand the distribution and behavior of the geological, altimetric, morphological and structural variables in the lakes, descriptive statistics were performed (minimum, maximum, median, mean, standard deviation and standard error) for the identification of similarities between the 153 ponds defined in this spatial analysis. These analyzes provided the basis for a statistical pattern evaluation to correlate similar subgroups, performed here manually.

4. Results

4.1. Identification of lakes and periodicity analysis

Whitin the time interval defined in this study, 153 depressions

presented water mirrors at some point. From the behavior analysis of the water mirrors during this period, four main classes of lakes were identified: perennial lakes, which have water depth in the rainy and dry seasons of all hydrological years; intermittent lakes, which present a strong variation of the water mirror through the dry and rainy seasons, becoming completely dry in the dry season or even remaining dry for several hydrological years and appearing again; new lakes, which did not exist in 1984 and appeared within the time interval analyzed; and lakes that dried up, in which the water mirrors dried up and did not appear until the year 2020. The 153 lakes were segregated based on the behavior of their water mirror into: 40 Perennial Lakes, 89 Intermittent Lakes, 19 New Lakes and 5 Lakes that no longer exist in the region.

4.2. Identification of morphological and structural parameters

Depressions' morphology (Fig. 4), rock masses (Fig. 5) and main negative structural lineaments (Fig. 6) were identified and visually correlated to all the identified lakes.

The altimetric depressions identified were morphologically like sinkholes and uvalas (Fig. 4). The sinkholes correspond to smaller depressions and have a more rounded and completely closed shape. The uvalas represent the largest altimetric depressions identified, and generally have more elongated and irregular shapes given the coalescence of two or more sinkholes. It should be noted that the poljes-type karst features were included within the uvalas group, as the classification adopted for the depressions was based solely on their shape. The

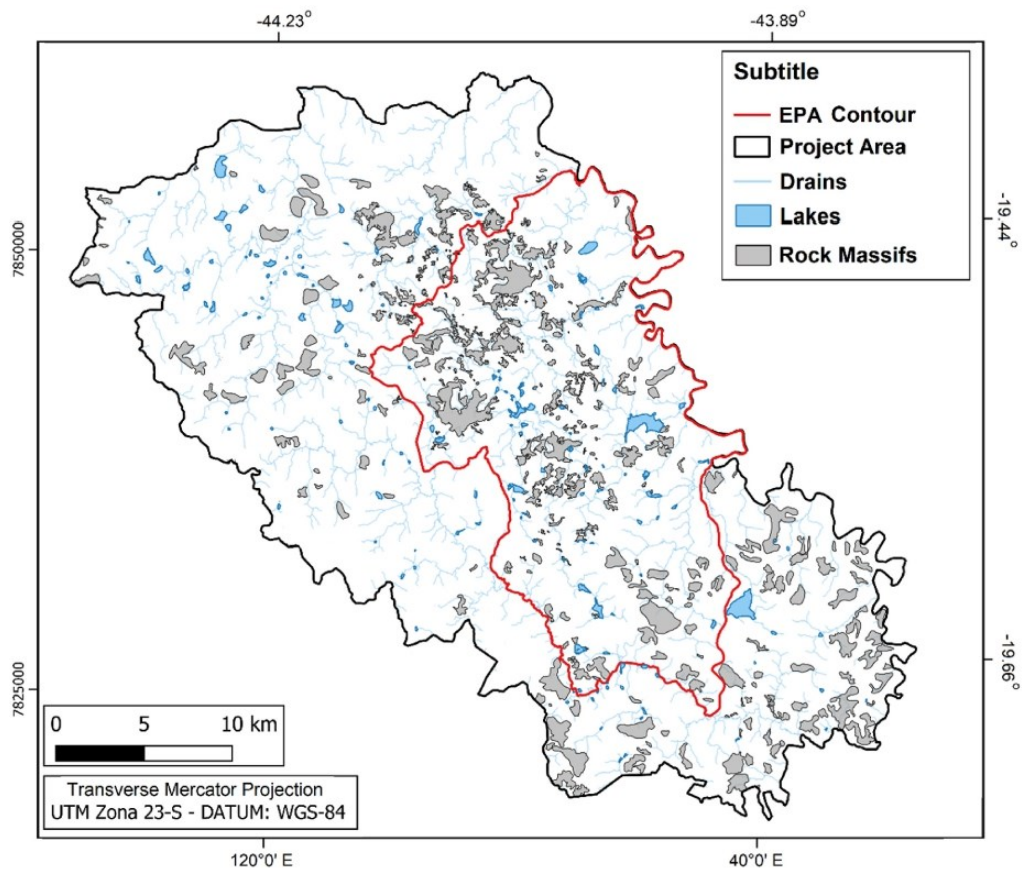


Fig. 5. Carbonate rock masses and lakes present in the study area.

morphological patterns of the raised depressions can show information about their influence on the dynamics of the lakes' behavior.

The carbonate rock masses identified by remote sensing (Fig. 5) occur as outcrops and exhumations (without the presence of vegetation) and covered by vegetation of different sizes. The proximity of these massifs to the lakes must be considered, since there is a high potential of these rocky bodies to influence the water dynamics of the lagoons. This effect is mainly due to the carbonate composition of these massifs that can act as a facilitator for the gradual recharge of the aquifer, due to fractures widened by mineral dissolution. Thus, carbonate masses constitute one of the factors that influence the perenniality of lakes.

The main negative structural photolineaments were identified (Fig. 6) and classified into four main direction classes: NW-SE, N-S, NE-SW and W-E. These structures may represent the direction of discontinuities that potentially favor the development of dissolutive features and water percolation, which may influence the water dynamics of the lakes.

According to Ribeiro et al. (2016) and Amaral et al. (2019), the photolineaments in the NW-SE direction are related to the azimuths of fractures in the crystalline basement and constitute the first phase of geotectonic deformation. In the first phase normal faults from the horst and grabens were generated on the basin floor, generating topographic differences that are the evidence of the strong control of the basement structures in the development of surface karst features. The same authors relate the NE-SW and W-E structural directions with the fractures measured in the metalimestones and metapelites of the Sete Lagoas and Lagoa Santa formations, these mainly correlated with the directions of the dissolution ducts. Pessoa (2005) states that the N-S directions would

be associated with several processes related to the carbonates, such as intracrustal shear planes, bedding planes, joints and tectonic foliations. These directions were the least frequent in this study.

From the results obtained, it was possible to determine all the geological and morphostructural characteristics that each type of lakes present. The results are summarized in Table 1.

5. Discussions

5.1. Correlation between characteristics analyzed and water dynamics in lakes

Of the 153 lakes identified, 75 (49%) occur on the Lagoa Santa Member (Sete Lagoas Formation), making up the highest number per geological unit; and 23 (15%) are on the Pedro Leopoldo Member (Table 1). The lakes occurring in the Lagoa Santa Member are in majority intermittent (57 lakes, 76%) and represent 64% of all intermittent lakes in the area. The Lagoa Santa Member is the geological unit that hosts the main karst aquifer in the region, given that its limestone is purer and has more evolved dissolution features. This leads to a greater difficulty in storing surface water, corroborating the cyclical character of these lakes. Of the 23 lakes associated with Pedro Leopoldo Member, 10 (43.5%) are intermittent and 11 (47.8%) are perennial. The greater occurrence of perennial lakes in this member is proportional to the total number of lakes in each member and can be attributed to the impure character of the limestone, which makes it less permeable and with greater retention capacity.

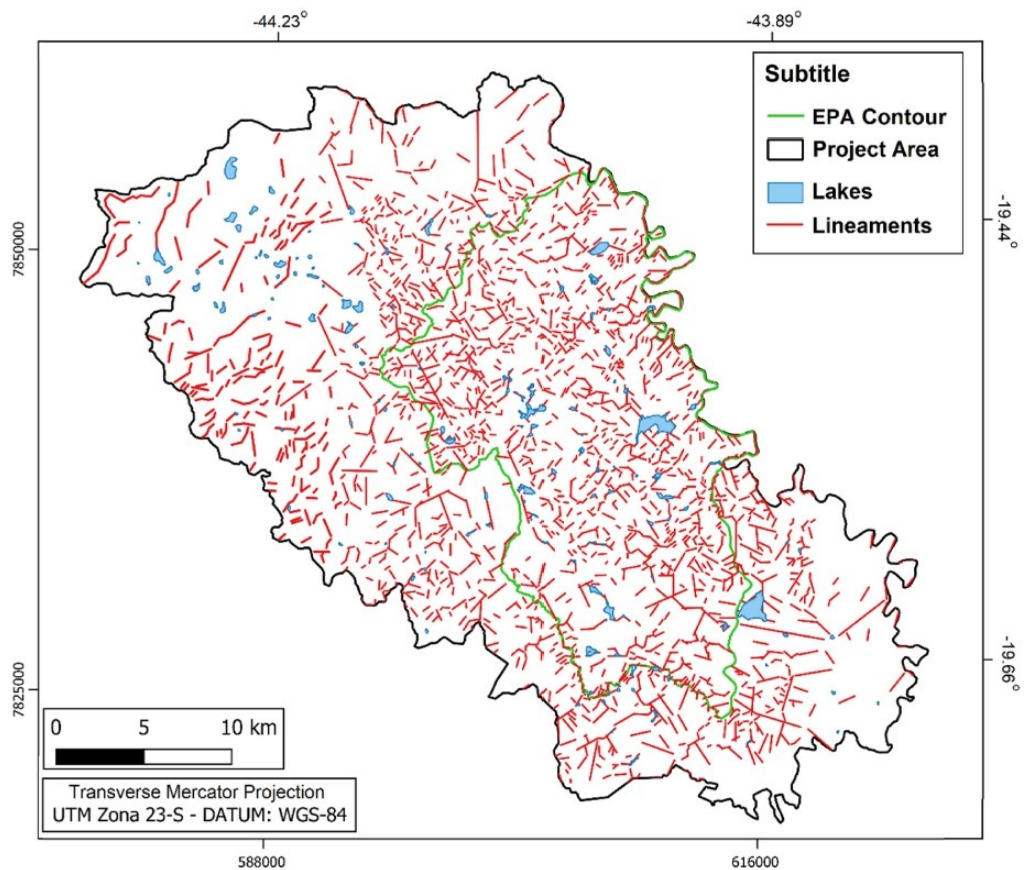


Fig. 6. Structural photolineaments and existing lakes in the study area.

There are 23 lakes linked to the Serra de Santa Helena Formation, in which the highest proportion are intermittent lakes (11 lakes, 47.8%), followed by perennial lakes (8 lakes, 34.7%). The intermittent lakes on the Serra de Santa Helena Formation may be a result of the collapse of carbonate packages that have become sedimentary lakes (pelitic bottom) in relief depressions, which may have greater influences from variations in the regional basement level.

New lakes are present in greater numbers along the granitic rocks of the Belo Horizonte Complex (6 lakes) and next to the alluvium (6 lakes) of the sedimentary covers, comprising a total of 63.1% of all the new lakes in this study. In the sedimentary covers, the existence of more recent lakes may be associated with the mountain range where they outcrop, since these covers are located close to rivers. Given that rainfall events have a great capacity to change the level of rivers, consequently storing water in less permeable strips, the new lakes are originated in the flood basins of rivers in this region.

The number of lakes close to carbonate rock masses totalize 21 (13.7%), in which 14 are intermittent lakes, 6 are perennial lakes and 01 is a lake that permanently dried up (Table 1). The carbonate rock massifs may be influencing the perenniality of the lakes due to the presence of fractures widened by mineral dissolution, facilitating the gradual recharge and discharge of the aquifer. The rock masses in the study area are more associated with intermittent lakes (14 lakes). In these cases, they may be influencing the non-permanence of water in these water bodies.

There are 118 lakes inside the karst depressions (77.1%), including sinkholes (81) and uvalas (37). Of the 40 perennial lakes, 28 (70%) are

found inside sinkholes, whereas of the 89 intermittent lakes, 38 (43%) have affinity with uvalas. This association points to a possible influence of the type of karst depression on the perenniality or intermittency of the lakes, since sinkholes are less evolved karstic forms and may have a greater capacity to retain water in their interiors. The permanence of water in less evolved depressions is also highlighted in the karstic density study carried out by Aguilar et al. (2016) in Mexico.

The lakes occur in all height ranges defined in this study, distributed as follows: 7 lakes (4.6%) between 600m and 650m, 52 lakes (33.9%) between 650m and 700m, 63 lakes (41.1%) between 700m and 750m, 24 lakes (15.7%) between 750m and 800m, 3 lakes (1.9%) between 800m and 850m and 4 lakes (2.7%) between 850m and 900m. The presence of intermittent lakes is more common (80.9%) at lower elevations, in the intervals between 650m-700m and 700m-750m, whereas perennial lakes occur (72.5%) in higher topographic tops (in the intervals between 700m-750m and 750m-800m).

Among all 153 lakes studied, 37 (25%) have at least one NE-SW structural photolineament inside or on their borders (Table 1), the most frequent among those associated with lakes, also considered the most frequent in the Lagoa Santa region (Ribeiro et al., 2003; Ribeiro et al., 2016). The second most important direction associated with lakes is NW-SE, occurring in 25 lakes (16%) of all lakes studied. The perennial lakes show greater affinity with the NE-SW direction lineaments, with 11 lakes with this direction (44%) among all the perennial lakes associated with the photolineaments. On the other hand, intermittent lakes are more strongly associated with NW-SE photolineaments, with 22 lakes in this direction (38%) among all intermittent lakes associated

Table 1
Types of existing lakes in the region and their geological and morphostructural characteristics.

Total lakes: 153					
Geological Units	Perennial Lakes (40)	Intermittent Lakes (89)	New Lakes (19)	Lakes that have permanently dried up (5)	N° Lakes analyzed
Belo Horizonte Complex	5	2	6	0	13
Fm Sete Lagoas, Member Lagoa Santa	14	57	2	2	75
Fm Sete Lagoas, Member Pedro Leopoldo	11	10	2	0	23
Fm Serra de Santa Helena	8	11	2	2	23
Alluvial	2	7	6	1	16
River Terraces	0	2	1	0	03
Total lakes inside Karstic Depressions: 118					
Sinkholes	28	38	11	4	81
Uvalas	5	31	1	0	37
Total lakes with nearby carbonate massifs: 21					
Rock Masses	6	14	0	1	21
Total Lakes: 153					
600–650m	2	5	0	0	7
650–700m	7	36	7	2	52
700–750m	18	36	7	2	63
750–800m	11	11	1	1	24
800–850m	1	1	1	0	3
850–900m	1	0	3	0	4
Total lakes associated with photolineaments: 92					
NW-SE	5	15	3	2	25
N-S	5	7	0	0	12
NE-SW	11	22	4	0	37
W-E	2	13	3	0	18
Total Lakes: 153					
<500 m	4	15	2	2	23
500 < x < 1000 m	17	38	13	2	70
1000 < x < 1500 m	4	16	2	1	23
>1500 m	15	20	2	0	37

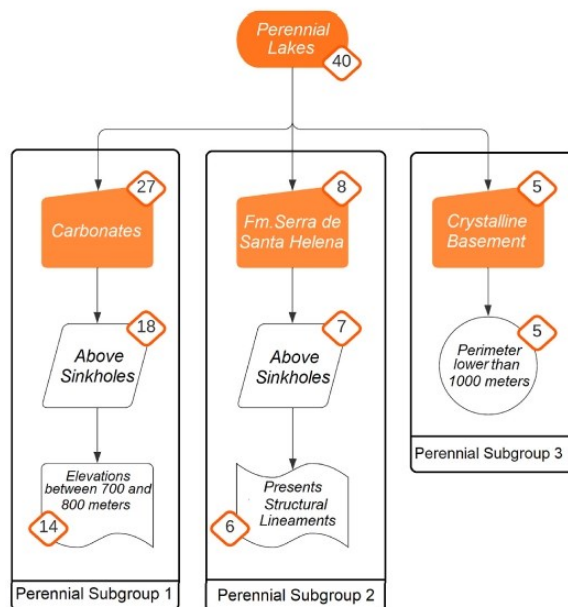


Fig. 7. Subclasses of perennial lakes, grouping by similarity the most common morphostructural and geological characteristics among the studied perennial lakes.

with photolineaments. These lineaments are also observed by Amaral et al. (2019) highlighting the strong structural control in the development of karst features.

Structural lineaments are important components of mature aquifers, being the fundamental factor for the connection and movement of water

in these environments. This relationship can also be observed in evolutionary studies of different types of karsts, i.e., Theilen-Willige et al. (2014). The fact that perennial lakes are more closely associated with lineaments in the preferential direction of the region (NE-SW) is an evidence that perennial lakes are connected to more evolved aquifers with greater water stability.

The size of the lakes was expressed by the perimeter of the largest water surface observed within the studied period, determined in four intervals: less than 500m (23 lakes), between 500m and 1000m (70 lakes), between 1000m and 1500m (23 lakes) and greater than 1500m (37 lagoons). The perennial lakes (40) are main between 500m and 1000m (17 lagoons) and larger than 1500m (15 lagoons). Intermittent lakes (89) occur more frequently between 500 and 1000m (38 lagoons), with great dispersion in other sizes. New lakes are more frequent with sizes between 500 and 1000m (13 lagoons).

In this study, several natural physical characteristics that lakes could present were considered. However, unnatural characteristics can be analyzed for future studies regarding the water dynamics of these lakes. The anthropic factor can often influence the presence or not of water in ponds in different types of aquifers. This is shown by Gao et al. (2020), in which the exploitation of water closes to carbonate water basins severely influenced the karst dynamics in the region, lowering the level of several water bodies.

5.2. Similarity analysis

Among the geological, morphological and structural factors, the study aimed to define those that actually influence the behavior of perennial, intermittent and new lakes. Thus, the lakes were grouped according to these factors into 8 subgroups, namely (Figs. 7–9): 3 subgroups of perennial lakes, 4 subgroups of intermittent lakes, and 1 subgroup of new lakes. All lakes that did not show similarity patterns associated with such subgroups were allocated in a separate subgroup. Ponds that dried up permanently were not included in this division due to their small occurrence (5 lakes).

The three subgroups of the perennial lakes (40 lakes) are comprised

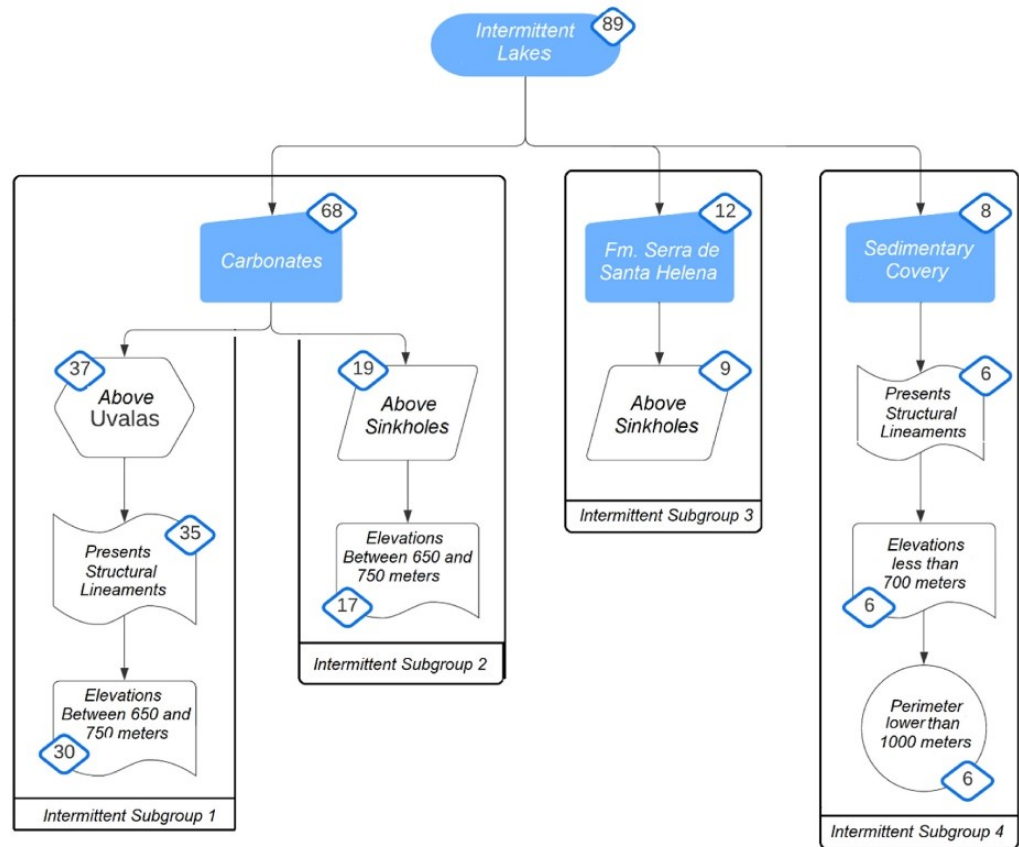


Fig. 8. Subclasses of intermittent lakes, grouping by similarity the most common morphostructural and geological characteristics among the studied intermittent lakes.

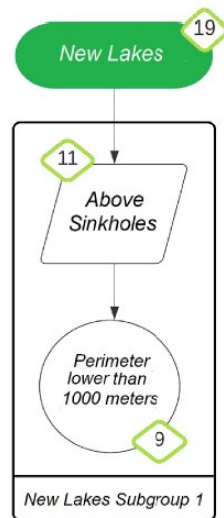


Fig. 9. Subclasses of new lakes, grouping by similarity the most common morphostructural and geological characteristics among the studied new lakes.

by 25 lakes (62.5%, Fig. 7) divided into 14 lakes (35%) that are concomitantly on carbonate lithology, on sinkholes and at altitudes between 700 and 800m (Perennial Subgroup 1); 6 lakes (15%) that are concomitantly on the Serra de Santa Helena Formation, on sinkholes, and associated with photolineaments (Perennial Subgroup 2); and 5 lakes (12.5%) that are on the basement and have perimeters smaller than 1 km (Perennial Subgroup 3). A total of 15 perennial lakes (37.5%) could not be included in any subgroup, as they have the distinct characteristics mentioned above.

It is important to highlight the importance of the lineaments for the existence of permanent water bodies on the pelitic rocks of the Serra de Santa Helena Formation in Perennial Subgroup 2, since this is defined as an aquitard in the study area (De Paula, 2019). According to the same author, the basement in the region is defined as a fissured aquifer and is one of the conditions for the existence of perennial lakes on these lithologies (Perennial Subgroup 3).

The four subgroups identified in the intermittent lakes (89) involved 62 lakes (69.6%), distributed as follows (Fig. 8): 30 intermittent lakes (33.7%), which are concomitantly on carbonate lithology, on uvalas, associated to photolineaments and at altitudes between 650 and 750m (Intermittent Subgroup 1); 17 lakes (19.1%) occur on carbonate rocks, on sinkholes and at altitudes between 650 and 750m (Intermittent Subgroup 2); 9 lakes (10.1%) on the Serra de Santa Helena Formation and on sinkholes (Intermittent Subgroup 3); and 6 lakes (6.7%) associated with photolineaments, sedimentary covers, low altitudes (<700m) and perimeters smaller than 1 km (Intermittent Subgroup 4). A total of

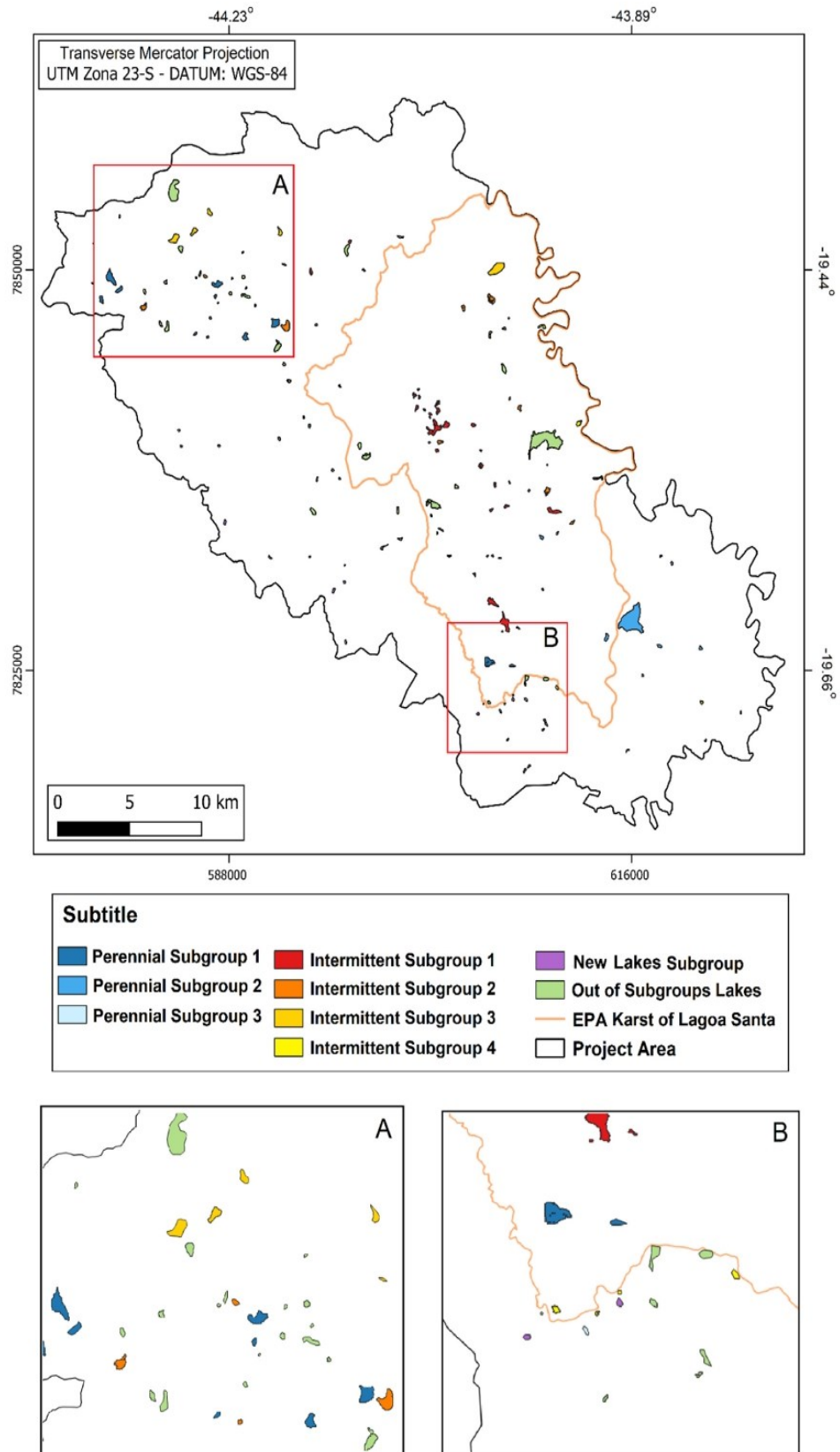


Fig. 10. Subgroups of lakes in the study region and in the EPA Karst Lagoa Santa, highlighting two points in the region for a better view of the lakes in each subgroup.

27 lakes (30.4%) could not be included in any subgroup, due to the different characteristics mentioned above.

Intermittent subgroups 1 and 2 may represent an evolutionary relationship of existing lakes in the region, in which intermittent subgroup 1 is at a more advanced stage of karst evolution, as it is located on uvalas and is associated with photolineaments, and intermittent subgroup 2 is over sinkholes and not associated with any type of lineament, indicating that it is in an initial stage of these lakes. Lakes over more evolved depressions, such as uvalas, have a strong tendency to intermittence due to the higher levels of karstification around these water bodies (intermittent Subgroup 1).

The Intermittent Subgroup 3 (Fig. 8) is similar to the Perennial Subgroup 2 (Fig. 7). However, the latter is not associated with photolineaments, suggesting that one of the factors of these lakes is intermittent and not perennial. The association with photolineaments proved to be a fundamental factor for the perenniality of the lakes on the Serra de Santa Helena Formation, since these lakes on dolines and associated with photolineaments are perennial (Perennial Subgroup 2) and those on sinkholes without association with photolineaments are intermittent (Intermittent subgroup 3). As the Serra de Santa Helena Formation is siliciclastic (siltstones and claystones) and would probably not be able to store rainwater, the lineaments may provide preferred paths for water supply in this aquitard and confinement in these lakes, enabling the perennial behavior.

It was possible to observe that the altitude indirectly influences perenniality, since lakes that are on sinkholes on carbonate lithologies (Pedro Leopoldo and Lagoa Santa members) tend to be perennial when at higher levels, between 700m and 800m - Perennial Subgroup 1 (Fig. 7), and intermittent when occurring at lower elevations, between 650m and 750m - Intermittent Subgroup 2 (Fig. 8).

The New Lakes Subgroup (19) is comprised by 9 lakes (47.3%) that are on sinkholes and with perimeters between 500 and 1000m (Fig. 9). The small perimeters may indicate an initial evolution stage, which may evolve into large perennial or intermittent lakes in the future depending on the movement and confinement of the waters. Another 10 lakes (52.7%) could not be included in this subgroup defined for this class.

On the map shown in Fig. 10, all existing lakes in the study region are divided into their subclasses, totaling 96 lakes (64.8% of all existing lakes). In blue are represented the 52 lakes (35.2%) outside the subgroups defined in this work.

6. Conclusion

The exploratory analysis carried out using Landsat multispectral images proved to be assertive in identifying and detecting morphological and structural patterns of the lakes in the area. The use of remote sensing techniques, applied to images of different hydrological periods (dry season and rainy season) in recent years, made it possible to measure the periodicity of the water mirrors and to apply a supervised classification (Maximum Verisimilitude Classifier), which made the detection of water mirrors in Landsat scenes less subjective and more accurate. In this way, the water mirrors detected allowed the analysis of the water behavior of the depressions.

To validate the proposed identification method, 28% of the lakes were verified in the field (44 out of 153), obtaining a 98% adherence. The result shows that this is efficient method for identification through satellite images. Only one lake observed in the field was not previously detected in the geoprocessing stages, giving an identification failure close to 2%. Thus, there may be a greater number of lakes in the region.

The similarity analyzes were carried out manually and allowed grouping the lakes into subgroups based on geological and morphostructural characteristics, and indicated the factors that most condition the existence of these lakes. These observations were important for analyzing the general and specific distribution of data and measured variables. The existing karst and the surface and underground evolution of water patterns must be understood as a complex phenomenon.

The separation of lakes into subgroups was positive, resulting a total of 64.8% of ponds in 8 subgroups defined in this study. From the observed data, it is possible to point out a trend that conditions a lake to be perennial or intermittent.

The existence of depressions in karst reliefs is a relevant factor for the lake presence in its interior and the depression evolution dictates the water behavior since lakes positioned on uvalas at low altitudes (650m–750m) tend to be intermittent as they have greater potential for underground water flow. On the other hand, lakes inside poorly evolved depressions, such as sinkholes, tend to be perennial. In this context, there are lakes in the Pedro Leopoldo and Lagoa Santa members at higher topographical elevations (700m–800m) that are perennial, and lakes on the Serra de Santa Helena Formation associated with photolineaments that are also perennial. Another important factor is the association of lakes with photolineaments, which could condition the presence of water in lakes over sinkholes and be one of the conditions for the permanence of water in some depressions, as seen in the lakes present on the surface of Serra de Santa Helena Formation.

Finally, it should be noted the importance of this region and its natural conservation, guaranteeing the existence of quality water resources for the population that depends on its use. The surveys initiated in this study must be more detailed in future studies to characterize more deeply the lakes present in the region. Hydrochemical and isotopic analysis of lakes can be an alternative to raise more intrinsic characteristics that these water bodies have in common.

CRedit authorship contribution statement

Wallace Maciel Pacheco Neto: Writing – original draft, Resources, Methodology, Investigation, Data curation, Conceptualization. **Rodrigo Sérgio de Paula:** Writing – review & editing, Supervision, Methodology, Investigation, Data curation, Conceptualization. **Leila Nunes Mene-gasse Velásquez:** Writing – review & editing, Supervision, Methodology, Data curation, Conceptualization. **Gabriela Meira:** Resources, Methodology, Investigation, Conceptualization. **Matheus Alonso Castelo Pena:** Resources, Methodology, Investigation, Conceptualization.

Declaration of competing interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Data availability

Data will be made available on request.

Acknowledgments

This work is part of the project named “Project for adequation and implementation of groundwater monitoring network in areas with karst cavities in the São Francisco River Basin, applied to the pilot area of the EPA Karst in Lagoa Santa, Minas Gerais” (in Portuguese, *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*). It would not have been possible without the partnerships formed between the Graduate Program in Geology (PPGEOL) of the Federal University of Minas Gerais (UFMG) and the Center for the Development of Nuclear Technology (CDTN) and funded by CECAV (National Center for Research and Conservation of Caves). The Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel (CAPES) should also be thanked for providing the scholarship to one of the authors of this research.

References

- Aguilar, Y., Bautista, F., Mendoza, M.E., Frausto, O., Ihl, T., 2016. Density of karst depressions in Yucatán state, México. *J. Cave Karst Stud.* 78 (2) <https://doi.org/10.4311/2015ES0124>.
- Alkmim, F.F., Martins-Neto, M.A., 2001. The São Francisco intracratonic basin: structural framework and evolutionary scenarios. In: Pinto, C.P., Martins-Neto, M.A. (Eds.), *The São Francisco Basin Geology and Natural Resources*. SBG: Belo Horizonte, pp. 9–30 (in Portuguese).
- Amaral, D.G.P., Menegasse, L.N.V., Rodrigues, P.C.H., 2019. Water behavior of karst depressions in the region of Lagoa Santa, MG. *Underground Waters* 33 (2), 196–209. <https://doi.org/10.14295/ras.v33i2.29274> (in Portuguese).
- Andrade, A.C., Francisco, C.N., Almeida, C.M., 2014. Performance of Parametric and Non-parametric Classifiers in the Classification of Plant Physiognomy, vol. 66. *RBC. Brazilian Magazine of Cartography (Online)*. <https://doi.org/10.14393/rbcv66n2-43917> (in Portuguese).
- 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, p. 110 (Thesis, Master of Science).
- Cabral, J.A.L., 1994. VIDA Project - Industrial Feasibility and Environmental Defense. Sete Lagoas Region - Lagoa Santa: Basic Information for Territorial Management. (Territorial Planning Series v.3). Planning Geotechnical Cartography. Belo Horizonte: CPRM/CETEC (in Portuguese).
- Čalić, J., 2011. Karstic uvala revisited: toward a redefinition of the term. *Geomorphology* 134, 32–42.
- Cvijić, J., 1893. The karst phenomenon. Attempt at a morphological monograph. In: Penck, A. (Ed.), *Geographical Treatises*, Bd. V. Heft, vol. 3. Wien, pp. 1–114 (in German).
- Dardenne, M.A., 1978. Synthesis on the stratigraphy of the Bambuí group in Central Brazil. In: *Congresso Brasileiro de Geologia*, 30, Recife, Anais, vol. 2, pp. 597–610 (in Portuguese).
- De Paula, R.S., 2019. Conceptual Flow Model of Pelitic-Carbonate Aquifers in the Region of the EPA Karst Lagoa Santa, MG. Doctoral Thesis. Federal University of Minas Gerais. Institute of Geosciences, p. 281 (in Portuguese).
- Feathers, J., Kipnis, R., Pilóp, L., Arroyo-Kalin, M., Coblenz, D., 2010. How old is Luzia? Luminescence dating and stratigraphic integrity at lapa vermelha, Lagoa Santa, Brazil. *Geochronology* 25 (4), 395–436. <https://doi.org/10.1002/gen.20316>.
- Ford, D.C., Williams, P.W., 2007. *Karst Geomorphology and Hydrology*, ed. vol. 2. John Wiley & Sons, Chichester, UK, p. 562. <https://doi.org/10.1002/9781118684986>.
- Galvão, P.H.F., 2015. Conceptual Hydrogeological Model of Sete Lagoas (MG) and Implications Associated with Urban Development in Karst Regions. 2015. Doctoral Thesis. University of Sao Paulo. Universidade de São Paulo (in Portuguese).
- Gao, Z., Zhang, H., Feng, J., Lu, T., Yang, L., Sun, J., Shi, M., 2020. Dynamic evolution of karst water levels and its controlling and influencing factors in Northern China: a case study in the Dawu water source area. *Carbonates Evaporites* 35, 1–12. <https://doi.org/10.1007/s13146-020-00585-6>.
- GOOGLE, 2022. Google Earth Pro Program. Image of the Surroundings of the EPA Carste Lagoa Santa - MG. (Accessed 12 January 2022).
- GRASS PROJECT, 2013. Geographic resource analysis support system. <http://grass.osgeo.org>.
- Herrmann, G., Kohler, H.C., Duarte, J.C., Carvalho, P.G.S., Org., 1998. EPA Lagoa Santa Karst - Environmental Management. IBAMA/CPRM, Belo Horizonte, p. 57 (in Portuguese).
- IEF - State Institute of Forests, 2010. Sumidouro State Park Management Plan. State Secretariat for Environment and Development - SEMAD, Belo Horizonte (in Portuguese).
- JAXA - Japan Aerospace Exploration Agency, 2021. ALOS. Available from: www.jaxa.jp/projects/sat/alos/index_e.html. (Accessed 25 October 2021).
- Junior, A.C., 2008. Karstic environments. In: FLORENZANO, T.G. (Ed.), *Geomorphology: Current Concepts and Technologies*. Text Workshop, São Paulo (in Portuguese).
- Kohler, H.C., 1989. Karst Geomorphology in the Region of Lagoa Santa. Doctoral Thesis. University of São Paulo (in Portuguese).
- Köppen, W., Geiger, R., 1928. *Climates of the Earth*. Verlag Justus Perthes, Gotha (in German).
- Kohler, H.C., Coutard, J.P., de Queiroz Neto, J.P., 1978. Excursion to the karstic region north of Belo Horizonte. In: *Franco-Brazilian Interdisciplinary Colloquium: Study and Mapping of Surface Formations and Their Applications in Tropical Regions*, São Paulo, USP, vol. II, pp. 20–43 (in Portuguese).
- Lund, P.W., 1950. *Memoirs on Brazilian paleontology*. Translated, revised and commented by Carlos de Paula Couto. National Book Institute, Rio de Janeiro, p. 589.
- Luo, Y., Wang, H., Meersmans, J., Green, S.M., Quine, T.A., Feng, S., 2021. Modeling soil erosion between 1985 and 2014 in three watersheds on the carbonate-rock dominated Guizhou Plateau, SW China, using WaTEM/SEDEM. *Prog. Phys. Geogr. Earth Environ.* 45 (1), 53–81. <https://doi.org/10.1177/030913332096127>.
- Macedo, L.B., 2020. Wet and Dry: Ecological Strategies and Dynamics of Plant Communities in Temporary Ponds - Master's Dissertation (Biology), Postgraduate Program in Ecology, Conservation and Wildlife Management - Institute of Biological Sciences, Federal University of Minas Gerais, Belo Horizonte, p. 62 (in Portuguese).
- Macedo, C.A.R., Alvarez, G.C., 2021. The Disappearance of the Sumidouro Lagoon: Analysis of the Hydrogeological Behavior of the Lagoon over the Last 40 Years. Course Completion Work (Geology) - Institute of Geosciences (IGC), Federal University of Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte (in Portuguese).
- Malagutti Filho, W., Cottas, L.R., 1993. Application of geophysical methods in urban planning geology - methodological approach. *Geosciences*, São Paulo 12 (2), 417–438.
- Martins, E.S.P.R., Menescal, R.A., Scheren-Warren, M., Carvalho, M.S.B.S., Melo, M.S., Perini, D.S., Oliveira, F.A.J., 2007. Use of CBERS images for mapping water mirrors in Brazil. In: *Proceedings of the XIII Brazilian Symposium on Remote Sensing*. INPE. Florianópolis, Brasil.
- Meneses, I.C.R.R.C. de, 2003. *Geosystemic Analysis in the Environmental Protection Area (EPA) Karst of Lagoa Santa, MG*. PUC-MG, Belo Horizonte, p. 187. Master's Dissertation, (in Portuguese).
- Meneses, P.R., Almeida, T., 2012. Introduction to Remote Sensing Image Processing. University of Brasília, Brasília, pp. 121–160 (in Portuguese).
- Mourão, M.A.A., Cruz, W.B., Gonçalves, R.L.F., 2001. Hydrogeological characterization of the Minas Gerais portion of the São Francisco watershed. In: *São Francisco Basin: Geology and Natural Resources*. Belo Horizonte, pp. 327–349 (in Portuguese).
- Myers, N., Mittermier, R.A., Mittermier, C.G., Fonseca, G.A.B., Kent, J., 2000. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature* 403, 853–858. <https://doi.org/10.1038/35002501>.
- Nóbrega, P.F.A., 2015. Waterfowl in the Lagoa Santa Karst Environmental Protection Area: Ecology and Conservation. Master's Dissertation, Ecology, Conservation and Wildlife Management Graduate Program. Federal University of Minas Gerais (in Portuguese).
- Papadopoulou-Vrynioti, K., Bathrellos, G.D., Skilodimou, H.D., Kaviris, G., Makropoulos, K., 2013. Karst collapse susceptibility mapping considering peak ground acceleration in a rapidly growing urban area. *Eng. Geol.* 158, 77–88. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.02.009>.
- Pessoa, P.F.P., 1996. Hydrogeological Characterization of the Karstic Region of Sete Lagoas, MG: Potentialities and Risks. Masters dissertation. University of Sao Paulo (in Portuguese).
- Pessoa, P.F.P., 2005. Hydrogeology of Covered Karst Aquifers in the Region of Lagoa Santa, MG. Doctoral Thesis. Department of Sanitary and Environmental Engineering/DESA, Federal University of Minas Gerais, Belo Horizonte, p. 335 (in Portuguese).
- Ribeiro, J.H., Tuller, M.P., Filho, A.D., Padilha, A.V., Córdoba, C.V., 2003. VIDA Project: geological mapping, region of Sete Lagoas, Pedro Leopoldo, Matozinhos, Lagoa Santa, Vespasiano, Capim Branco, Prudente de Moraes, Confins and Funilândia, Minas Gerais - final report, scale 1:50,000, 2nd ed.: Belo Horizonte: CPRM, 54p., Maps and annexes (Basic Information Program for Territorial Management Series - GATE, digital version and convention) (in Portuguese).
- Ribeiro, C.G., Meireles, C.G., Lopes, N.H.B., Arcos, R.E.C., 2016. Structural Geological Survey Applied to the Flows of Karstic-Fissural Aquifers in the Region of the EPA Karst Lagoa Santa, Minas Gerais. Graduation Work (Geology). Institute of Geosciences, Federal University of Minas Gerais, Belo Horizonte, p. 157 (in Portuguese).
- Rosa, L., Alves, M. de C., Sanches, L., 2011. Use of Landsat 5 TM satellite band compositions to characterize the dynamics of the variation of wetlands in the Pantanal of Mato Grosso. In: *Anais XV Brazilian Symposium on Remote Sensing - SBSR*, Curitiba, PR, Brazil, INPE (in Portuguese).
- Schobbenhaus, C., Campos, D.A., Derza, G.R., Asmus, G.E., 1984. *Geology of Brazil. Explanatory Text of the Geological Map of Brazil and the Adjacent Oceanic Area Including Mineral Deposits*, Scale 1:2500000. Illustrated, p. 501 (in Portuguese).
- Silva, B.B., Lopes, G.M., Azevedo, P.V., 2005. Radiation balance in irrigated areas using Landsat images 5 - TM. *Brazilian Journal of Meteorology* 20 (2) (in Portuguese).
- Teodoro, M.I.P., 2020. Hydrodynamics of the Karst and Karstic-Fissural Zones of the Aquifer System of the Sete Lagoas Formation Using Tracer Dyes and the Analysis of Brittle Structures in the Region of Lagoa Santa, Minas Gerais. Masters dissertation. Federal University of Minas Gerais (in Portuguese).
- Teófilo, G., Gioia, D., Spalluto, L., 2019. Integrated geomorphological and geospatial analysis for mapping fluvial landforms in Murge basse karst of Apulia (Southern Italy). *Geosciences* 9 (10), 418. <https://doi.org/10.3390/geosciences9100418>.
- Theilen-Willige, B., Ait Malek, H., Charif, A., El Bchari, F., Chaibi, M., 2014. Remote sensing and GIS contribution to the investigation of karst landscapes in NW-Morocco. *Geosciences* 4 (2), 50–72. <https://doi.org/10.3390/geosciences4020050>.
- Uhlein, A., Caxito, F.A., Sanglard, J.C.D., Uhlein, G.J., Suckau, G.L., 2018. Stratigraphy and tectonics of the Neoproterozoic belts of the northern portion of the São Francisco Craton. *GEONOMOS* 19 (2), 8–31. <https://doi.org/10.18285/geonomos.v19i2.38> conservation of the speleological heritage in the karstic areas of the São Francisco basin. *Pan Caves of San Francisco*.
- USGS - United States Geological Survey, 2021. Landsat Data Continuity Mission. U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, pp. 2012–3066. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. (Accessed 2 November 2021).
- Viana, H.S., Kohler, H.C., Tavares, V.P., Org., 1998. EPA Lagoa Santa Karst - Physical Environment, vol. I. IBAMA/CPRM, Belo Horizonte (in Portuguese).
- Vieira, L.C.M., 2018. Hydrogeochemistry of Aquifers in the EPA Karst Region of Lagoa Santa, MG. Masters dissertation. Federal University of Minas Gerais (in Portuguese).
- Warming, E., 1908. *Contribution to Phytobiological Geography*. Belo Horizonte, Official Press of the State of Minas Gerais (Translation from Danish by Alberto Loeffler). Republished by EDUSP in 1973 and 1982, p. 386 (in Portuguese).
- White, W.B., 1988. *Geomorphology and Hydrology of Karst Terrains*. Oxford University Press, New York.
- Zakán, P.V., Romeiro-Silva, P.C., 2007. Bacia do São Francisco. *Bol. Geociências Petróbras* 15, 561–571 (in Portuguese).

W.M. Pacheco Neto et al.

Journal of South American Earth Sciences 132 (2023) 104662

Further reading

CETEC – Technological Center of the State of Minas Gerais, 1983. Environmental Diagnosis of the State of Minas Gerais, vol. 10. Belo Horizonte, Technical Publications Series (in Portuguese).

Nimer, E., 1989. Climatology of Brazil. IBGE, Department of Mineral Resources and Environmental Studies, Rio de Janeiro, p. 421 (in Portuguese).

APÊNDICE C Artigo elaborado com base no Capítulo 5 desta tese publicado na revista *Water* no ano de 2024.



Article

Karst Hydrological Connections of Lakes and Neoproterozoic Hydrogeological System between the Years 1985–2020, Lagoa Santa—Minas Gerais, Brazil

Wallace Pacheco Neto ^{*}, Rodrigo de Paula and Paulo Galvão ^{ID}

Postgraduate Program in Geology, CPMTC-IGC, Laboratório de Estudos Hidrogeológicos [LEHID], Department of Geology, Institute of Geosciences, Federal University of Minas Gerais, Pres. Antônio Carlos Ave., 6627–Pampulha Campus, Belo Horizonte 31270-901, MG, Brazil; depaula.ufmg@gmail.com (R.d.P.); hidropaulo@gmail.com (P.G.)

* Correspondence: wallacemaciel.geo@gmail.com

Abstract: This study focuses on a complex Brazilian Neoproterozoic karst (hydro)geological and geomorphological area, consisting of metapelitic–carbonate sedimentary rocks of ~740–590 Ma, forming the largest carbonate sequence in the country. At the center of the area lies the Lagoa Santa Karst Environmental Protection Area (LSKEPA), located near the Minas Gerais' state capital, Belo Horizonte, and presents a series of lakes associated with the large fluvial system of the Velhas river under the influence, locally, of carbonate rocks. The hydrodynamics of carbonate lakes remain enigmatic, and various factors can influence the behavior of these water bodies. This work analyzed the hydrological behavior of 129 lakes within the LSKEPA to understand potential connections with the main karst aquifer, karst-fissure aquifer, and porous aquifer, as well as their evolution patterns in the physical environment. Pluviometric surveys and satellite image analysis were conducted from 1984 to 2020 to observe how the lakes' shorelines behaved in response to meteorological variations. The temporal assessment for understanding landscape evolution proves to be an effective tool and provides important information about the interaction between groundwater and surface water. The 129 lakes were grouped into eight classes representing the hydrological connection patterns with the aquifers in the region, with classes defined for perennial lakes: (1) constantly connected, (2) seasonally disconnected, and (3) disconnected; for intermittent lakes: (4) disconnected during the analyzed time interval, (5) seasonally connected, (6) disconnected, (7) extremely disconnected, and (8) intermittent lakes that connected and stopped drying up. The patterns observed in the variation of lakes' shorelines under the influence of different pluviometric moments showed a positive correlation, especially in dry periods, where these water bodies may be functioning as recharge or discharge zones of the karst aquifer. These inputs and outputs are conditioned to the well-developed karst tertiary porosity, where water flow in the epikarst moves according to the direction of enlarged karstified fractures, rock foliation planes, and lithological contacts. Other factors may condition the hydrological behavior of the lakes, such as rates of evapotranspiration, intensity of rainfall during rainy periods, and excessive exploitation of water.

Keywords: hydrological dynamics; karst hydrogeology; pluviometric analysis; GIS; karst lakes



Citation: Pacheco Neto, W.; de Paula, R.; Galvão, P. Karst Hydrological Connections of Lakes and Neoproterozoic Hydrogeological System between the Years 1985–2020, Lagoa Santa—Minas Gerais, Brazil. *Water* **2024**, *16*, 2591. <https://doi.org/10.3390/w16182591>

Academic Editors: Giuseppe Sappa and Francesco Maria De Filippi

Received: 12 August 2024

Revised: 6 September 2024

Accepted: 8 September 2024

Published: 12 September 2024



Copyright: © 2024 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

The Lagoa Santa Karst Environmental Protection Area (LSKEPA) is one of the primary research areas related to archaeology, paleontology, speleology, and hydrogeology in Brazil, located near the state capital of Minas Gerais, Belo Horizonte. The archaeological sites in the Lagoa Santa region are world-renowned, featuring remarkable discoveries, such as the oldest human skeleton fragment in the Americas and a skull that is approximately 11,000 years old, nicknamed Luzia [1].

The lands of the Lagoa Santa region and the karst geomorphology is an interesting feature of the region and represent classic karst study sites in Brazil, where carbonate rocks, upon dissolution, give rise to caves, depressions, sinkholes, and various other unique landforms characteristic of these environments [2,3]. Over the years, various authors have conducted research focusing on the geology, geomorphology, and hydrological dynamics of this region, including [2,4–13], as well as projects by CPRM (APA Carste Lagoa Santa Project—1998 and Vida Project—2003) and work related to the PAN São Francisco Caves Project [14].

Understanding the hydrological dynamics and groundwater flow in the region is the main focus of various studies, resulting in complex conceptual models for the local karst. Notably, the study by [6] highlights the presence of an extremely active karst aquifer beneath the weathering mantle, where control is primarily exerted by the spatial distribution of the pure limestone occurrences. The recrystallized matrix of these rocks results in very low primary porosity (~3%) [15], where groundwater flows are influenced by secondary and tertiary porosities, such as fractures/faults and karst conduits within the aquifer [7].

The region still lacks studies that can relate the hydrological dynamics between the subterranean and surface karst. In this context, lakes become particularly significant because these karst depressions are crucial for the groundwater recharge of the region's aquifers. According to [16], the genesis of lakes in karst environments is conditioned by the dissolution of rocks and is strongly influenced by factors that either amplify or diminish this dissolution, such as the structure of the rocks, including their faults and fractures.

Few studies have combined efforts to understand the surface evolution dynamics of these water bodies, but one notable study was conducted by [4], who classified three types of lakes in the region: stable lakes on phyllite; seasonal lakes containing sinkholes at the bottom of dolines in topographically higher areas; and perched lakes on carbonate, at lower elevations. More recent studies use tools such as remote sensing, geoprocessing, aquifer testing, geophysics, isotopic, and meteorological analyses in modeling the evolutionary patterns of karst lakes [17–19].

Recently, the region experienced a severe drought, causing many lakes to dry up or significantly reduce their water levels, while others showed no disturbance in their water surface. The lack of knowledge about the hydrological dynamics of these lakes, as well as the need to understand the factors influencing the connection between these water bodies and deep aquifers provided strong incentives for this study.

This work analyzed the hydrological behavior of 129 lakes within the LSKEPA to understand potential connections with the karst aquifer, karst-fissure aquifer and surface porous aquifer, as well as the evolution patterns of their physical environment. Pluviometric surveys and satellite image analysis were conducted from 1984 to 2020 to observe how the lakes' shorelines behaved in response to meteorological variations. The temporal assessment for understanding landscape evolution proves to be an effective tool and provides information about the interaction between groundwater and surface water.

2. Site Description

Referred to by [20] as the “Lagoa Santa Karst Region,” the area of this study has been one of the most extensively studied karst environments since the 19th century, where carbonate and argillo-arenaceous sediments are emplaced giving rise to the Bambuí Group. Located 30 km north of Belo Horizonte, the capital of Minas Gerais state, it covers an area of 1197.5 km² (Figure 1).

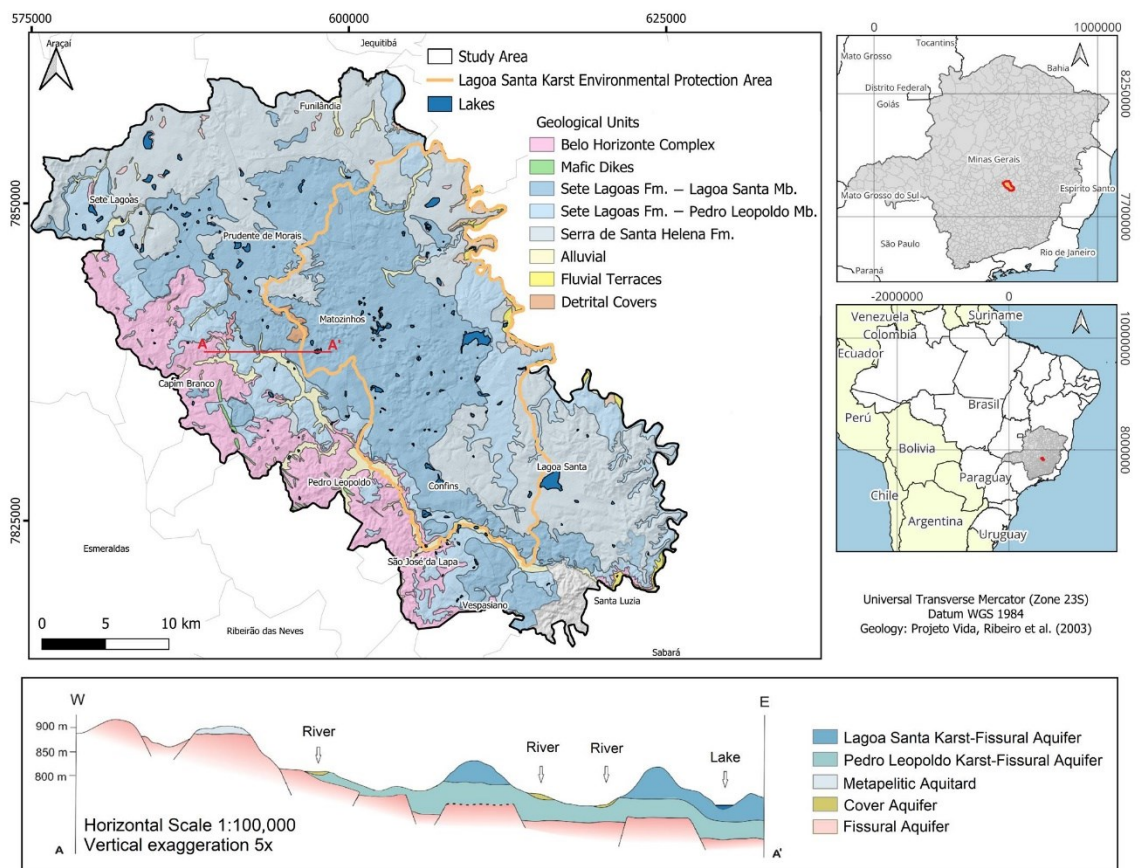


Figure 1. Geological and location map of the study area highlighting the Lagoa Santa Karst Environmental Protection Area, Minas Gerais, Brazil, and the lakes analyzed in this work. Geology modified from “Projeto Vida” [21] and profile modified from [22].

Geologically, the study area is regionally located in the central-southern portion of the São Francisco Craton, primarily consisting of Neoproterozoic clastic and carbonate sedimentary cover of the Bambuí Group [23], overlying an Archaean gneissic basement [21] (Figure 1). The craton served as a foundation for the deposition of marine pelitic-carbonate sedimentary packages on a stable epicontinental platform, with a minimum relative age of 630 Ma [24,25].

Locally, the stratigraphy, from bottom to top, features crystalline rocks of the basement, described as an Archaean and Paleoproterozoic Granit-Gneiss-Migmatite Complex (Belo Horizonte Complex) [26], directly overlaid by Neoproterozoic sub-horizontal cover rocks of the Bambuí Group [21,27,28], which in the study area correspond to the Sete Lagoas Formation and the Serra de Santa Helena Formation.

The Sete Lagoas Formation, representing the lower unit of the Bambuí Group, is divided into two members: the Pedro Leopoldo at the base, composed of impure crystalline metacarbonates with fine to medium grain size, intercalated with metapelitic layers; and the Lagoa Santa at the top, featuring pure crystalline metacarbonates with high calcite content and medium to coarse grain size. Both members exhibit partial to total recrystallization of the carbonates [21,27].

The Serra de Santa Helena Formation overlays the Sete Lagoas Formation and consists of metapelites (siltstones, shales, and carbonate lenses), which, even when altered, may

display relict structures at the surface [27]. At the top of the stratigraphy, two types of Cenozoic cover rocks are common: detritic–lateritic covers and alluvial covers, occupying higher topographic portions and drainage margins, respectively [21].

The Bambuí Group units in the region exhibit a degree of deformation ranging from moderate to high. Consequently, erosional processes are significantly influenced by fracture families, stratification planes, horizontal foliation, and existing shear zones, which govern the secondary and tertiary porosities of these rocks [29]. The structuring of the rocks is crucial, influencing the widening of conduits along major groundwater flow paths [4,6,30].

The following hydrogeological units are described in the region: granular aquifer of unconsolidated covers, aquiclude in saprolites and pelites of the Serra de Santa Helena Formation, karst aquifer and karst–fissure aquifer in the carbonates of the Sete Lagoas Formation, and fissure aquifer and aquifuge in the domain of gneiss–migmatite granites [31]. A schematic geological section can be observed in Figure 1, representing some of the hydrogeological units. The main aquifer in the region is the karst–fissure aquifer, consisting of the Lagoa Santa Member, which exhibits higher hydrological potential. This is directly related to more intense karstification processes, which promote the widening of fractures and larger conduits [32,33].

In the study area, karst features are widely observed and are important factors in determining the local hydrography, with both fluvial and karstic components [5]. Features such as sinkholes, karst depressions, and caves drain water into subterranean environments, reflecting an evolved karstic environment that affects the recharge and groundwater flow of the aquifers in the region [6,29,33]. Karst depressions play a significant role in the hydrological dynamics of the region and in this study, as many of these can host lakes, whether temporary or permanent. In the Lagoa Santa karst, there is a series of lakes associated with the large Velhas River system, which is part of the São Francisco River Basin.

Many perennial and intermittent karst lakes are present in the region, governed by a complex hydrological dynamic, which can exhibit irregular water level variation patterns, highlighting complex hydrological cycles and behaviors [20,34,35]. The high complexity of the hydrological behavior of these lakes remains a significant question, as these flooded depressions may serve as recharge points for the aquifer or as locations for high-flow springs or resurgence.

Auler, A. et al. [4] classified three types of lakes in the area: stable lakes on phyllite; seasonal lakes containing sinkholes at the bottom of dolines in topographically higher areas; and perched lakes on carbonate, at lower elevations.

Doline-type lakes and perched water table lakes are restricted to limestone rocks, with doline-type lakes primarily occurring in high topographies, at the bottoms of deep karst depressions, and perched water table lakes occurring in low topographic elevations. Generally, lakes on phyllites are stable, while those on limestone have fluctuating water levels, potentially drying up at times. The water level of the latter lakes is related to the amount of precipitation and the permeability of the pedological cover at the lake bottoms [4].

Precipitation control can be decisive for some of these lakes. [36] highlights that climatic variation has direct consequences for the karst region, altering water characteristics, as well as the activity of morphogenetic processes of karst features. Recently, the region experienced a significant drought, resulting in a marked reduction in precipitation and causing many lakes to dry up or significantly reduce their water levels [17,19].

3. Materials and Methods

This study was based on four stages: (1) climatological surveys using data from existing pluviometric stations in the study area from 1984 to 2020; (2) identification of the existing lakes in the area through geoprocessing of Landsat satellite images; (3) detecting the periodicity of these lakes between 1984 and 2020, as well as measuring the water surface dimensions of each lake; (4) evaluating the hydrological behavior of the lakes through

various analyses focused on the variation of water levels in different climatological periods over the selected time interval for this study. The stages will be detailed further below.

All maps, rasters, and vector files were geoprocesed in the Universal Transverse Mercator coordinate system, with WGS-1984 Datum, Zone 23S. All geoprocesing activities were carried out using GRASS 7.8.3 tools in the QGIS[®] software (Version 3.34.2) [37]. Tables, graphs, and charts were created using Microsoft Excel (Version 2019 MSO) and CorelDRAW (Version Graphics Suite 2024).

3.1. Climatological Survey

Climatological data were obtained from pluviometric stations located in the study area. Raw data from the Sete Lagoas (code 01944052), Pedro Leopoldo (code 01944009), Raul Soares (code 01943049), Vespasiano (code 01943009), Vargem Bonita (code 01944024), Taquaraçu (code 01943023), and Jaboticatubas (code 01943004) stations were downloaded from the HidroWeb portal (snirh.gov.br/hidroweb) of the National Water and Basic Sanitation Agency (ANA).

Data completion was necessary, as the series had some incomplete periods. Statistical correlations between neighboring stations were performed, and the double-mass method was applied. The correlation between two variables was calculated using the Pearson linear coefficient, which, according to [38], represents a mutual relationship between the two variables.

The double-mass method was designed to analyze and group sets of correlated meteorological stations by observing cumulative precipitation diagrams. According to [39], precipitation is less dependent on anthropogenic actions, making it simpler to indicate consistency between two data sets from different meteorological stations.

According to [40], the method involves accumulating monthly or annual precipitation values and plotting them on a graph. The x -axis represents values from the reference station, and the y -axis represents the station to be validated. If the values at both stations are proportional, the graph will be a single line, with the slope defining the proportionality between the two series. If the graph is not a single line, there is a strong indication that the series are not correlatable, there has been a change in the precipitation regime, or the two series belong to different precipitation regimes.

Next, the pluviometric value affecting the area was calculated for each of the studied hydrological years (from October of one year to September of the next year). The Thiessen method [41] was used, which requires the determination of the influence areas for each pluviometer of the selected stations. This method generates a weighted average of the heights recorded by the pluviometers, which is directly proportional to the influence area of the basin, considering the non-uniformity of the spatial distribution of the stations, and does not account for the basin's topography [40].

Thiessen polygons were drawn in the area for all analyzed hydrological years, from 1984/1985 to 2019/2020, based on the distribution of stations in the area. With the measured precipitation for each hydrological year, historical variations in the precipitation volume affecting the region were estimated, as well as the average precipitation for the 36 years (1984 to 2020).

With the pluviometric inputs calculated for each hydrological year, analyses of data homogeneity and trends were conducted. For homogeneity, the non-parametric Pettitt test [42] was used, which identifies abrupt changes in the temporal data, i.e., a point of discontinuity in the series, according to Equations (1) and (2). The hypotheses to be tested are $H_0: F_1(X) = F_2(X)$ (no change point); $H_1: F_1(X) \neq F_2(X)$ (change point).

$$U_{t,n} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^n \operatorname{sgn}(x_t - x_j) \quad (1)$$

$$\operatorname{sgn}(x_t - x_j) = \begin{cases} 1 & \text{if } (x_t - x_j) > 0 \\ 0 & \text{if } (x_t - x_j) = 0 \\ -1 & \text{if } (x_t - x_j) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

The null hypothesis (H_0) assumes the absence of a change point in the time series. K_t represents the maximum point in the trend change of the series, calculated through the maximum value of $U_{t,n}$, which is associated with a significance level (ρ) calculated using Equations (3) and (4). Thus, given a significance level α , if $\rho < \alpha$, the null hypothesis (H_0) is rejected, where n is the number of years in the time series, ρ is the confidence level, and n is the number of years in the time series. The adopted significance level in this study was 5%.

$$K_t = U_{t,n} = \max|U_{t,n}|, 1 \leq t < n \quad (3)$$

$$\rho = 2 \exp\left(\frac{-6K_n^2}{n^3 + n^2}\right) \quad (4)$$

The non-parametric Mann–Kendall [43,44] test was conducted to assess the statistical significance (increasing or decreasing) of the climatic time series, distinguishing between natural fluctuation and deterministic trend processes. This method is based on the statistic S , which involves comparing each value of the series with others, always in sequential order, according to Equations (5) and (6).

$$S = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{i-1} \operatorname{sgn}(x_i - x_j) \quad (5)$$

$$\operatorname{sgn}(x_t - x_j) = \begin{cases} 1 & \text{if } (x_i - x_j) > 0 \\ 0 & \text{if } (x_i - x_j) = 0 \\ -1 & \text{if } (x_i - x_j) < 0 \end{cases} \quad (6)$$

According to [45], the test correlates observation rankings within a time sequence, meaning that it compares each value in the series with previous values in sequential order to determine the statistical variable. In Equation (5), sgn represents the sum of the signs of the pairwise differences of all values in the series (x_i) relative to the remaining values, in sequential order (x_j), where j are the values of the sequential data, and n is the size of the analyzed time series. The results of this summation will vary according to the conditions of Equation (6).

Next, the statistical variance of S , $\operatorname{Var}(S)$, is calculated using Equation (7), where n is the number of years in the time series, t is the duration of any period of time, and $\sum t$ is the sum of all values of the number of time periods. Equation (8) then calculates the Mann–Kendall statistic Z for this test, where positive values of Z indicate increasing trends, while negative values of Z indicate decreasing trends in the time series. The adopted confidence level was 95%, and the significance level, as in the Pettitt test, was 5%, meaning the probability of rejecting the null hypothesis (H_0) when it is true.

$$\operatorname{Var}(S) = \frac{1}{n} \left[n(n-1)(2n+5) - \sum_t t(t-1)(2t+5) \right] \quad (7)$$

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\operatorname{Var}(S)}} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\operatorname{Var}(S)}} & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (8)$$

In addition to statistical tests, another approach was taken to observe variations in the temporal rainfall data. Using historical rainfall data and historical mean rainfall, the rainfall cycles occurring throughout the study period were defined. It is known that within a single year, variations between dry and wet periods occur, but the annual rainfall amount,

when compared with other annual amounts, can provide important information about how successive years represent a rainfall cycle.

Subsequent years with rainfall values below the historical mean for the analyzed period were grouped into dry or water scarcity cycles. Conversely, sequences of years with rainfall values above the historical mean were grouped into wet cycles. Successive periods where there is no predominant trend of annual rainfall values being consistently above or below the historical mean were categorized as “mixed periods”.

These cycles are of utmost importance when evaluating rainfall data over long intervals, particularly when assessing the temporal behavior of an object, such as the lakes in this study. It becomes apparent that the evaluation of the hydrological dynamics of the lakes is facilitated when examining rainfall variations over shorter intervals. Thus, this study aimed to identify as many rainfall cycles with similar characteristics as possible.

All rainfall data were graphically processed using Microsoft Excel to facilitate the observation and interpretation of the results. The graphs generated from the aforementioned cycles provided resources for creating linear trend lines. A linear trend line is a useful statistical representation for data that increases or decreases at a constant rate [46], and its graphical representation is a straight line that best fits a simple data set. Therefore, each rainfall cycle presented a trend line, representing the variation in growth or reduction of successive rainfall data.

Additionally, within Microsoft Excel, the equations of these trend lines were analyzed. An important piece of information from these equations is the slope coefficient, which relates to the incline of the line and how our data vary successively on a Cartesian plane [46]. The slope coefficients obtained from the trend lines of each rainfall cycle indicate patterns of increasing or decreasing rainfall over the years within a rainfall cycle. Harmonic means of each rainfall cycle were also calculated to compare the rainfall values of each cycle with the historical mean rainfall.

3.2. Identification of Lakes

The processes for identifying lakes outlined by [35] were followed. Initially, land cover scenes from different Landsat satellites [47] for dry and wet seasons of each hydrological year from 1984 to 2020 were selected, while color compositions of spectral bands were created to enhance the contrast between water bodies and other land covers present in the images (Figure 2).

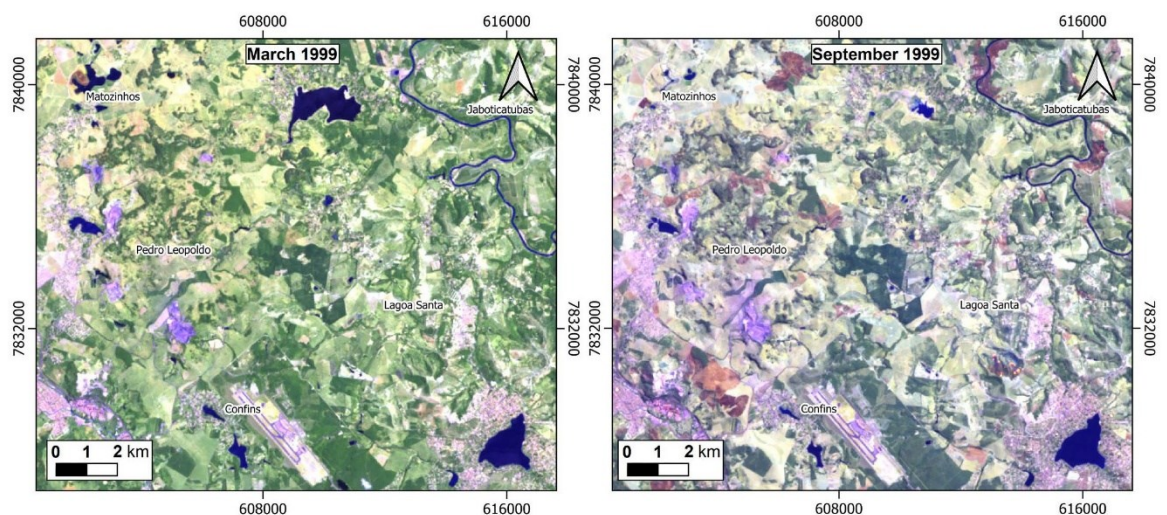


Figure 2. Example of Landsat satellite images used in this study, representing the rainy season of 1999 and the dry season of the same year.

The color compositions served as the basis for conducting a supervised classification, named Region of Interest (ROI), to separate two classes: water bodies and other surfaces. This classification was based on color, texture, tone, and shadows, which are fundamental characteristics to assist in distinguishing the training areas for the predefined classes [48]. Various training areas were selected for each class to achieve greater representativeness of each surface.

Using the Semi-Automatic Classification tool in QGIS software (version 3.34.2), a Maximum Likelihood Classification was performed. This classification calculates the probability that a given pixel belongs to a specific class and labels the class with the highest probability [49]. The result of this step were rasters of classified land cover into water bodies and other surfaces for the wet and dry seasons of all years from 1984 to 2020. These rasters were then converted into vector files to facilitate data handling and to exclude water bodies with linear patterns, which more closely resemble rivers rather than lakes, the focus of this study.

3.3. Periodicity of the Lakes

With the water bodies defined for the dry and wet seasons between the hydrological years of 1984 and 2020, the behavior of all the lakes regarding their periodicity of appearing full or dry was observed. This step defined which lakes had perennial or intermittent behavior. Perennial lakes are those that never dried out during the study period. Intermittent lakes are those that existed in the 1980s and show a periodic behavior of having or not having water in different years between 1984 and 2020. At this stage, the perimeter of these lakes was also calculated, corresponding to the length of the outermost edge of the water bodies, varying according to their size and shape. The perimeter values were obtained using the Calculate Geometry/Perimeter tool from the attribute table of the QGIS vector files.

3.4. Assessment of Hydrological Behavior

For the analysis of hydrological behavior, the perimeter data of the lakes for each hydrological year were initially processed graphically using Microsoft Excel. Graphs were created to represent each lake and how numerically whether its water body expanded or contracted during the study period. This step involved defining the averages and perimeters of the lakes, indicating what would be considered their normal behavior over the years (Figure 3).

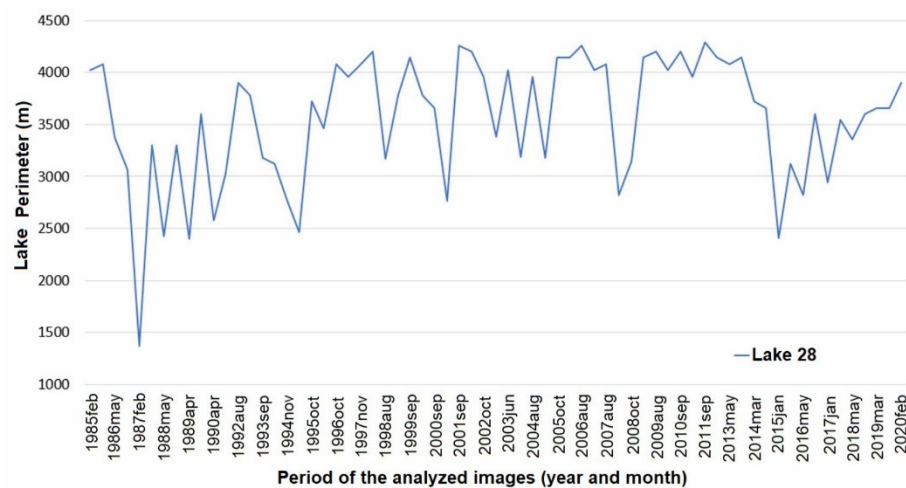


Figure 3. Graphical representation of perimeter variation over the years for the studied lakes (example Lake 28).

The perimeter data were analyzed in relation to the previously defined rainfall cycles, and new trend lines representing the successive variation in perimeters were observed for each of the dry, wet, or mixed cycles. The angular coefficients in this analysis were important, as they represent how much the lakes expanded or contracted during each rainfall cycle. The sum of these coefficients can be interpreted as reflecting the changes in the water body of a lake and be compared with the average perimeter of each lake to observe the behavior of each one over the analyzed years. Contractions of less than 5% of the average lake size were considered minor, while contractions greater than 5% were considered significant. A flowchart of this step can be seen in Figure 4.

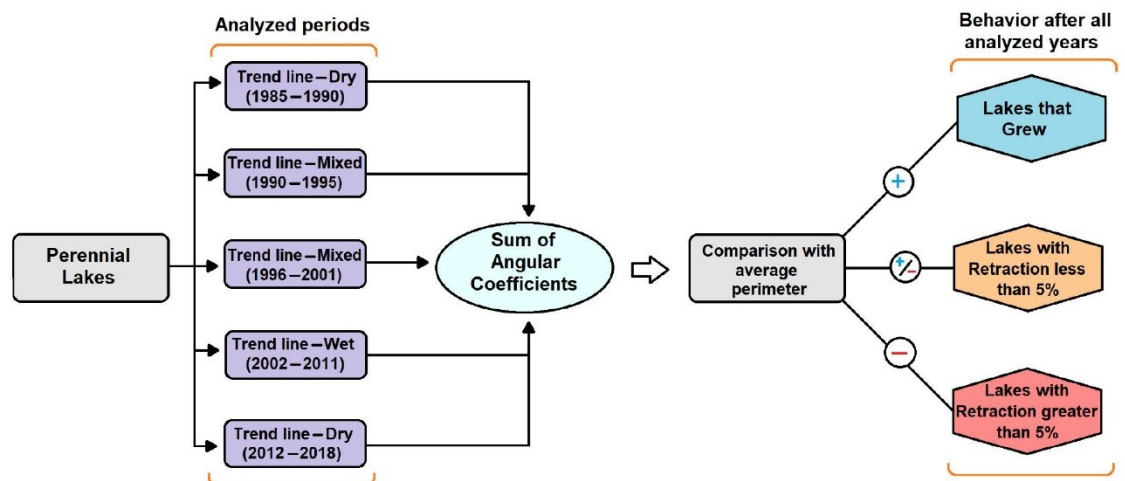


Figure 4. Flowchart summarizing the steps taken to identify the expansion or contraction behavior of each lake over the analyzed years.

To observe the hydrological behavior of the lakes during abrupt changes in precipitation, a new approach was proposed. The perimeters of the lakes were analyzed in relation to changes in rainfall cycles, highlighting how each lake's behavior was affected by significant changes in precipitation. The period chosen was between the transition from the rainy cycle to the dry cycle, an event that occurs only once in the temporal interval used. The end of the rainy cycle was set to 2011, and the start of the dry cycle was set to 2012. Graphically, precipitation was compared with the perimeter variations each lake might exhibit.

This method proved more effective for perennial lakes compared to intermittent ones, likely due to the potential connection with groundwater bodies that perennial lakes might have. Perennial lakes are more likely to be connected to aquifers and receive constant groundwater replenishment. Therefore, lakes that do not show a disturbance in their water body in response to abrupt changes in precipitation may be connected lakes. Conversely, lakes affected by precipitation and showing perimeter changes may not be as connected to the regional groundwater system. Intermittent lakes are frequently dry, and precipitation is crucial for them to hold water. Hence, a comprehensive analysis across all research years was used for these lakes to identify moments when their hydrological behavior changed.

The analysis focused on perennial lakes, comparing the two proposed approaches described in this section: the first related to the final behavior of the lakes over the years, identifying which expanded and which contracted over time, as well as quantifying this growth or reduction; the second related to the lake's behavior during the transition between a rainy cycle and a period of precipitation scarcity, demonstrating possible connections or disconnections between perennial lakes and groundwater. If these approaches are validated, it is expected that lakes with a greater connection to the aquifer will show

minimal contraction or even expansion of their water body by the end of this study. Conversely, disconnected lakes should show greater contraction of their water body over the successive years.

Unlike perennial lakes, analyzing trend lines and their angular coefficients for intermittent lakes was not useful. This is because almost all intermittent lakes exhibit negative trend lines, as these lakes are often empty during various periods over the studied years—a defining characteristic of intermittent lakes. Thus, the analysis of intermittent lakes' hydrological behavior was conducted by graphically examining their water bodies (perimeter) over the full study period (36 years) and comparing it with precipitation. Lakes with similar behavior were grouped into classes based on their hydrological connection.

4. Results and Discussion

4.1. Historical Precipitation

Using data from the pluviometric stations, a graph was created to represent the historical annual average precipitation for all hydrological years between 1984–1985 and 2019–2020 (Figure 5).

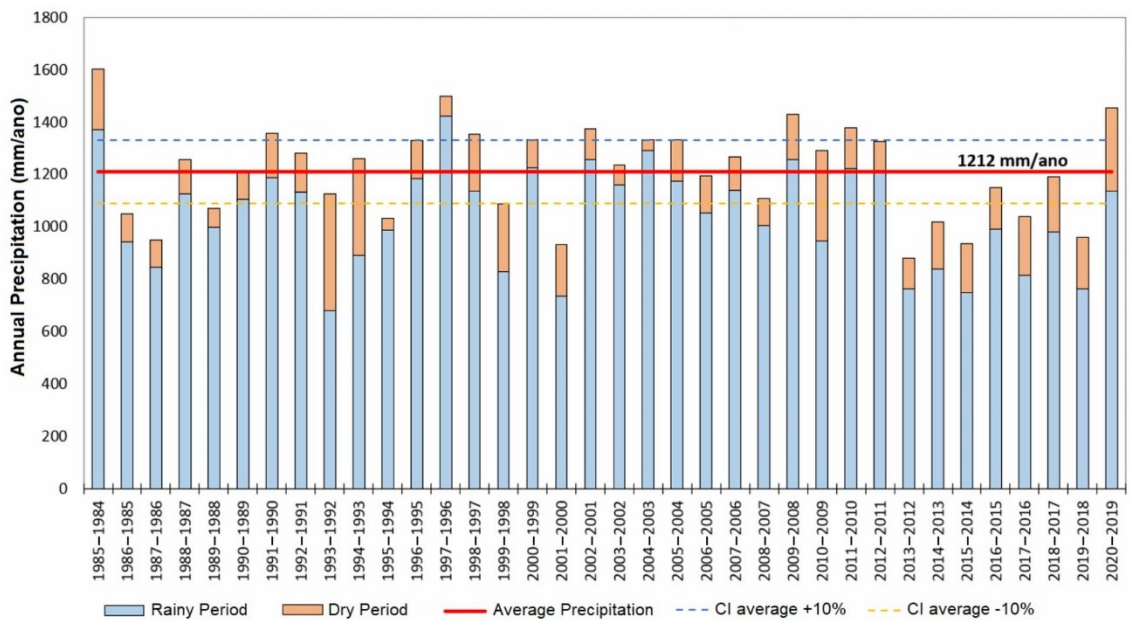


Figure 5. Bar chart representing the annual average precipitation between the hydrological years 1984–1985 and 2019–2020. The orange bars indicate precipitation during the dry months (April to September), while the blue bars show precipitation during the wet months (October to March). The red line marks the average precipitation for the 36 years analyzed in this study, with confidence intervals represented by the dashed blue line (positive confidence interval) and the dashed yellow line (negative confidence interval).

With the annual averages calculated, a new calculation was performed to represent the historical precipitation average over the years studied, resulting in a value of 1212 mm. This value is of great importance, as it helps identify hydrological years with low precipitation and those with high precipitation, representing significant cycles of flooding and water scarcity over recent years.

A total of 20 hydrological years had precipitation above the historical average for the analyzed period, much of which occurred between the hydrological years 2001–2002 and 2011–2012. Conversely, 16 hydrological years had precipitation below the historical

average, with the most notable period being between the years 2012–2013 and 2018–2019. The negative confidence interval, represented by 10% below the average of 1212 mm, showed a good fit to the data, without significantly altering the behavior of the analyzed hydrological years.

4.2. Precipitation Cycles

Climatic homogeneity was tested (Pettitt's test) for the time series of hydrological years between 1984–1985 and 2019–2020, indicating that there are no change points in precipitation throughout the selected interval. Based on the 5% significance level, H_0 is accepted; that is, there was no change point, as $\rho > \alpha = 0.05$ was found in these parameters, showing a homogeneous behavior. The Mann–Kendall trend test results indicated similar behavior to Pettitt's test for precipitation, where H_0 is accepted ($\rho > \alpha = 0.05$), showing no significant trend (Table 1).

Table 1. Statistical nonparametric results based on homogeneity (Pettitt's test) and trend analysis (Mann–Kendall test).

Method	Parameter	Precipitation
Pettitt's test	K	124
	t	28
	p-value (two-tailed)	0.39
	alpha	0.05
	Interpretation ^a	Accept H_0
Mann–Kendall trend test	Kendall's tau	−0.06
	S	−38
	Var(S)	5390
	p-value (two-tailed)	0.61
	alpha	0.05
	Interpretation ^b	Accept H_0

Notes: ^a Two hypotheses: H_0 = no change point; H_1 = change point. Based on the significant level of 5%, if $\rho < \alpha = 0.05$, H_0 is rejected (change point); if $\rho > \alpha = 0.05$, H_0 is accepted (no change point). ^b Two hypotheses: H_0 = no trend; H_1 = significant rising or declining trend. Based on the significant level of 5%, if $\rho < \alpha = 0.05$, H_0 is rejected (there is a trend in the data); if $\rho > \alpha = 0.05$, H_0 is accepted (no trend in the data).

The statistical tests, therefore, were not effective in diagnosing significant changes in precipitation or in identifying increasing or decreasing trends in the rainfall data. Consequently, an alternative approach was proposed to identify the nuances in precipitation data over the years.

Based on the historical precipitation record and the historical average, the cycles of rainfall and water scarcity were defined. Hydrological years consecutive to the historical average precipitation (1212 mm/year) were grouped into rainfall cycles, while subsequent hydrological years with values below the historical average were categorized as drought cycles. The years that showed inconsistency with the historical average were grouped into "mixed" cycles (Figure 6). The first and last hydrological years of the data group were excluded due to the inability to analyze the behavior of the years preceding and following these years.

Throughout the historical series, five cycles were identified, ranging from 5 to 11 years in duration. The historical series begins with a 5-year dry period, one of the shortest cycles in the set (1984/1985 to 1989/1990), featuring only one hydrological year (1987–1988) above the historical average. This is followed by two mixed cycles, one lasting 5 years (1990/1991 to 1994/1995) and the other lasting 6 years (1995/1996 to 2000/2001).

This sequence of hydrological years hardly represents a grouping of years of water scarcity or abundance, as the years do not show a pattern of consecutive years above or below the average precipitation. Thus, they were categorized into mixed precipitation cycles. The decision to separate into two mixed cycles rather than one was due to the precipitation fluctuations observed, with each mixed cycle starting with high precipitation

values that decrease over the years. The precipitation variations within these cycles are crucial for understanding the hydrological behavior of the lakes.

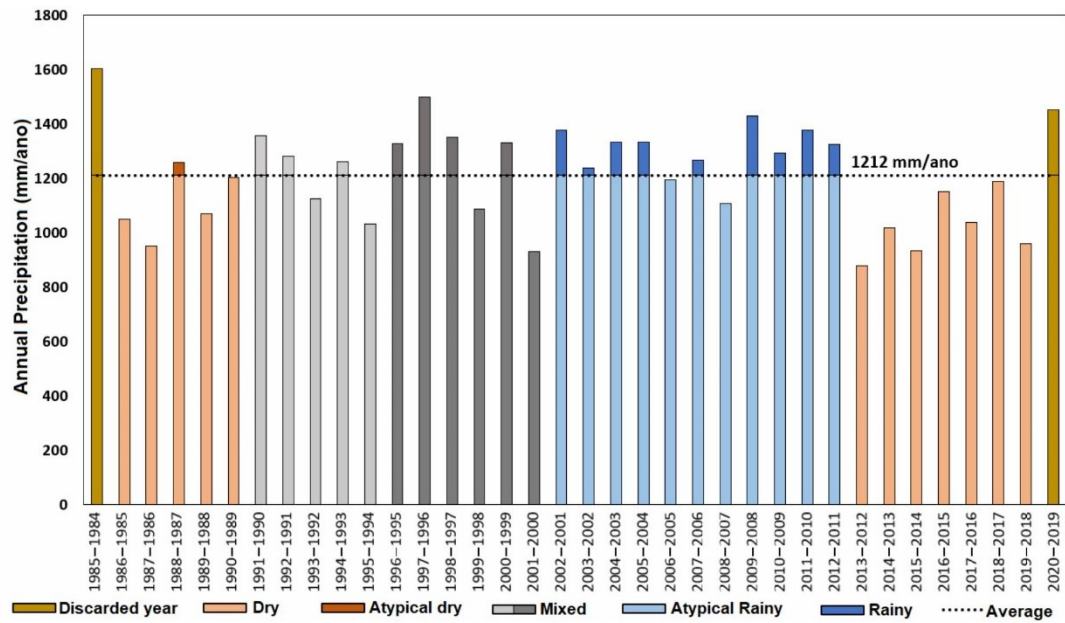


Figure 6. Bar chart representing rainfall and drought cycles. Values above the historical average (black dashed line) during dry precipitation cycles were defined as atypical dry hydrological years, while values below the historical average (black dashed line) during wet cycles were defined as atypical wet hydrological years.

Following this, a major wet cycle occurs, the longest in the set, lasting 11 years (2001/2002 to 2011/2012). This cycle had only 2 years (2005–2006 and 2007–2008) with precipitation below the historical average. The final cycle is a drought cycle lasting 7 years (2012/2013 to 2018/2019). During this cycle, all hydrological years were below the historical precipitation average, showing very low precipitation volumes; this significant reduction in precipitation in the region is also noted in the works of [19,50,51].

The first (1984–1985) and last (2019–2020) hydrological years of the analyzed interval were excluded, as including them in any cycle would not have been coherent due to the unknown behavior of the years preceding the chosen interval and those following the study period. The wet, dry, and mixed periods were graphically treated to observe the trend lines of each cycle and the harmonic mean precipitation values that encompass only the precipitation values of each period (Figure 7).

The average rainfall for the two dry periods was well below the historical average (1212 mm/year) previously represented, with the first dry period showing 1095.8 mm/year and the second dry period 1014 mm/year. In contrast, the wet period (2001 to 2012) had an average of 1288.5 mm/year, significantly above the historical average (1212 mm/year), which is expected for a wet precipitation cycle.

Observing the average for each of the mixed cycles reveals an interesting pattern: the average rainfall during the years of each cycle is close to the historical precipitation average (1212 mm/year). This reflects the nature of these periods, characterized by variations of high and low rainfall over the years, similar to what is observed when analyzing the entire study period (1984 to 2020). The first mixed period had an average of 1200.2 mm/year, and the second had an average of 1223.9 mm/year.

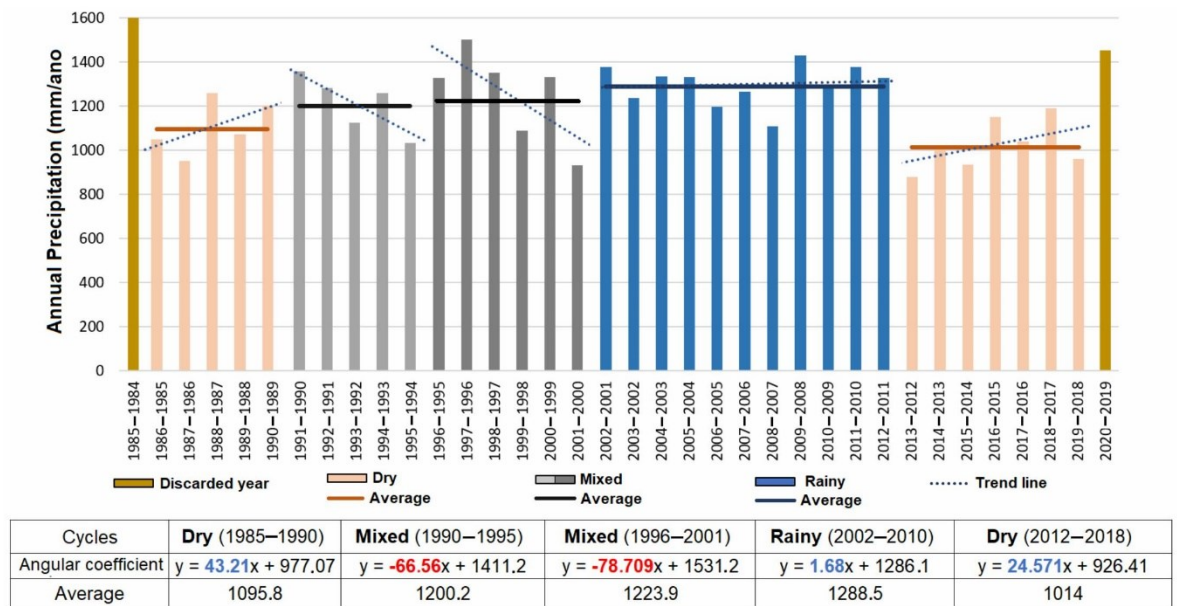


Figure 7. Graph of the precipitation cycles, showing their averages, and trend lines representing the precipitation variation within each cycle. Below is a table summarizing the averages and equations of the trend lines for each cycle, with angular coefficients in blue (positive) and red (negative).

The trend lines for each cycle type (dry, wet, and mixed) show similar behaviors. During dry periods, the trend lines exhibit a positive trend, indicating an annual increase in precipitation within these cycles. This suggests that the beginning of precipitation scarcity cycles is more severe, with precipitation tending to approach the historical average over time. The annual increase in precipitation over the cycle is 43.2 mm/year (the first dry cycle) and 24.5 mm/year (the second dry cycle).

Mixed cycles exhibit the opposite behavior of dry cycles, with trend lines showing negative values. This indicates that these cycles start with higher precipitation values and show a reduction in precipitation throughout the cycle, with a decrease of 66.5 mm/yr (the first mixed cycle) and 78.7 mm/year (the second mixed cycle).

Finally, the wet cycle shows a constant trend line, indicating a well-defined cycle, with most of its hydrological years marked by high precipitation values. The trend line is positive, showing an increase of 1.6 mm/year over the cycle.

4.3. Lake’s Identification and Periodicity

Based on the analysis of the water body behavior during this period, 129 lakes were classified in two main types: 40 perennial lakes, which had water bodies in both the rainy and dry seasons of all hydrological years; and 89 intermittent lakes, which showed significant variation in water bodies between the dry and rainy seasons, sometimes becoming completely dry in the dry season or remaining dry for several hydrological years before reappearing (Figure 8).

The perimeter value of each lake was also determined, representing the length of the outermost edge of the water bodies for each image used, varying according to their size and shape. This measurement provided the basis for the subsequent stages of this research.

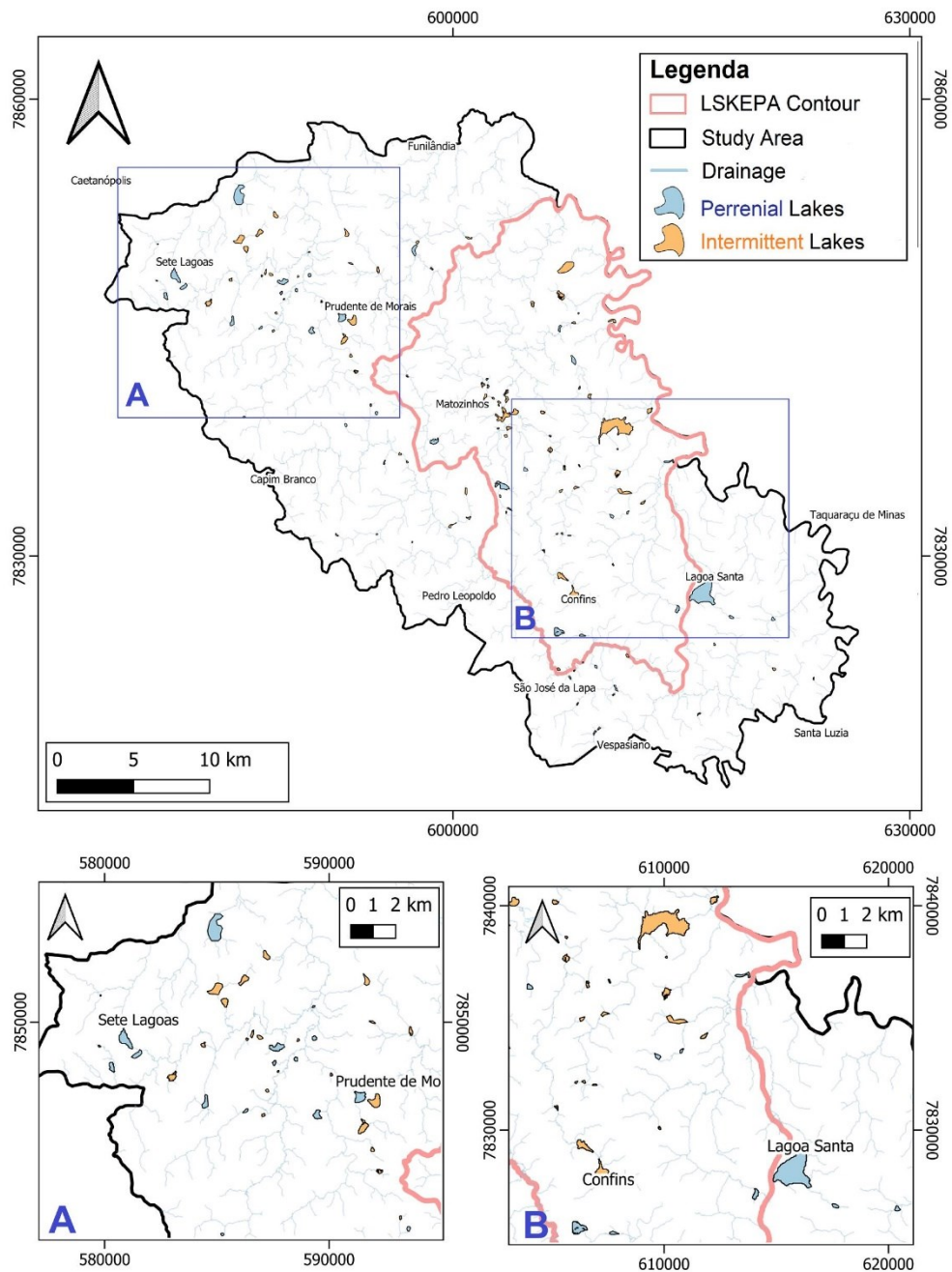


Figure 8. Identification and distribution of perennial lakes (in blue) and intermittent lakes (in orange) in the study area. (A) and (B): Highlights of some lakes.

4.4. A Lake's Water Behavior

The perimeter variation was observed, as well as the trend lines of this variation within the precipitation cycles, and angular coefficients were calculated, representing how the lakes expanded and contracted in each of the precipitation cycles. The sum of these

angular coefficients can be interpreted as the change in the water body of a lake over the 36-year period covered in this study.

Figure 9 illustrates the perimeter variation of one of the perennial lakes, where the table represents the trend line equation for the perimeter variation of its water body across each analyzed cycle, along with the sum of the angular coefficients of this variation in all cycles. For visualization, one lake was chosen, and this measurement was conducted for 40 perennial lakes and 89 intermittent lakes in the region of focus.

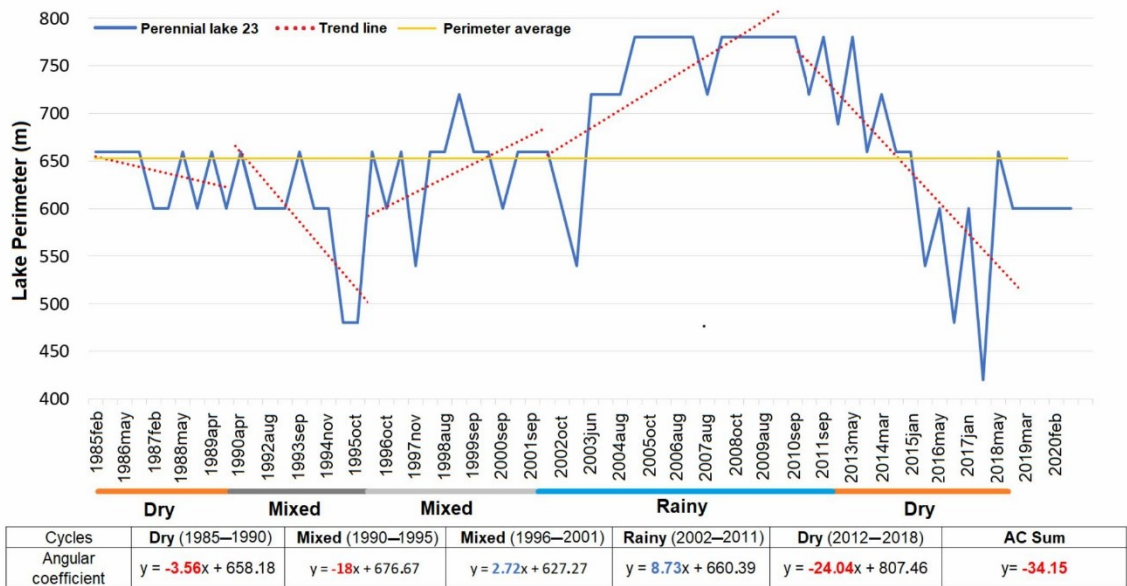


Figure 9. Graphical representation of the perimeter variation of perennial lake 23 over the time interval used. The precipitation cycles and the trend lines of perimeter variation in each cycle can be observed. The table below provides the trend line equations within each cycle, along with their positive and negative angular coefficients.

In Figure 9, the behavior of perennial lake number 23 and how its perimeter varied from 1985 to 2020 can be observed. As a perennial lake, it never dried up during the analyzed interval; however, it showed significant variation in its water body, with many variations recorded during the previously defined wet and dry cycles. During the first dry cycle, the lake showed what is considered a normal variation, where its water body expanded and contracted according to the precipitation variations between dry and wet seasons within a hydrological year. At the end of this cycle, the angular coefficient generated by the trend line equation indicated a loss of 3.56 m in its water body.

The two subsequent mixed cycles had distinct influences on the lake’s perimeter. During the first mixed cycle, the lake experienced a contraction of 18 m, while in the second mixed cycle, it expanded by 2.72 m.

The wet cycle between 2002 and 2011 represented a significant positive variation in the lake’s perimeter, which may be related to the higher precipitation occurring in this cycle. During this cycle, the lake reached its largest water body within the analyzed interval, totaling 780 m in perimeter, and this value was maintained for several years. At the end of this cycle, the trend line equation indicated that the lake had an expansion of 8.73 m throughout the wet cycle.

Finally, the lake faced a last dry cycle, where its water body drastically reduced, reaching values of 425 m during the dry season of 2017, the period of greatest contraction for the lake in the analyzed interval. At the end of this cycle, the lake began to expand again,

but not enough to show a positive variation over the cycle. The trend line represented a reduction of 24 m for the lake throughout the analyzed years. The sum of all angular coefficients obtained for each cycle resulted in a total contraction of 34.15 m for the lake over the years analyzed.

4.5. Lake Classes of Hydrological Connection

The previous data provided the foundation to define the hydrological connection classes representing perennial and intermittent lakes, which exhibit similar behavior in response to perimeter variation related to changes in precipitation patterns. Different approaches were used to analyze the hydrological connection for perennial lakes and intermittent lakes. The results for each type of lake will be discussed below, starting with perennial lakes and followed by intermittent lakes.

4.5.1. Perennial Lakes—Analysis of Angular Coefficients

For the analysis of the hydrological connection of the 40 perennial lakes, the sum of the angular coefficients for all the previously defined precipitation cycles was first observed. These sums indicated which lakes grew or shrank during the 36 years analyzed in this study. Interpreting this behavior in relation to the evolution of their water bodies is crucial for identifying lakes that are connected to the aquifer. These lakes, regardless of precipitation variations, were replenished by groundwater and experienced an increase in their water surface. Conversely, lakes that might be disconnected could be losing water through infiltration and percolation, unable to maintain their water levels within their depressions solely through precipitation.

The equations of the trend lines and their angular coefficients, as well as the sum of these coefficients, are detailed in Table A1, contained in the Appendix A of this paper. A subset of this table can be seen in Table 2.

The sum of the angular coefficients was compared with the average perimeter of each lake to establish the limits of water surface contraction experienced by each water body over the years. Negative sums indicate the contraction of the lakes over the analyzed interval. Lakes that decreased by more than 5% of their average perimeter showed significant contraction, while lakes that decreased by less than 5% exhibited minor contraction of their water surface. Lakes with positive sums of angular coefficients showed an increase in their water surfaces over the years analyzed. The flowchart representing this step can be seen in Figure 4.

Table 2 illustrates the behavior of some of the studied perennial lakes, showing three examples of lakes whose water surfaces expanded during the analyzed years. It is noticeable that despite the expansion, these lakes experienced different degrees of increase, which can be compared with their average sizes. For example, the 56.99 m expansion of lake 36, although an increase in size, may not be considered significant due to its average perimeter of 3349 m. On the other hand, the expansion of lake 10, which increased by 117.15 m compared to its average perimeter of 1348 m, can be deemed significant, with its size increasing by almost 10% over the 36 years.

Lakes that showed a contraction in their water surfaces were categorized into those with contractions of less than 5% and those with contractions of more than 5% relative to their average perimeter. For instance, lake 8 showed a contraction of 23.69 m, but its average perimeter is 1999 m, making the observed contraction over the years relatively low. Conversely, lake 20 experienced a contraction of 111.52 m in its water surface, which is considered high for a lake with an average perimeter of 582 m.

In the analysis of the 40 perennial lakes, 12 lakes showed an increase in their water surfaces over the years, while 28 lakes experienced a decrease in their water surfaces between 1985 and 2020. Among these 28 lakes that contracted, 15 exhibited less than 5% contraction relative to their average perimeter, and 13 showed more than 5% contraction. The complete data for all the perennial lakes analyzed in this step can be found in the Appendix A of this article, in Table A1.

Table 2. Examples of perennial lakes and their perimeter variation behaviors in each of the precipitation cycles defined in this study, as well as their final behavior after all the analyzed years. Summations in blue represent the expansion of the water mirror, and those in red represent retractions.

Perennial Lakes	Trend Lines					Sum of Angular Coefficients	Lakes Perimeter (m)	Behavior after All Analyzed Years		
	Dry (1985–1990)	Mixed (1990–1995)	Mixed (1996–2001)	Rainy (2002–2010)	Dry (2012–2018)			Lakes That Enlarged	Lakes with Retraction Less than 5%	Lakes with Retraction Greater than 5%
1	$y = -4.8112x + 767.94$	$y = 7x + 758.33$	$y = 813.33$	$y = -4.7678x + 835.29$	$y = -3.2253x + 804.12$	-5.79x	784		x	
6	$y = -34.213x + 1008.5$	$y = 2.333x + 660.78$	$y = 16.157x + 578.89$	$y = -1.9628x + 791.54$	$y = 27.615x + 592.08$	9.92x	767	x		
8	$y = 76.759x + 1165.2$	$y = -0.966x + 2025.6$	$y = -94.259x + 2988.7$	$y = 0.3798x + 1957.1$	$y = -5.6044x + 1992.5$	-23.69x	1999		x	
10	$y = 116.72x + 1340$	$y = 21.483x + 1905.4$	$y = -16.416x + 1228.1$	$y = -9.6502x + 1043.5$	$y = 5.0165x + 1115.1$	117.15x	1348	x		
13	$y = -90.633x + 2299.4$	$y = -84.4x + 1739.9$	$y = -6.8531x + 1382.2$	$y = 22.118x + 1206.7$	$y = -25.286x + 1776.5$	-184.78x	1501			x
20	$y = -42.587x + 921.82$	$y = -15x + 635$	$y = -37.385x + 916$	$y = -8.6357x + 670.48$	$y = -7.9341x + 535.46$	-111.52x	582			x
35	$y = 2.8147x + 2329.8$	$y = -175.05x + 3936.5$	$y = -138.74x + 4006.2$	$y = -39.089x + 2999.4$	$y = -218.05x + 3599.2$	-568.11x	2529			x
36	$y = -47.916x + 3679.6$	$y = 102.75x + 2912.6$	$y = -37.182x + 3562.7$	$y = 43.744x + 2801.7$	$y = -4.4176x + 3381.3$	56.99x	3349	x		

4.5.2. Perennial Lakes—Behavioral Analysis during Transition of Precipitation Cycles

The extent to which each perennial lake grew or shrank over the study period was previously noted (Tables 2 and A1 of the Appendix A). Another interesting result emerged when comparing each perennial lake in terms of its response to changes in precipitation cycles, highlighting how the lake’s behavior reacts to abrupt precipitation changes. Therefore, the period from 2009 to 2016 was chosen to graphically demonstrate these changes.

This interval was not chosen randomly; these years are highly representative of the region’s precipitation variation, covering the end of the wet cycle (2001–2012) and the beginning of the last dry cycle (2012–2018). Consequently, the sharp reduction in precipitation could directly impact the water surface of karst lakes, especially if these perennial lakes are disconnected from the aquifer. In such cases, their water surface variations are entirely related to the amount of rainfall that affects their depressions. [50], analyzing water occurrence in some karst depressions in the Lagoa Santa Karst EPA region, observed that during hydrological recessions, particularly from 2010 to 2014, many lakes had their water surfaces reduced or even dried up due to lower precipitation.

Based on this result, three distinct behaviors were identified for perennial lakes in the region in response to precipitation changes. Out of the 40 analyzed perennial lakes, 37 were categorized into three groups that clarify their behavior concerning their hydrological connection with aquifers in the region. To represent these patterns, some lakes that effectively illustrate their response to a sequence of years with high average precipitation followed by a reduction in average precipitation were selected. The graphical representation of their perimeter variations over the years can be observed in Figure 10.

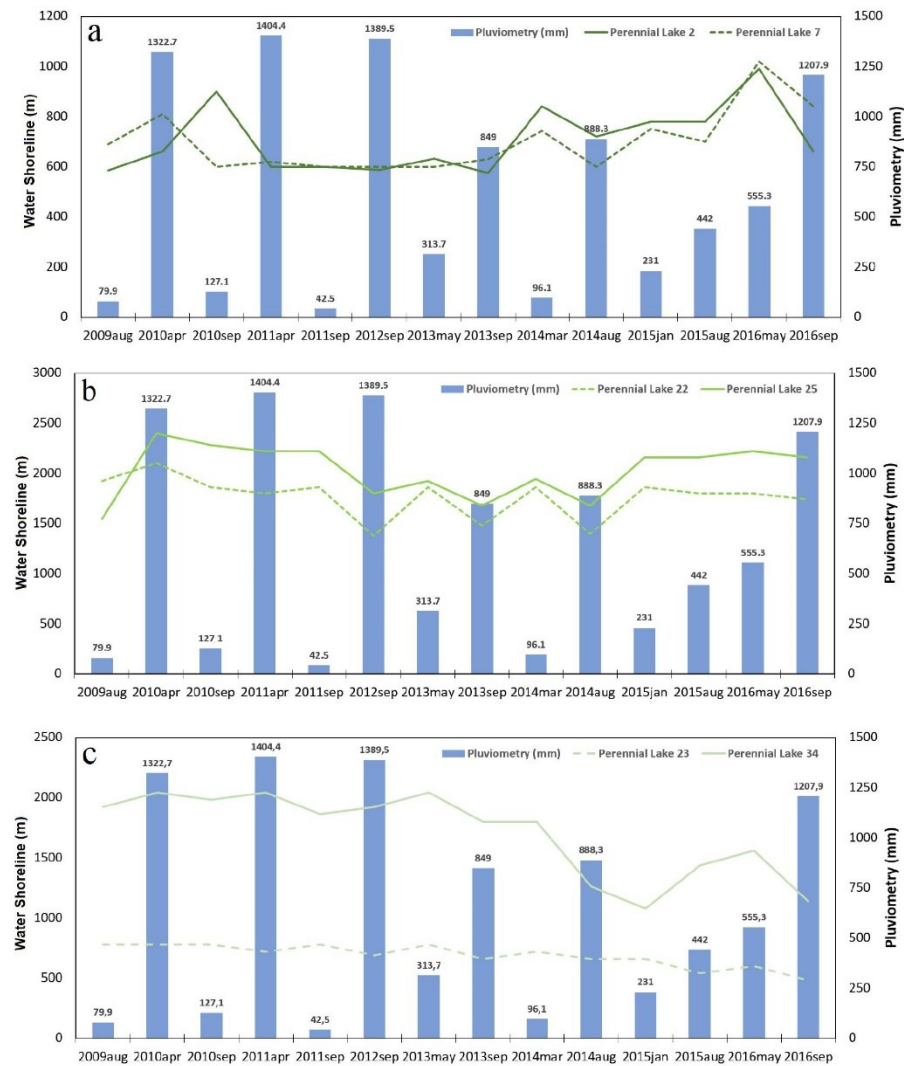


Figure 10. Graphical representation with examples of the behavior of perennial lakes that are constantly connected (a), seasonally disconnected perennial lakes (b), and disconnected perennial lakes (c).

The graph in Figure 10a represents the group of lakes that show no disturbances in their water surface during the transition from a wet cycle to a dry cycle. It illustrates two perennial lakes which, during the cycle transition (September 2012–May 2013), maintained a constant perimeter and, as they entered the dry cycle, showed an increase in their perimeter over the years. This suggests that these lakes are better supplied by groundwater, likely due to high groundwater levels, even during periods of low precipitation. According to [52], a phenomenon that can occur in karst aquifers is late recharge, where water levels in piezometers may rise only after precipitation events, exhibiting slower recharge responses due to the complexity of the aquifer system. This might be happening with the water levels in these lakes. This group of lakes was classified in terms of their hydrological connection as constantly connected perennial lakes and includes 19 lakes that do not rely on rainfall for their permanence.

The graph in Figure 10b represents the group of lakes that experience disturbances in their water surface during the transition from a wet cycle to a dry cycle. It shows two perennial lakes which, during the cycle transition (September 2012–May 2013), exhibit a disturbance in their perimeter, interpreted here as a temporary disconnection. Over the years, their water surface tends to return to its normal behavior, indicating that the lake reconnects with the aquifer and/or the groundwater level is reestablished, maintaining its standard water supply during subsequent years of the low precipitation cycle. This group of lakes was classified in terms of their hydrological connection as seasonally disconnected perennial lakes and includes nine lakes that are less dependent on rainfall for their permanence.

The graph in Figure 10c represents the group of lakes that showed disturbances in their water surface during the transition from a wet cycle to a dry cycle. It illustrates two perennial lakes which, during the cycle transition (September 2012–May 2013), exhibit a disturbance in their perimeter, with noticeable water surface contraction as they enter the low precipitation years. These lakes do not show a return to their normal behavior within the analyzed interval and are interpreted as lakes that are highly influenced by precipitation balance. This group of lakes was classified in terms of their hydrological connection as disconnected perennial lakes and includes nine lakes that are highly dependent on precipitation to determine their permanence.

Another perspective on these karst features could be to interpret them as recharge features, such as detention and infiltration lakes, where water accumulated during wet seasons is slowly drained into groundwater bodies, or as lakes with sinks, a common karst recharge feature in carbonate lakes [3]. Lakes that recharge the aquifer have been studied previously in the study area, such as the Lake Grande studied by [18,53], showing that this perennial lake experienced a contraction of its water surface between 2013 and 2017, and the data collected in this study do not reveal any subsequent increase in its volume.

Finally, three lakes out of the 40 studied perennial lakes did not fit the observed behaviors. An illustrative representation of the behavior of each class of hydrological connection for the lakes can be seen in Figure 11, which shows how the lakes behave during wet and dry periods (or cycles), as well as what happens to these water bodies during the transition from high to low precipitation.

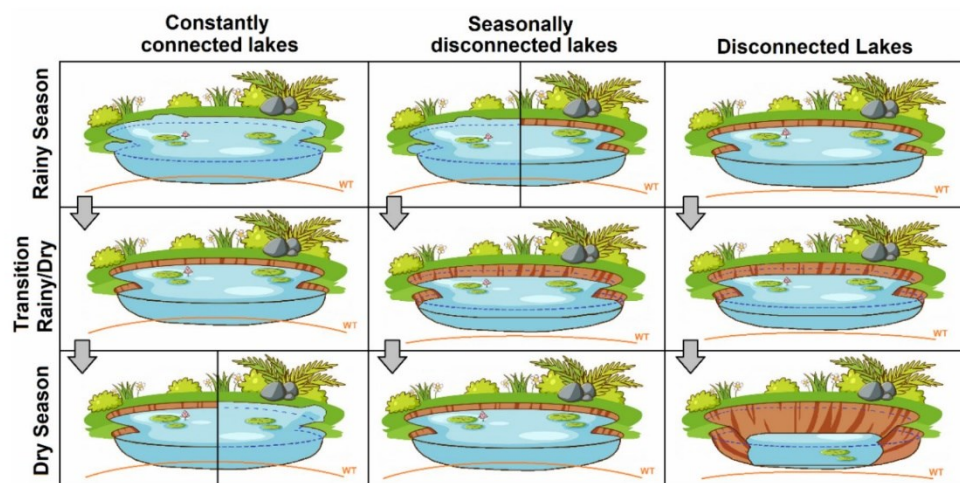


Figure 11. Illustration of the proposed classes of hydrological connection for the analyzed perennial lakes.

4.5.3. Perennial Lakes—Compatibility between Analyses

The two approaches discussed previously yielded distinct results. The first analysis identified which perennial lakes experienced growth, minor contraction, and major contraction in their water surfaces over the years. The second analysis demonstrated the behavior of each perennial lake during the transition from a wet cycle to a dry cycle, defining classifications based on their connection with the aquifer.

To confirm these data, the results from both analyses were correlated with the following premise: lakes that are constantly connected should exhibit larger positive variations in water surface, and if they contract, it should be a minor contraction; disconnected lakes should show larger negative variations in water surface, as a lake that is not connected to the aquifer cannot experience growth in its water surface; and seasonally disconnected lakes may exhibit any behavior of contraction or expansion in their water surface, influenced by the duration of disconnection from the aquifer and the frequency of disconnection during the study period.

Among the 19 lakes defined as constantly connected to the aquifer, eight lakes showed an increase in their water surface over the years, and another eight lakes showed a minor contraction (less than 5%), supporting the hypothesis that lakes connected to the aquifer receive a water supply and therefore exhibit growth or minimal variation in perimeter values. These lakes are excellent examples of water bodies that function as discharge points for the aquifer, with water loss occurring through the evapotranspiration of surface waters. Only three lakes showed unexpected behavior for this connection class, demonstrating a significant contraction in their water surfaces. Thus, the correlation between the two methodologies adopted was accepted at 84%.

Among the nine lakes classified as disconnected from the aquifer, four lakes showed minor contraction (less than 5%), and five lakes demonstrated significant contraction (more than 5%) in their water surfaces over the study period, supporting the hypothesis that lakes disconnected from the aquifer do not receive the necessary water supply and thus show negative variations in their perimeter over time. These lakes have the greatest potential to contribute to aquifer recharge in the region, as indicated by their contraction during low precipitation events. No lake exhibited a behavior that differed from what was expected for this connection class. Therefore, the correlation between the two adopted methods was accepted at 100%.

The nine lakes defined as seasonally disconnected are distributed among the three behaviors, with an equal number of representatives (three lakes) in each type of water surface behavior over the study period. A more detailed study of how many years these lakes were disconnected and how often they disconnected over the years could provide a better understanding of the variation in water surfaces. Nonetheless, it is believed that these lakes alternate between connected and disconnected states with the aquifer.

4.5.4. Intermittent Lakes—Perimetric Variation

Unlike with perennial lakes, analyzing the trend lines and their angular coefficients was not useful for defining the behavior of intermittent lakes. This is because almost all intermittent lakes have negative trend lines, as these lakes were often empty during the study years—a characteristic feature of intermittent lakes, which exhibit seasonal fluctuations in water levels during wet and dry periods [54]. Therefore, another approach was used to determine the connections these lakes might have with the aquifer over the analyzed years, and thus classify them based on similar hydrological behavior.

To define the main types of intermittent lakes, a graphical analysis of the water surface behavior of all these lakes over the entire study period was performed, allowing the grouping of all 89 intermittent lakes into five groups or classes that exhibit similar hydrological behavior in terms of perimeter variation. Two lakes from each hydrological connection class were chosen to represent the behaviors of their respective groups (Figure 12).

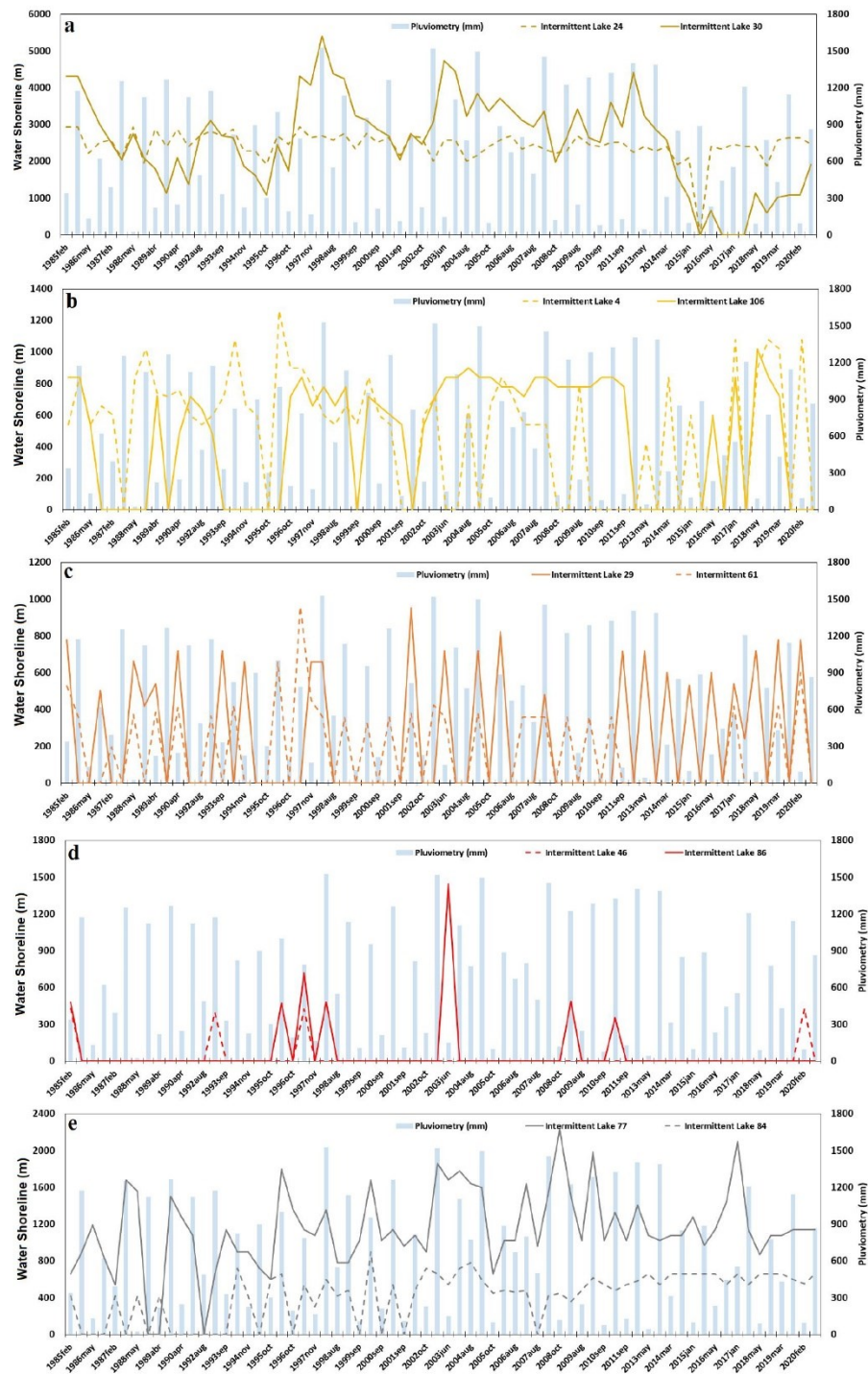


Figure 12. Graphical representation, with examples of the behavior of intermittent lakes that disconnected from the aquifer at some point (a), intermittently connected lakes (b), disconnected intermittent lakes (c), extremely disconnected intermittent lakes (d), and fully connected intermittent lakes (e).

The graph in Figure 12a shows two lakes classified as intermittent lakes, which disconnected from the aquifer at some point, representing the behavior of 13 intermittent lakes in the study area. These lakes were constantly full throughout their hydrological history but disconnected from the aquifer and dried up at a certain point, changing from a typical perennial lake (which does not dry up) to intermittent. Figure 12a illustrates lakes 24 and 30; they were lakes that did not dry up for many years and then dried up in 2015. Lake 24 dried up for only one period (the dry season of 2015), while lake 30 experienced other empty years before showing water again in subsequent years. It is noteworthy that many lakes with this behavior have their last drying event as the point when they could no longer retain water. Interestingly, the lakes grouped here are generally extremely large, with average perimeters close to 2000 m, well above the regional average of 870 m. The Sumidouro Lake is a good example in this class, with an average perimeter of 6504 m observed during the analyzed period and recent years. During the last dry cycle, it dried up completely—a phenomenon that had never occurred in its hydrological history. The behavior of the Sumidouro Lake was also noted in previous studies by [51], as well as [19].

The graph in Figure 12b shows two lakes classified as intermittently connected to the aquifer and represents the behavior of 27 intermittent lakes in the study area. These lakes constantly dry up but periodically stop drying and exhibit behavior similar to that of “perennial lakes,” likely due to temporary connection with the aquifer. Eventually, these lakes disconnect again and dry up, a common behavior of intermittent lakes. In Figure 12b, lake number 4 connects at certain times, such as between 1987 and 2001, drying only once, and then between 2005 and 2008, it again shows permanent water over the years. Lake 106, also represented in the graph, was connected for a long period, from 2002 to 2012. It was observed that the lakes grouped here exhibit temporary connection behavior with the aquifer only during periods of medium to high precipitation, or what we defined earlier as mixed and wet cycles. This suggests that rainfall might also influence the persistence of water in these depressions, potentially due to rising groundwater levels in some areas.

The graph in Figure 12c shows two lakes classified as intermittently disconnected from the aquifer, representing the behavior of 25 intermittent lakes in the study area. These are “classic” intermittent lakes that constantly dry up, exhibiting what is considered the “normal” behavior for intermittent lakes, where they frequently fill and dry out [54], particularly influenced by rainfall during wet periods. These lakes are classified similarly to those described by [4], as lakes over limestone rocks with fluctuating water levels. In Figure 12c, lakes 29 and 61 are shown, demonstrating various periods of fullness and emptiness, as well as short periods of increased water levels due to high precipitation, and times of drying over multiple years, linked to precipitation and low rainfall periods.

The graph in Figure 12d shows two lakes classified as extremely disconnected from the aquifer, representing the behavior of 21 intermittent lakes in the study area. These lakes are constantly dry, with water only appearing during rare high precipitation events. Similar to the previously classified lakes, these also exhibit behavior similar to lakes over limestone rocks, with oscillating water levels, described by [4]. The inability of water to remain in these depressions suggests that these constantly dry lakes are excellent points of local recharge for deep aquifers. In Figure 12d, lakes 46 and 86 are shown, indicating that they are dry for most of the years, showing water only during the wet periods within a hydrological year and soon drying up again.

The graph in Figure 12e shows two lakes classified as intermittent lakes that connected with the aquifer at some point, representing the behavior of three intermittent lakes in the study area. These lakes, historically exhibiting the “normal” intermittent behavior of filling and drying in alternating periods, eventually connected with the aquifer and began exhibiting perennial lake behavior, not drying up during the study period. In Figure 12e, lakes 77 and 84 are shown, demonstrating the exact moment these lakes stopped drying and began maintaining a well-marked water surface over consecutive years. One possible explanation for this behavior is a rise in the groundwater level near these lakes, resulting in persistent water in these karstic depressions.

Finally, it is important to highlight the unique characteristics of the lakes in the region, which are closely related to the distinctive behavior of karst. As previously mentioned, the region is developed over Neoproterozoic limestone, and due to this, it has virtually no primary porosity, with about 3% porosity in its matrix. This is a characteristic exclusive to karsts developed on rocks of this age [15]. Thus, the flow of water in the system primarily occurs in secondary porosities, represented by vertical fractures, and tertiary porosities, which are the various conduits found in carbonate rocks. Many lakes are therefore subject to a complex and irregular flow of water in the karst and fissured-karst aquifers of the region.

5. Conclusions

The analysis of rainfall data identified wet and dry cycles influencing the surface water bodies in the region, as well as impacting groundwater levels, being categorized into five rainfall cycles: dry, from the hydrological years 1984/1985 to 1989/1990; mixed, from 1990/1991 to 1994/1995; another mixed cycle, from 1995/1996 to 2000/2001; wet, from 2001/2002 to 2011/2012; and a new dry cycle, from 2012/2013 to 2018/2019.

The use of remote sensing supervised classification (maximum likelihood classifier) made the detection of water surfaces in Landsat scenes less subjective and more reliable, identifying perennial or intermittent lakes, measuring their respective water surface shore-line variations in a satisfactory manner.

The fluctuation of perennial lake levels over the 36 years (1984–2020), compared with their behavior during rainfall cycle transitions, identified three classes that summarize the influence of groundwater, encompassing 92.5% of a total of 37 lakes: (1) constantly connected lakes, expanding or having minimal contraction in their hydrological history, with precipitation having little direct impact on their water surfaces; (2) seasonally disconnected, showing disturbances in their water surfaces due to changes in rainfall patterns, but eventually expanding their water surfaces even during years of low precipitation; and (3) disconnected lakes, having significant contraction in their water surfaces and continuing to lose water over time, being strongly influenced by rainfall, with behavior evident during transitions between rainfall cycles.

A total of 89 intermittent lakes were categorized into five classes, representing patterns of hydrological connection with the aquifer: (1) disconnected lakes, which were always full and then dried up completely at some point; (2) seasonally connected, which dry up but periodically acquire perennial behavior for some years before drying again; (3) disconnected, showing cyclic water presence influenced by annual rainfall variations; (4) extremely disconnected, which remain constantly dry, except during rare high precipitation events; and (5) fully connected lakes, which were intermittent in the past but later connected with the aquifer and exhibited perennial behavior, not drying up until the final years of this research.

The complexity of analyzing these water systems should be emphasized. Few of the studied water bodies have been analyzed in detail in previous works, but it has been noted that these bodies can play various roles in the local karst, functioning as springs or aquifer discharge at times, and as sinks or aquifer recharge at others. Some of these patterns are also observed in this work.

The importance of studies on surface water bodies such as karst lakes, which have delicate preservation needs, should be highlighted. Various factors can influence the fluctuations in their water components. While this work has elucidated rainfall and groundwater influences, further investigations into other potential influences are recommended, which may be critical for understanding the true behavior of these flooded depressions. An analysis of anthropogenic influences, especially on water use, in the local karst hydrogeological system is the goal for the continuation of this work.

Author Contributions: Conceptualization, W.P.N. and R.d.P.; Methodology, W.P.N., R.d.P. and P.G.; Validation, W.P.N., R.d.P. and P.G.; Investigation, W.P.N. and R.d.P.; Data curation, W.P.N., R.d.P. and P.G.; Writing—original draft, W.P.N. and R.d.P.; Writing—review & editing, W.P.N., R.d.P. and P.G. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding and the APC was funded by the authors.

Data Availability Statement: Data is contained within the article.

Acknowledgments: This work is part of the “Project for adequation and implementation of ground-water monitoring network in areas with karst cavities in the São Francisco River Basin, applied to the pilot area of the EPA Karst in Lagoa Santa, Minas Gerais”. It would not have been possible without the partnerships formed between the Graduate Program in Geology (PPGEOL in Portuguese) and the National Center for Research and Conservation of Caves (CECAV in Portuguese). Special thanks go to the Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel (CAPES in Portuguese) and the Hydrogeological Studies Laboratory (LEHID in Portuguese) of the Federal University of Minas Gerais.

Conflicts of Interest: There are no conflicts of interest to declare.

Appendix A

Table A1. Perennial lakes and their perimeter variation behaviors in each of the rainfall cycles defined in this study, as well as the final behavior after all the analyzed years. Note: Red numbers indicate lake contraction, and blue numbers indicate lake expansion.

Perennial Lakes	Trend Lines					Somatório de Todos Coeficientes Angulares	Behavior after All Analyzed Years			
	Dry (1985–1990)	Mixed (1990–1995)	Misto (1996–2001)	Dry (1990–1995)	Mixed (1990–1995)		Dry (1985–1990)	Mixed (1990–1995)	Lagoas Que Diminuíram Menos de 5%	Dry (1985–1990)
1	$y = -4.8112x + 767.94$	$y = 7x + 758.33$	$y = 813.33$	$y = -4.7678x + 835.29$	$y = -3.2253x + 804.12$	$y = -5.79$	784		x	
2	$y = -11.224x + 773.95$	$y = -24.467x + 718.33$	$y = 7.1x + 580.94$	$y = 5.9556x + 593.59$	$y = 18.231x + 584.77$	$y = -4.39$	669		x	
3	$y = 0.979x + 318.64$	$y = -2x + 335.56$	$y = 0.5x + 330.83$	$y = -0.5676x + 335.95$	$y = -0.4396x + 332.31$	$y = -1.52$	328		x	
5	$y = -30.927x + 718.94$	$y = -2.1667x + 414.17$	$y = 9.3706x + 370.76$	$y = 3.7131x + 454.5$	$y = -1.4286x + 551.54$	$y = -21.42$	493			x
6	$y = -34.213x + 1008.5$	$y = 2.3333x + 660.78$	$y = 16.157x + 578.89$	$y = -1.9628x + 791.54$	$y = 27.615x + 592.08$	$y = 9.92$	767	x		
7	$y = -4.9266x + 897.77$	$y = -19.5x + 904.17$	$y = -0.2797x + 821.82$	$y = -4.8194x + 783.01$	$y = 30.148x + 519.96$	$y = 0.64$	777	x		
8	$y = 76.759x + 1165.2$	$y = -0.9667x + 2025.6$	$y = -94.259x + 2988.7$	$y = 0.3798x + 1957.1$	$y = -5.6044x + 1992.5$	$y = -23.69$	1999		x	
9	$y = -4.5559x + 367.03$	$y = -0.05x + 383.81$	$y = 9.8706x + 316.92$	$y = -1.2663x + 346.97$	$y = -2.2198x + 386.69$	$y = 1.8$	356	x		
10	$y = 116.72x + 1340$	$y = 21.483x + 1905.4$	$y = -16.416x + 1228.1$	$y = -9.6502x + 1043.5$	$y = 5.0165x + 1115.1$	$y = 117.15$	1348	x		
11	$y = -130.97x + 3593.5$	$y = -7.55x + 2486.2$	$y = 297.86x + 1193.1$	$y = -111.64x + 3787.7$	$y = -94.335x + 3046.2$	$y = -46.63$	2751		x	
12	$y = -31.86x + 1221.8$	$y = 34.8x + 809.11$	$y = 29.738x + 649.45$	$y = -10.837x + 1515.8$	$y = 16.78x + 1357.9$	$y = 38.62$	1233	x	x	
13	$y = -90.633x + 2299.4$	$y = -84.4x + 1739.9$	$y = -6.8531x + 1382.2$	$y = 22.118x + 1206.7$	$y = -25.286x + 1776.5$	$y = -184.78$	1501			x
14	$y = -14.35x + 828.61$	$y = -4.7833x + 736.69$	$y = -4.8916x + 676.55$	$y = -4.8328x + 590.19$	$y = 1.978x + 566.54$	$y = -26.88$	639	x	x	x
15	$y = -32.727x + 1042.7$	$y = -16.883x + 785.19$	$y = 7.2727x + 636.06$	$y = -2.87x + 968.1$	$y = -17.319x + 848$	$y = -62.51$	781			x

Table A1. Cont.

Perennial Lakes	Trend Lines					Somatório de Todos Coeficientes Angulares	Behavior after All Analyzed Years			
	Dry (1985–1990)	Mixed (1990–1995)	Misto (1996–2001)	Dry (1985–1990)	Mixed (1990–1995)		Dry (1985–1990)	Mixed (1990–1995)	Lagoas Que Diminuíram Menos de 5%	Dry (1985–1990)
16	$y = -3.3811x + 1028.4$	$y = -24.333x + 1128.2$	$y = -6.979x + 1171.7$	$y = -8.4211x + 1026.7$	$y = 6.5934x + 872.31$	$y = -36.51$	993		x	
17	$y = 8.8112x + 1813.7$	$y = 7x + 1912.7$	$y = -5.2448x + 1990.1$	$y = -14.747x + 2094.4$	$y = 13.516x + 1854.1$	$y = 9.34$	1943	x		
18	$y = -88.259x + 1597.3$	$y = -46.683x + 1487.2$	$y = 11.689x + 1325.6$	$y = -31.451x + 1513.8$	$y = -16.088x + 716.46$	$y = -170.78$	1137		x	
19	$y = -12.657x + 523.94$	$y = 11.133x + 452.44$	$y = -17.063x + 674.24$	$y = -2.3024x + 592.82$	$y = -17.538x + 590.31$	$y = -38.38$	512		x	
20	$y = -42.587x + 921.82$	$y = -15x + 635$	$y = -37.385x + 916$	$y = -8.6357x + 670.48$	$y = -7.9341x + 535.46$	$y = -111.52$	582		x	
21	$y = -10.038x + 962.17$	$y = -8x + 1053.3$	$y = -15.105x + 1058.2$	$y = -1.7337x + 916.47$	$y = -8.6813x + 851.54$	$y = -43.54$	900		x	
22	$y = 10.07x + 1825.5$	$y = -6x + 1964.3$	$y = -3.021x + 1922.6$	$y = -8.1342x + 1969.7$	$y = 10.582x + 1656.8$	$y = 3.6$	1867	x		
23	$y = -3.5664x + 658.18$	$y = -18x + 676.67$	$y = 2.7273x + 627.27$	$y = 8.7307x + 660.39$	$y = -24.044x + 807.46$	$y = -34.15$	657		x	
24	$y = -128.33x + 3915.2$	$y = -50.5x + 3455.9$	$y = -31.36x + 2322.8$	$y = 11.547x + 2305.5$	$y = -39.495x + 2613.5$	$y = -238.14$	2543		x	
25	$y = -5.8322x + 1695.2$	$y = 30.033x + 1696.9$	$y = -20.381x + 2288.4$	$y = -1.6925x + 2155.5$	$y = 4.7967x + 1981.3$	$y = 6.92$	2018	x		
26	$y = -8.3916x + 1064.5$	$y = -41.167x + 1153.1$	$y = -5.4545x + 955.45$	$y = -2.1672x + 870.59$	$y = 6.2857x + 812.08$	$y = -50.88$	909		x	
27	$y = 9.3776x + 761.71$	$y = -8x + 886.67$	$y = -3.7762x + 844.55$	$y = -1.4087x + 769.1$	$y = 11.821x + 676.5$	$y = 8.02$	790	x		
28	$y = -120.27x + 3929.5$	$y = -75.967x + 3536.1$	$y = -41.538x + 4003.5$	$y = -5.4912x + 3892.3$	$y = -121.65x + 4474$	$y = -364.86$	3569		x	
29	$y = -59.451x + 1666.2$	$y = -15.45x + 1142.9$	$y = -9.8182x + 1335.8$	$y = -12.114x + 1332.2$	$y = 9.0989x + 1086.7$	$y = -87.73$	1217		x	
30	$y = 149.38x + 7126.9$	$y = -246.7x + 9129.2$	$y = -19.93x + 8566.5$	$y = -13.167x + 8453.5$	$y = 17.242x + 7661.1$	$y = -113.17$	8112		x	
32	$y = 11.119x + 1763.7$	$y = -4.9667x + 1912.3$	$y = 11.346x + 1717.2$	$y = 6.3158x + 1874.3$	$y = -10.626x + 1800.8$	$y = -13.18$	1821		x	
33	$y = 42.727x + 694.61$	$y = 42.233x + 918.06$	$y = -21.647x + 1247$	$y = -8.8163x + 1109.9$	$y = -9.1099x + 1021.3$	$y = 45.4$	1034	x		
34	$y = 4.6434x + 1790.8$	$y = 1874.3$	$y = -21.818x + 2092.8$	$y = -1.1146x + 1984.9$	$y = -67.082x + 2066.7$	$y = -85.36$	1807		x	
35	$y = 2.8147x + 2329.8$	$y = -175.05x + 3936.5$	$y = -138.74x + 4006.2$	$y = -39.089x + 2999.4$	$y = -218.05x + 3599.2$	$y = -568.11$	2529		x	
36	$y = -47.916x + 3679.6$	$y = 102.75x + 2912.6$	$y = -37.182x + 3562.7$	$y = 43.744x + 2801.7$	$y = -4.4176x + 3381.3$	$y = 56.99$	3349	x		
37	$y = 0.6294x + 787.58$	$y = 6x + 776.67$	$y = -7.1329x + 826.36$	$y = -1.4087x + 769.1$	$y = -14.835x + 786.92$	$y = -16.64$	777		x	

Table A1. Cont.

Perennial Lakes	Trend Lines					Somatório de Todos Coeficientes Angulares	Behavior after All Analyzed Years			
	Dry (1985–1990)	Mixed (1990–1995)	Misto (1996–2001)	Dry (1985–1990)	Mixed (1990–1995)		Dry (1985–1990)	Mixed (1990–1995)	Lagoas Que Diminuíram Menos de 5%	Dry (1985–1990)
38	$y = -4.542x + 853.77$	$y = 5x + 721.67$	$y = -23.497x + 902.73$	$y = -3.0341x + 745.49$	$y = 3.4176x + 669$	$y = -22.65$	757		x	
39	$y = 0.4545x + 2353.9$	$y = -5x + 2499.3$	$y = -0.4196x + 2433.7$	$y = -16.221x + 2547.7$	$y = -41.538x + 2530.2$	$y = -62.71$	2370		x	
40	$y = -28.986x + 1121.7$	$y = -22.333x + 789.44$	$y = -14.021x + 878.64$	$y = -17.666x + 923.71$	$y = -5.0549x + 763.85$	$y = -88.04$	795			x
41	$y = -8.3217x + 427.92$	$y = -0.7167x + 341.47$	$y = -2.5769x + 339.33$	$y = -5.7245x + 391.44$	$y = 8.2198x + 240.69$	$y = -9.11$	332		x	
42	$y = -11.979x + 559.53$	$y = 40.133x + 308.44$	$y = -18.745x + 537.92$	$y = -3.4675x + 439.27$	$y = 2.6978x + 411.58$	$y = 8.65$	444	x		

References


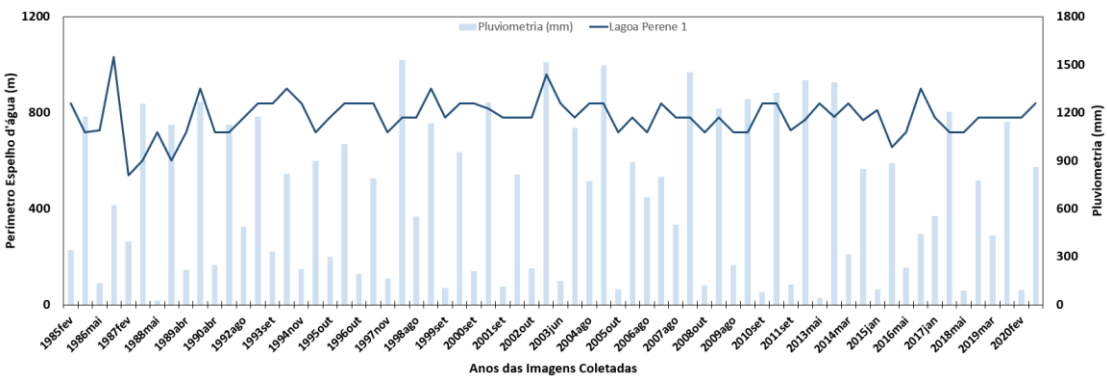
- Feathers, J.; Kipnis, R.; Pilóp, L.; Arroyo-Kalin, M.; Coblenz, D. How old is Luzia? Luminescence dating and stratigraphic integrity at Lapa Vermelha, Lagoa Santa, Brazil. *Geoarchaeology* **2010**, *25*, 395–436. [CrossRef]
- Kohler, H.C. Geomorfologia Cárstica na Região de Lagoa Santa-M.G. Ph.D. Thesis, FFLCH-USP, São Paulo, Brazil, 1989; 113p.
- Ford, D.C.; Williams, P.W. *Karst Geomorphology and Hydrology*, 2nd ed.; John Wiley & Sons: Chichester, UK, 2007; 562p.
- Auler, A. Hydrogeological and Hydrochemical Characterization of the Matozinhos—Pedro Leopoldo Karst, Brazil. Master's Thesis, Western Kentucky University, Bowling Green, KY, USA, 1994; 110p.
- Berbert-Born, M.L.C. Carste de Lagoa Santa—Berço da paleontologia e da espeleologia brasileira. In *Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil*; Schobbenhaus, C., Campos, D.A., Queiroz, E.T., Winge, M., Berbert-born, M.L.C., Eds.; DNP/CPRM—Comissão Brasileira de Sítios Geológicos e Paleobiológicos (SIGEP): Brasília, Brazil, 2002; Volume 1, pp. 415–430.
- Pessoa, P.F.P. Hidrogeologia do Aquífero Cárstico Coberto de Lagoa Santa, MG. Ph.D. Thesis, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brazil, 2005; 375p.
- Galvão, P.; Halihan, T.; Hirata, R. Evaluating karst geotechnical risk in the urbanized area of Sete Lagoas, Minas Gerais, Brazil. *Hydrogeol. J.* **2015**, *23*, 1499–1513. [CrossRef]
- Galvão, P.; Halihan, T.; Hirata, R. The karst permeability scale effect of Sete Lagoas, MG, Brazil. *J. Hydrol.* **2015**, *532*, 149–162. [CrossRef]
- Galvão, P.; Hirata, R.; Cordeiro, A.; Osório, D.B.; Peñaranda, J. Geologic conceptual model of the municipality of Sete Lagoas (MG, Brazil) and the surroundings. *An. Acad. Bras. Ciências* **2016**, *88*, 35–53. [CrossRef]
- Galvão, P.; Hirata, R.; Halihan, T.; Terada, R. Recharge sources and hydrochemical evolution of an urban karst aquifer, Sete Lagoas, MG, Brazil. *Environ. Earth Sci.* **2017**, *76*, 159. [CrossRef]
- De Paula, R.S. Modelo Conceitual de Fluxo dos Aquíferos Pelíticos-carbonáticos da Região da APA Carste de Lagoa Santa, MG. Ph.D. Thesis, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brazil, 2019.
- De Paula, R.S.; Velásquez, L.N.M. Method to complete flow rate data in automatic fluvimetric stations in the karst system of Lagoa Santa area, MG, Brazil. *Braz. J. Geol.* **2020**, *50*, e20190031. [CrossRef]
- De Paula, R.S.; Teixeira, G.M.; Ribeiro, C.G.; Silva, P.H.P.; Silva, T.G.A.; Vieira, L.C.M.; Velásquez, L.N.M. Parâmetros Hidrodinâmicos do Aquífero Cárstico-Fissural da Região de Lagoa Santa, Minas Gerais. *Rev. Água Subterrânea* **2020**, *34*, 221–235. [CrossRef]
- Velásquez, L.N.M.; Andrade, I.B.; Ribeiro, C.G.; Amaral, D.G.P.; Viera, L.C.M.; Cardoso, F.A.; De Paula, R.S.; Silva, P.H.P.; Souza, R.T.; Almeida, S.B.S. 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. 2018. Available online: <https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/biodiversidade/pan/pan-cavernas-do-sao-francisco> (accessed on 1 March 2022).
- Peñaranda Salgado, J.R. Condicionamento Estrutural e Litológico da Porosidade Cárstica da Formação Sete Lagoas, Município de Sete Lagoas (MG). Ph. D. Thesis, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brazil, 2016.
- Piló, L.B. Geomorfologia Cárstica. *Rev. Bras. De Geomorfol.* **2000**, *1*, 88–102. [CrossRef]
- Assunção, P.H.d.S. Análise da Zona de Recarga e sua Interação com o Aquífero Cárstico na Lagoa do Matadouro, Zona Urbana de Sete Lagoas: Uma Abordagem Científica e Ambiental. Bachelor's Thesis, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brazil, 2019.


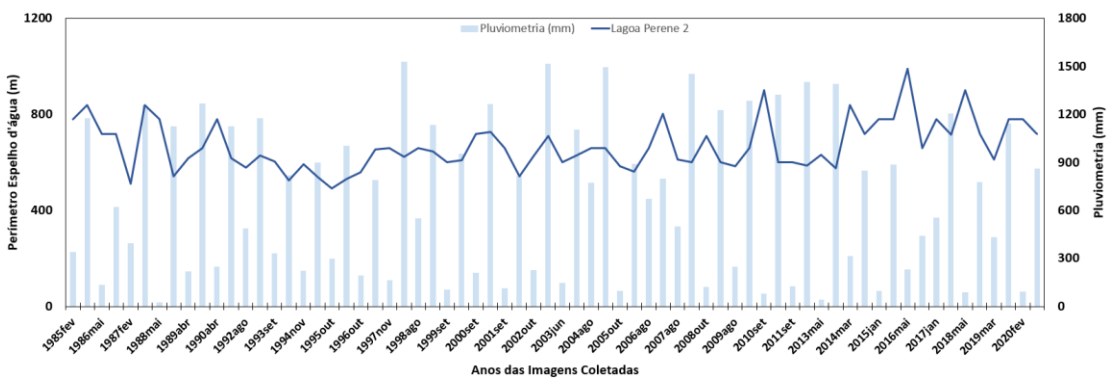
18. Alves, M.; Galvão, P.; Aranha, P. Karst hydrogeological controls and anthropic effects in an urban lake. *J. Hydrol.* **2021**, *593*, 125830. [[CrossRef](#)]
19. Macedo, C.A.R.; Alvarez, G.C. O Desaparecimento da Lagoa do Sumidouro: Análise do Comportamento Hidrogeológico da Lagoa ao Longo dos Últimos 40 Anos. Bachelor's Thesis, Instituto de Geociências (IGC), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Brazil, 2021.
20. Kohler, H.C.; Coutard, J.P.; De Queiroz-Neto, J.P. Excursão a Região Kárstica ao Norte de Belo Horizonte. In *Colóquio Interdisciplinar Franco-Brasileiro: Estudo e Cartografiação de Formações Superficiais e Suas Aplicações em Regiões Tropicais*; (Guia de excursões); USP: São Paulo, Brazil, 1978; Volume II, pp. 20–43.
21. Ribeiro, J.H.; Tuller, M.P.; Filho, A.D.; Padilha, A.V.; Córdoba, C.V. Projeto VIDA: Mapeamento Geológico, Região de Sete Lagoas, Pedro Leopoldo, Matozinhos, Lagoa Santa, Vespasiano, Capim Branco, Prudente de Morais, Confins e Funilândia, Minas Gerais—Relatório Final, Escala 1:50.000, 2nd ed.; Mapas e Anexos (Série Programa Informações Básicas para Gestão Territorial—GATE, Versão Digital e Convenção); CPRM: Belo Horizonte, Brazil, 2003; 54p.
22. Pacheco Neto, W.M.; Meira, G.T.; Pena, M.A.C.; Silva, P.H.P.; Uhlein, G.J.; Velásquez, L.N.M.; De Paula, R.S. Avaliação da conectividade hidráulica entre os aquíferos cársticos na região APA Carste de Lagoa Santa e suas imediações, MG. *Revista Estudos Geológicos—UFPE*, 20 December 2023.
23. Alkmim, F.F.; Martins-Neto, M.A. A bacia intracratônica do São Francisco: Arcabouço estrutural e cenários evolutivos. In *A Bacia do São Francisco Geologia e Recursos Naturais*; Pinto, C.P., Martins-Neto, M.A., Eds.; SBG: Belo Horizonte, Brazil, 2001; pp. 9–30.
24. Dardenne, M.A. Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central. In *Proceedings of the 30 Congresso Brasileiro de Geologia*, Recife, Brazil; 1978; Volume 2, pp. 597–610.
25. Zalán, P.V.; Romeiro-Silva, P.C. Bacia do São Francisco. *Bol. Geociências Petrobrás* **2007**, *15*, 561–571.
26. Noce, C.M.; Teixeira, W.; Machado, N. Geoquímica dos gnaisses TTG e granitoides neoarqueanos do Complexo Belo Horizonte, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. *Rev. Bras. Geociência* **1997**, *27*, 25–32. [[CrossRef](#)]
27. Ribeiro, C.G.; Meireles, C.G.; Lopes, N.H.B.; Arcos, R.E.C. Levantamento Geológico Estrutural Aplicado aos Fluxos dos Aquíferos Cárstico-Fissurais da Região da APA Carste de Lagoa Santa, Minas Gerais. Bachelor's Thesis, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brazil, 2016; 157p.
28. Teixeira, G.M.; Pena, M.A.C.; Silva, P.H.P. Avaliação da Conectividade Hidrogeológica Entre a Região a Sudeste de Sete Lagoas e a APA Carste de Lagoa Santa. MG. Bachelor's Thesis, Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brazil, 2020.
29. Teodoro, M.I.P.; Velásquez, L.N.M.; Fleming, P.M.; De Paula, R.S.; Souza, R.T.; Doi, B.M. Hidrodinâmica do Sistema Aquífero Cárstico Bambuí, com uso de traçadores corantes, na região de Lagoa Santa, Minas Gerais. *Águas Subterrâneas* **2019**, *33*, 392–406. [[CrossRef](#)]
30. Ribeiro, C.G.; Velásquez, L.N.M.; De Paula, R.S.; Meireles, C.G.; LOPES, N.H.B.; Arcos, R.E.C.; Amaral, D.G.P. *Análise dos Fluxos Nos Aquíferos Cárstico-Fissurais da Região da APA Carste de Lagoa Santa, MG*; Universidade Federal de Minas Gerais: Belo Horizonte, MG, Brazil, 2019.
31. Dantas, J.C.M.; Velásquez, L.N.M.; De Paula, R.S. Horizontal and vertical compartmentalization in the fissure and karstic aquifers of the Lagoa Santa Karst Environmental Protection Area and surroundings, Minas Gerais, Brazil. *J. South Am. Earth Sci.* **2023**, *123*, 104219. [[CrossRef](#)]
32. Pessoa, P.F.P.; Mourão, M.A.A. Levantamento hidrogeológico. In *APA Carste de Lagoa Santa—Meio Físico*; IBAMA/CPRM: Belo Horizonte, Brazil, 1998; p. 36.
33. De Paula, R.S.; Velásquez, L.N.M. Balanço hídrico em sistema hidrogeológico cárstico, região de Lagoa Santa, Minas Gerais. *Rev. Água Subterrânea* **2019**, *33*, 119–133. [[CrossRef](#)]
34. Berbert-Born, M.L.C. Geoquímica dos Sedimentos Superficiais da Região Cárstica de Sete Lagoas-Lagoa Santa (MG), e os Indícios de Interferências Antrópicas. Master's Thesis, Department of Geology, Universidade Federal de Ouro Preto, , Ouro Preto, Brazil, 1998.
35. Pacheco Neto, W.M.; De Paula, R.S.; Velásquez, L.N.M.; Meira, G.; Pena, M.A.C. Characterization and classification of lakes based on geospatial analyses in the karst hydrogeological system of the Bambuí group, Lagoa Santa, Minas Gerais, Brazil. *J. South Am. Earth Sci.* **2023**, *132*, 104662. [[CrossRef](#)]
36. Meneses, I.C.R.R.C. Análise Geossistêmica na Área de Proteção Ambiental (APA) Carste de Lagoa Santa, MG. Master's Thesis, Pontifical Catholic University of Minas Gerais, Belo Horizonte, Brazil, 2003; 187p.
37. GRASS PROJECT. Geographic Resource Analysis Support System. 2013. Available online: <http://grass.osgeo.org.com> (accessed on 1 July 2021).
38. Yamamoto, J.K.; Landim, P.M.B. *Geoestatística: Conceitos e Aplicações*; Oficina de Textos: São Paulo, Brazil, 2015; 215p.
39. Starcy, J.R.; Hardison, C. *Double-Mass Curves*; Geological Water Supply Paper; United States Geological Survey: Reston, VA, USA, 1996; Volume 1541-B.
40. Tucci, C.E.M. *Hidrologia: Ciência e Aplicação*, 2nd ed.; Editora da UFRGS/ABRH: Porto Alegre, Brazil, 2001; 943p.
41. Thiessen, A.H. Precipitation averages for large areas. *Mon. Weather. Rev.* **1911**, *39*, 1082–1089. [[CrossRef](#)]
42. Pettitt, A.N. A non-parametric approach to the change point problem. *J. Appl. Stat.* **1979**, *8*, 126–135. [[CrossRef](#)]
43. Mann, H.B. Nonparametric tests against trend. *Econometrica* **1945**, *13*, 245–259. [[CrossRef](#)]
44. Kendall, M.G. *Rank Correlation Methods*; Charles Griffin: London, UK, 1975; 272p.


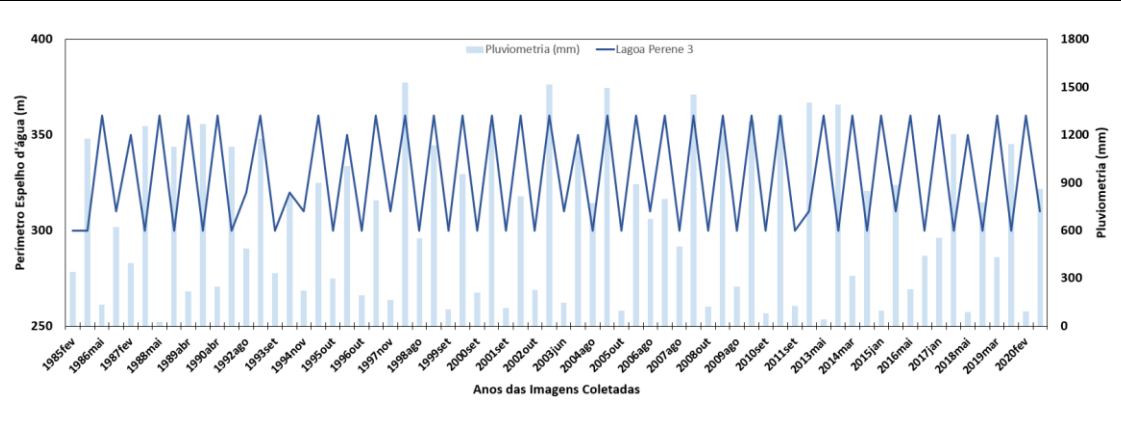
45. Bartels, R.J.; Black, A.W.; Keim, B.D. Trends in precipitation days in the United States. *Int. J. Climatol.* **2019**, *40*, 1038–1048. [CrossRef]
46. Magalhães, M.N.; De Lima, A.C.P. *Noções de Probabilidade e Estatística*; Editora da Universidade de São Paulo: São Paulo, Brazil, 2002; Volume 5.
47. USGS—United States Geological Survey. 2021. Landsat Data Continuity Mission. U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey. 2012–3066. Available online: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (accessed on 2 November 2021).
48. Meneses, P.R.; Almeida, T. Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto. Universidade de Brasília, Brasília, Brazil. 2012, pp. 121–160. Available online: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5550408/mod_resource/content/3/LivroSensoriamentoRemoto.pdf (accessed on 22 May 2023).
49. Andrade, A.C.; Francisco, C.N.; Almeida, C.M. Desempenho de Classificadores Paramétrico e Não Paramétrico na Classificação da Fisionomia Vegetal. *Rev. Bras. Cartogr.* **2014**, *66*, 349–363. [CrossRef]
50. Amaral, D.G.P. Análise do Comportamento e Desempenho Hídrico das Depressões Cársticas da Região da APA Carste Lagoa Santa (MG). Master's Thesis, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brazil, 2018.
51. Tavares, I.C.P. Caracterização Hidrológica da Bacia do Córrego Samambaia, Região da APA Carste de Lagoa Santa—MG. Master's Thesis, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brazil, 2020.
52. Legrand, H.E.; Llamoreaux, P.E. Hydrogeology and hydrology of karst. In *Hydrogeology of Karstic Terrains*; Burger, A., Dubertret, L., Eds.; IAH: Paris, France, 1975.
53. Pizani, F.M.C.; Pereira, M.P.R.; Da Silva, M.M.; Elmiro, M.A.T. Técnicas de sensoriamento remoto para análise temporal do espelho d'água da Lagoa Grande na cidade de Sete Lagoas—MG. *Rev. GEOgrafias* **2021**, *17*, 81–102. [CrossRef]
54. Likens, G.E. (Ed.) *Lake Ecosystem Ecology: A Global Perspective*; Academic Press: Cambridge, MA, USA, 2010.

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.


APÊNDICE D Catálogo contendo as lagoas perenes e intermitentes contidas na janela cárstica de Lagoa Santa e suas proximidades.

Catálogo de lagoas da região de Lagoa Santa – Minas Gerais				
Identificação:	1	Comportamento:	Perene	
Nome Popular:	-	Município:	Matozinhos	
Coordenadas:		Perímetro Médio:	Altimetria:	
590864	7832042	784 m	877 m	
Unidade Geológica:	Complexo Belo Horizonte			
Sobre Influência de:	Lineamentos Estruturais	Dolina	Uvala	Maciço Carbonático
	Não	Não	Não	Não
Imagem – Google Satellite (2025)			Informações Poços	
			Identificação	Distância
			-	-
			-	-
			-	-
			-	-
			-	-
Variação Perimétrica x Médias Pluviométricas				
				

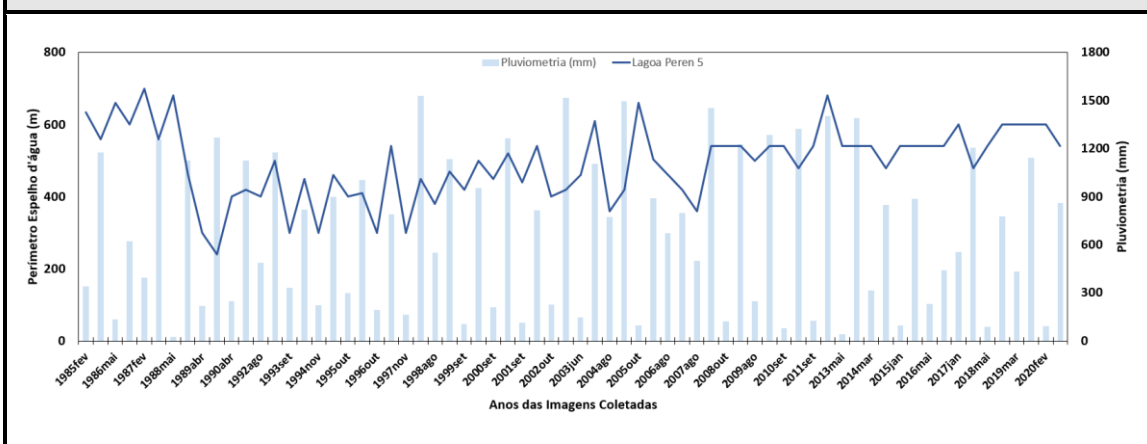
Catálogo de lagoas da região de Lagoa Santa – Minas Gerais				
Identificação:	2	Comportamento:	Perene	
Nome Popular:	-	Município:	São José da Lapa	
Coordenadas:		Perímetro Médio:	Altimetria:	
606864	7822471	699 m	703 m	
Unidade Geológica:	Fm. Sete Lagoas – Mb. Pedro Leopoldo			
Sobre Influência de:	Lineamentos Estruturais	Dolina	Uvala	Maciço Carbonático
	Sim	Sim	Não	Não
Imagem – Google Satellite (2025)			Informações Poços	
			Identificação	Distância
			05316-2007	910 m
			03464-PT	1100 m
			4726-2008	420 m
			11538-2009	610 m
			-	-
Variação Perimétrica x Médias Pluviométricas				
				

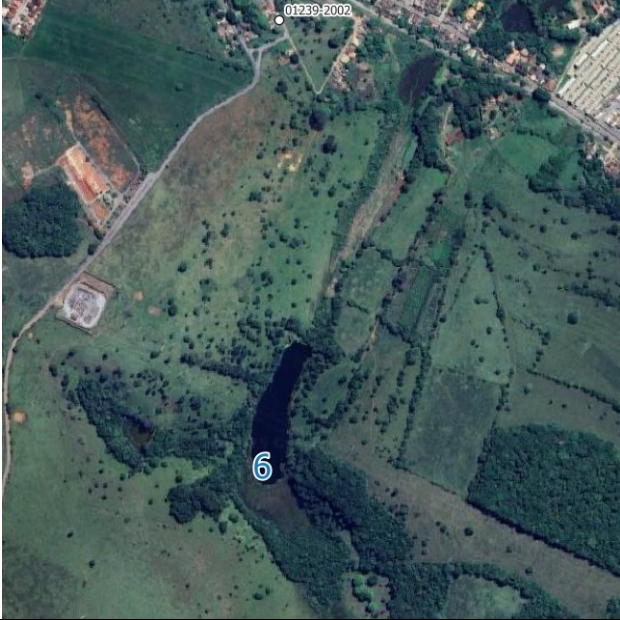
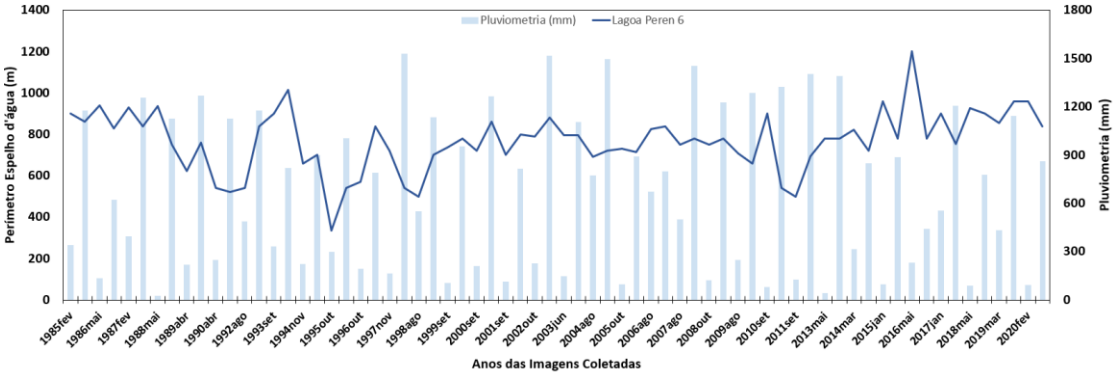
Catálogo de lagoas da região de Lagoa Santa – Minas Gerais				
Identificação:	3	Comportamento:	Perene	
Nome Popular:	-	Município:	Pedro Leopoldo	
Coordenadas:		Perímetro Médio:	Altimetria:	
596051	7831535	328 m	784 m	
Unidade Geológica:	Complexo Belo Horizonte			
Sobre Influência de:	Lineamentos Estruturais	Dolina	Uvala	Maciço Carbonático
	Não	Não	Não	Não
Imagem – Google Satellite (2025)			Informações Poços	
			Identificação	Distância
			-	-
			-	-
			-	-
			-	-
			-	-
Variação Perimétrica x Médias Pluviométricas				
				


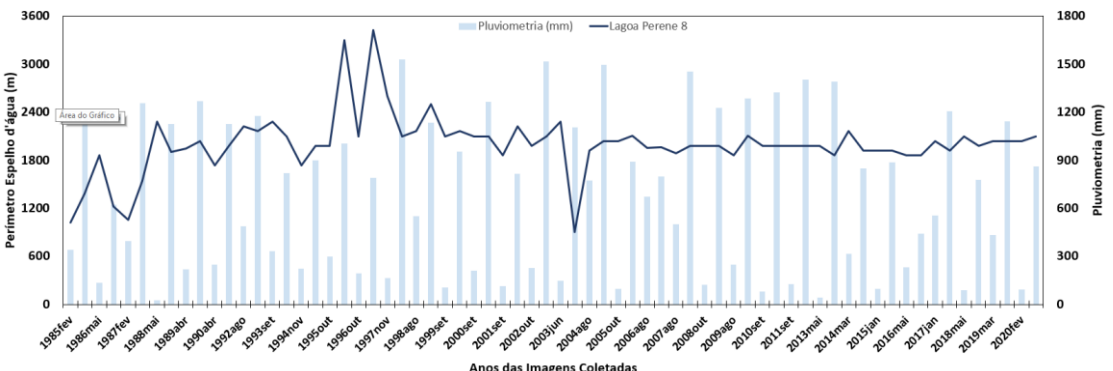
Catálogo de lagoas da região de Lagoa Santa – Minas Gerais				
Identificação:	5	Comportamento:	Perene	
Nome Popular:	-	Município:	Capim Branco	
Coordenadas:		Perímetro Médio:	Altimetria:	
591492	7839448	493 m	789 m	
Unidade Geológica:		Fm. Sete Lagoas – Mb. Lagoa Santa		
Sobre Influência de:	Lineamentos Estruturais	Dolina	Uvala	Maciço Carbonático
	Sim	Não	Não	Não


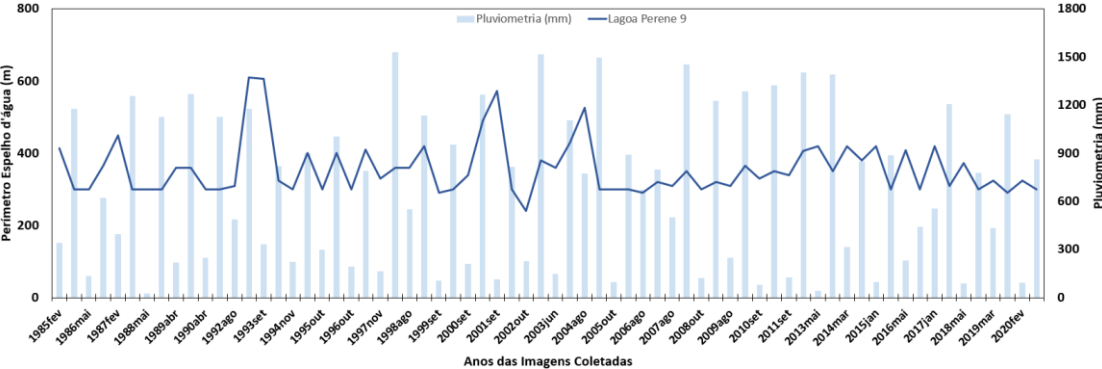
Imagem – Google Satellite (2025)		Informações Poços	
		Identificação	Distância
		C-01-SCB	1100
		C-09-SLS	1100
		-	-
		-	-
		-	-

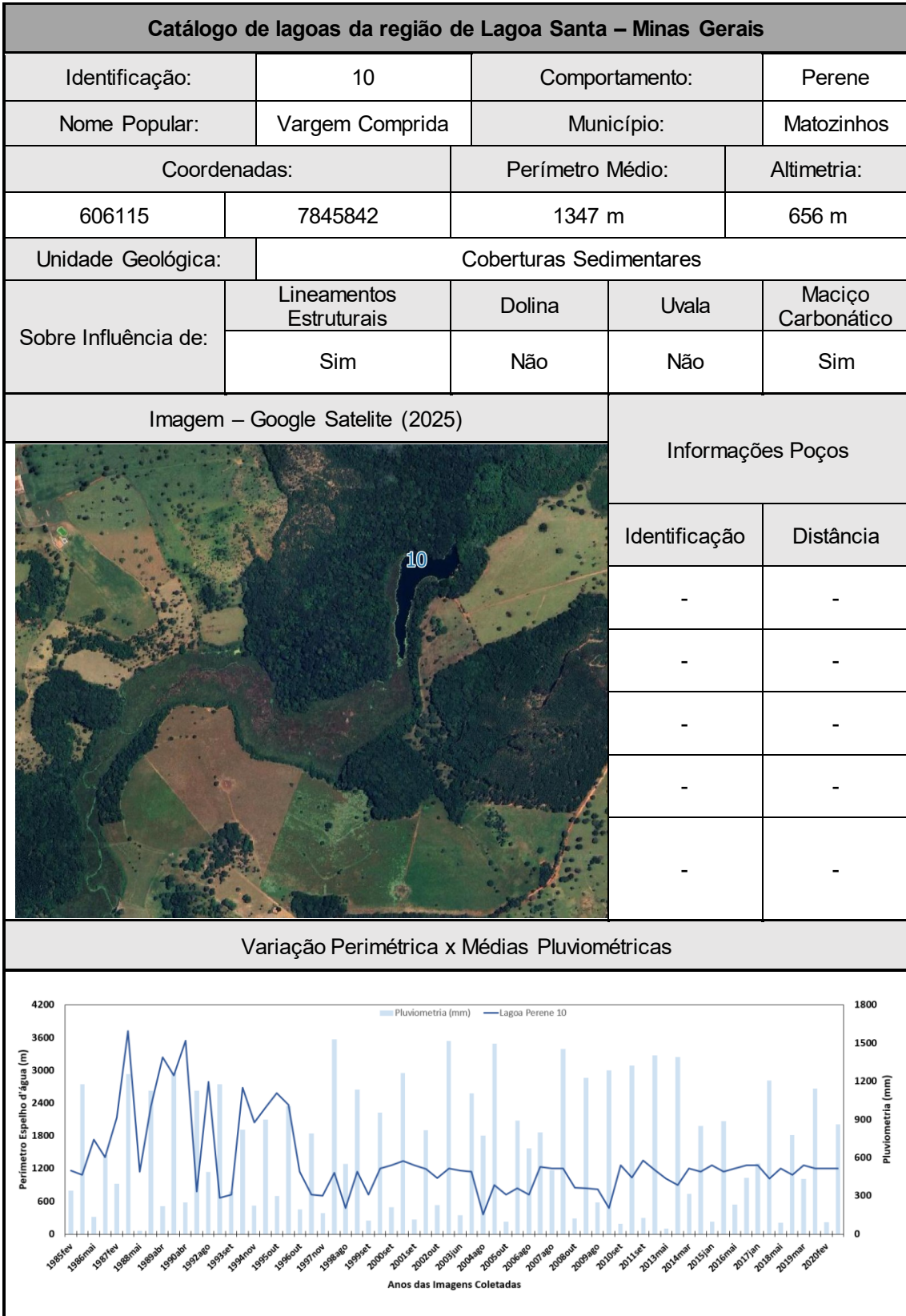
Varição Perimétrica x Médias Pluviométricas

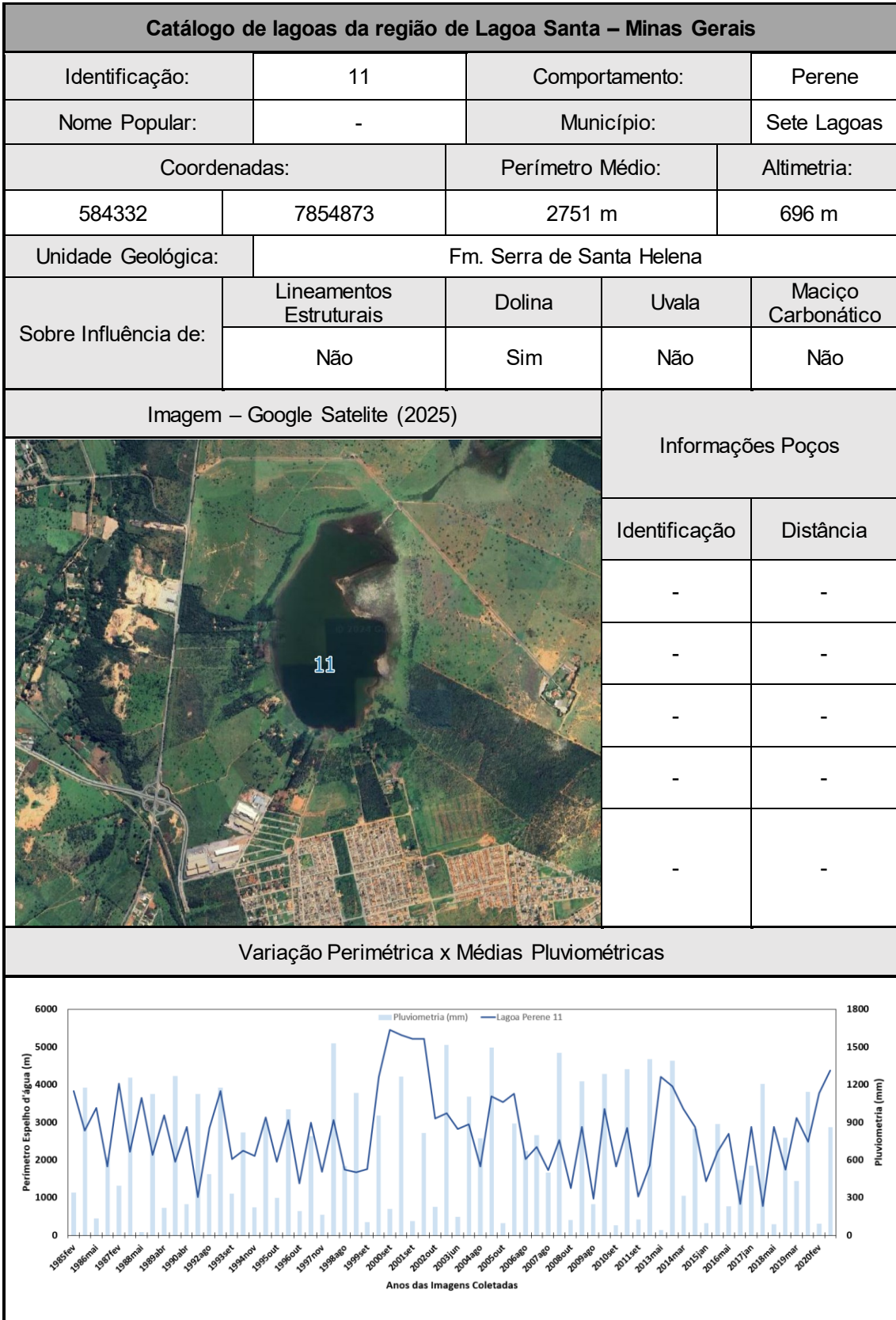


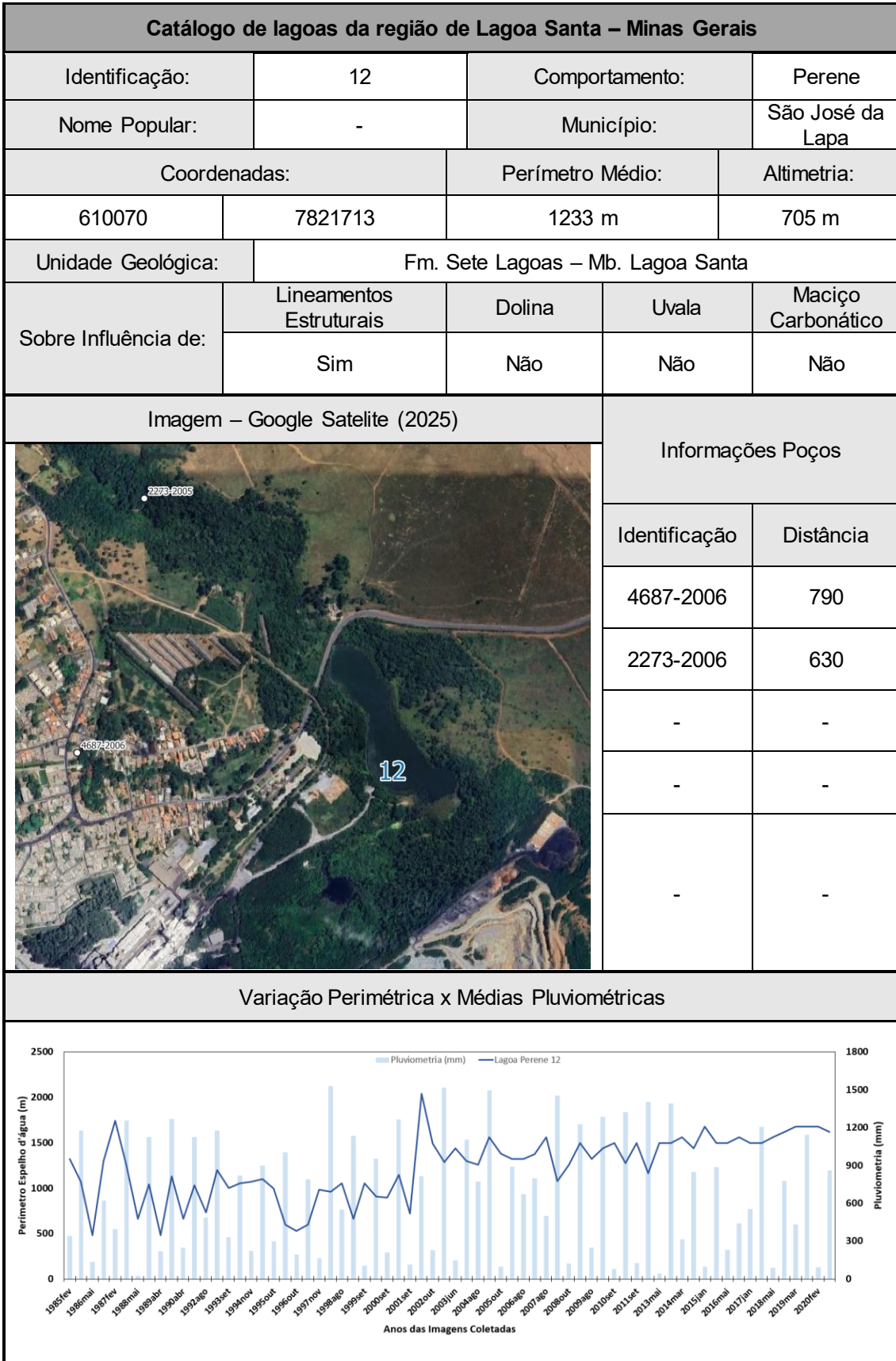
Catálogo de lagoas da região de Lagoa Santa – Minas Gerais				
Identificação:	6	Comportamento:	Perene	
Nome Popular:	-	Município:	Matozinhos	
Coordenadas:		Perímetro Médio:	Altimetria:	
594135	7836968	767 m	762 m	
Unidade Geológica:	Fm. Sete Lagoas – Mb. Pedro Leopoldo			
Sobre Influência de:	Lineamentos Estruturais	Dolina	Uvala	Maciço Carbonático
	Sim	Sim	Não	Não
Imagem – Google Satellite (2025)			Informações Poços	
			Identificação	Distância
			01239-2002	630
			02289-2009	1050
			02288-2009	1025
			C-04-SM	1100
			-	-
Variação Perimétrica x Médias Pluviométricas				
				

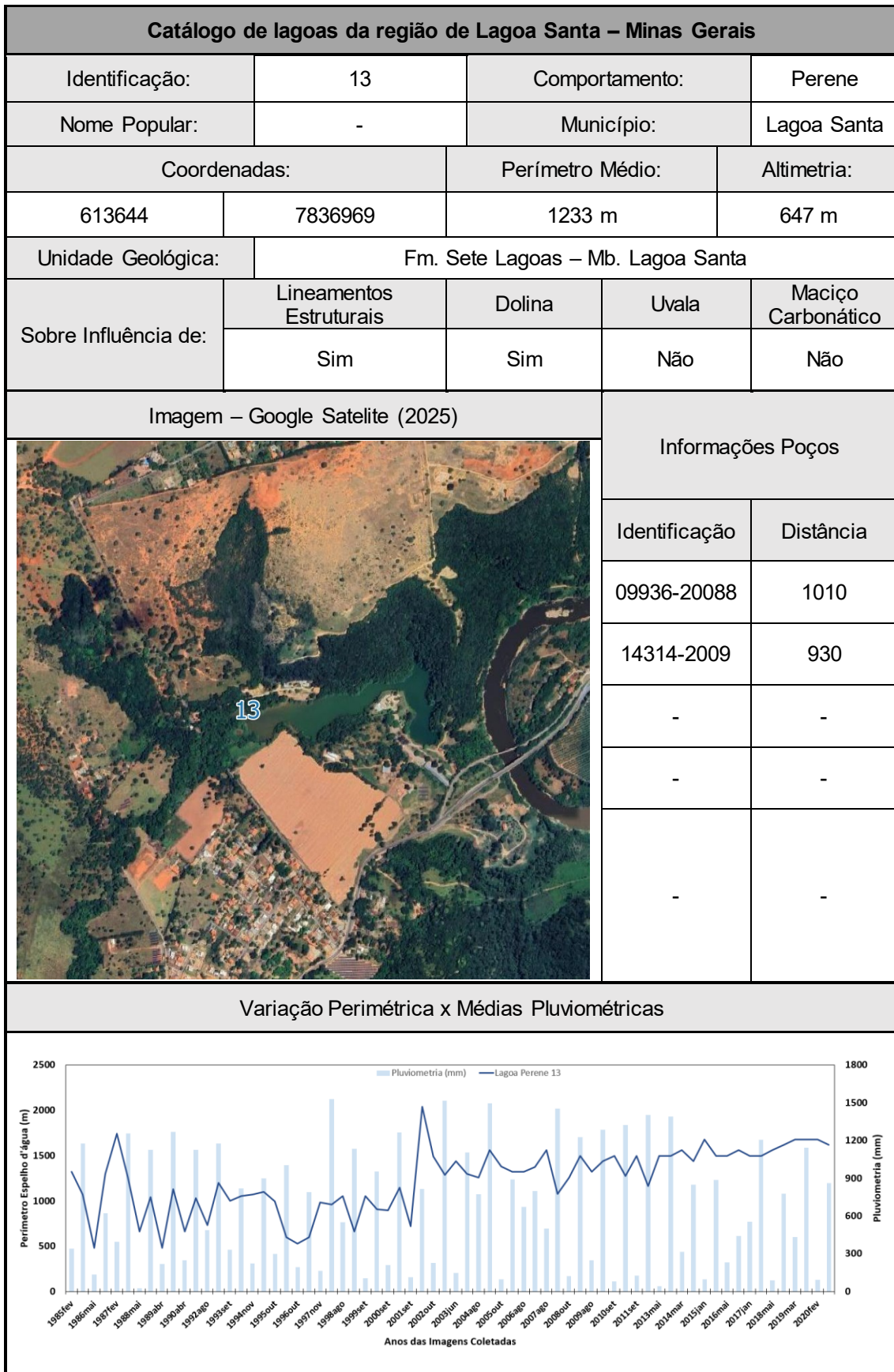
Catálogo de lagoas da região de Lagoa Santa – Minas Gerais				
Identificação:	8	Comportamento:	Perene	
Nome Popular:	Lagoa Bonita	Município:	Prudente de Moraes	
Coordenadas:		Perímetro Médio:	Altimetria:	
596153	7841322	1999 m	671 m	
Unidade Geológica:	Fm. Sete Lagoas – Mb. Lagoa Santa			
Sobre Influência de:	Lineamentos Estruturais	Dolina	Uvala	Maciço Carbonático
	Sim	Não	Sim	Sim
Imagem – Google Satellite (2025)			Informações Poços	
			Identificação	Distância
			03243-PT	890
			01361-2009	540
			-	-
			-	-
			-	-
Variação Perimétrica x Médias Pluviométricas				
				

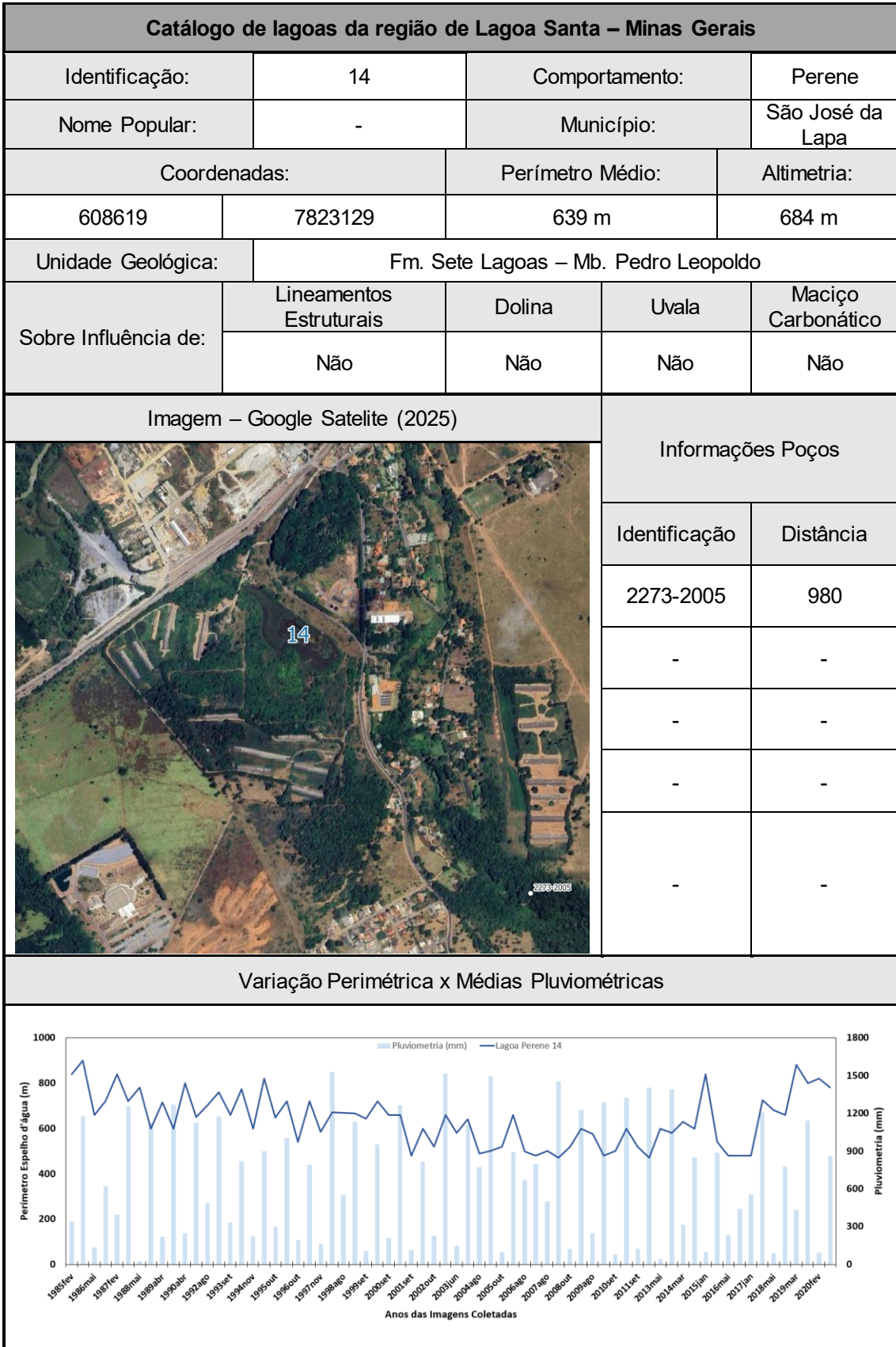
Catálogo de lagoas da região de Lagoa Santa – Minas Gerais				
Identificação:	9	Comportamento:	Perene	
Nome Popular:	-	Município:	Sete Lagoas	
Coordenadas:		Perímetro Médio:	Altimetria:	
588963	7851111	356 m	681 m	
Unidade Geológica:	Fm. Sete Lagoas – Mb. Lagoa Santa			
Sobre Influência de:	Lineamentos Estruturais	Dolina	Uvala	Maciço Carbonático
	Não	Sim	Não	Não
Imagem – Google Satellite (2025)			Informações Poços	
			Identificação	Distância
			03250-PT	510
			3100003250	520
			-	-
			-	-
			-	-
Variação Perimétrica x Médias Pluviométricas				
				

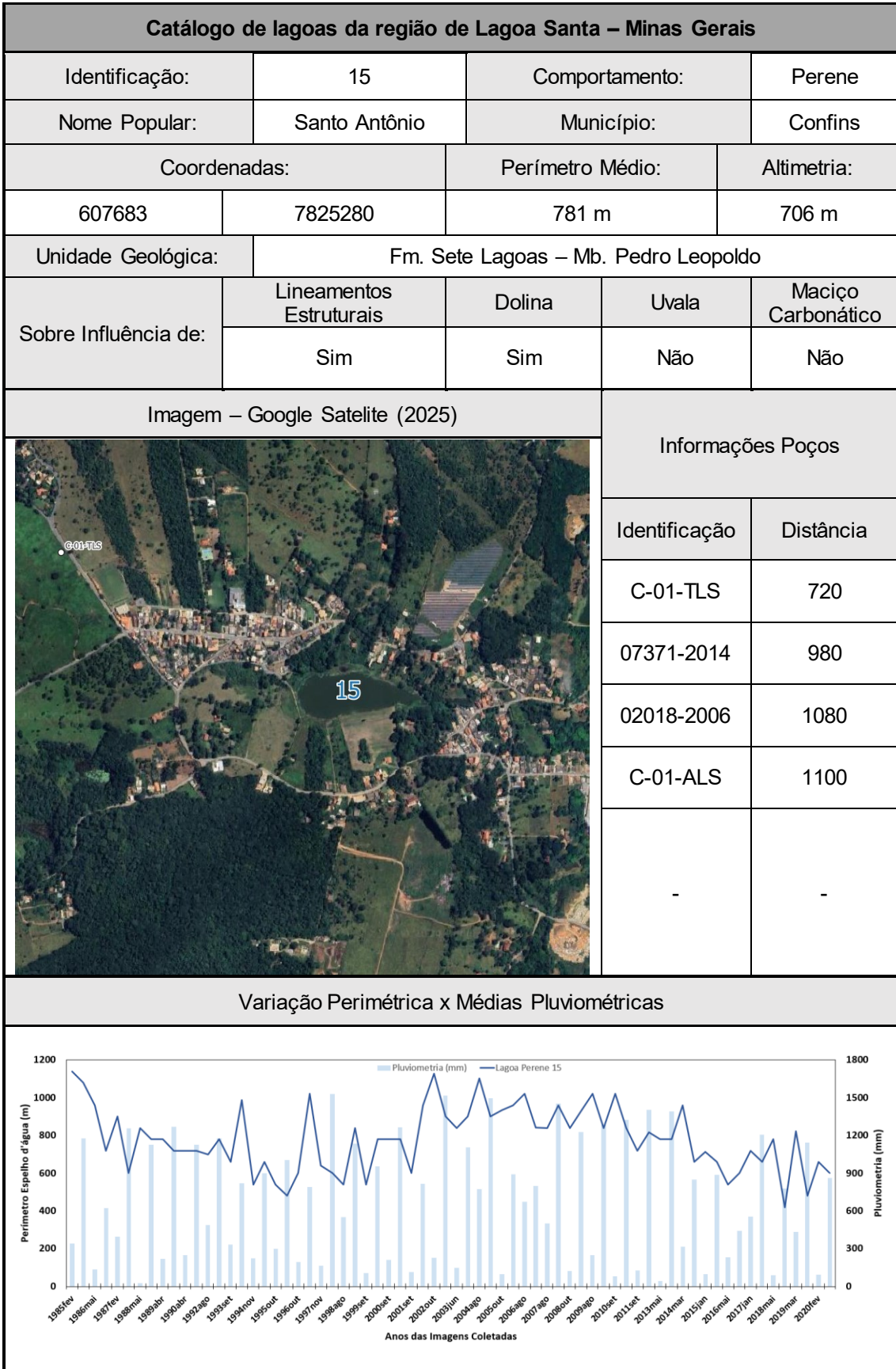


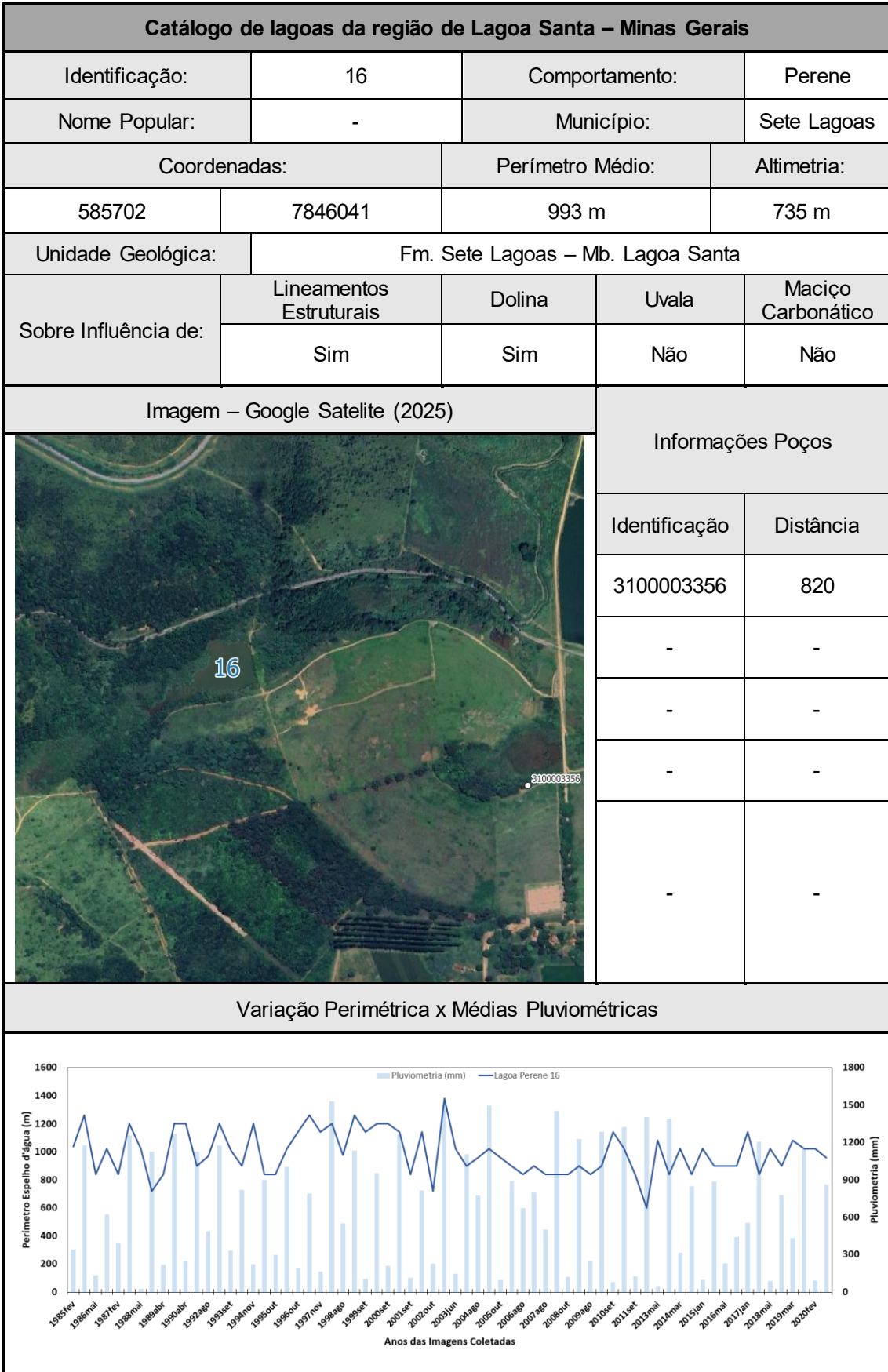


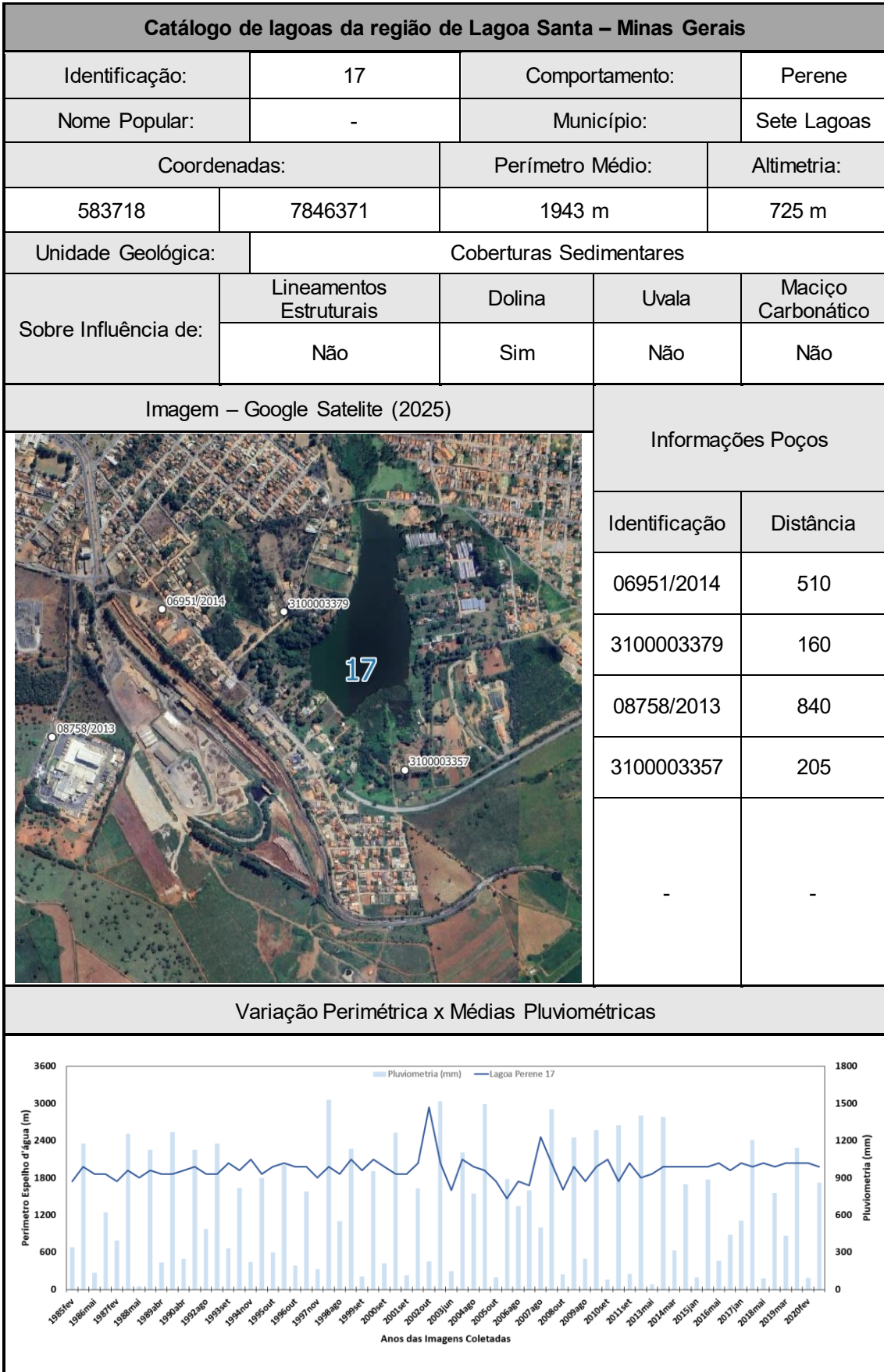


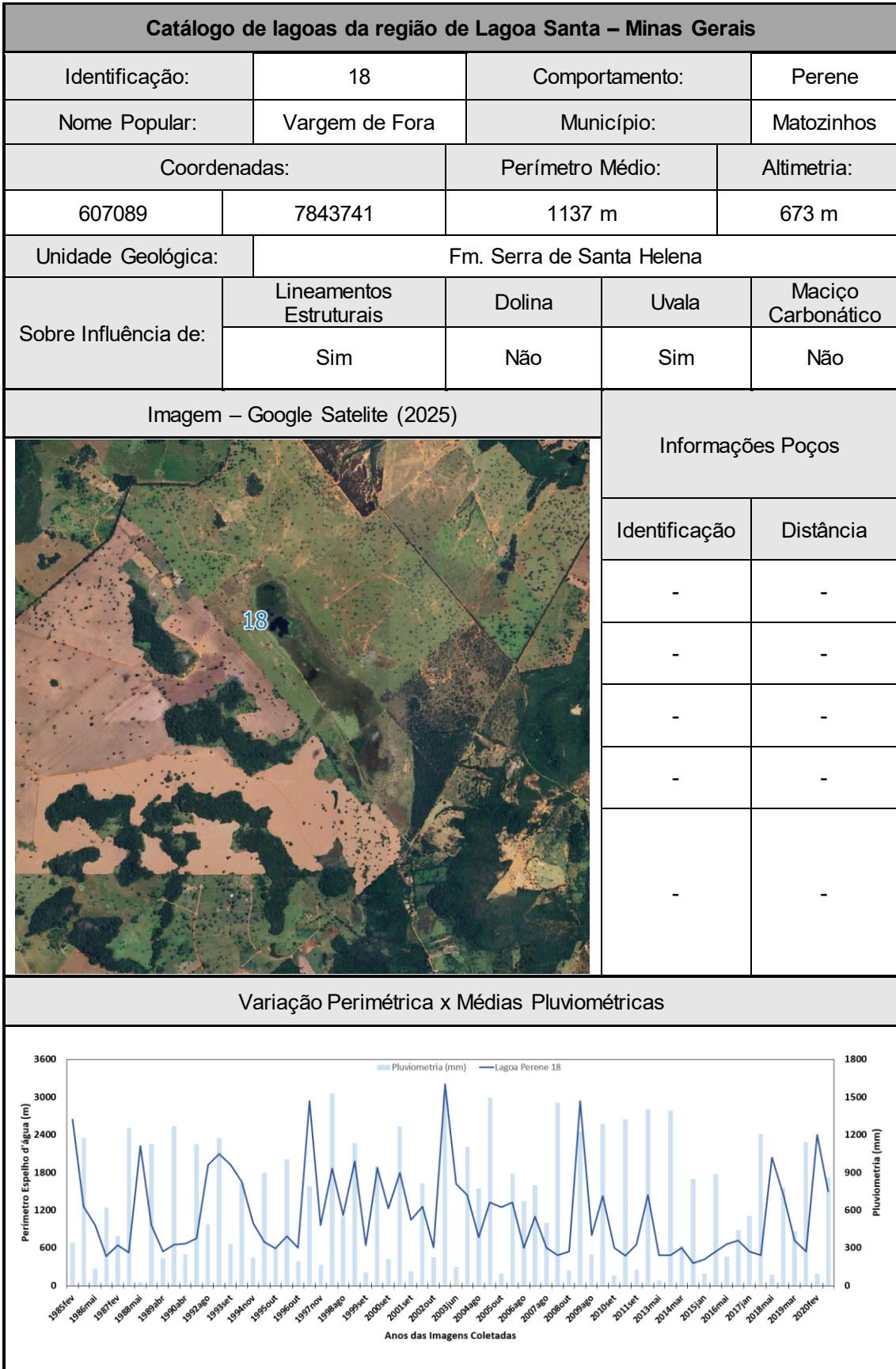


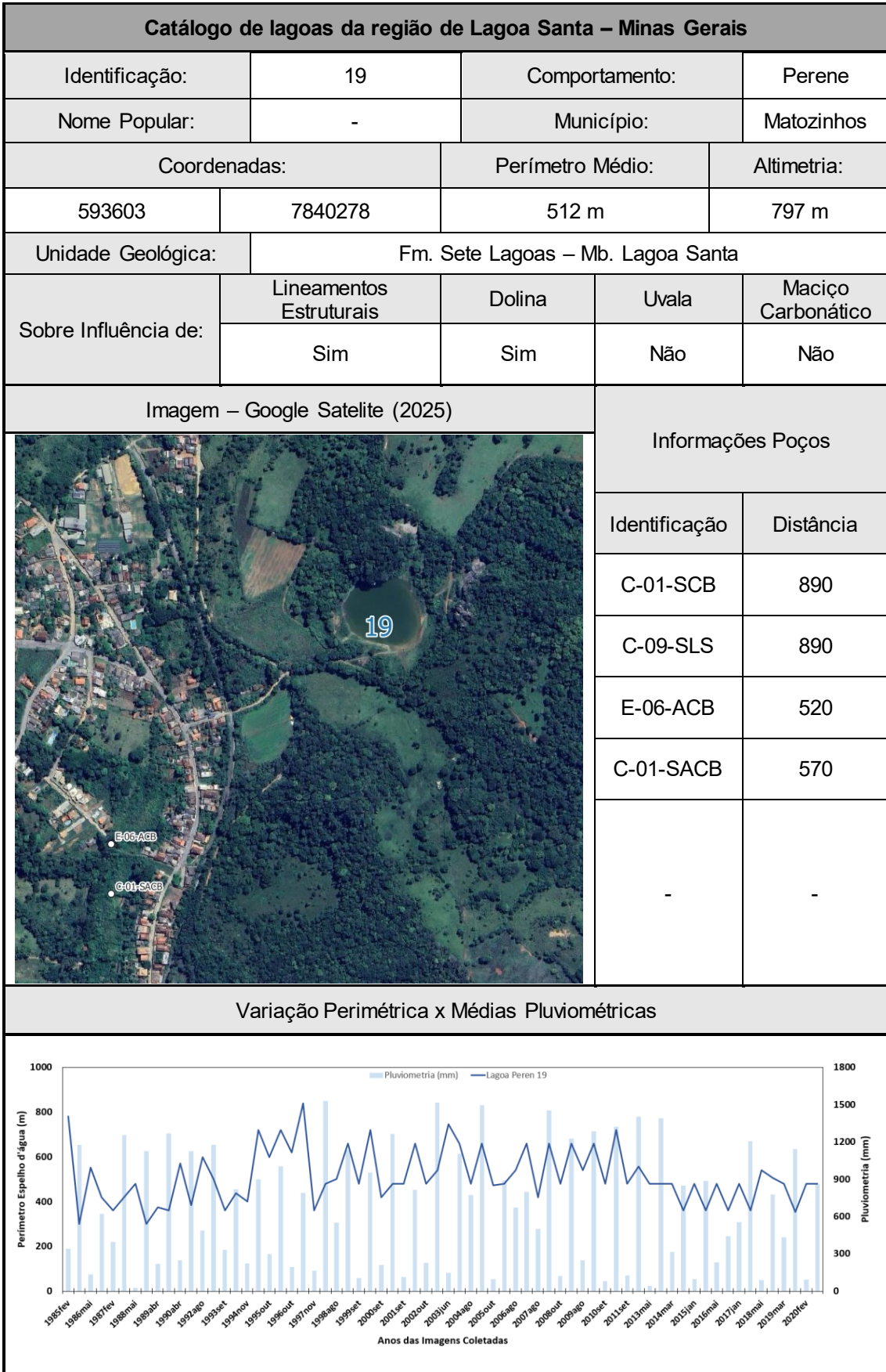


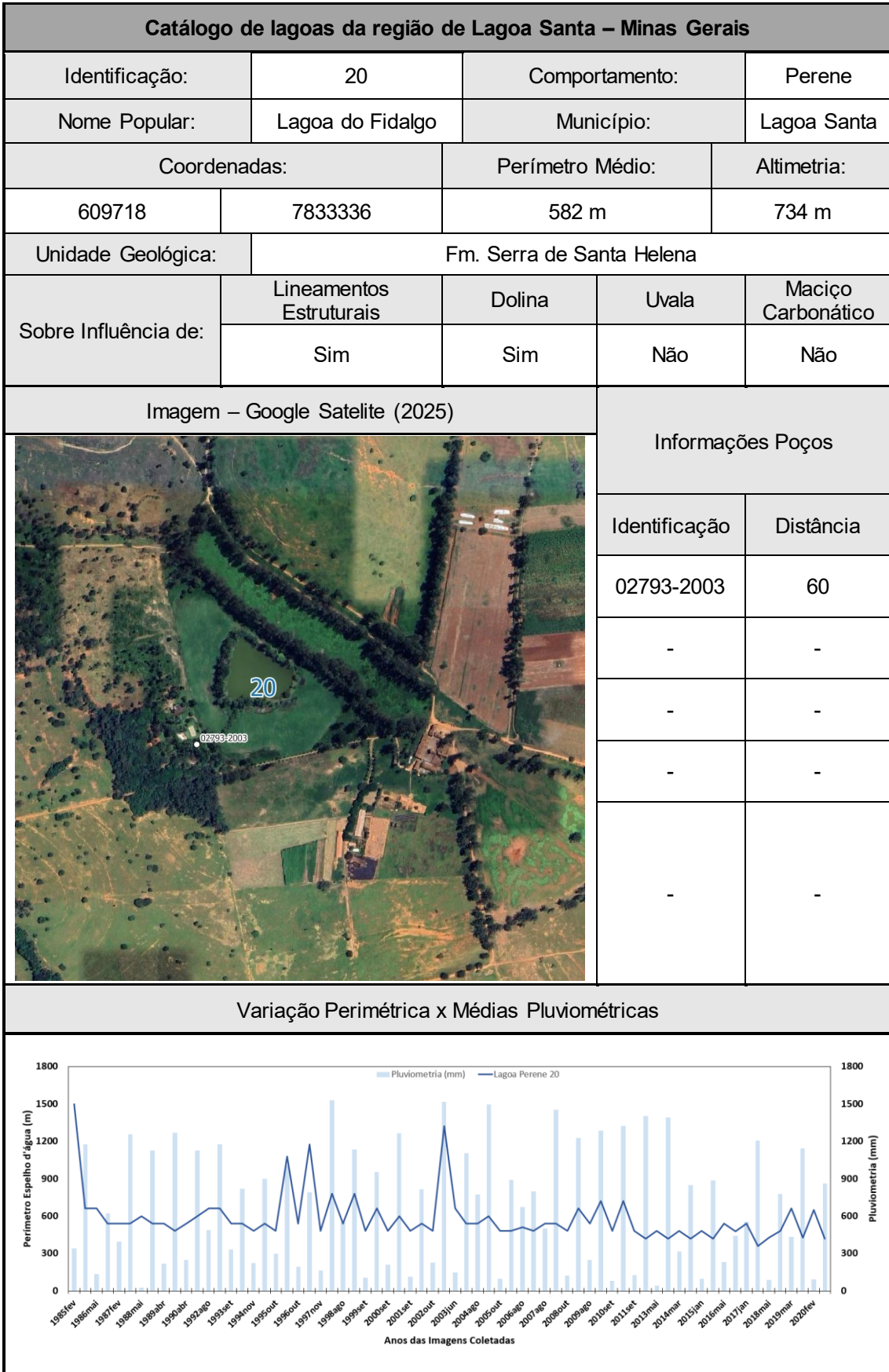


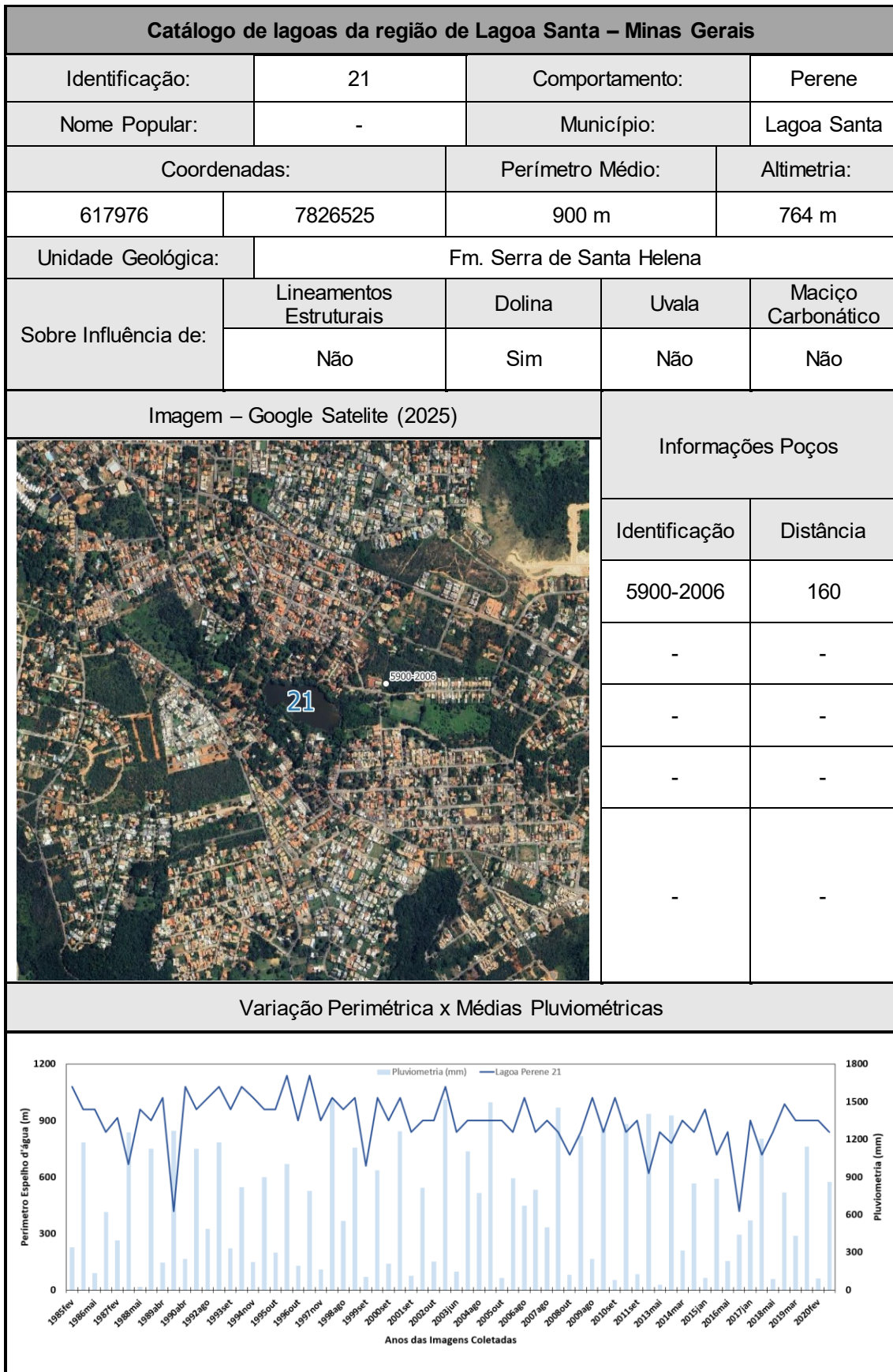



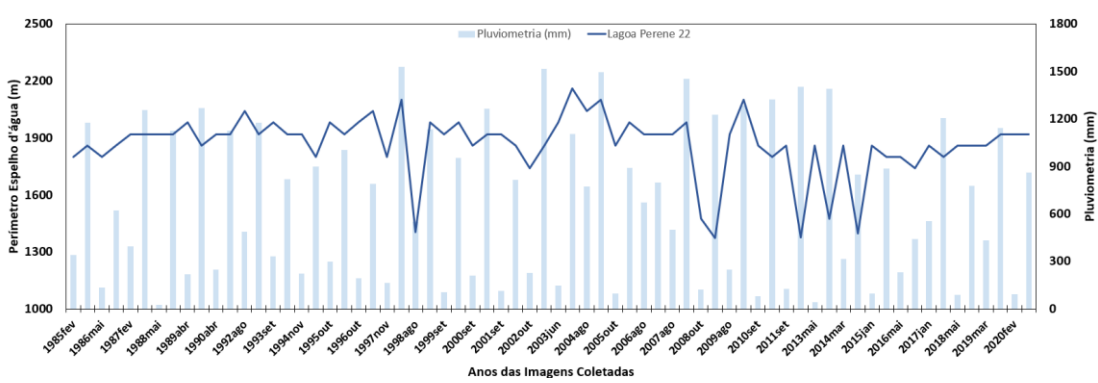


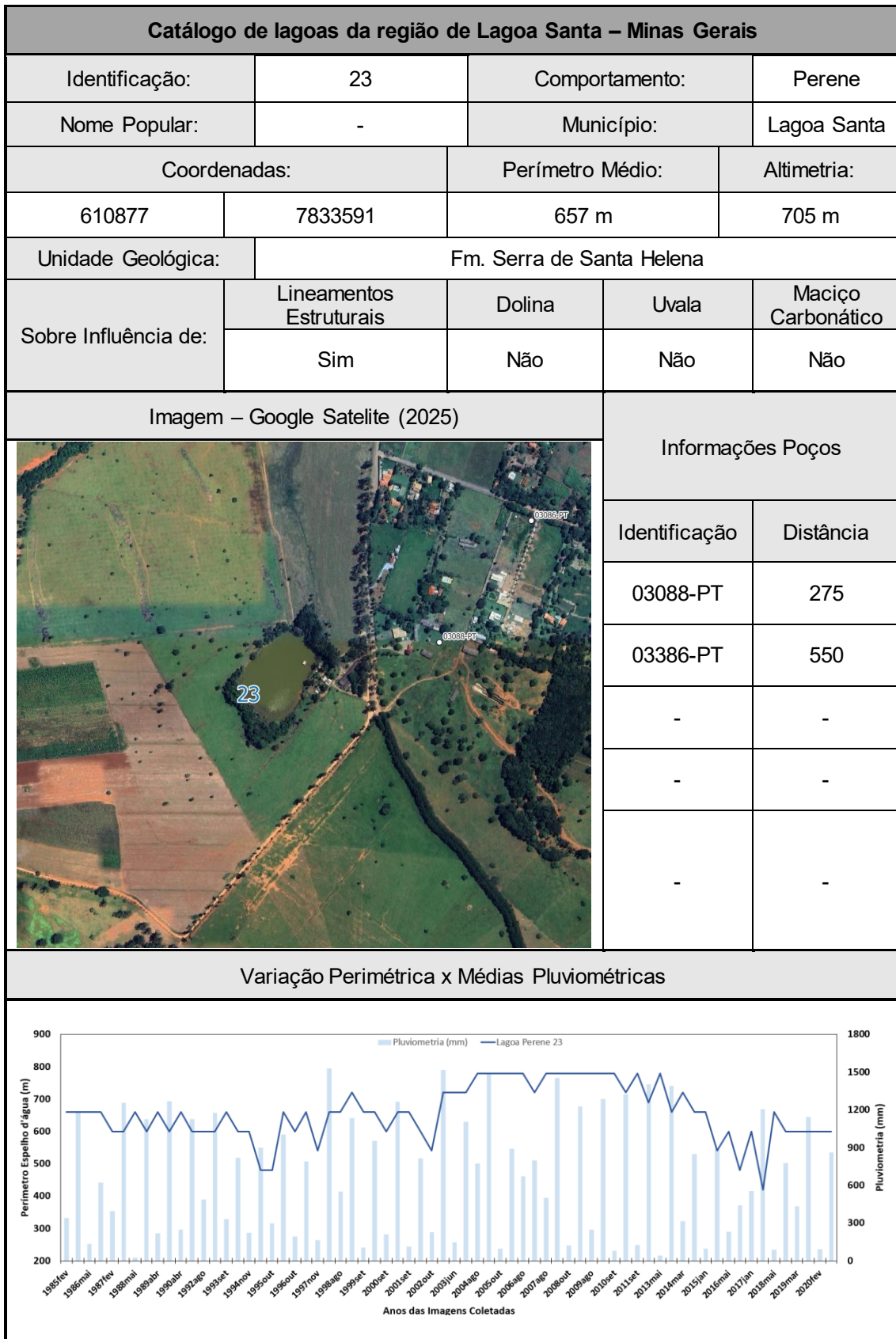


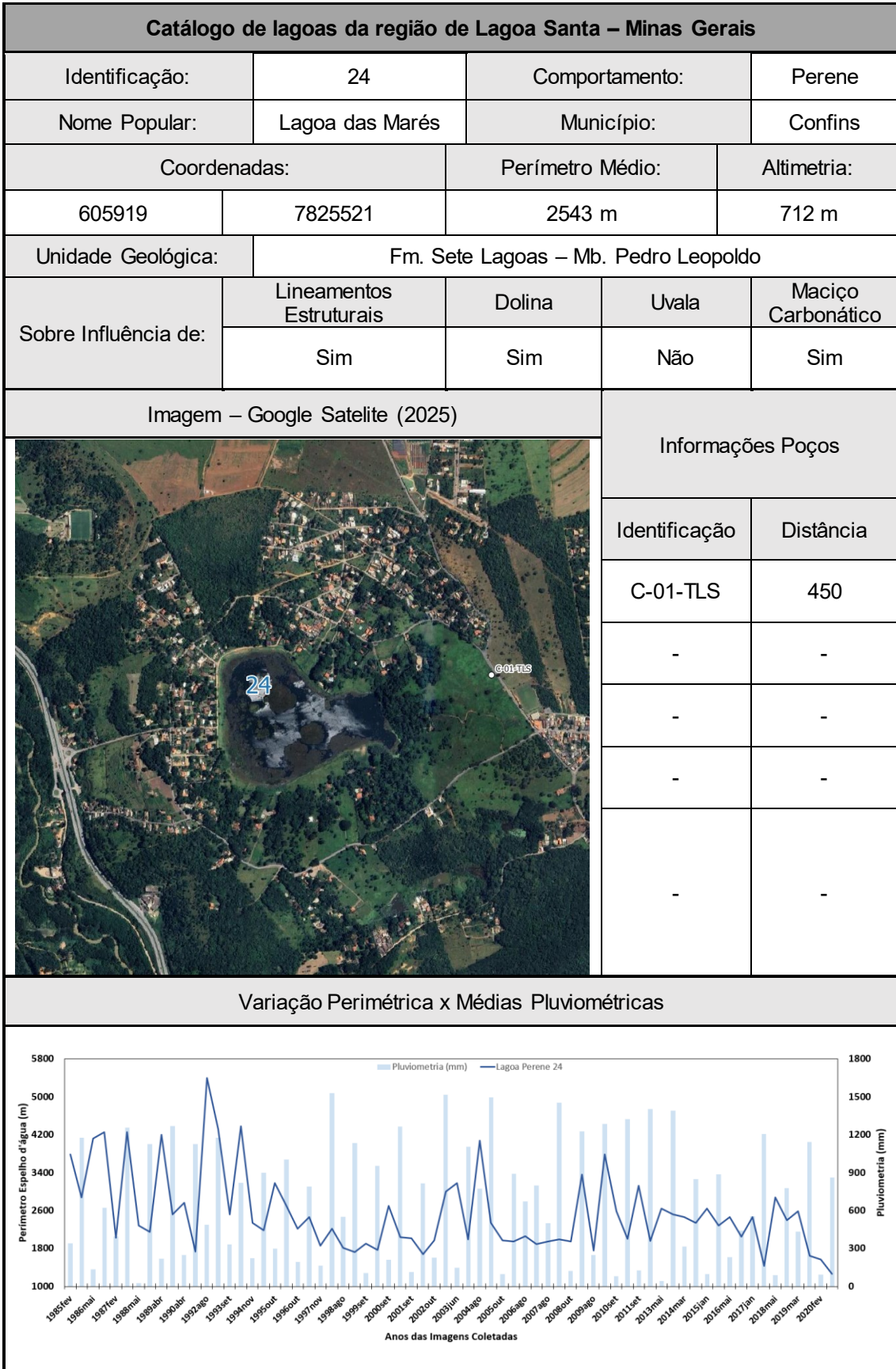


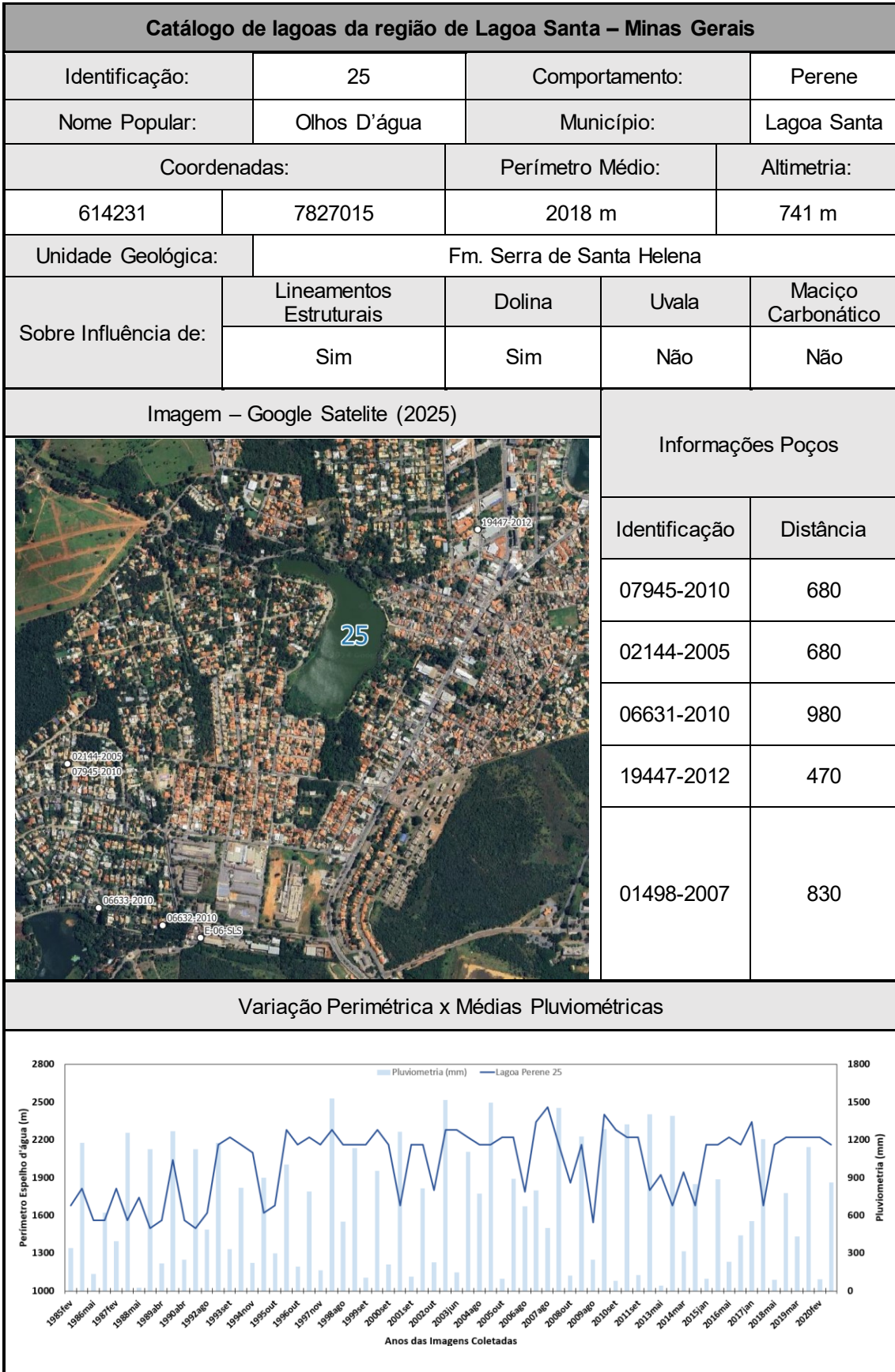



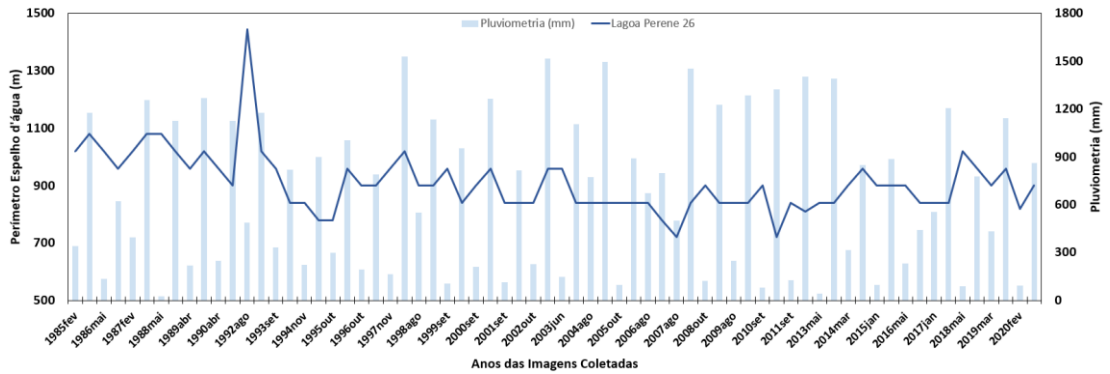



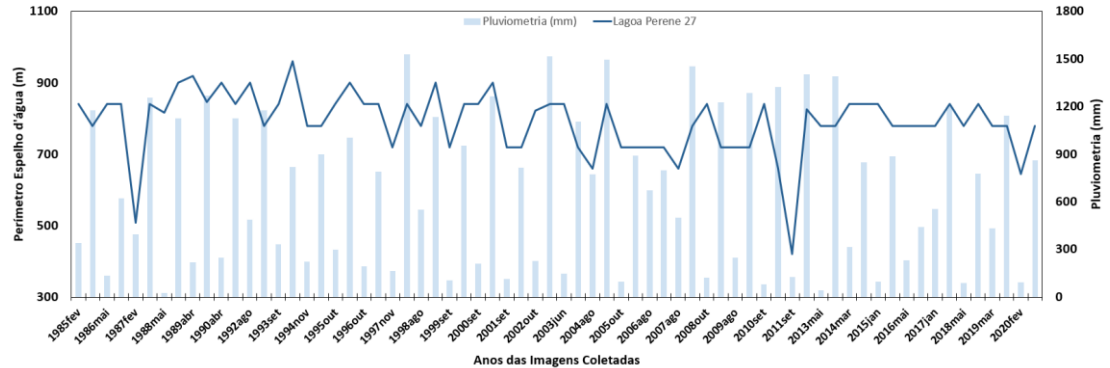
Catálogo de lagoas da região de Lagoa Santa – Minas Gerais				
Identificação:	22	Comportamento:	Perene	
Nome Popular:	-	Município:	Sete Lagoas	
Coordenadas:		Perímetro Médio:	Altimetria:	
580410	7848748	1867 m	758 m	
Unidade Geológica:	Fm. Sete Lagoas – Mb. Pedro Leopoldo			
Sobre Influência de:	Lineamentos Estruturais	Dolina	Uvala	Maciço Carbonático
	Não	Sim	Não	Não
Imagem – Google Satellite (2025)		Informações Poços		
		Identificação	Distância	
		3100003390	0	
		3100003391	50	
		3100003393	975	
		488/2007	900	
		-	-	
Variação Perimétrica x Médias Pluviométricas				
				


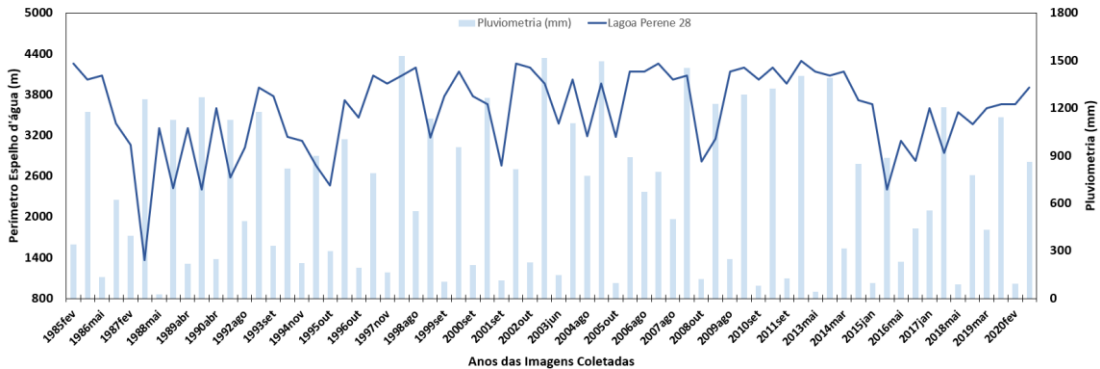


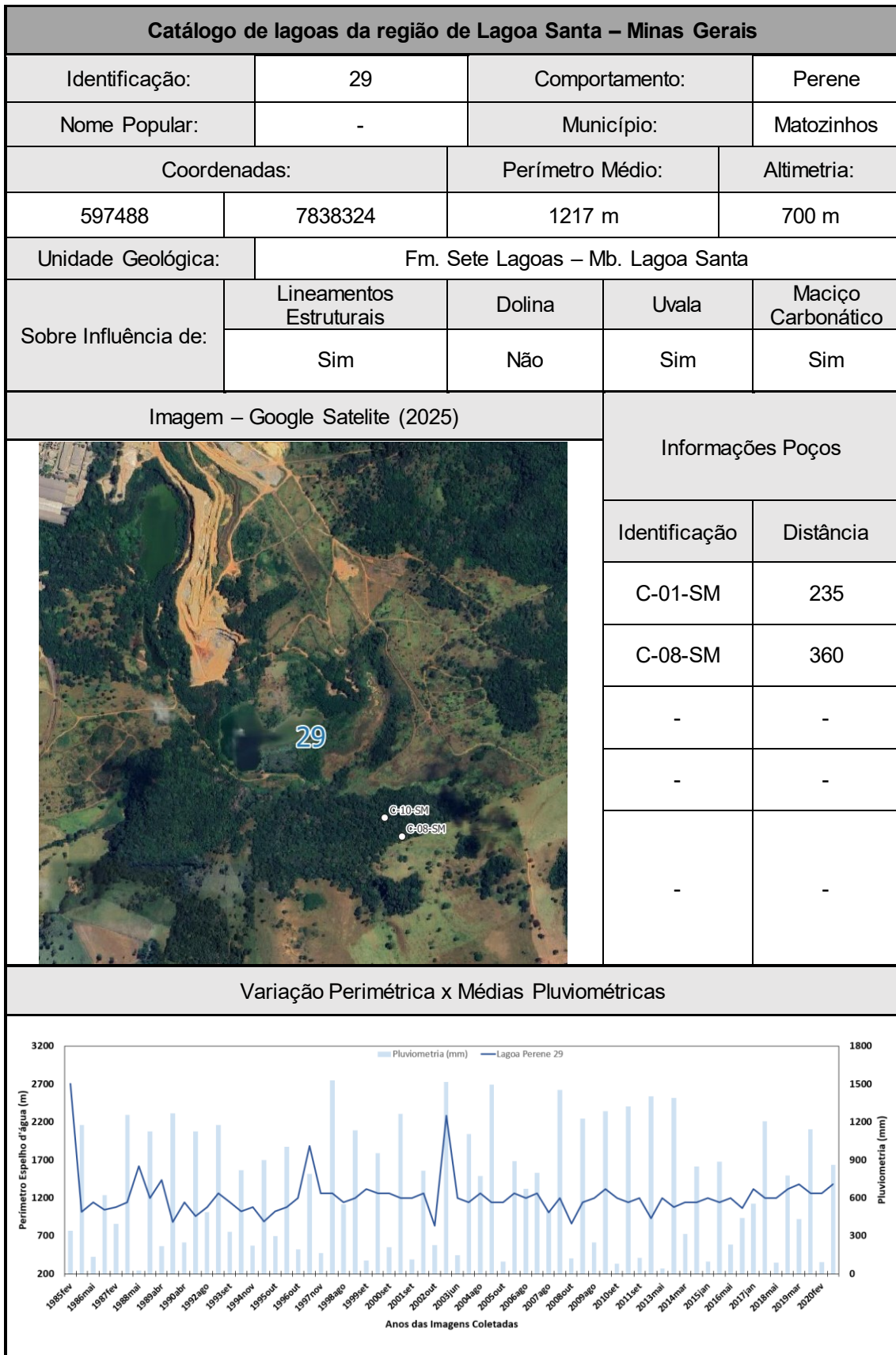


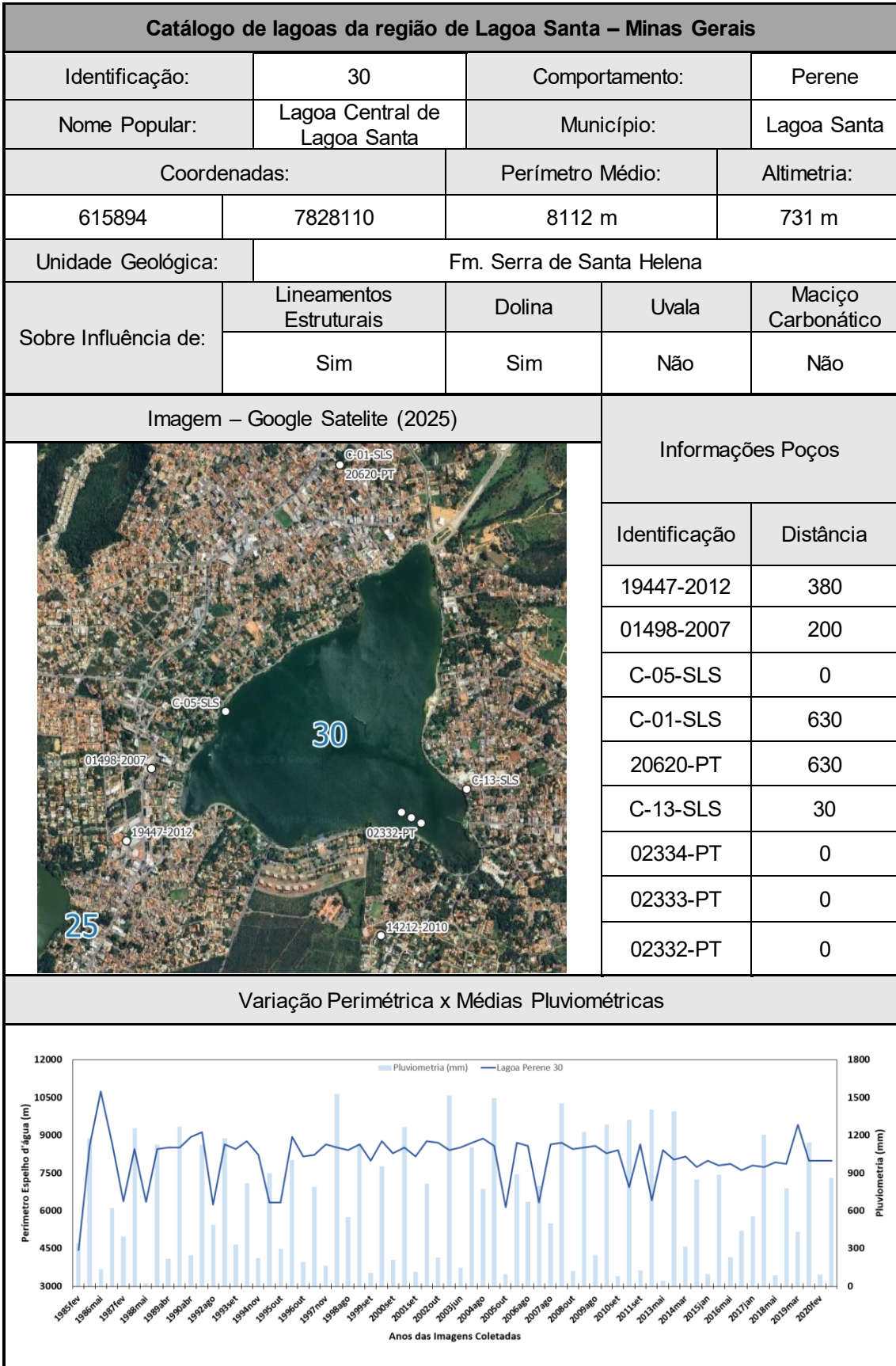


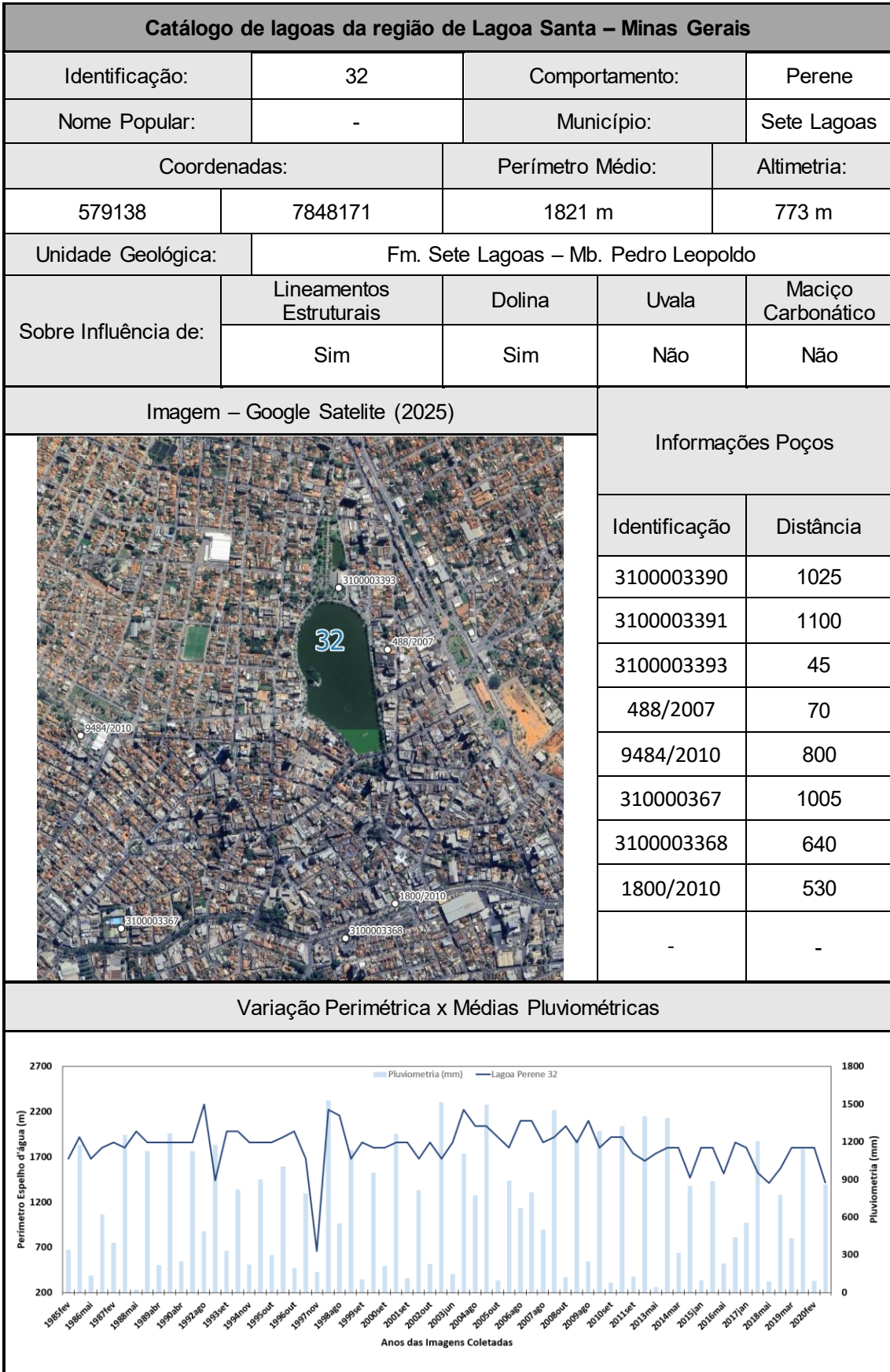
Catálogo de lagoas da região de Lagoa Santa – Minas Gerais				
Identificação:	26	Comportamento:	Perene	
Nome Popular:	-	Município:	Vespasiano	
Coordenadas:		Perímetro Médio:	Altimetria:	
608622	7818717	909 m	759 m	
Unidade Geológica:	Fm. Sete Lagoas – Mb. Pedro Leopoldo			
Sobre Influência de:	Lineamentos Estruturais	Dolina	Uvala	Maciço Carbonático
	Sim	Sim	Não	Não
Imagem – Google Satellite (2025)		Informações Poços		
		Identificação	Distância	
		-	-	
		-	-	
		-	-	
		-	-	
		-	-	
Variação Perimétrica x Médias Pluviométricas				
				

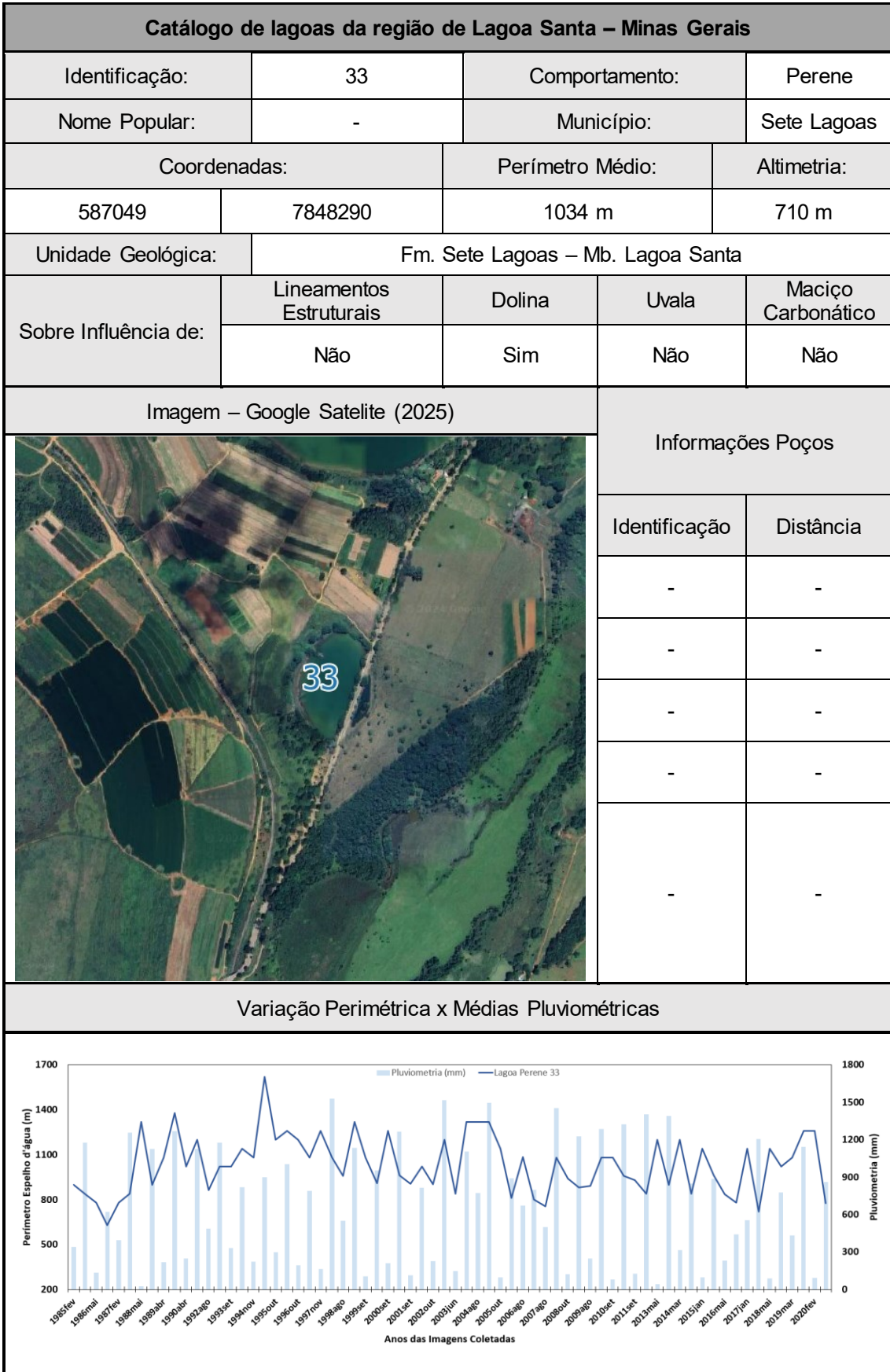
Catálogo de lagoas da região de Lagoa Santa – Minas Gerais				
Identificação:	27	Comportamento:	Perene	
Nome Popular:	-	Município:	Vespasiano	
Coordenadas:		Perímetro Médio:	Altimetria:	
608896	7819007	790 m	755 m	
Unidade Geológica:	Fm. Sete Lagoas – Mb. Pedro Leopoldo			
Sobre Influência de:	Lineamentos Estruturais	Dolina	Uvala	Maciço Carbonático
	Sim	Sim	Não	Não
Imagem – Google Satellite (2025)			Informações Poços	
			Identificação	Distância
			-	-
			-	-
			-	-
			-	-
			-	-
Variação Perimétrica x Médias Pluviométricas				
				

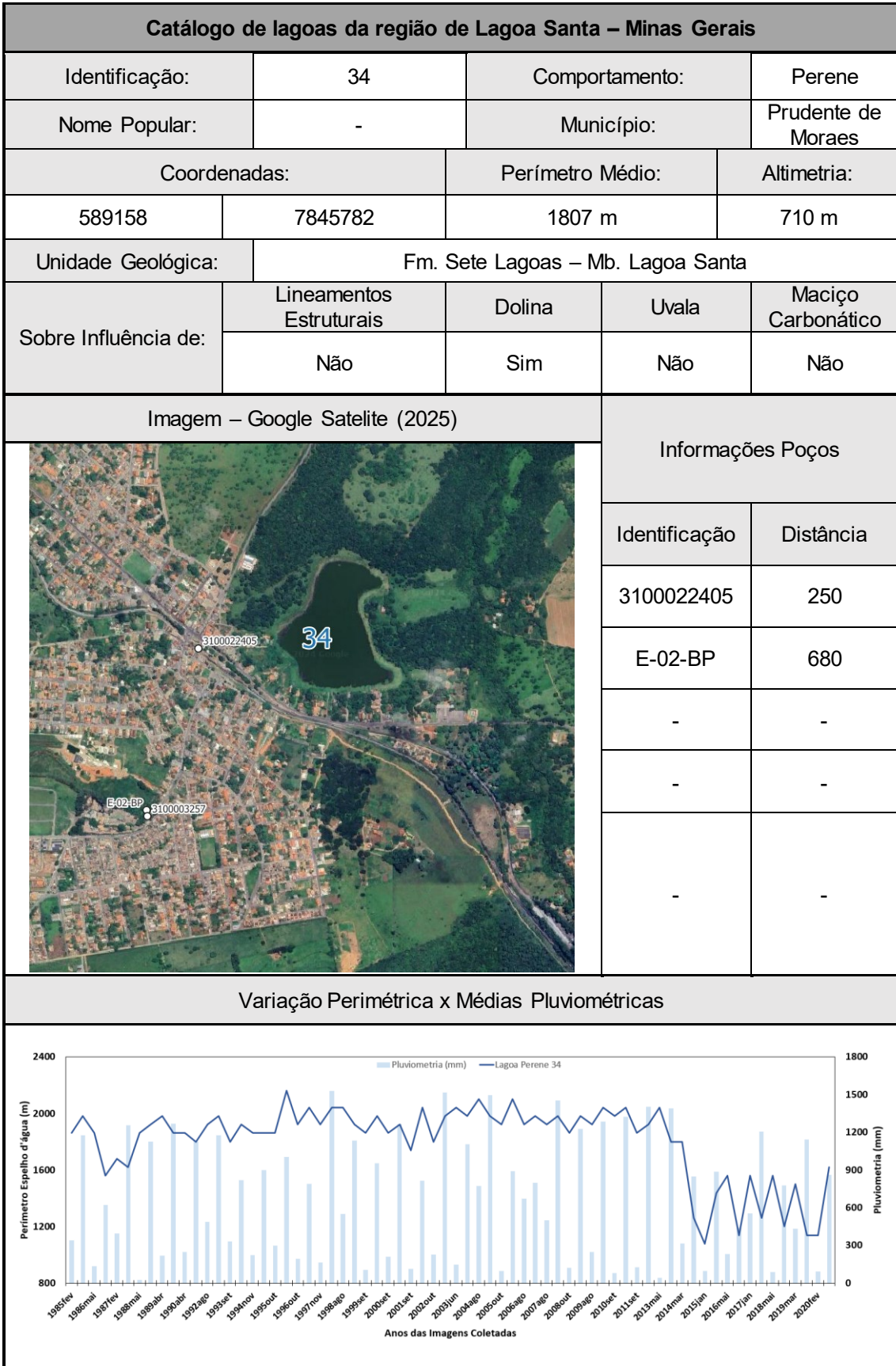
Catálogo de lagoas da região de Lagoa Santa – Minas Gerais				
Identificação:	28	Comportamento:	Perene	
Nome Popular:	Lagoa de Santo Antônio	Município:	Pedro Leopoldo	
Coordenadas:		Perímetro Médio:	Altimetria:	
602330	7835394	3569 m	728 m	
Unidade Geológica:	Fm. Sete Lagoas – Mb. Lagoa Santa			
Sobre Influência de:	Lineamentos Estruturais	Dolina	Uvala	Maciço Carbonático
	Sim	Não	Sim	Sim
Imagem – Google Satellite (2025)			Informações Poços	
			Identificação	Distância
			C-01-FGPL	330
			03189-2005	90
			03202-PT	340
			03203-PT	610
			-	-
Variação Perimétrica x Médias Pluviométricas				
				

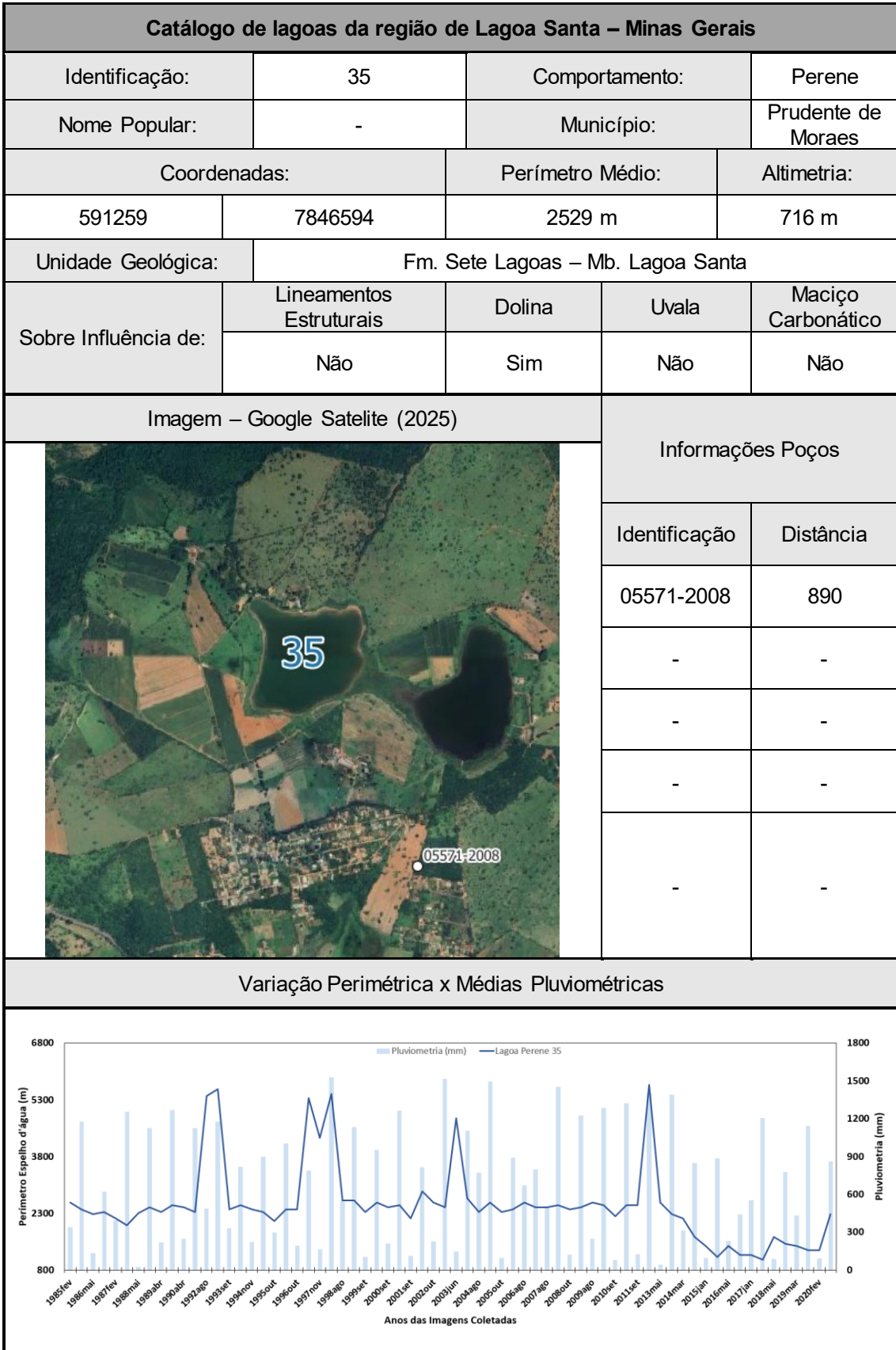


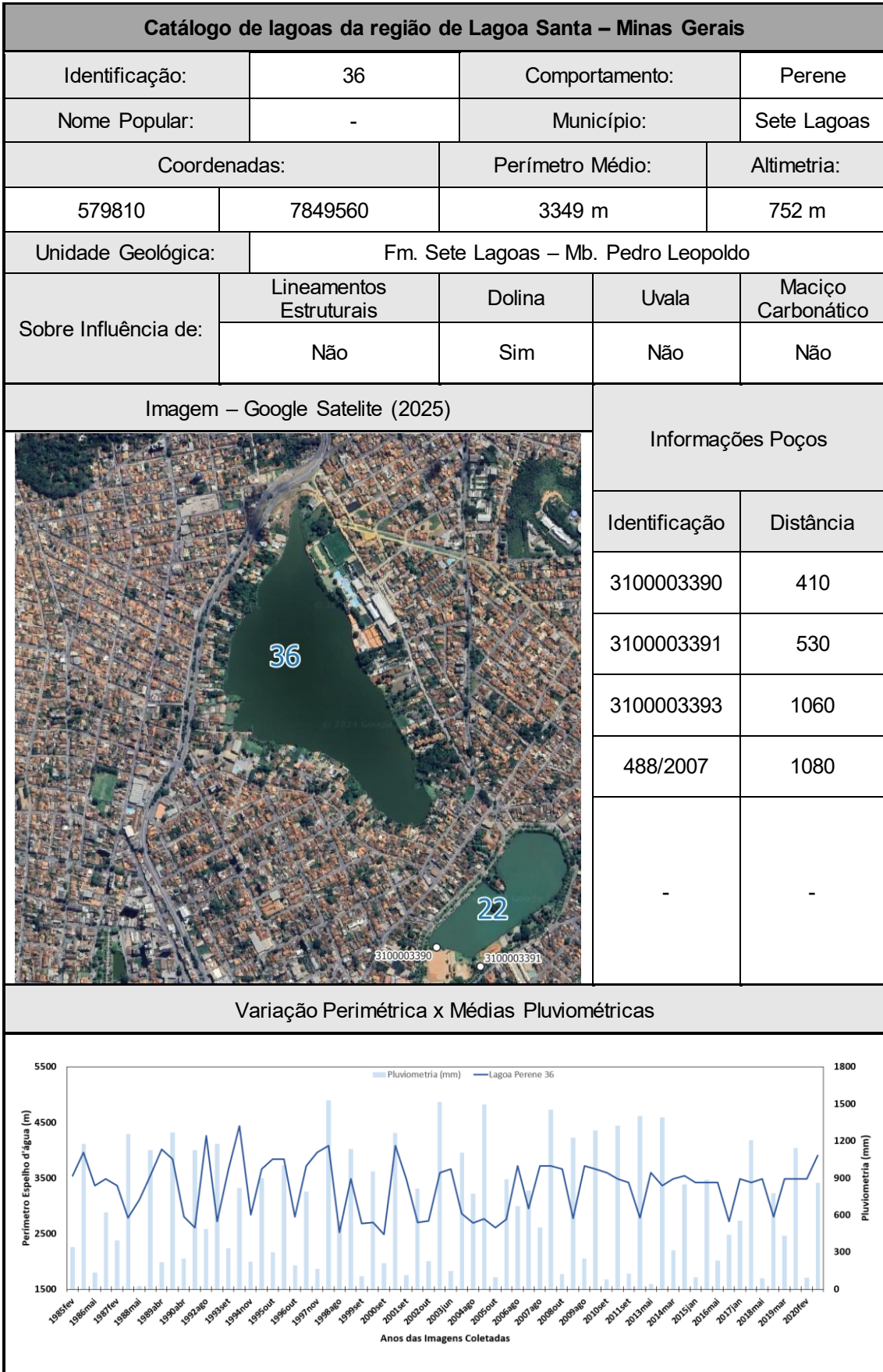


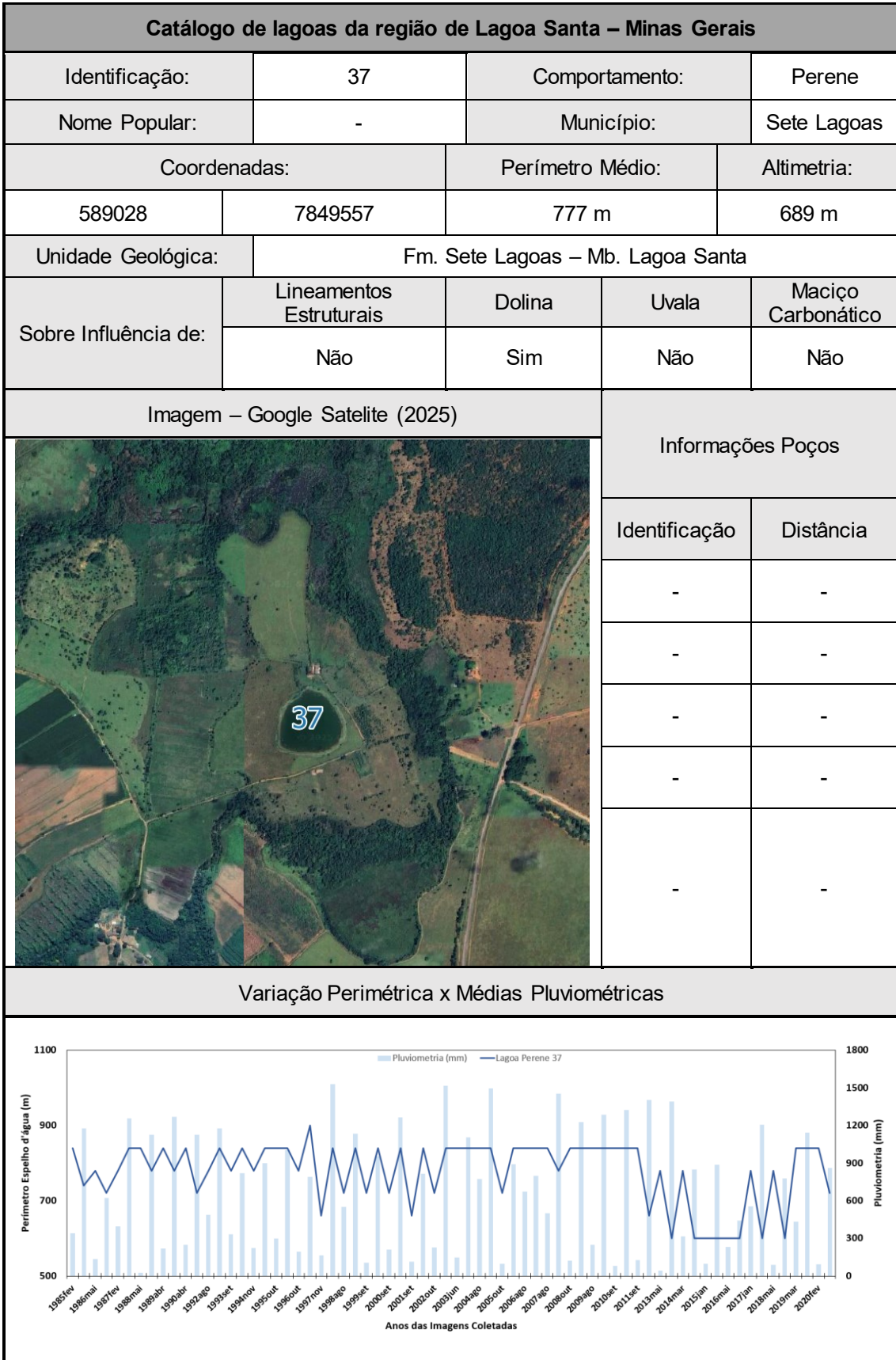


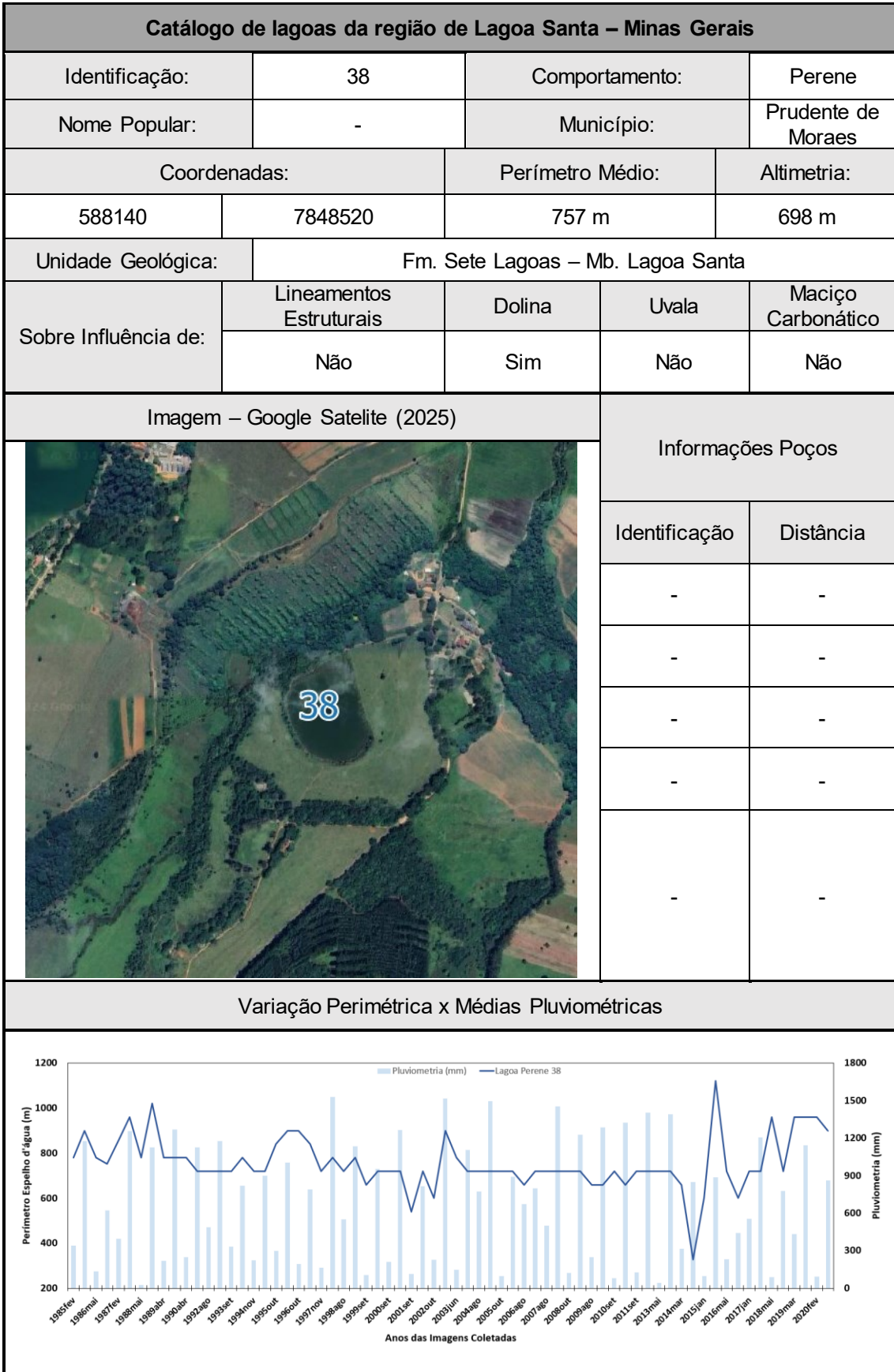


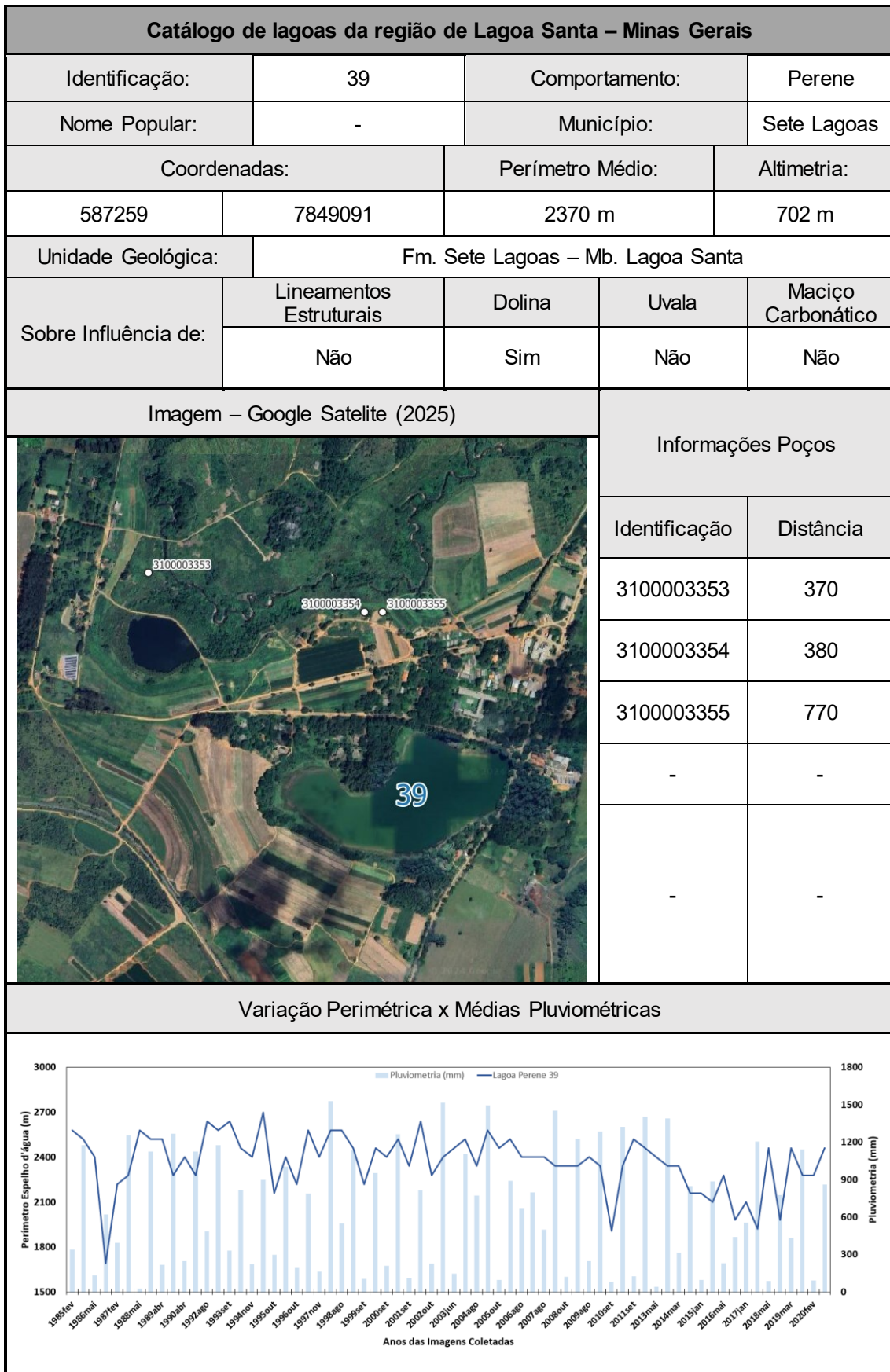


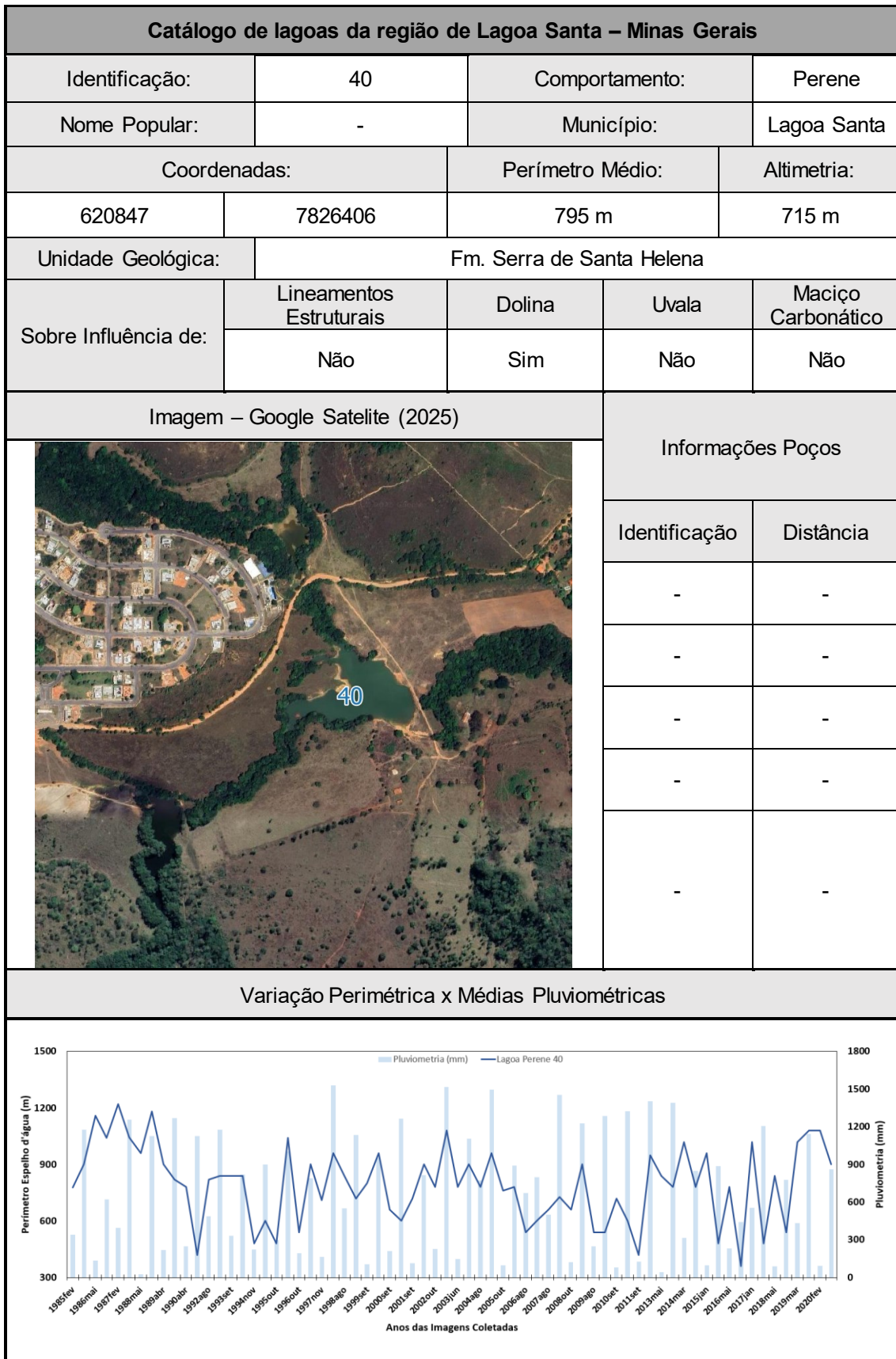



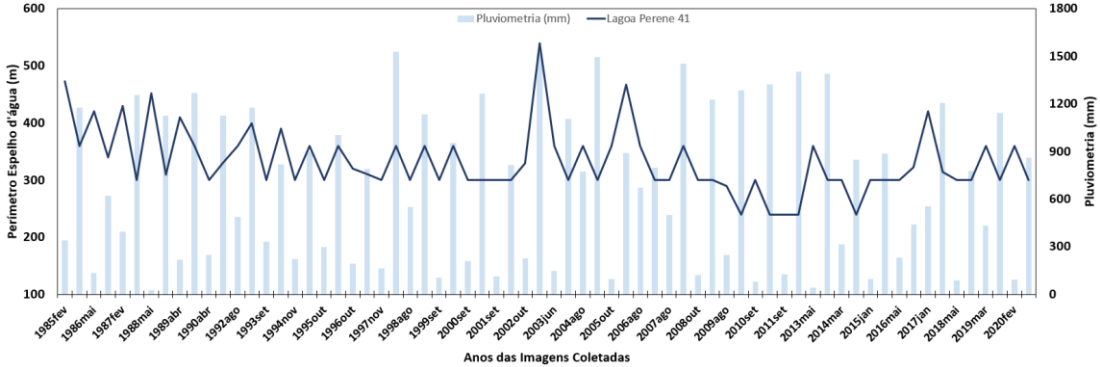



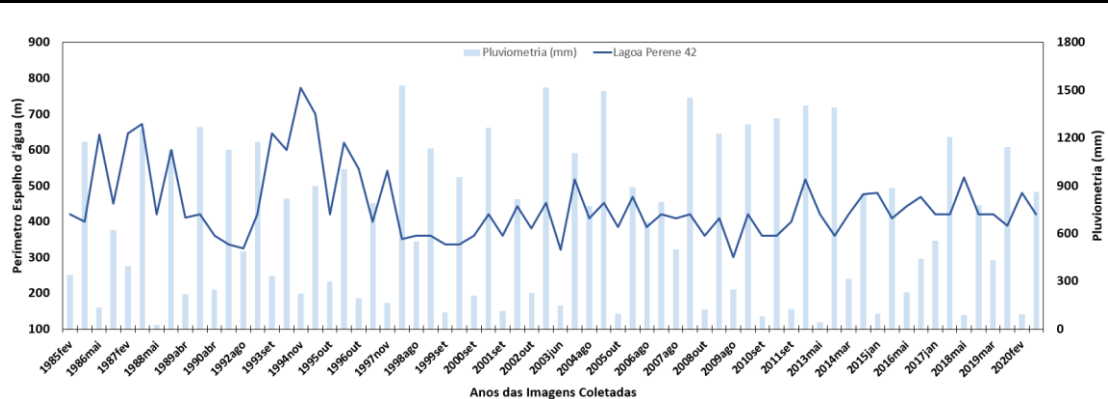


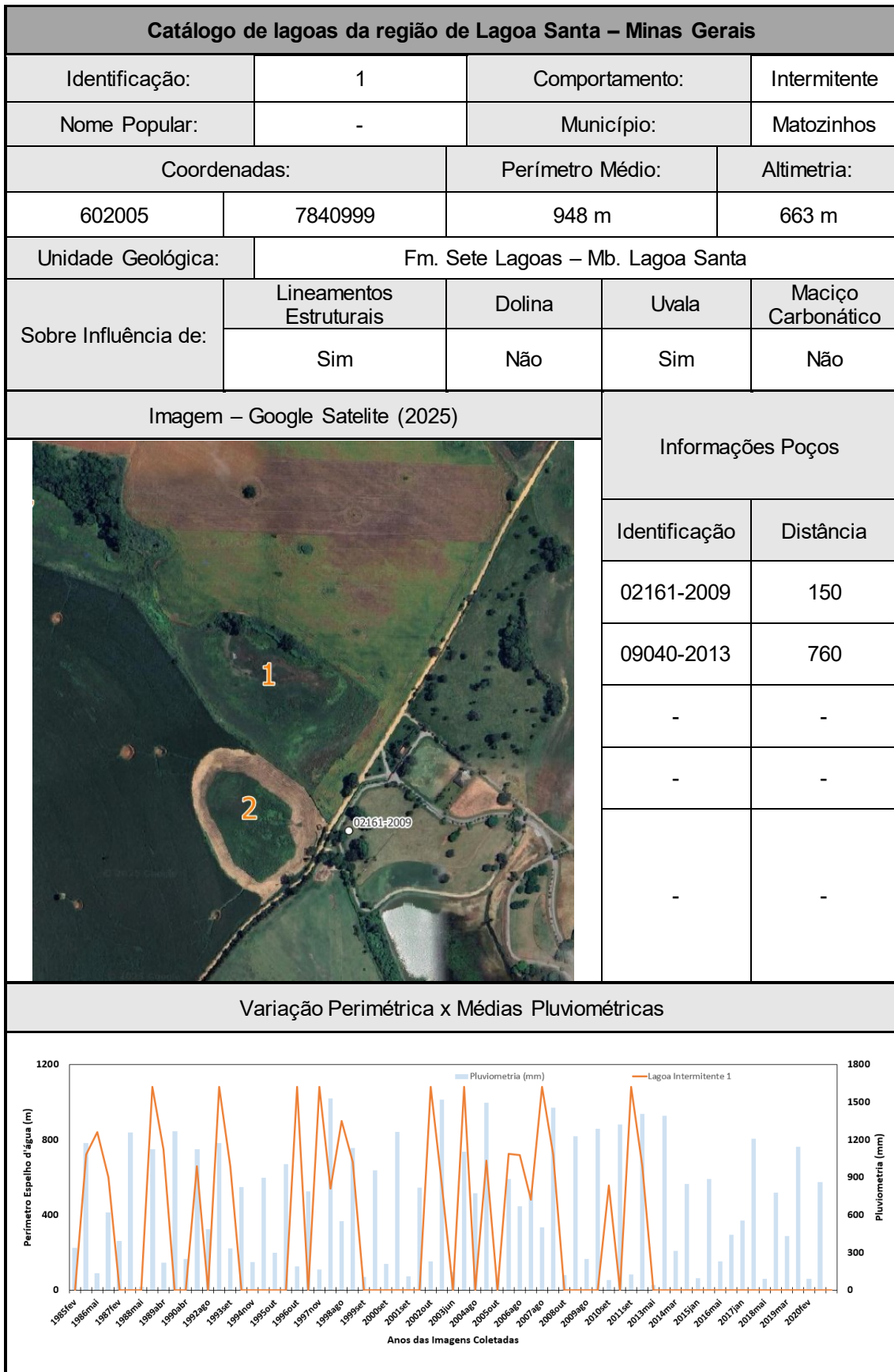


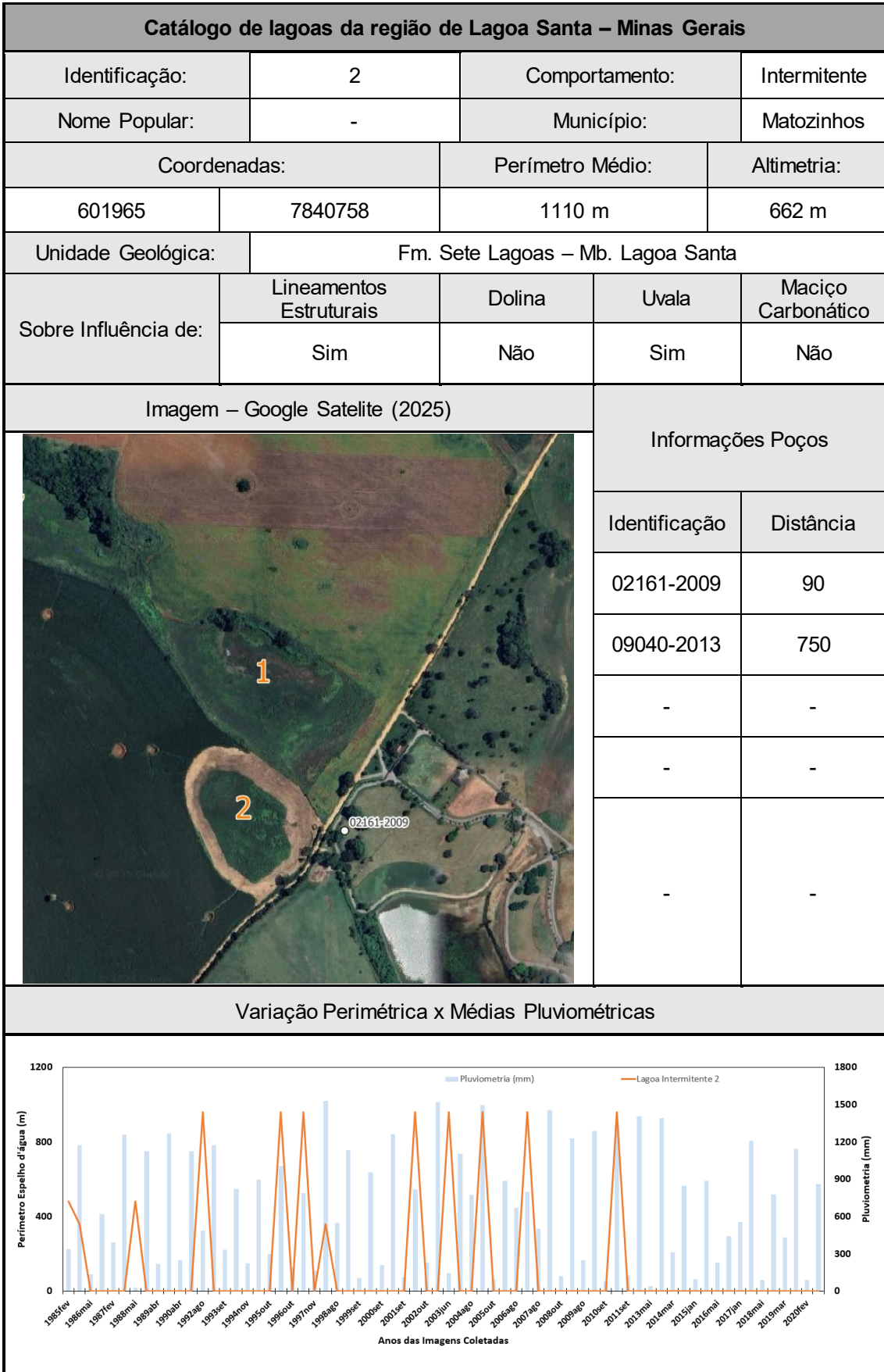


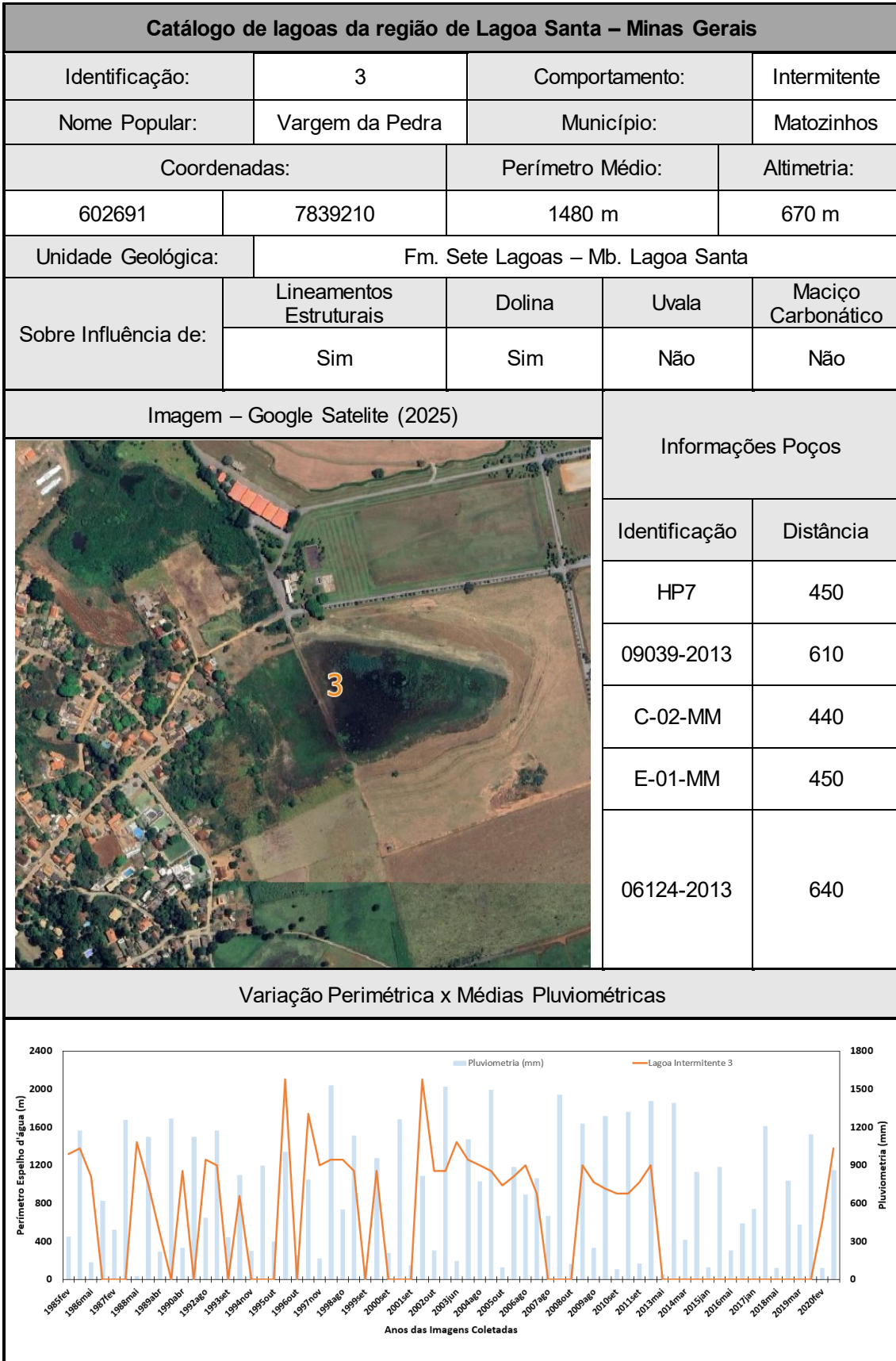



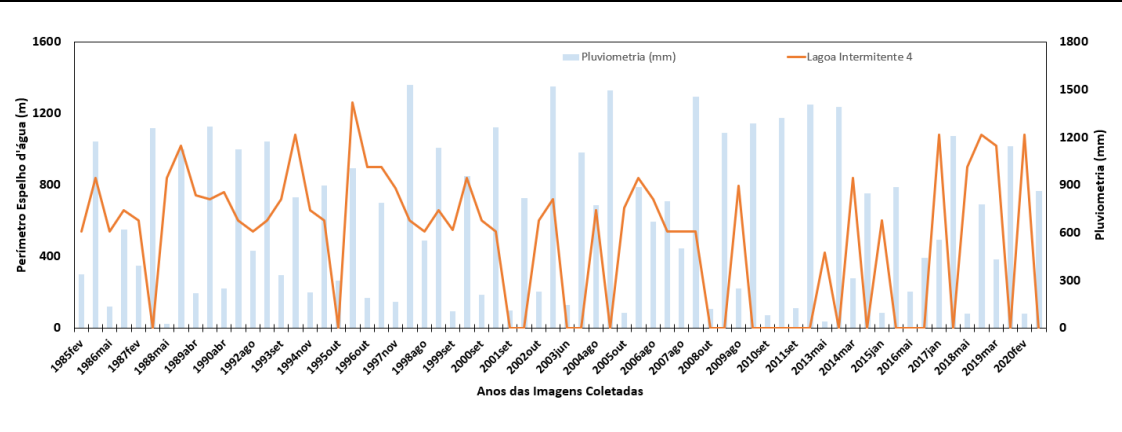
Catálogo de lagoas da região de Lagoa Santa – Minas Gerais				
Identificação:	41	Comportamento:	Perene	
Nome Popular:	-	Município:	Capim Branco	
Coordenadas:		Perímetro Médio:	Altimetria:	
584546	7840027	332 m	821 m	
Unidade Geológica:	Complexo Belo Horizonte			
Sobre Influência de:	Lineamentos Estruturais	Dolina	Uvala	Maciço Carbonático
	Sim	Sim	Não	Não
Imagem – Google Satellite (2025)			Informações Poços	
			Identificação	Distância
			-	-
			-	-
			-	-
			-	-
			-	-
Variação Perimétrica x Médias Pluviométricas				
				

Catálogo de lagoas da região de Lagoa Santa – Minas Gerais				
Identificação:	42	Comportamento:	Perene	
Nome Popular:	-	Município:	Matozinhos	
Coordenadas:		Perímetro Médio:	Altimetria:	
593622	7832099	444 m	790 m	
Unidade Geológica:	Complexo Belo Horizonte			
Sobre Influência de:	Lineamentos Estruturais	Dolina	Uvala	Maciço Carbonático
	Não	Sim	Não	Não
Imagem – Google Satellite (2025)		Informações Poços		
		Identificação	Distância	
		3100003128	480	
		-	-	
		-	-	
		-	-	
		-	-	
Variação Perimétrica x Médias Pluviométricas				
				

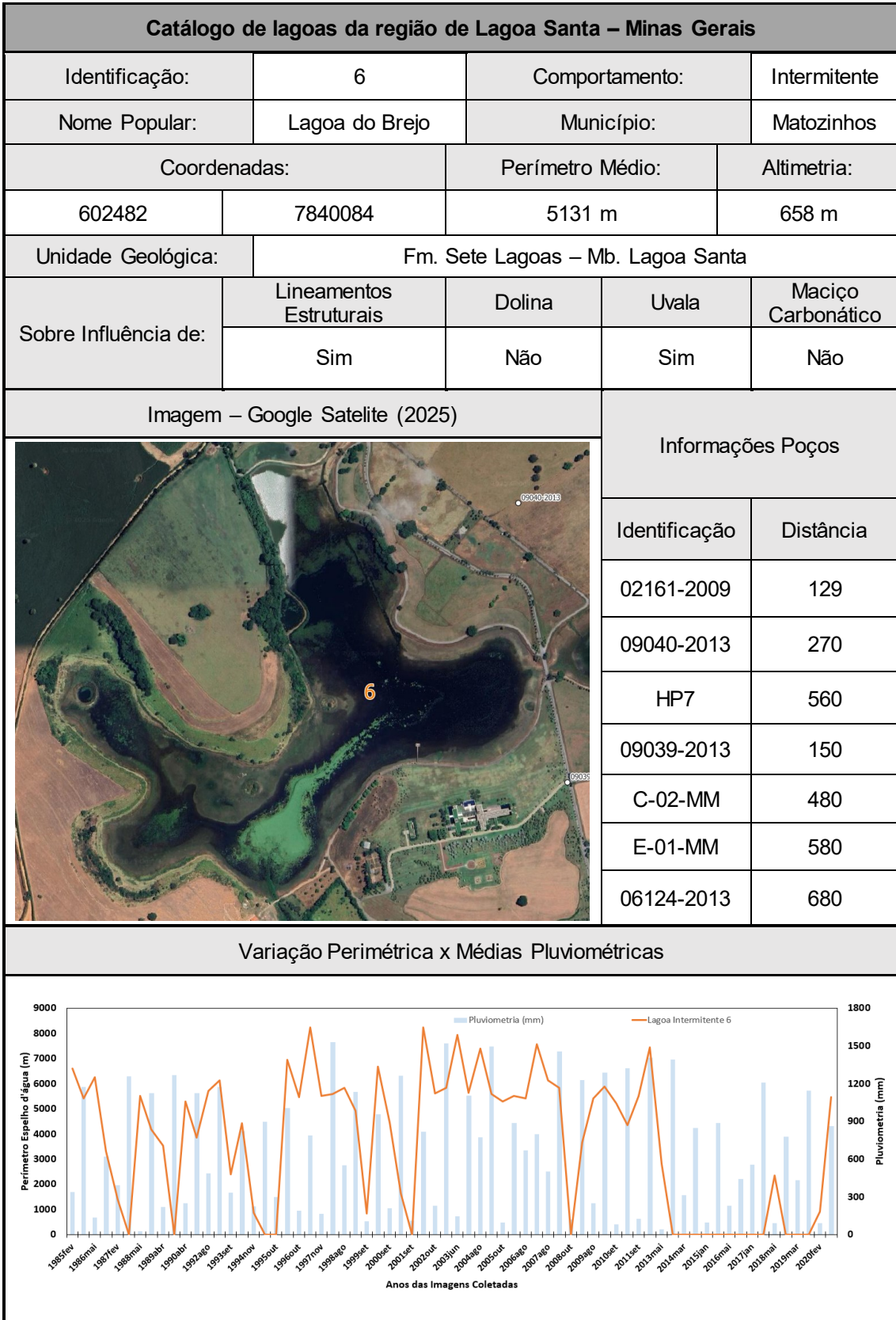



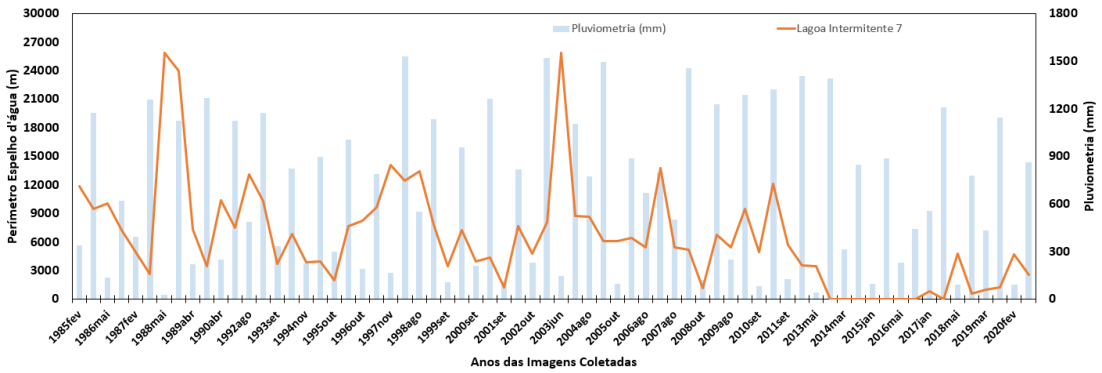


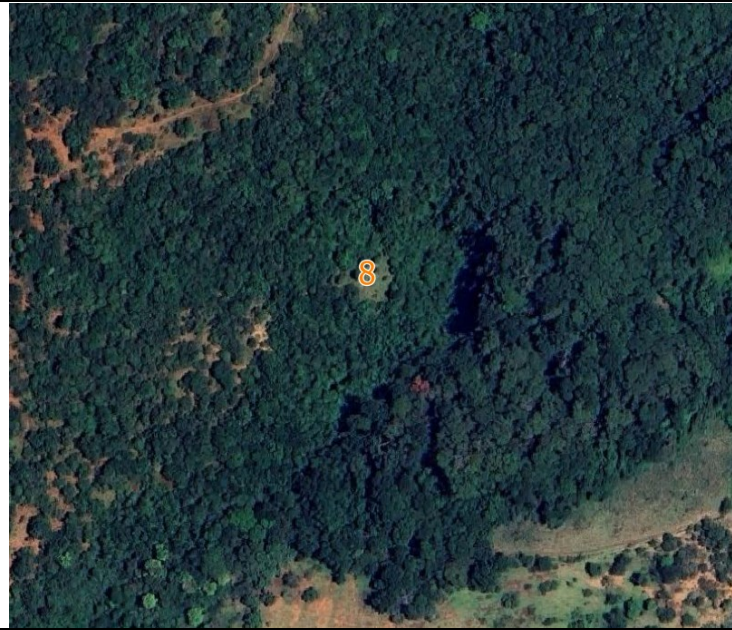
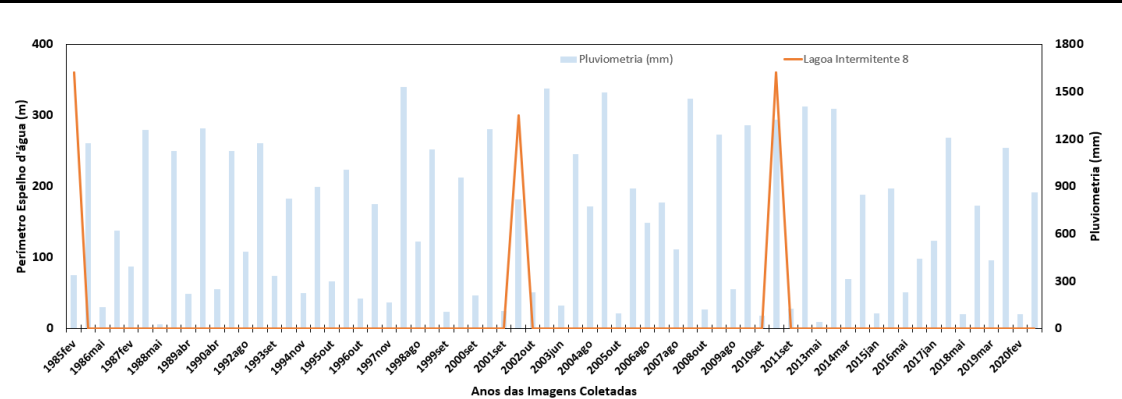


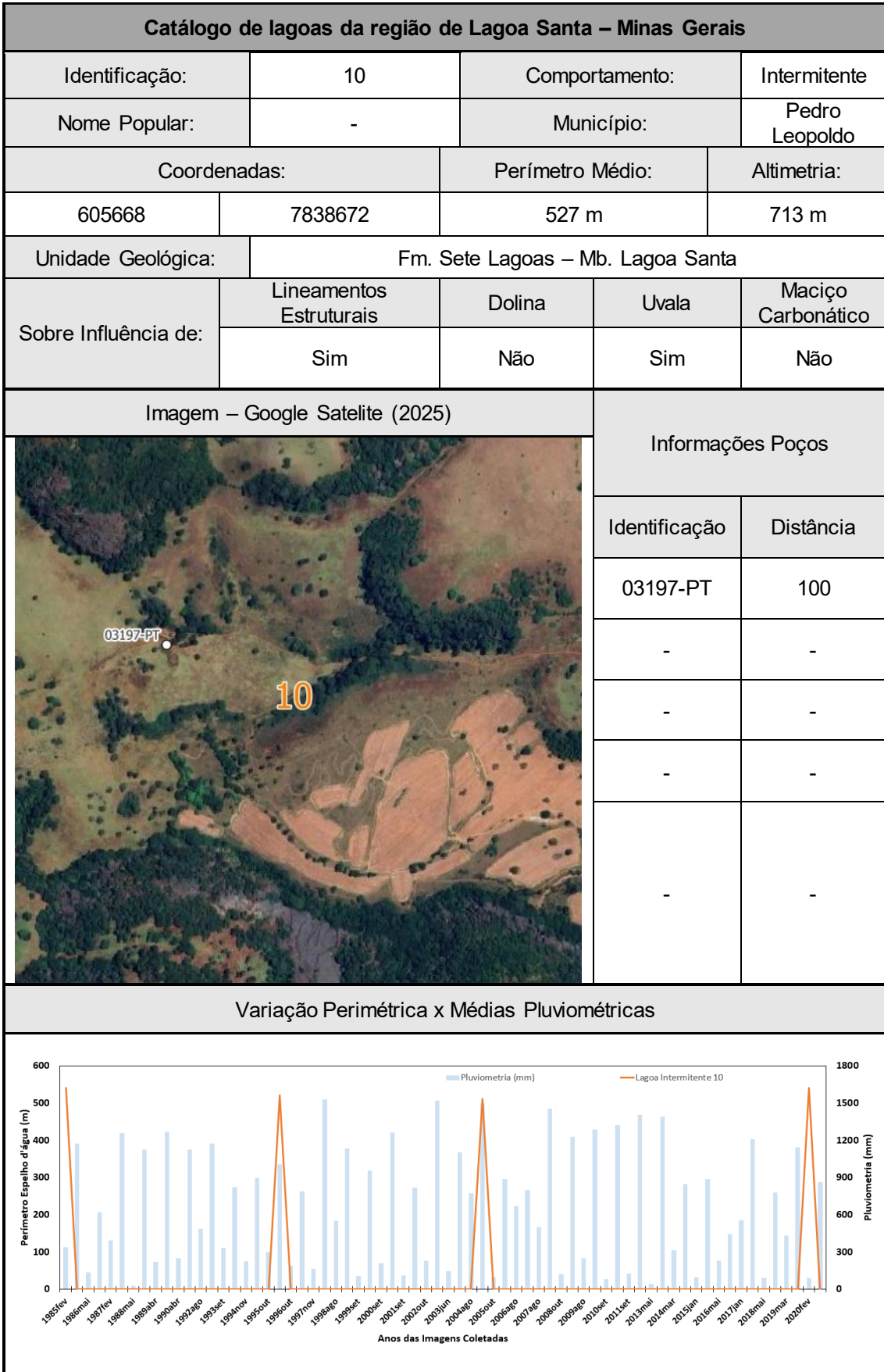
Catálogo de lagoas da região de Lagoa Santa – Minas Gerais				
Identificação:	4	Comportamento:	Intermitente	
Nome Popular:	-	Município:	Matozinhos	
Coordenadas:		Perímetro Médio:	Altimetria:	
601909	7839231	736 m	673 m	
Unidade Geológica:	Fm. Sete Lagoas – Mb. Lagoa Santa			
Sobre Influência de:	Lineamentos Estruturais	Dolina	Uvala	Maciço Carbonático
	Sim	Sim	Não	Não
Imagem – Google Satellite (2025)		Informações Poços		
		Identificação	Distância	
		09039-2013	1080	
		C-02-MM	40	
		E-01-MM	120	
		06124-2013	125	
		-	-	
Variação Perimétrica x Médias Pluviométricas				
				

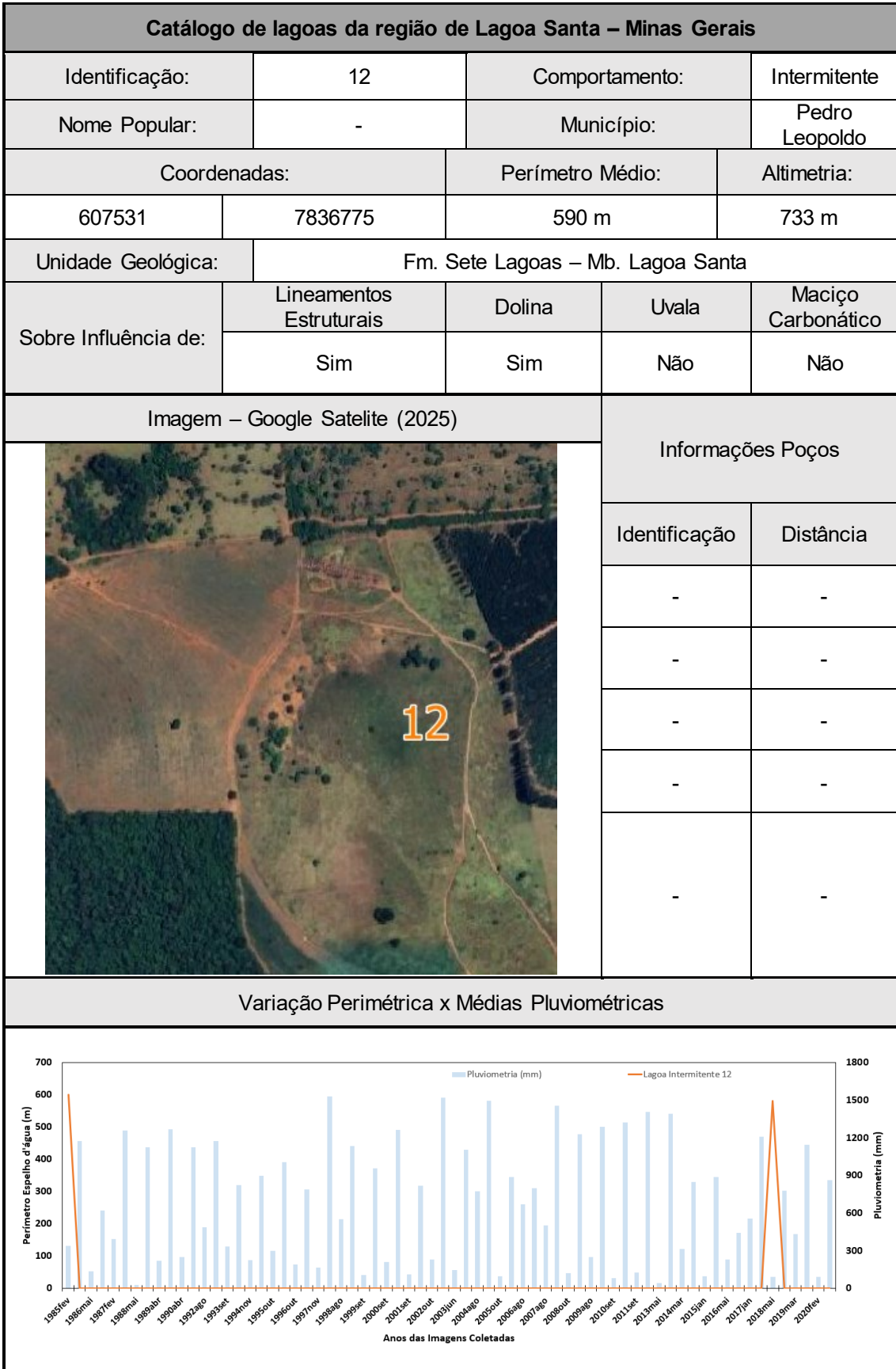



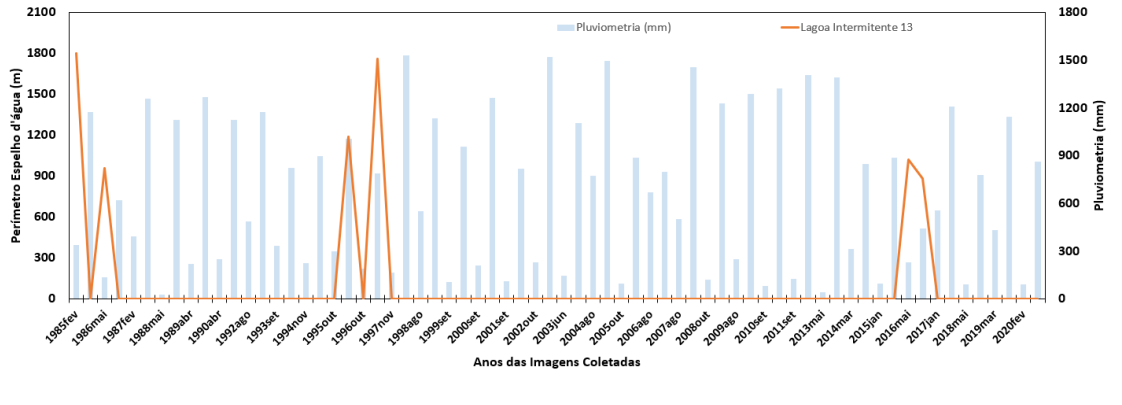


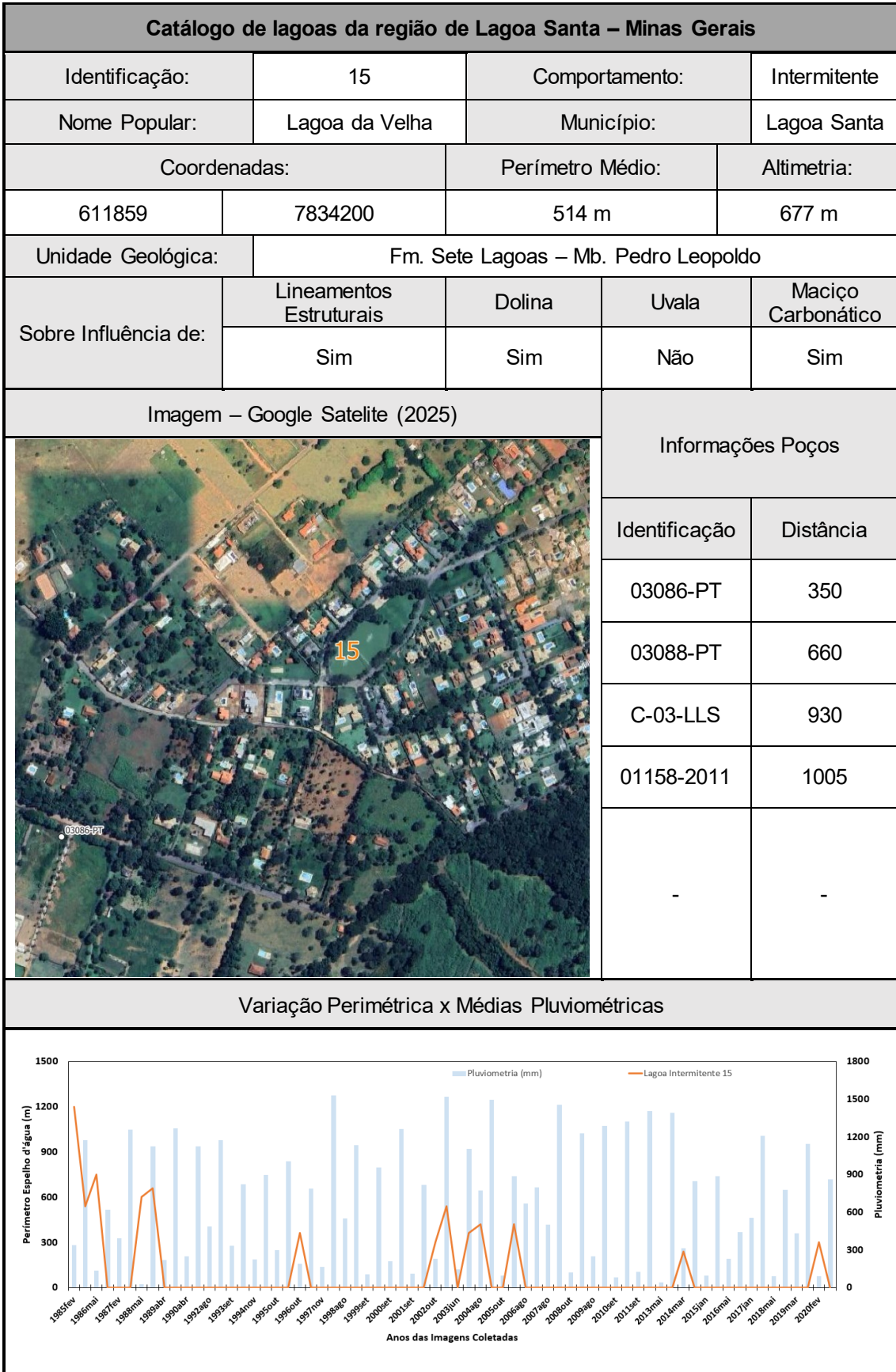
Catálogo de lagoas da região de Lagoa Santa – Minas Gerais				
Identificação:	7		Comportamento:	Intermitente
Nome Popular:	Lagoa do Sumidouro		Município:	Pedro Leopoldo / Lagoa Santa
Coordenadas:		Perímetro Médio:		Altimetria:
610724		7839256		639 m
Unidade Geológica:		Fm. Sete Lagoas – Mb. Lagoa Santa		
Sobre Influência de:	Lineamentos Estruturais		Dolina	Uvala
	Sim		Não	Sim
Maciço Carbonático		Não		
Imagem – Google Satellite (2025)			Informações Poços	
			Identificação	Distância
			E-01-FPL	305
			C-01-FPL	130
			-	-
			-	-
			-	-
			-	-
Variação Perimétrica x Médias Pluviométricas				
				

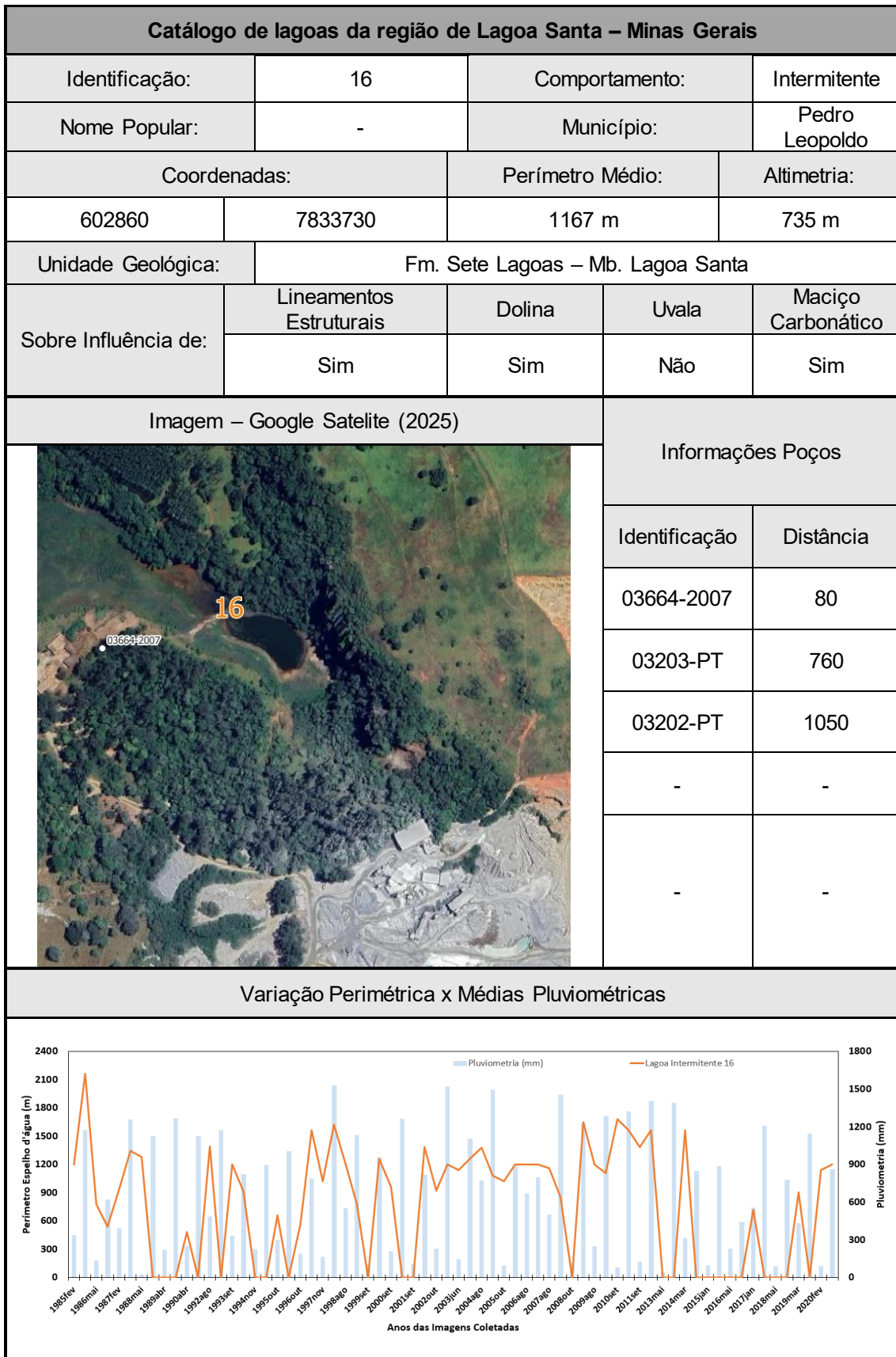
Catálogo de lagoas da região de Lagoa Santa – Minas Gerais				
Identificação:	8	Comportamento:	Intermitente	
Nome Popular:	-	Município:	Lagoa Santa	
Coordenadas:		Perímetro Médio:	Altimetria:	
610145	7837819	300 m	687 m	
Unidade Geológica:	Fm. Sete Lagoas – Mb. Lagoa Santa			
Sobre Influência de:	Lineamentos Estruturais	Dolina	Uvala	Maciço Carbonático
	Não	Sim	Não	Sim
Imagem – Google Satellite (2025)		Informações Poços		
		Identificação	Distância	
		-	-	
		-	-	
		-	-	
		-	-	
		-	-	
		-	-	
		-	-	
Variação Perimétrica x Médias Pluviométricas				
				

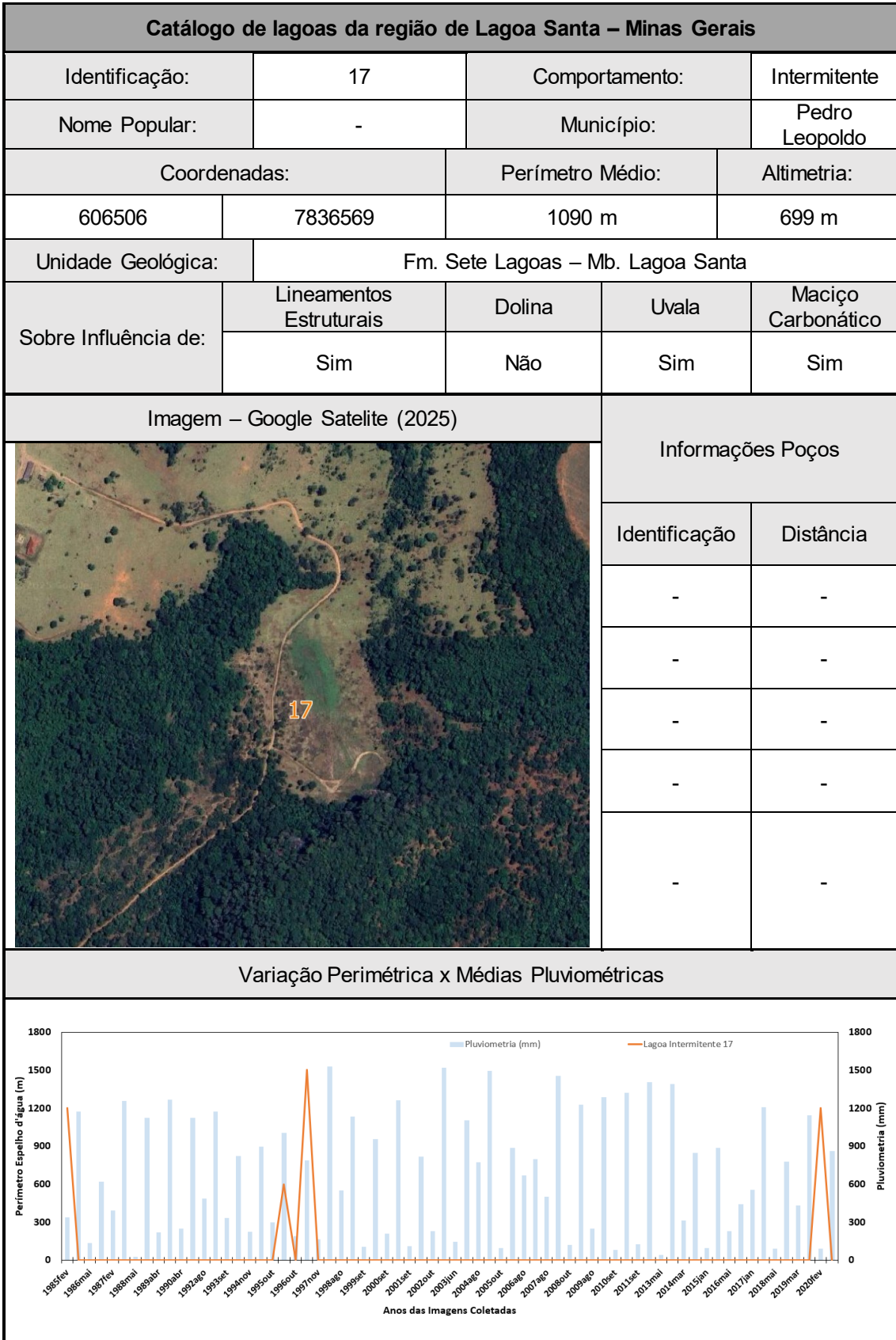


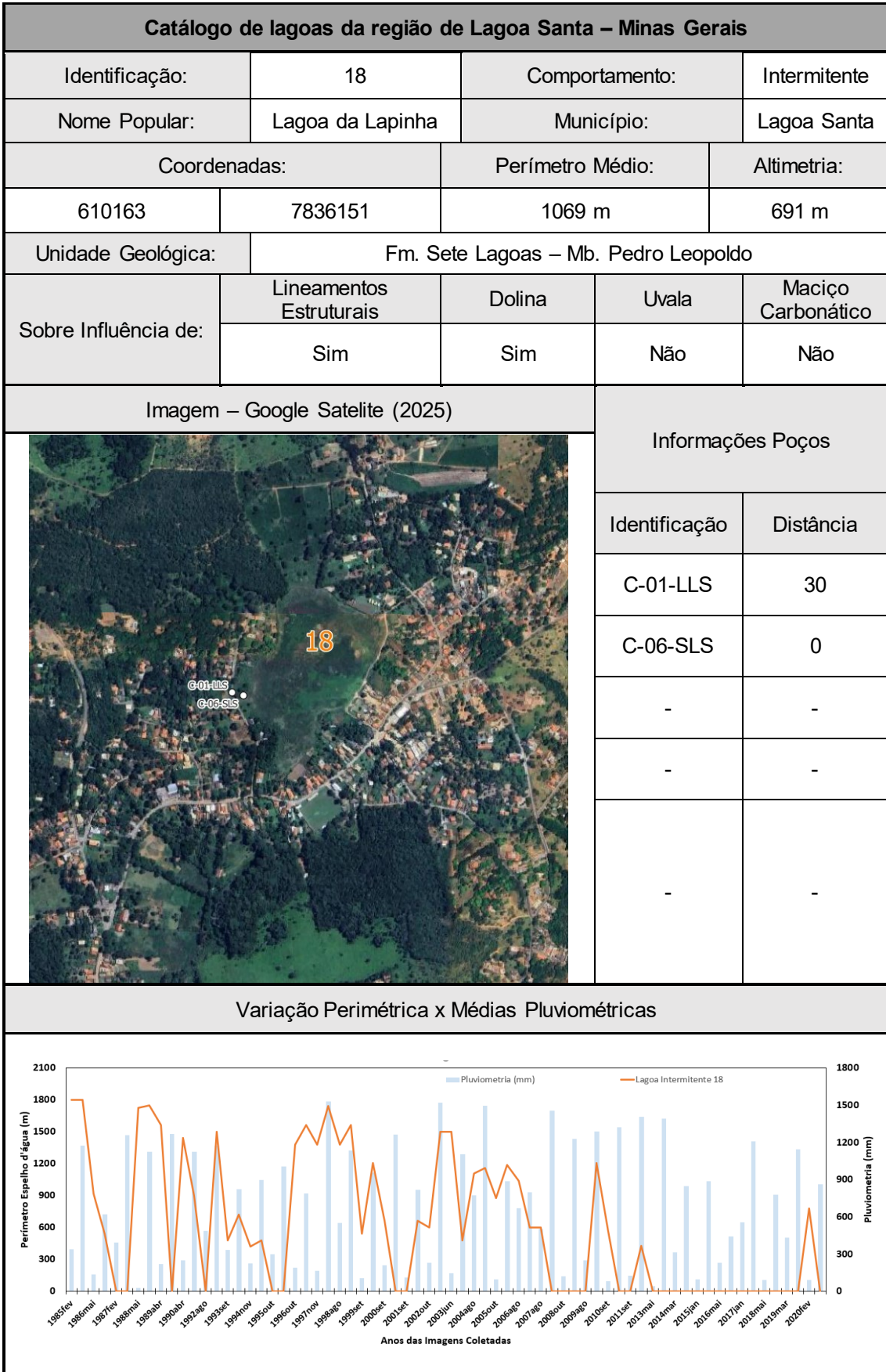


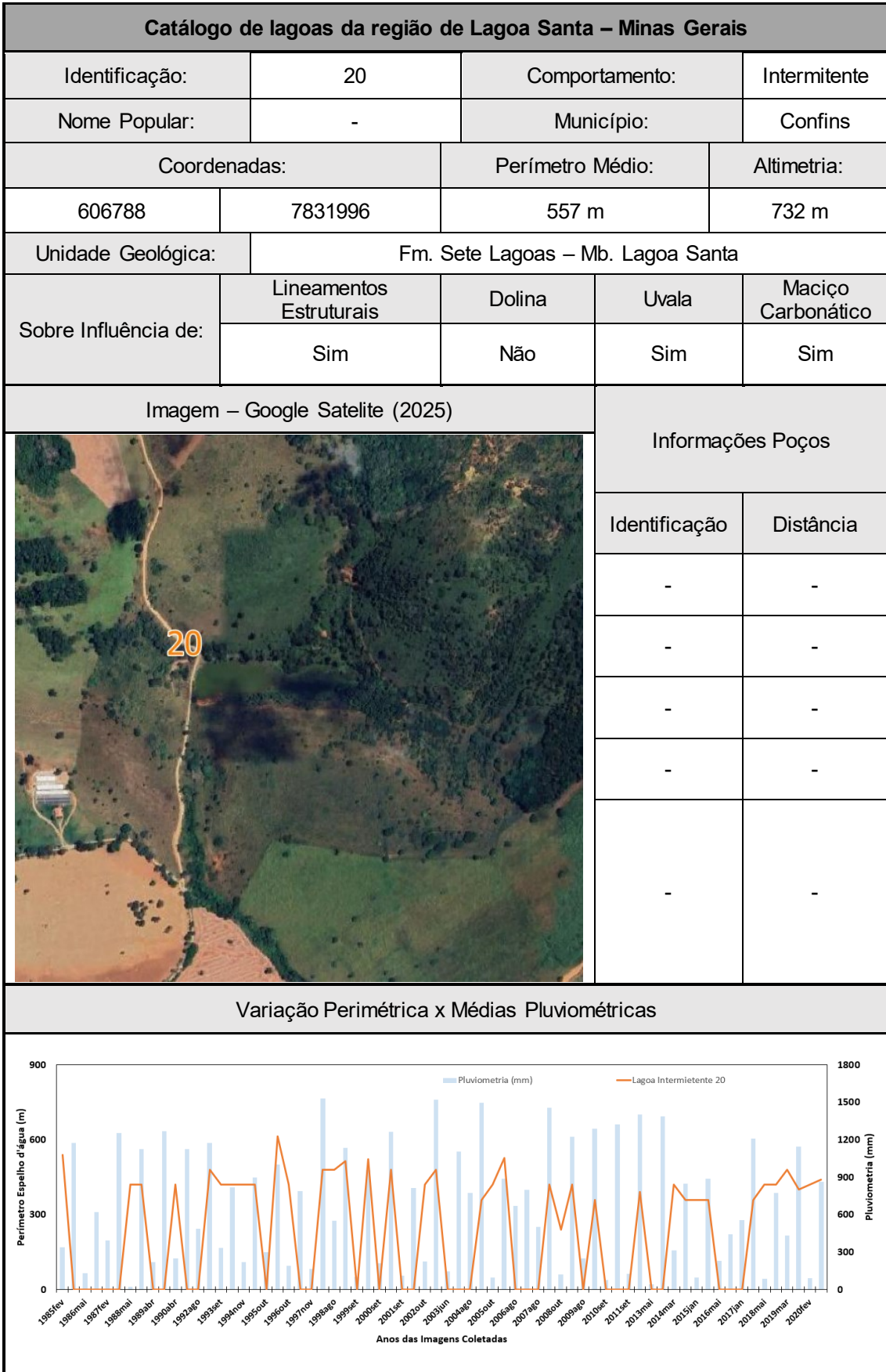
Catálogo de lagoas da região de Lagoa Santa – Minas Gerais				
Identificação:	13	Comportamento:	Intermitente	
Nome Popular:	-	Município:	Pedro Leopoldo	
Coordenadas:		Perímetro Médio:	Altimetria:	
605571	7837777	1266 m	691 m	
Unidade Geológica:	Fm. Sete Lagoas – Mb. Lagoa Santa			
Sobre Influência de:	Lineamentos Estruturais	Dolina	Uvala	Maciço Carbonático
	Sim	Não	Sim	Sim
Imagem – Google Satellite (2025)		Informações Poços		
		Identificação	Distância	
		03197-PT	830	
		-	-	
		-	-	
		-	-	
		-	-	
Variação Perimétrica x Médias Pluviométricas				
				

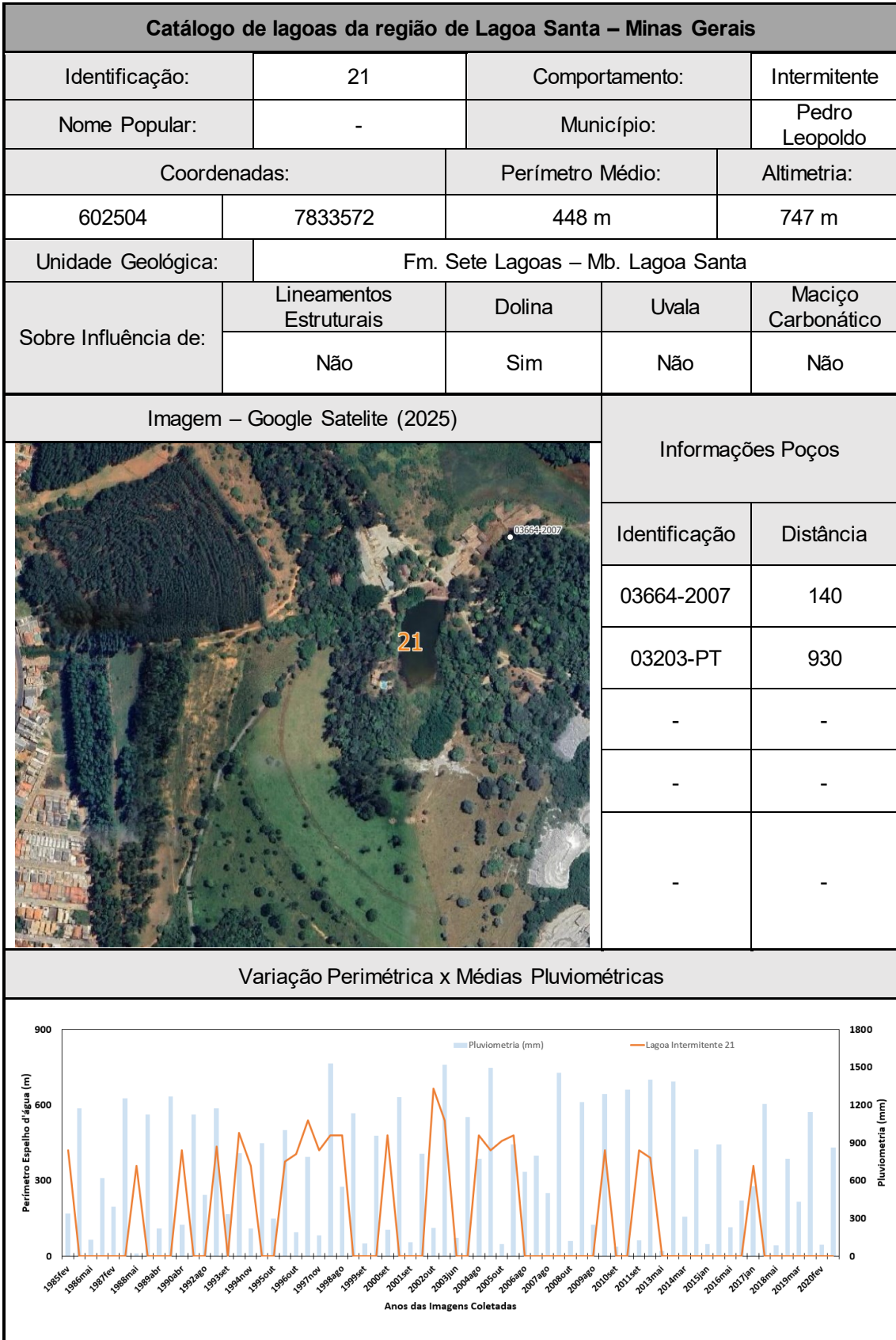


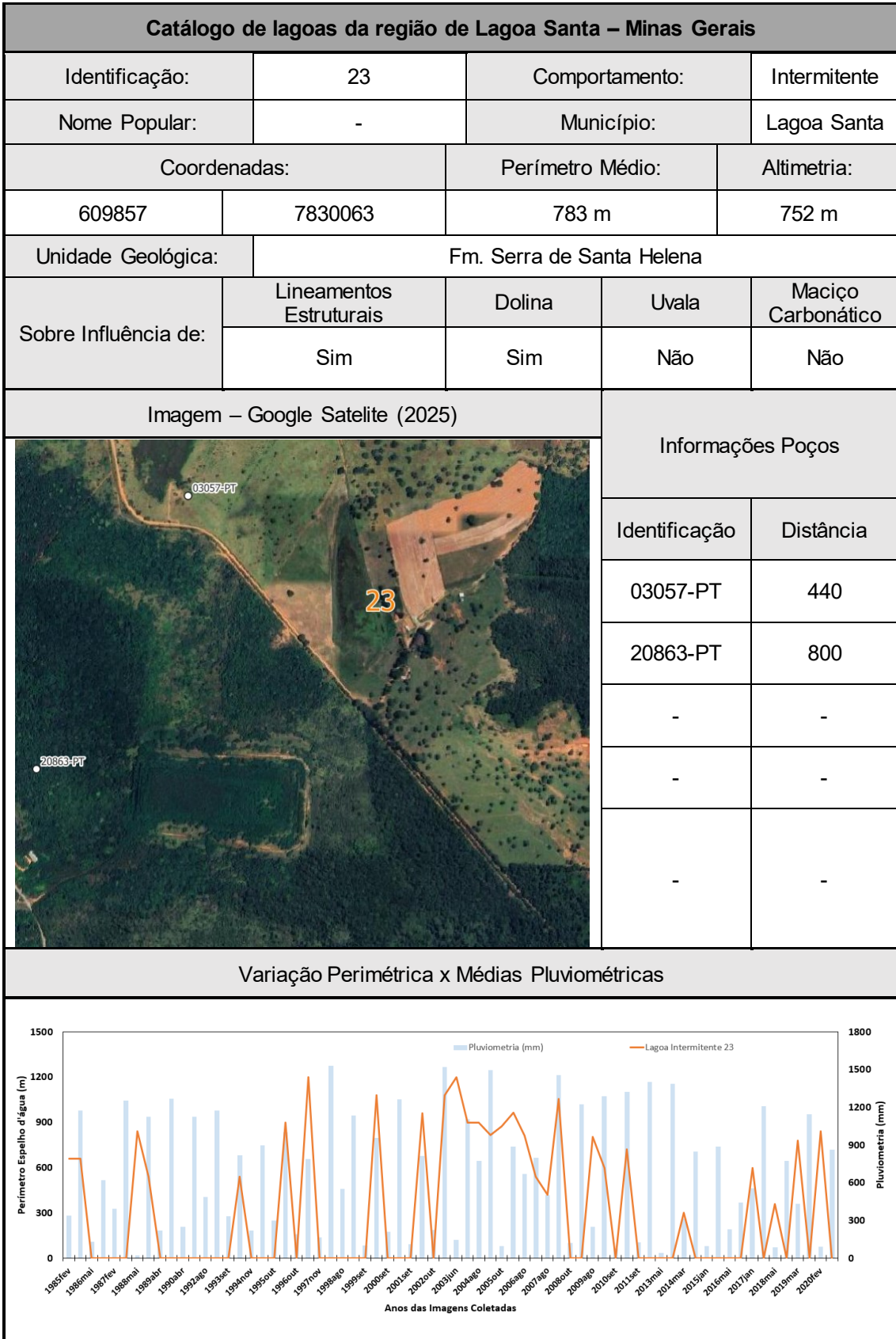



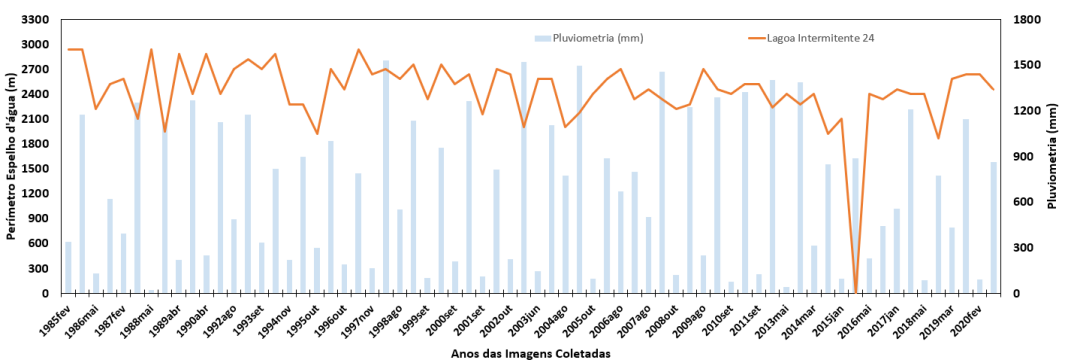


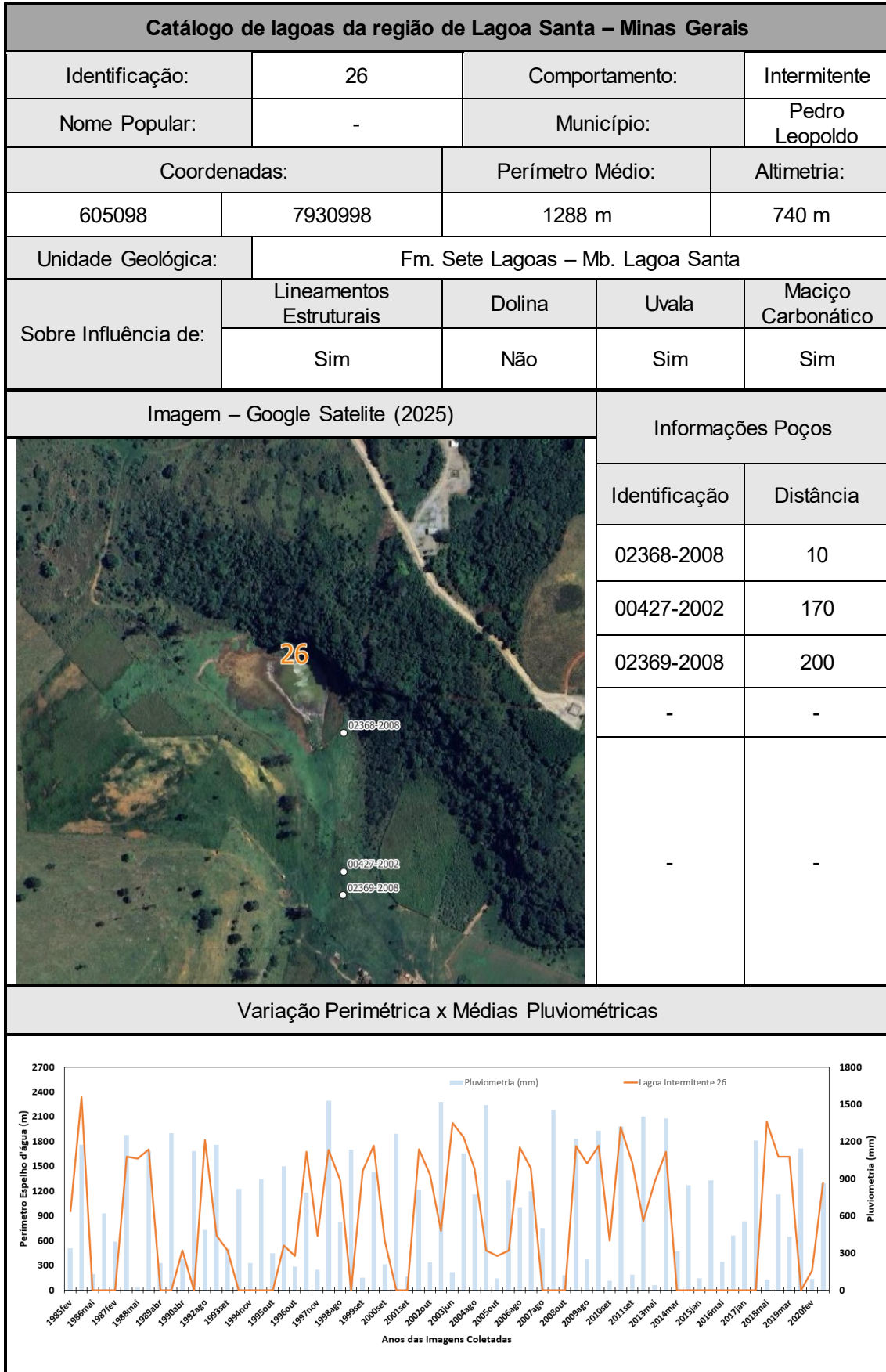


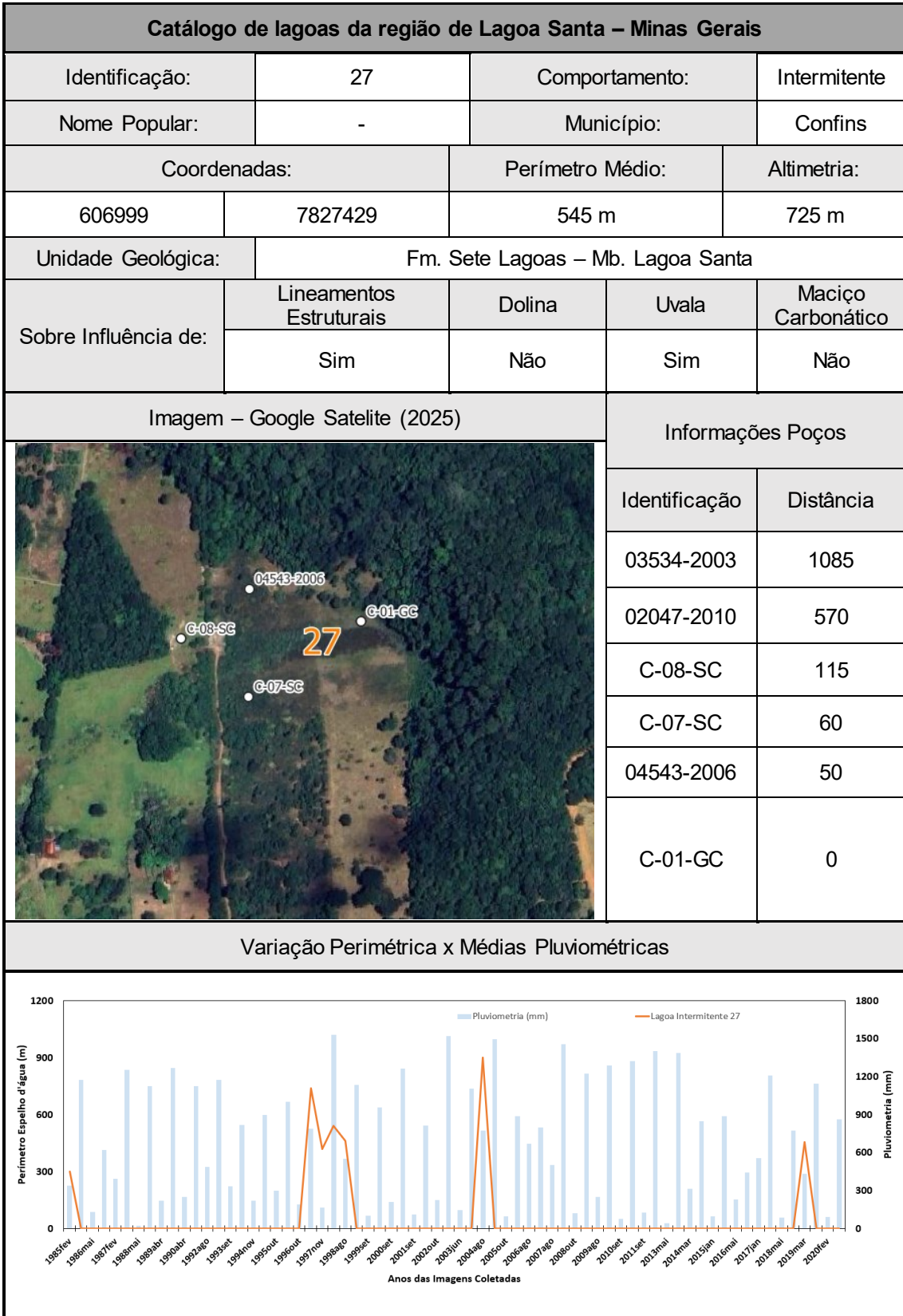


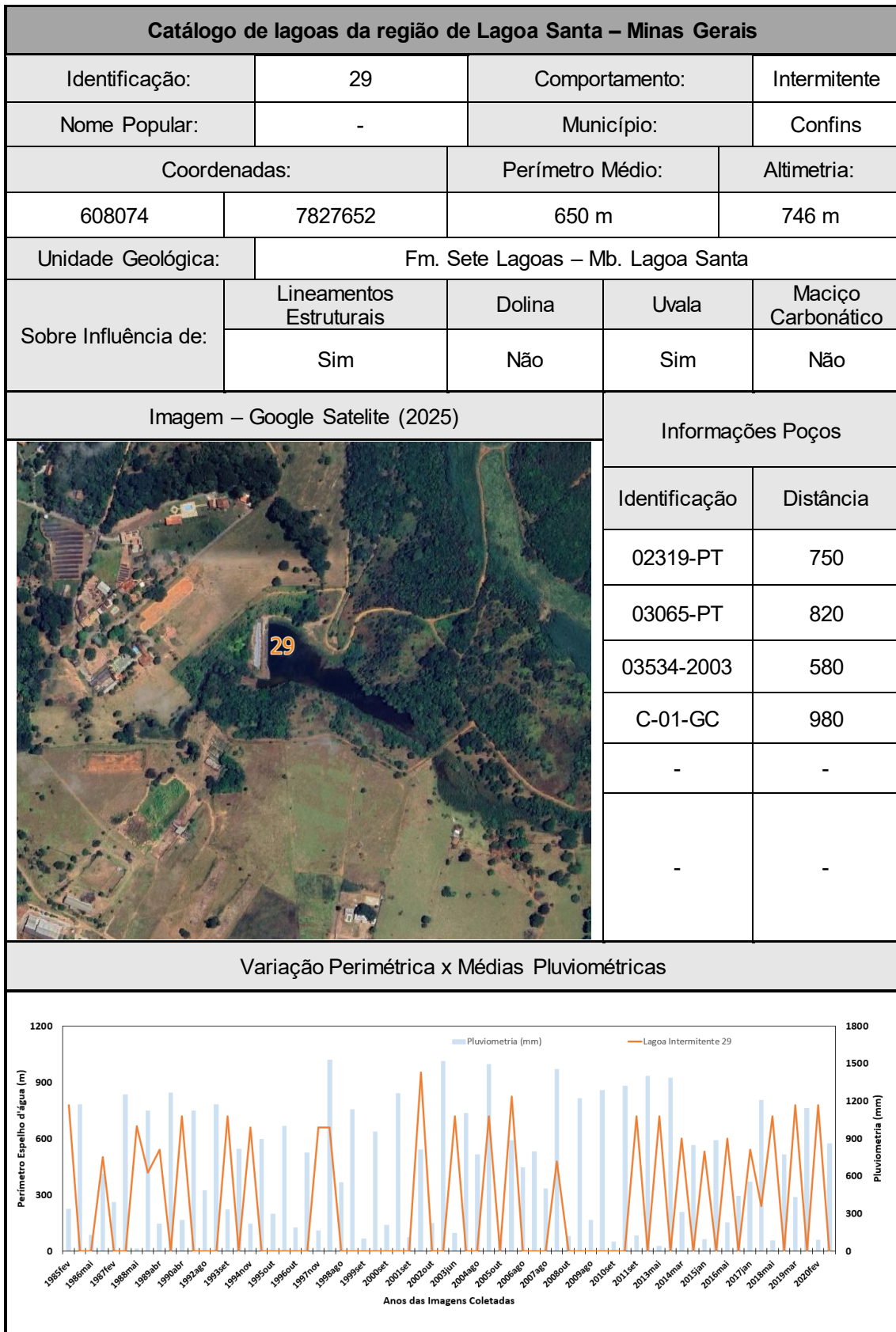


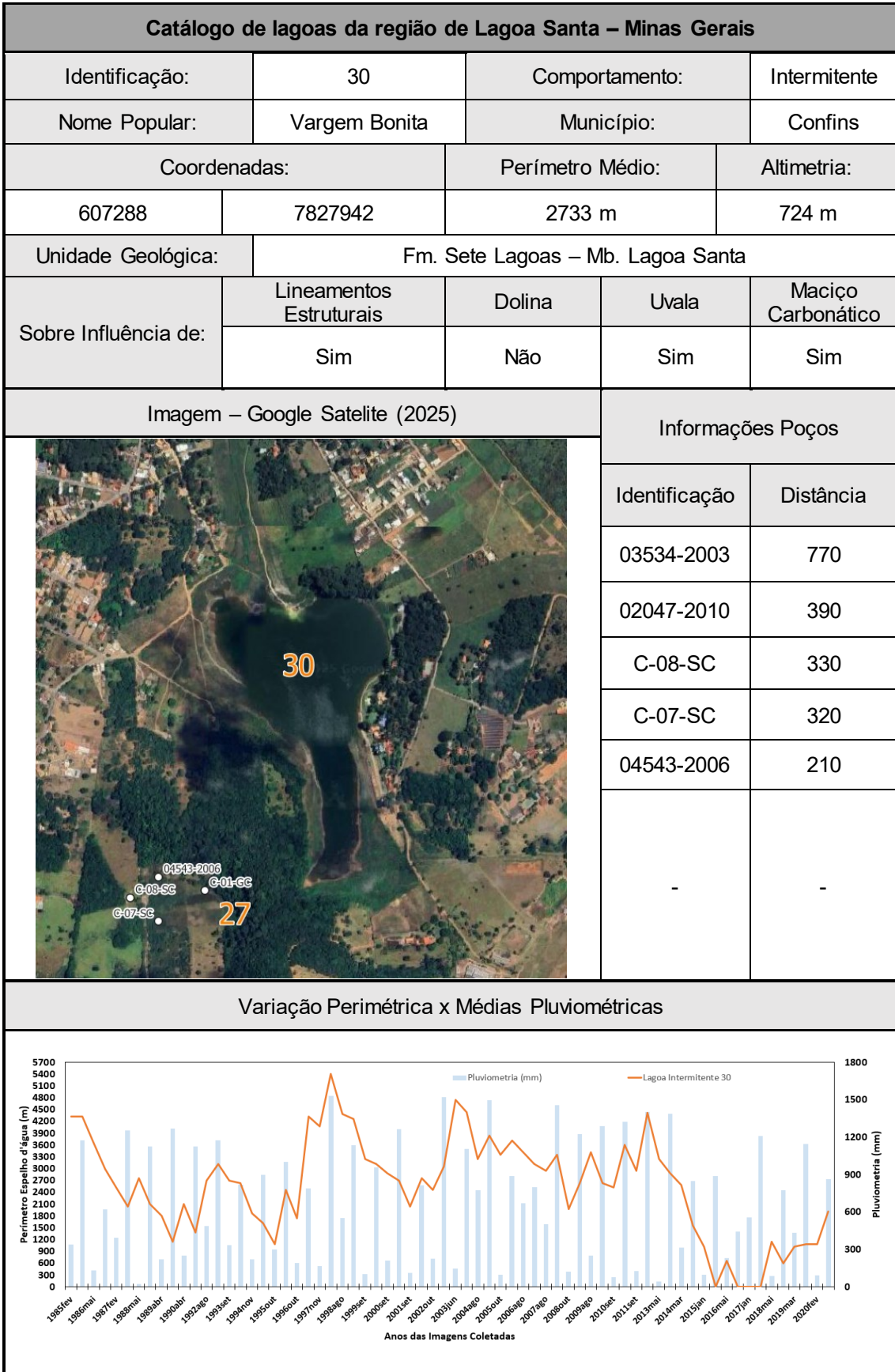


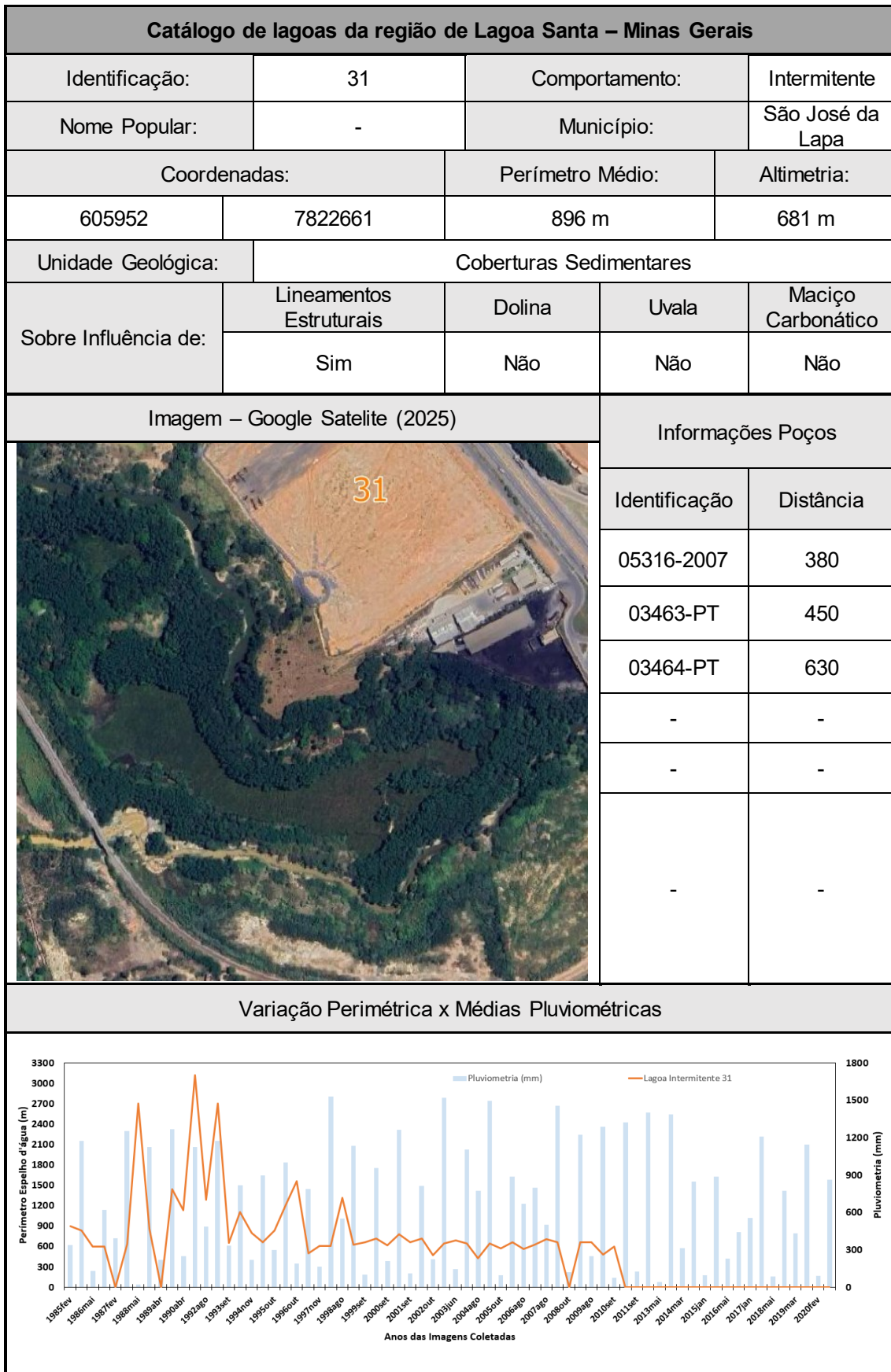
Catálogo de lagoas da região de Lagoa Santa – Minas Gerais				
Identificação:	24	Comportamento:	Intermitente	
Nome Popular:	Lagoa de Confins	Município:	Confins	
Coordenadas:		Perímetro Médio:	Altimetria:	
606327	7829217	2473 m	724 m	
Unidade Geológica:	Fm. Sete Lagoas – Mb. Lagoa Santa			
Sobre Influência de:	Lineamentos Estruturais	Dolina	Uvala	Maciço Carbonático
	Sim	Não	Sim	Não
Imagem – Google Satellite (2025)			Informações Poços	
			Identificação	Distância
			13253-2008	615
			C-06-SM	230
			05972-PT	290
			05973-PT	280
			05971-PT	300
			02319-PT	50
			03065-PT	190
			03063-PT	400
			C-03-SC	520
03534-2003	600			
Variação Perimétrica x Médias Pluviométricas				
				



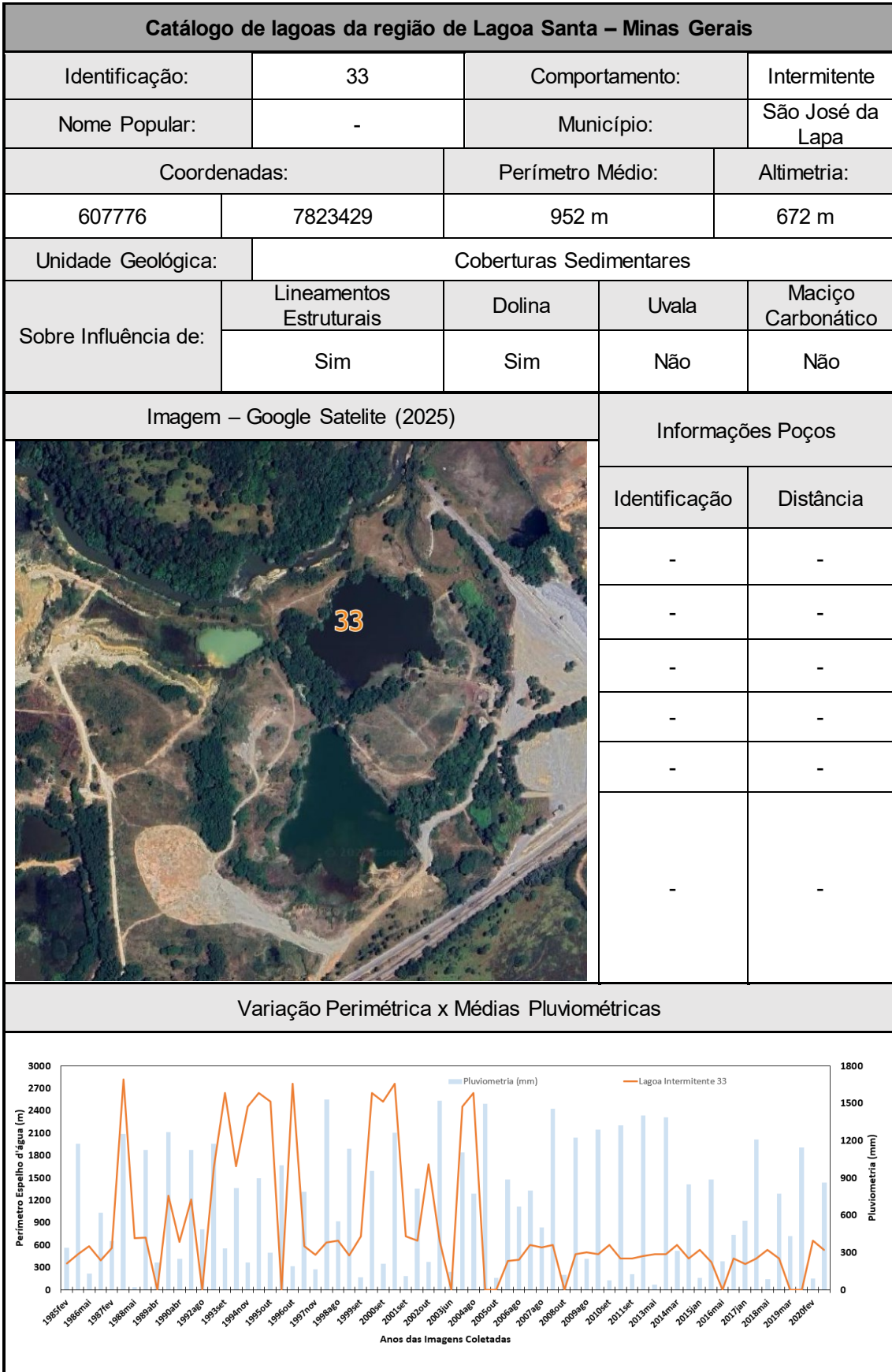


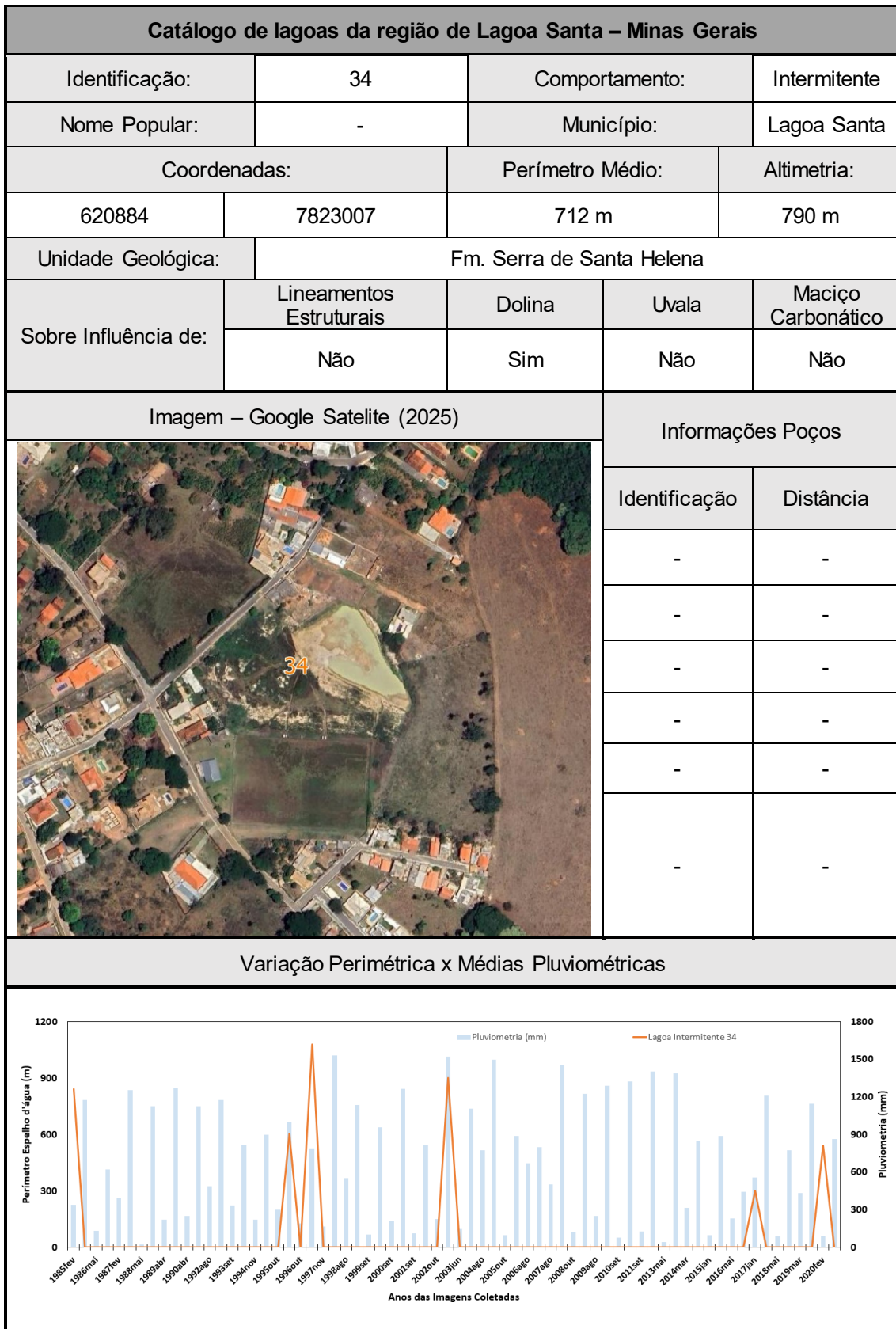


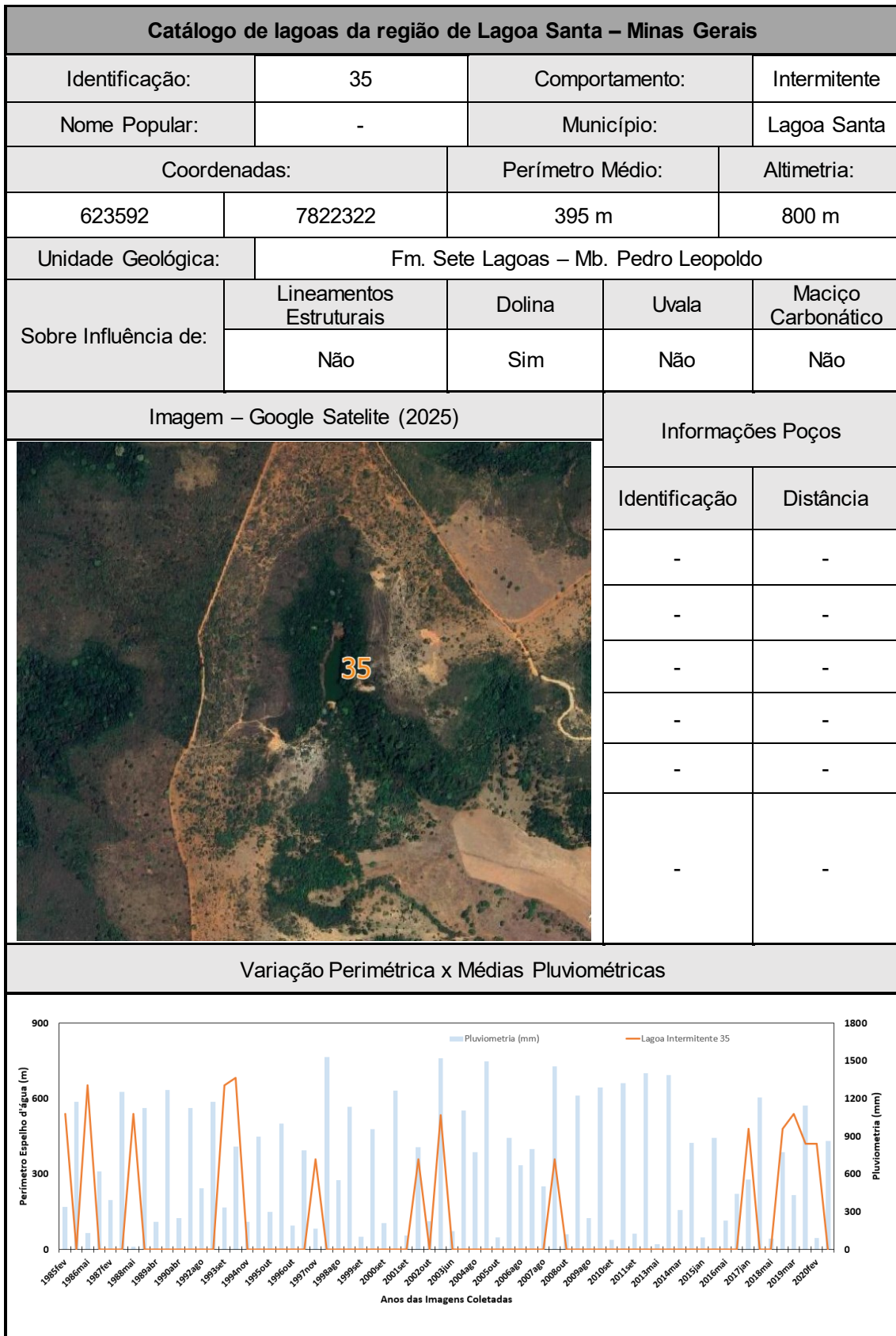


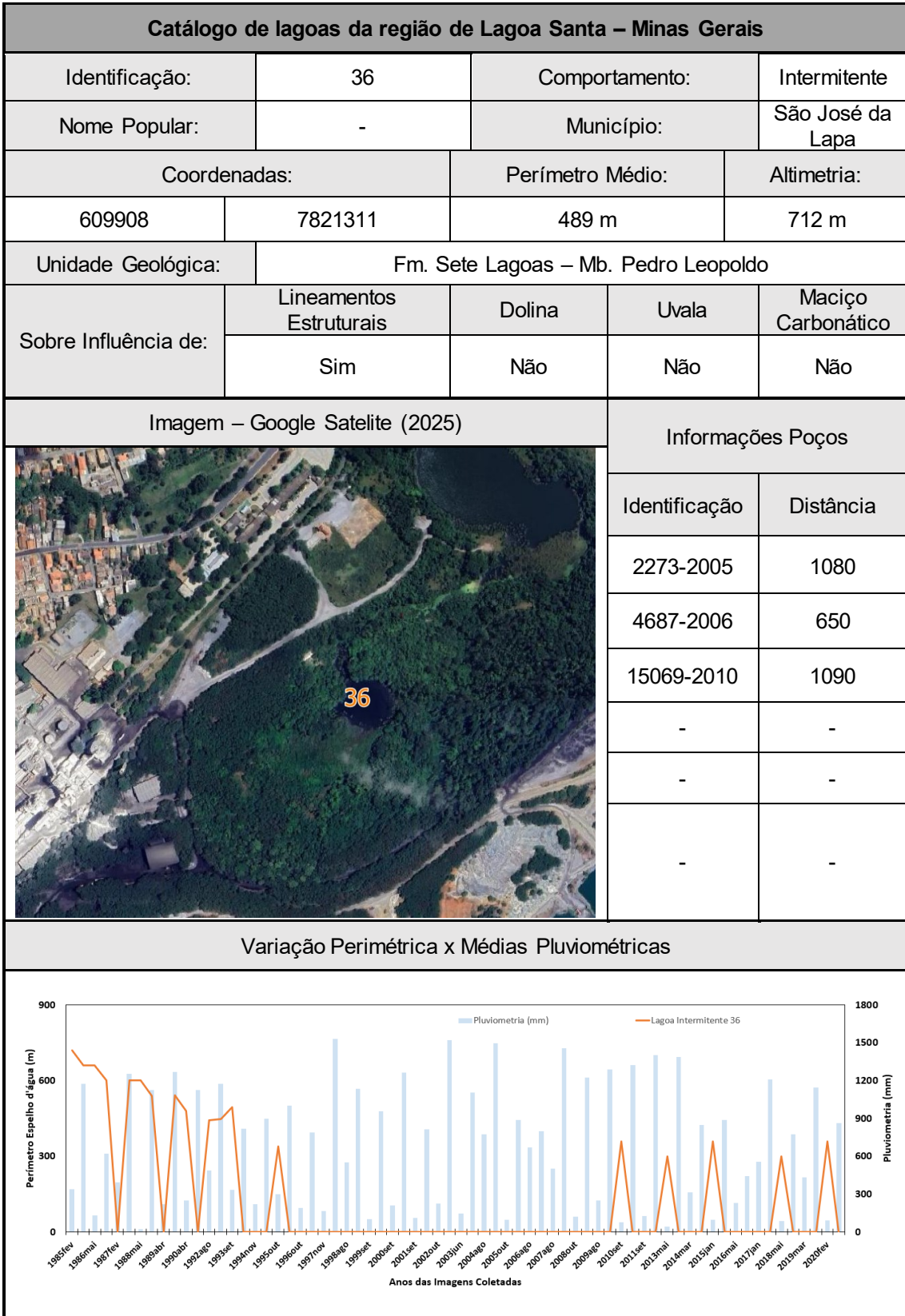


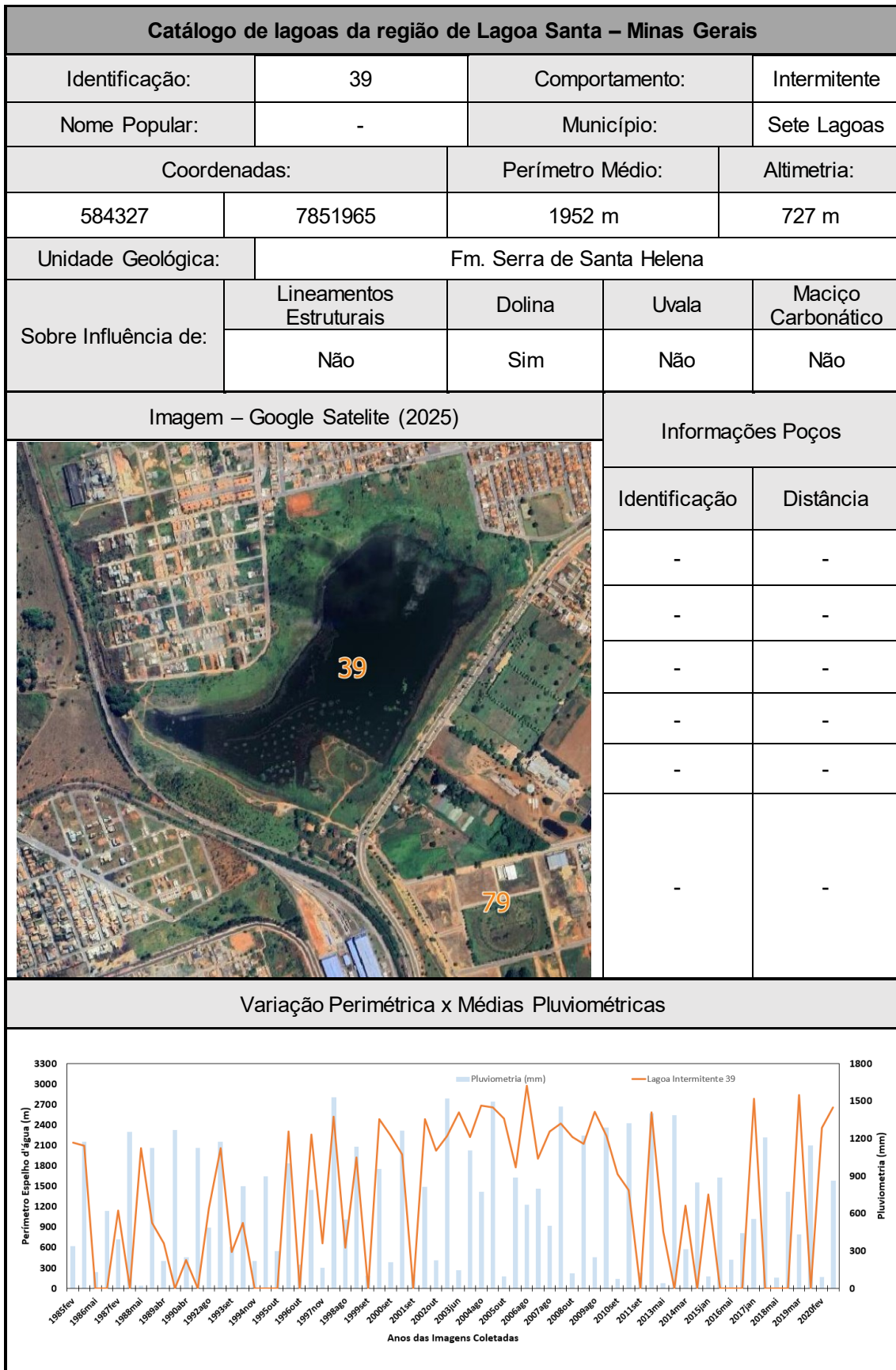


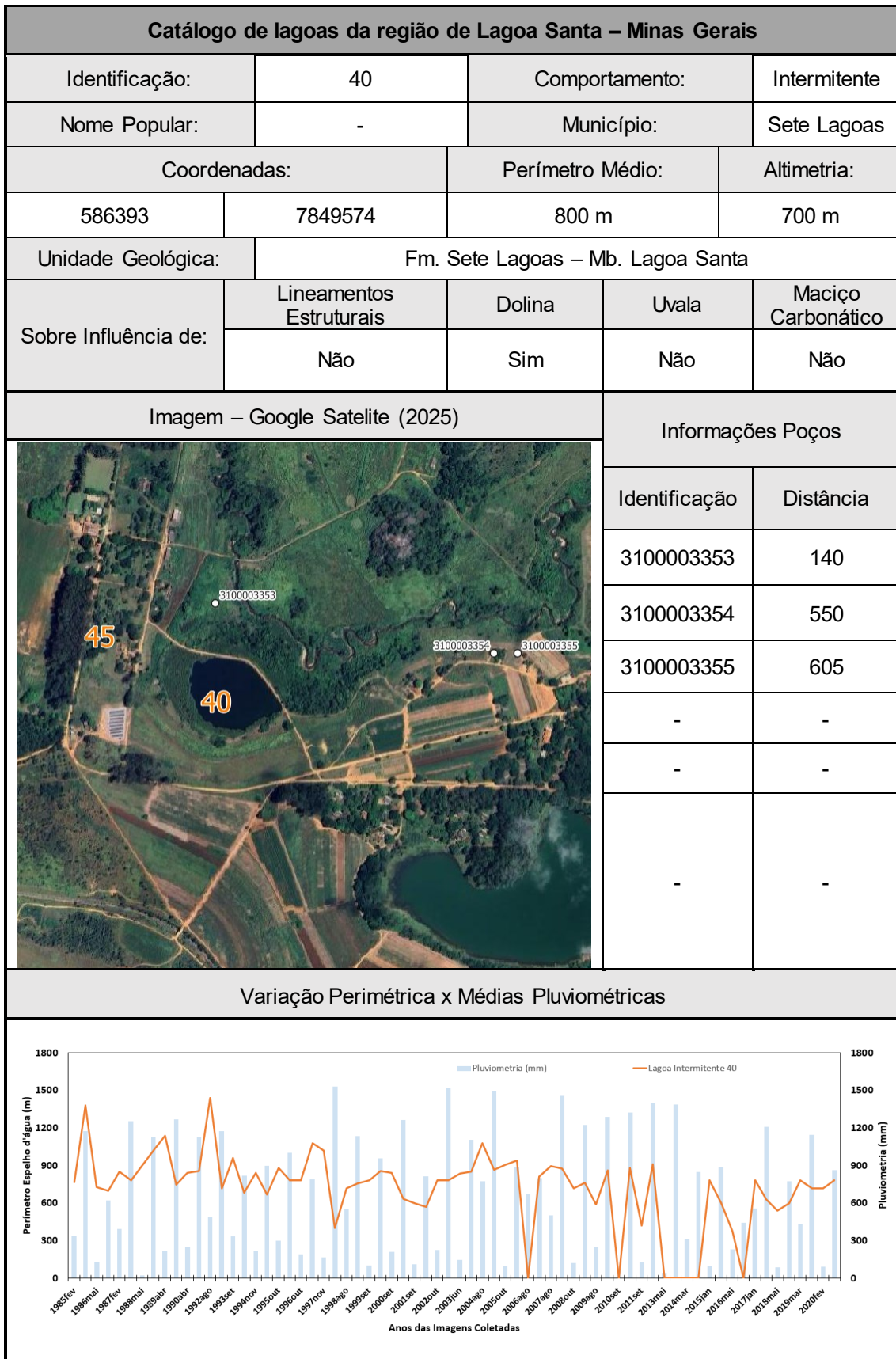


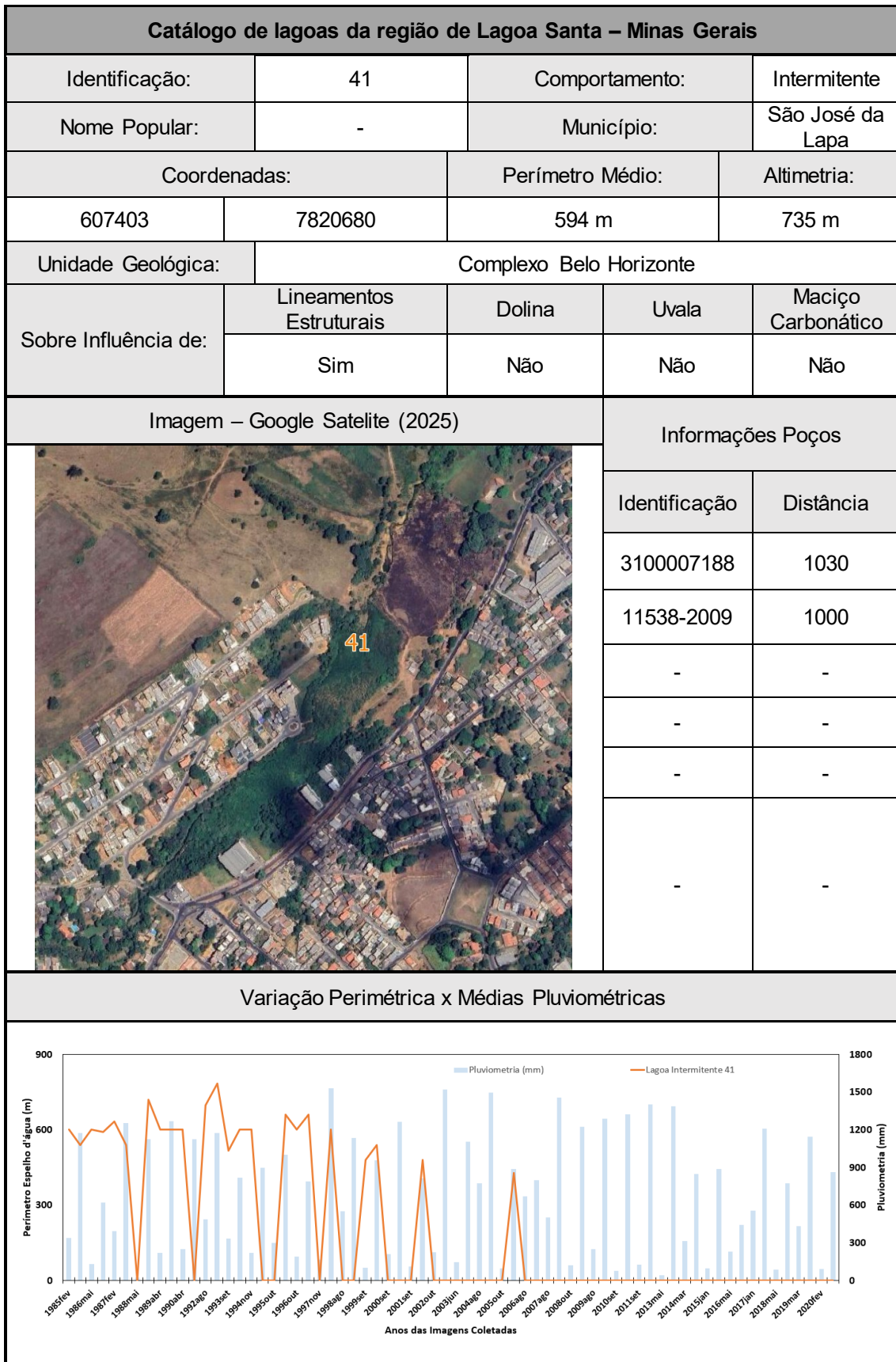


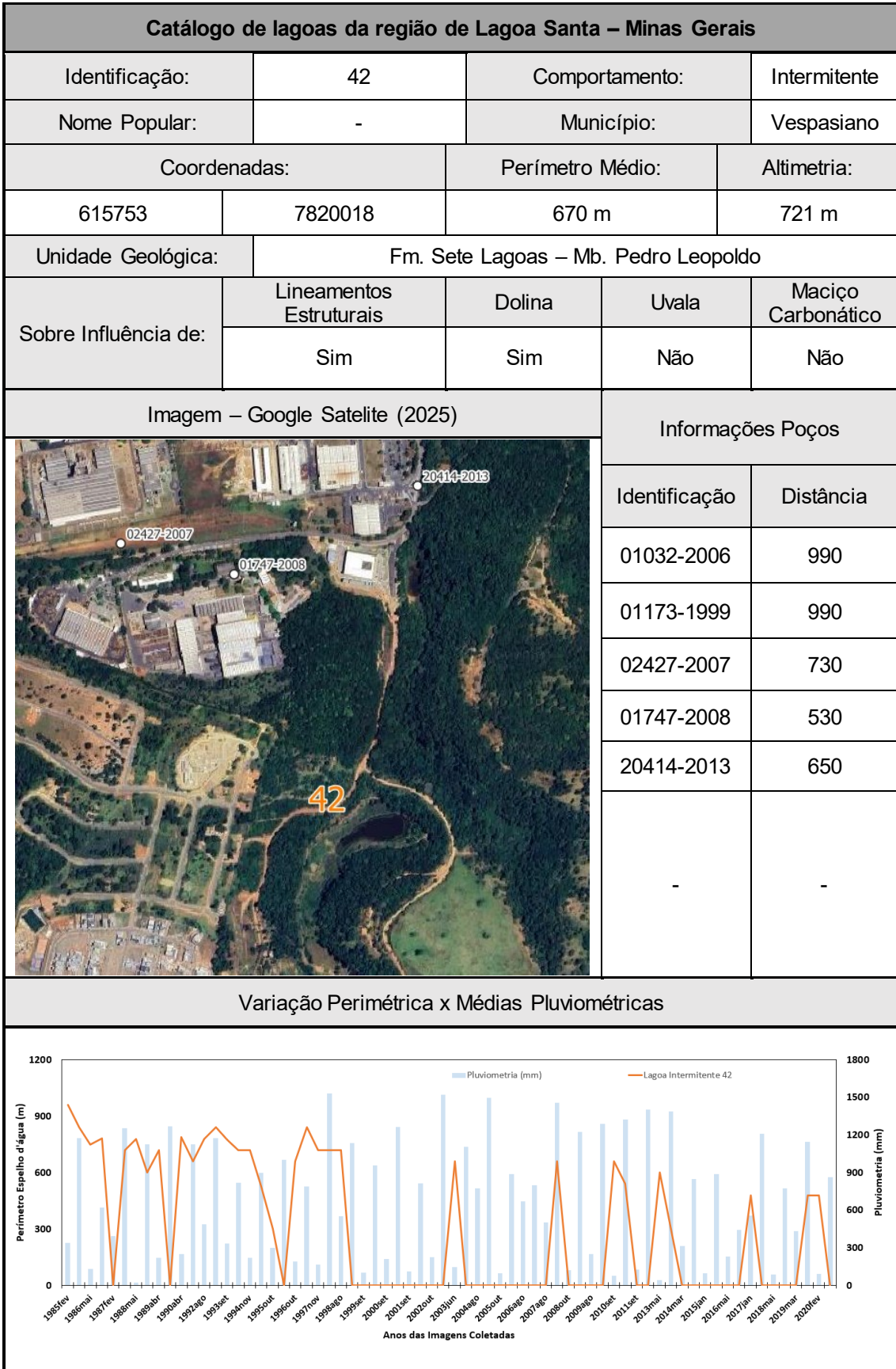


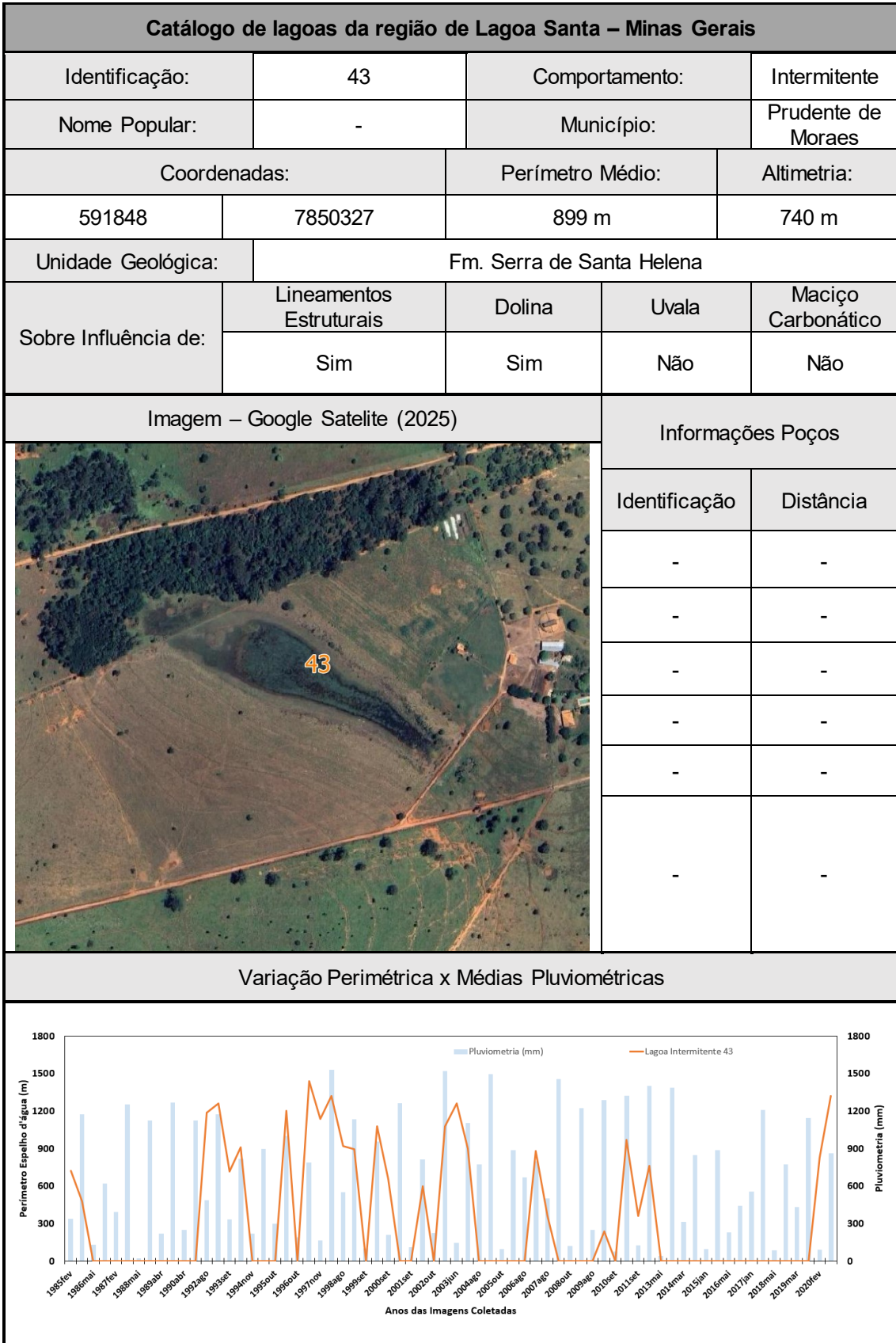


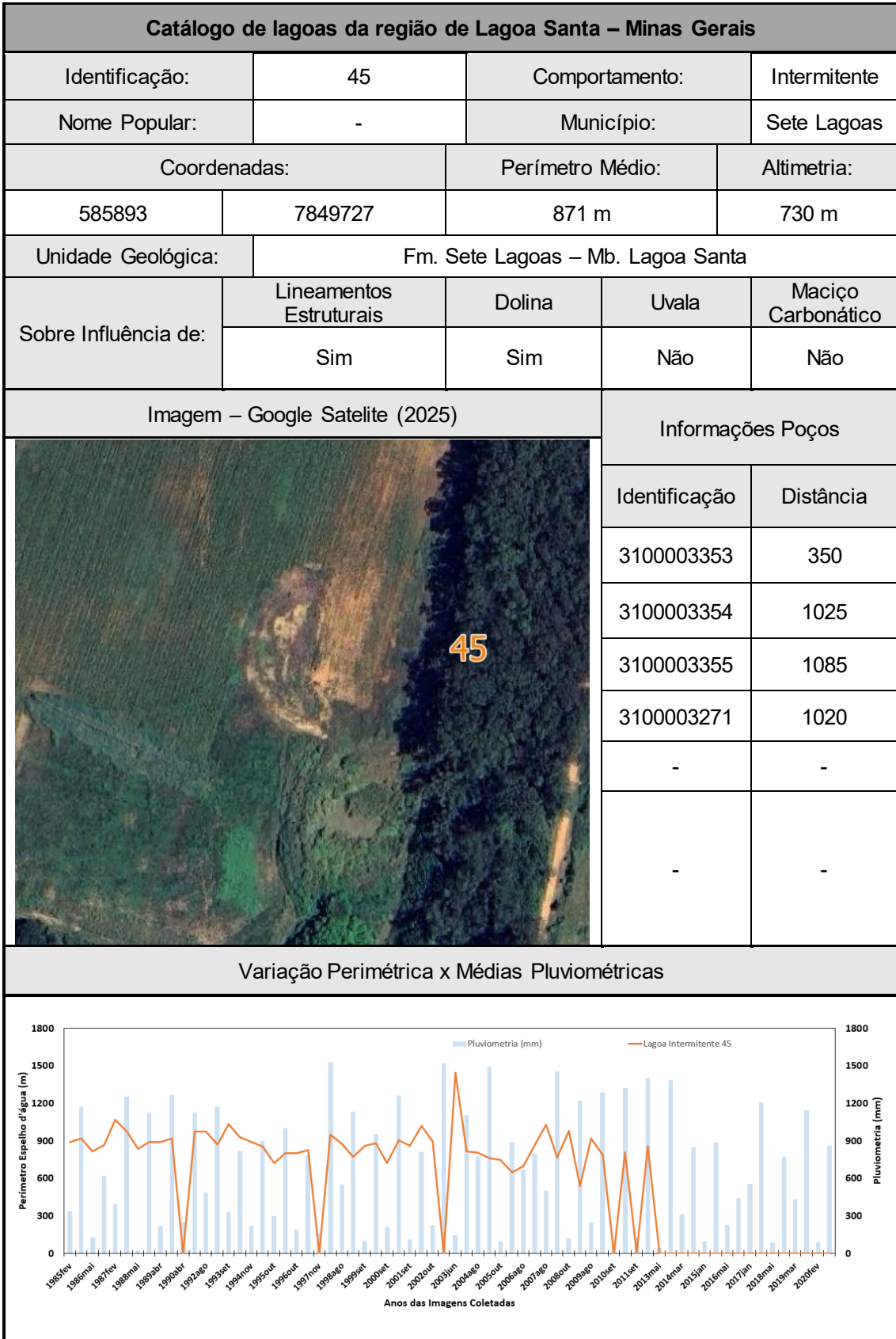


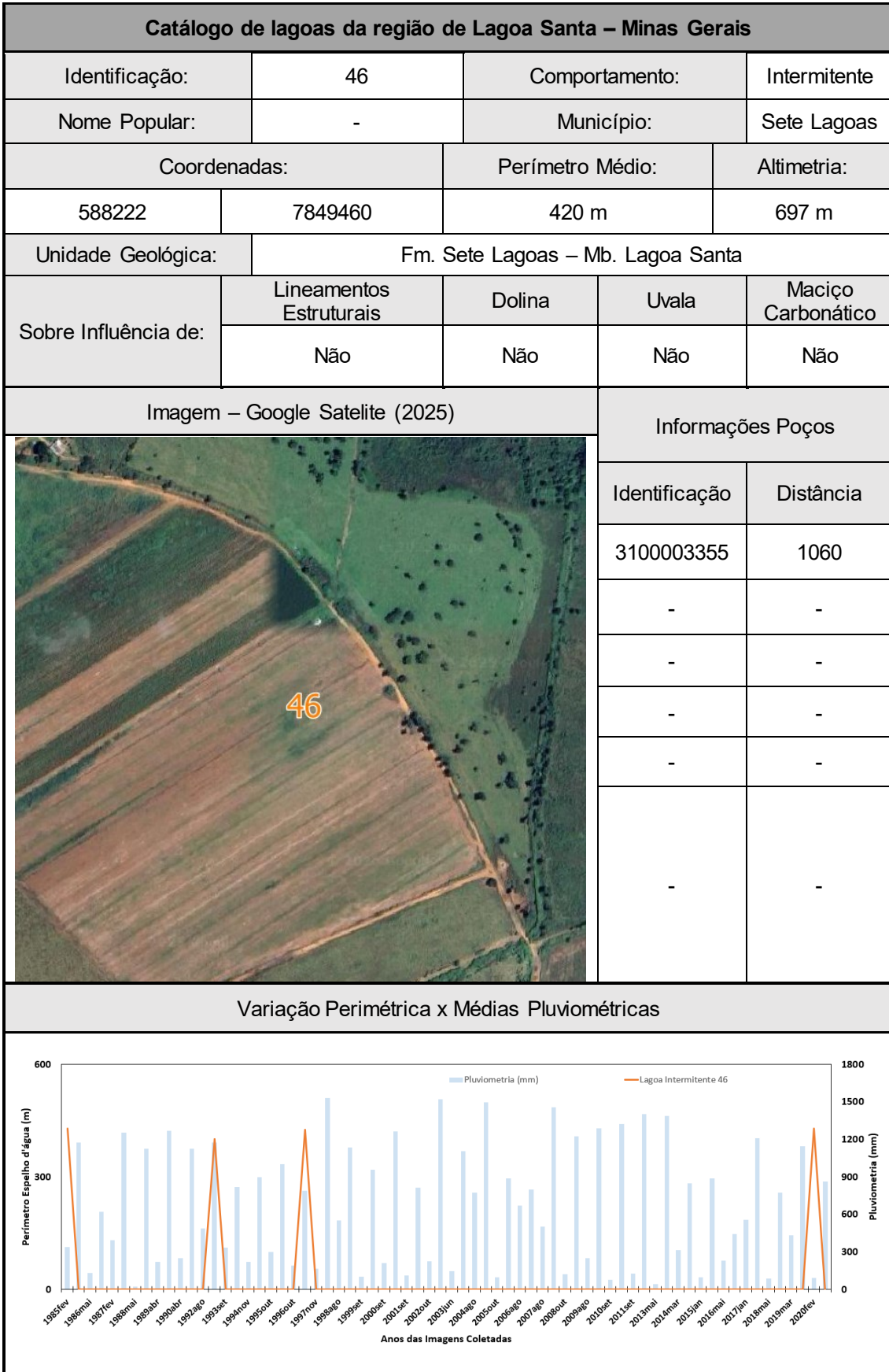


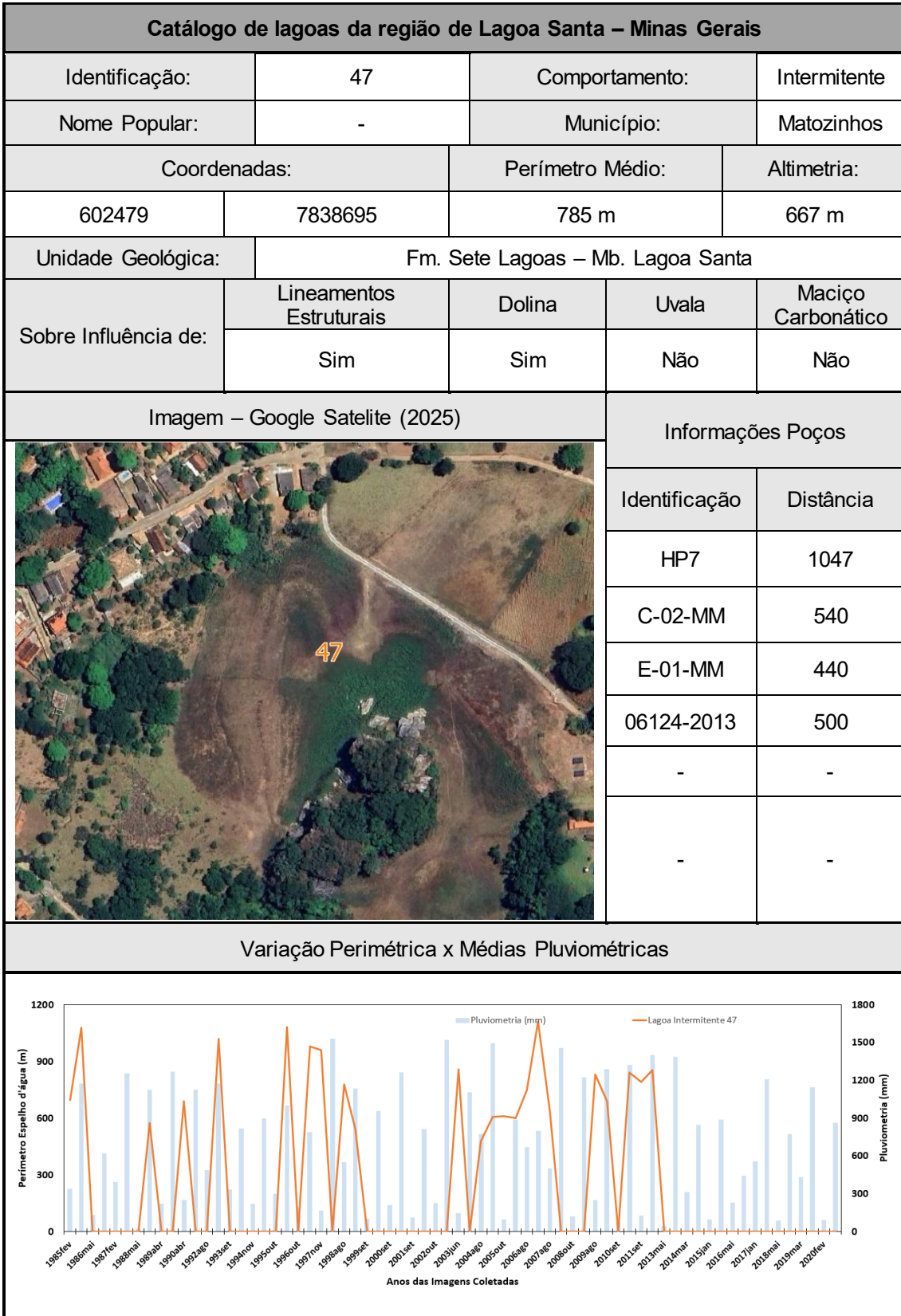


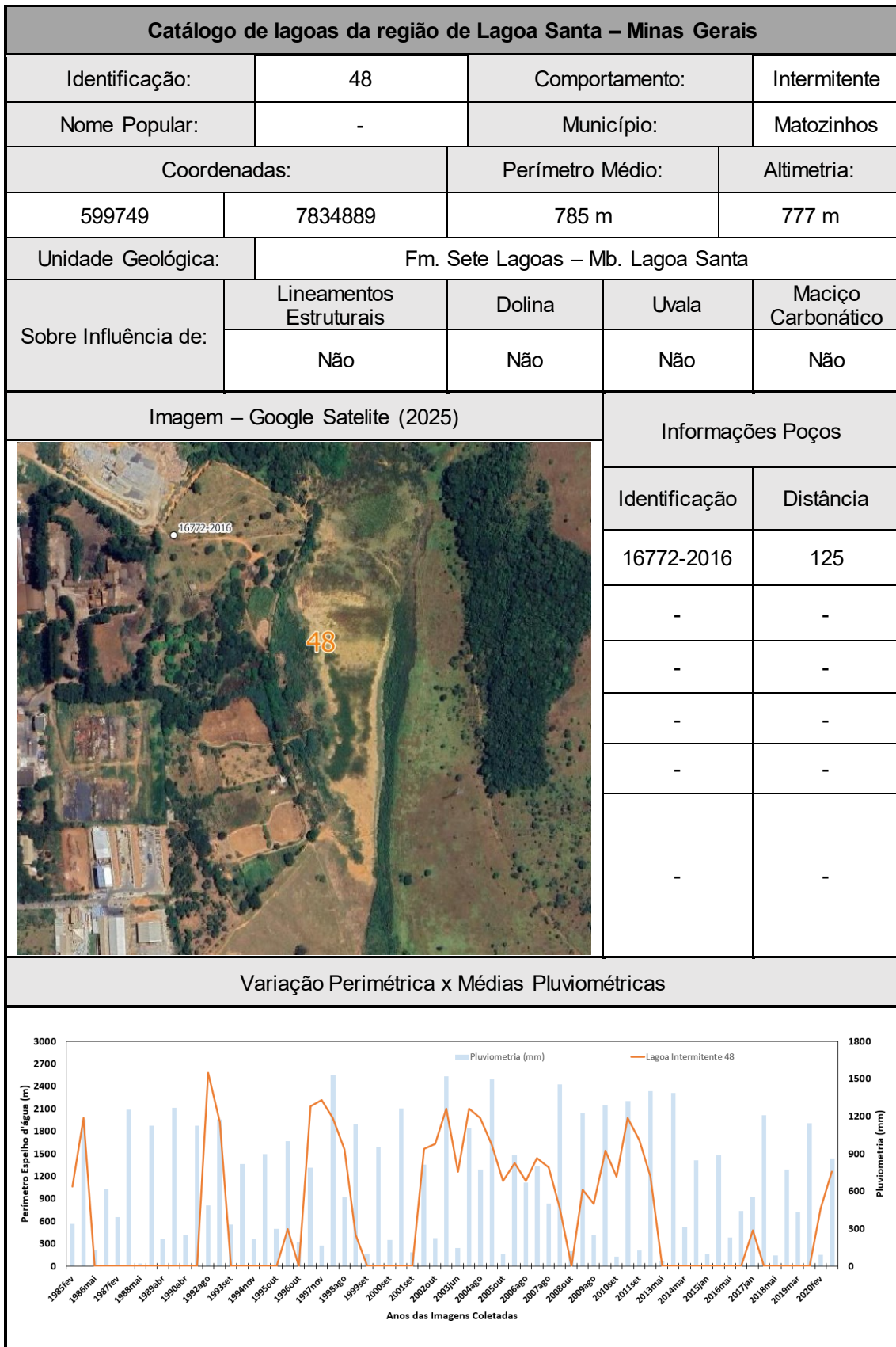


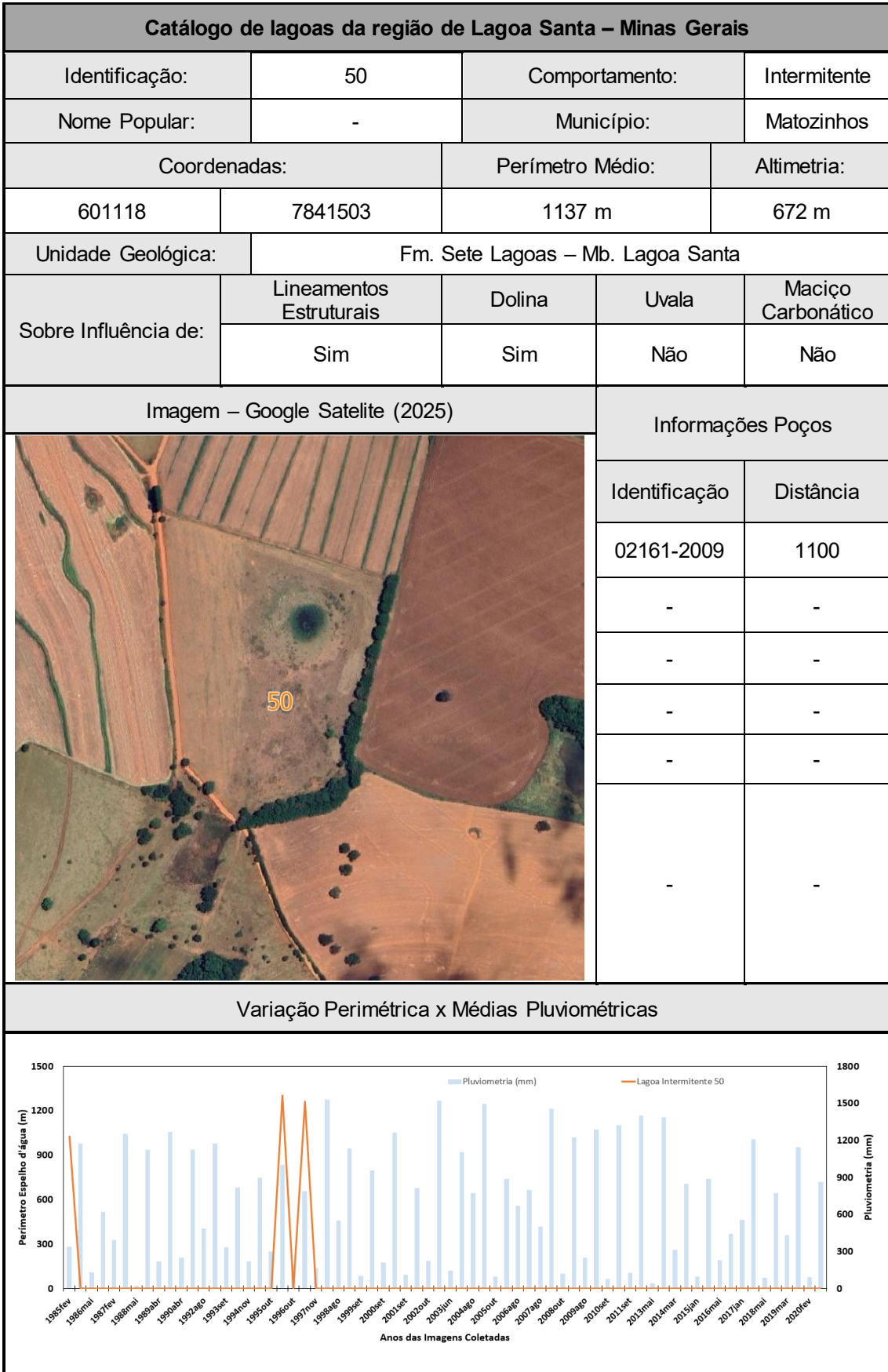


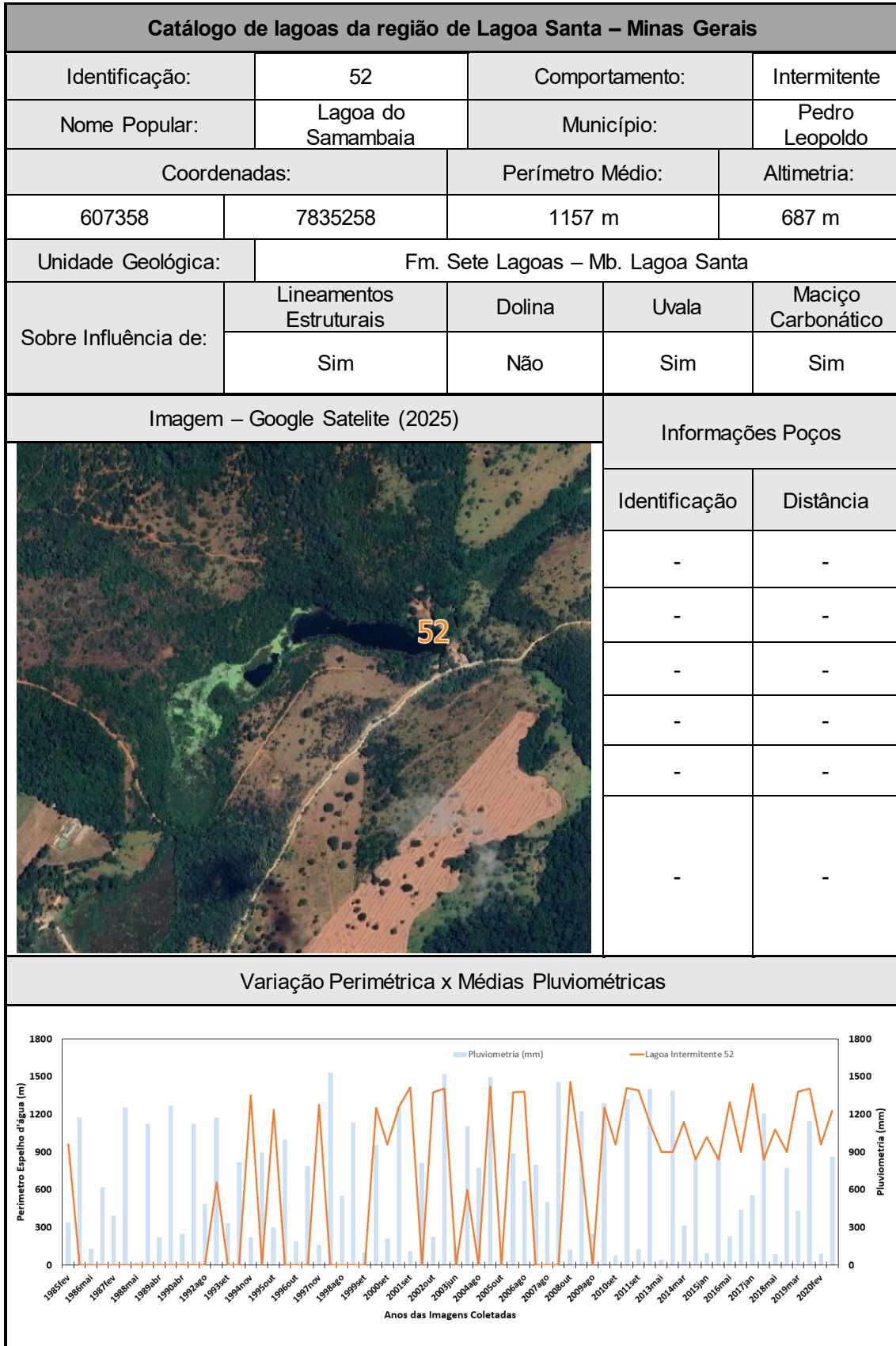


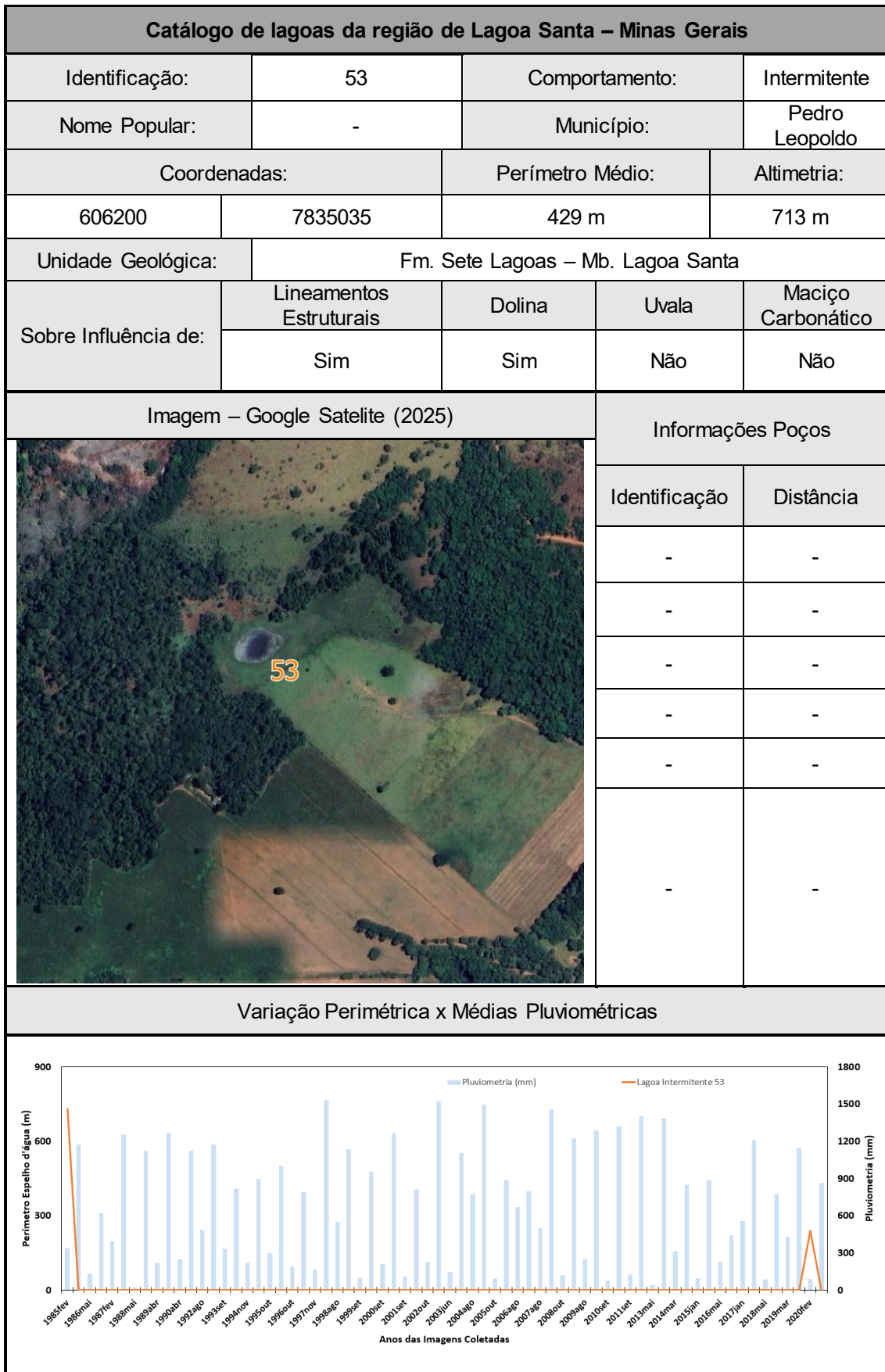


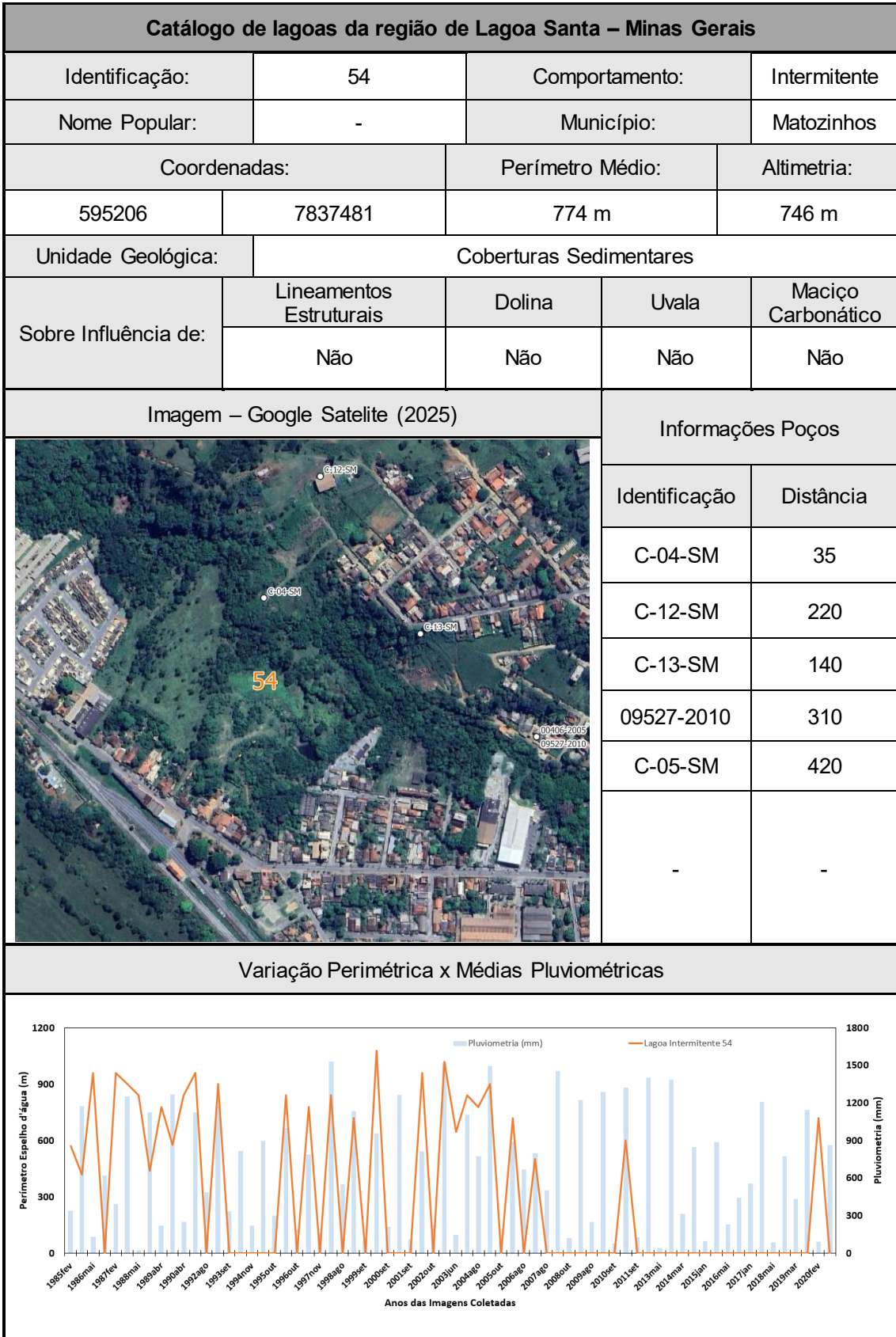



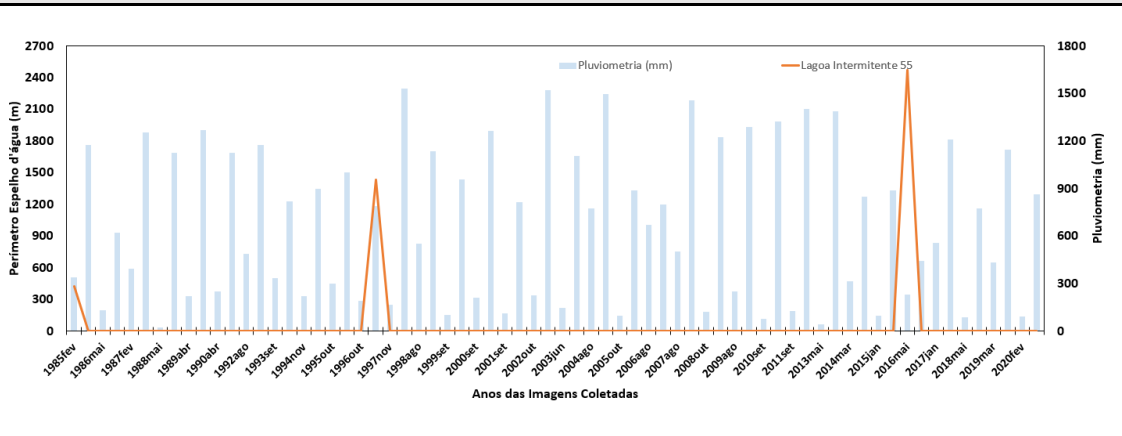


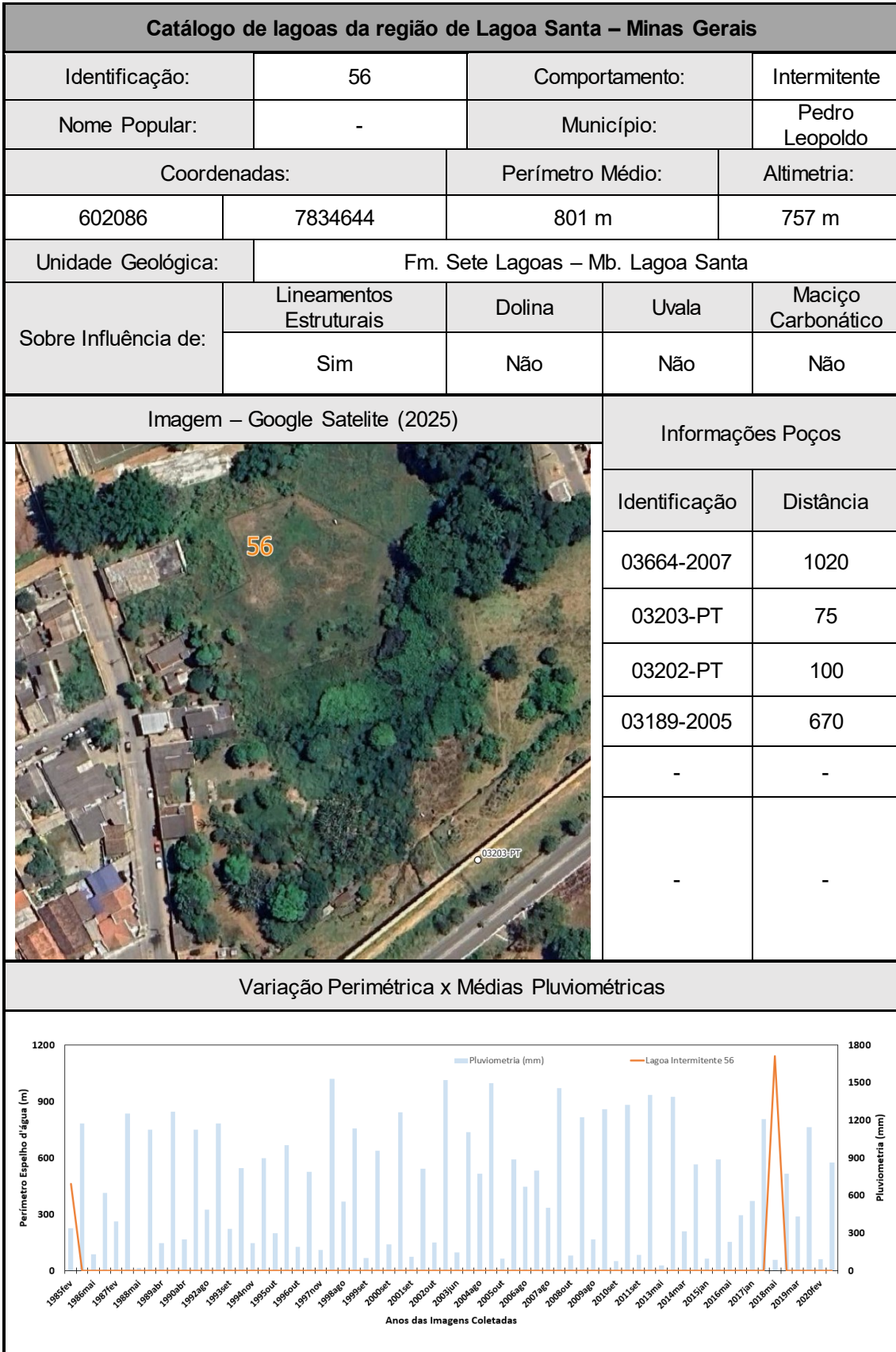


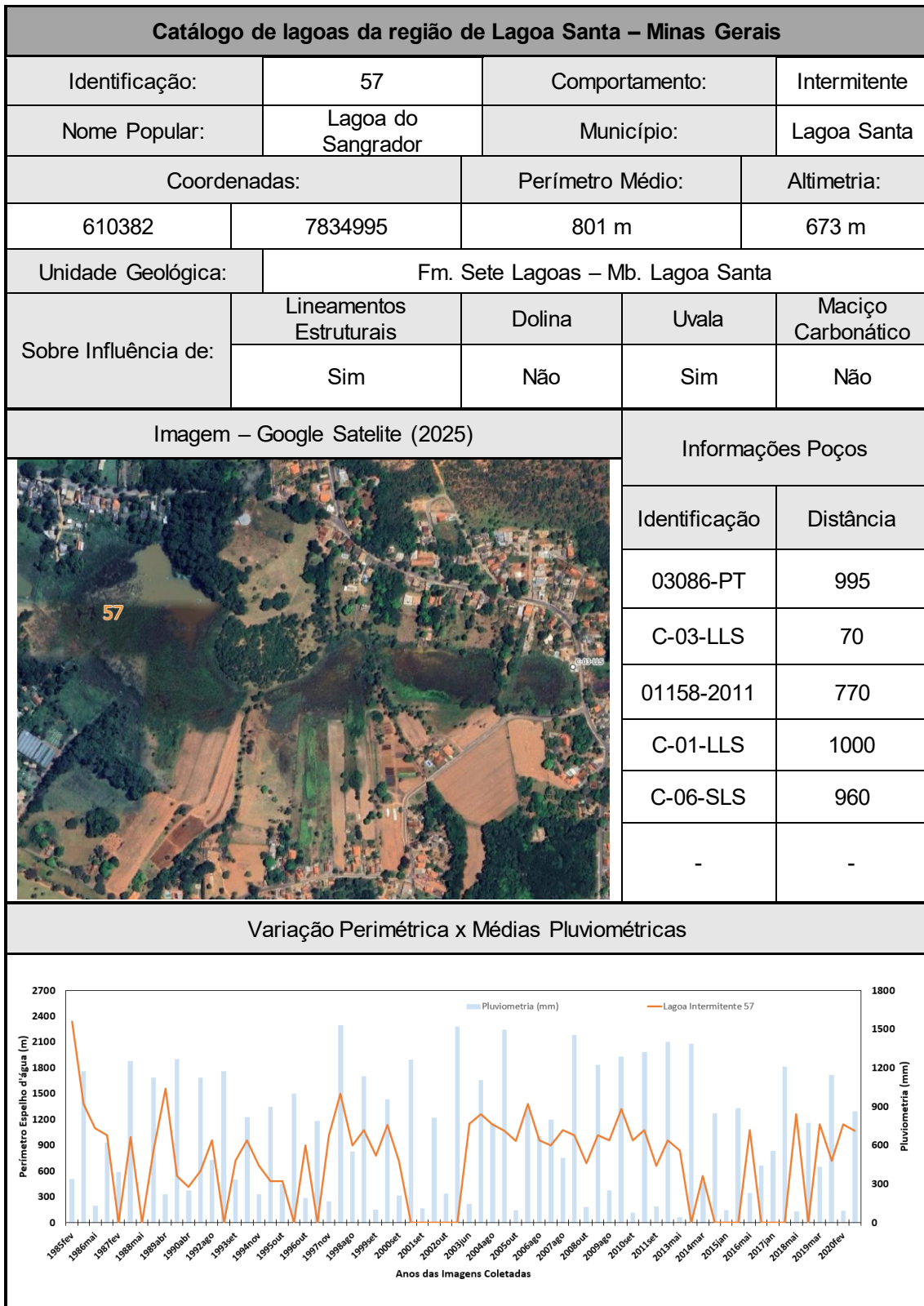



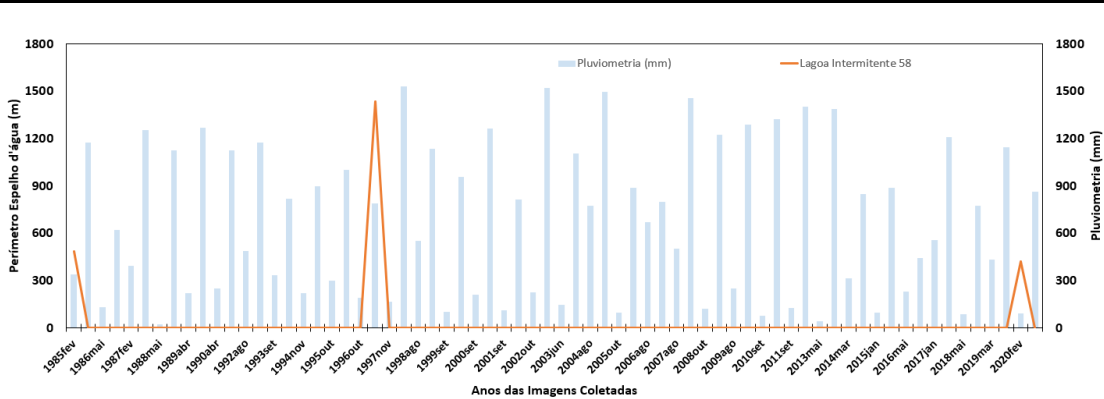


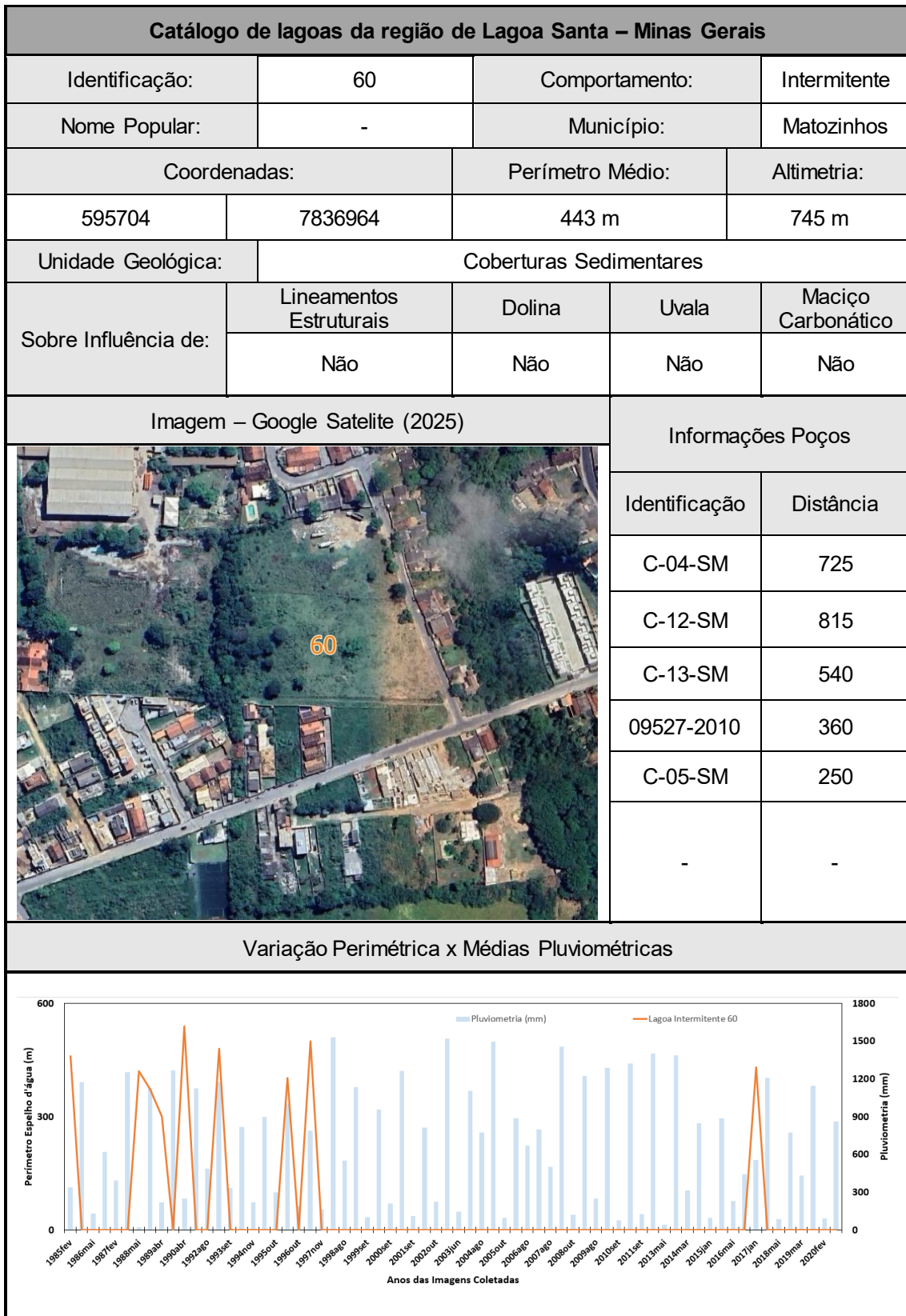


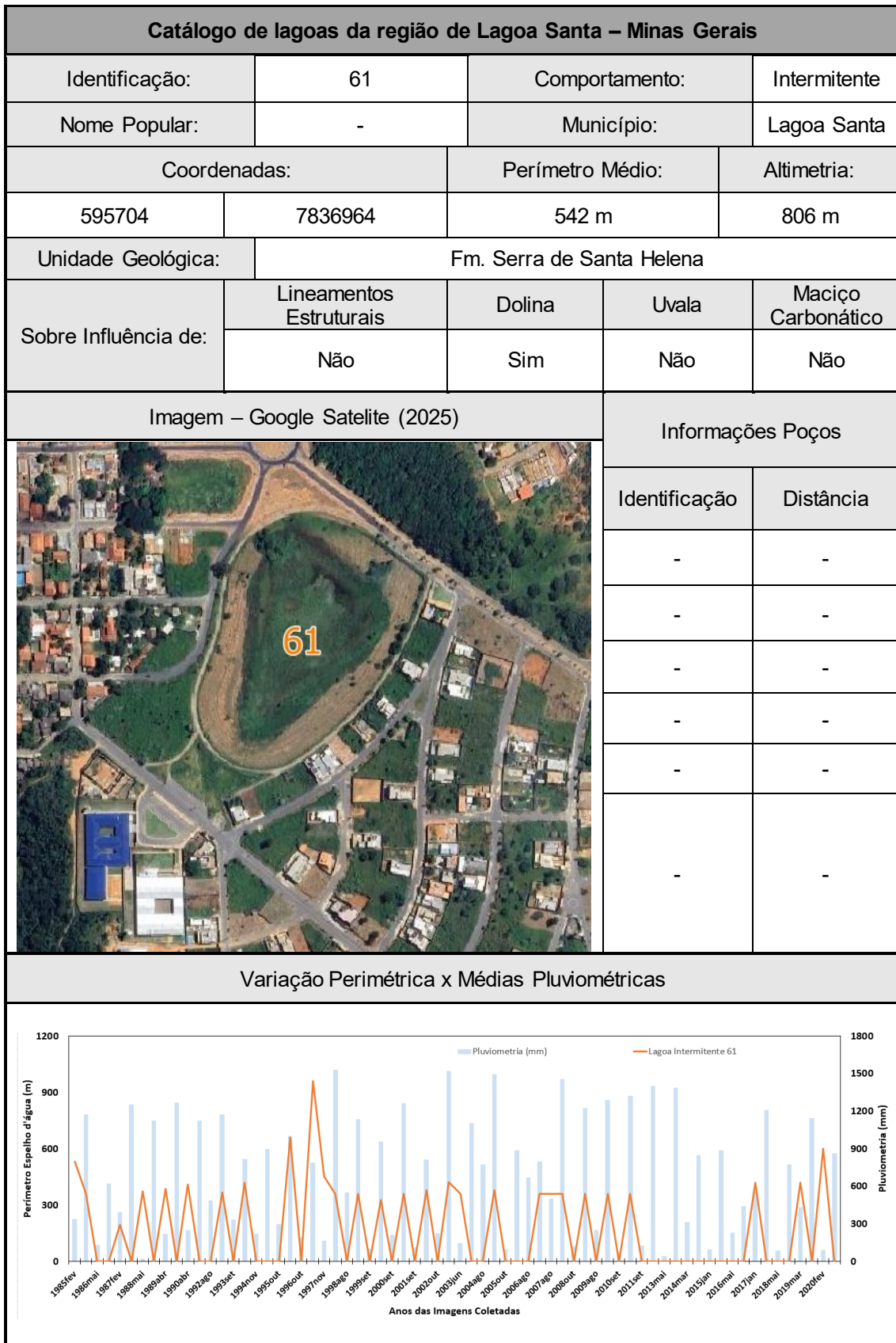
Catálogo de lagoas da região de Lagoa Santa – Minas Gerais				
Identificação:	55	Comportamento:	Intermitente	
Nome Popular:	-	Município:	Confins	
Coordenadas:		Perímetro Médio:	Altimetria:	
605992	7832137	1995 m	714 m	
Unidade Geológica:	Fm. Sete Lagoas – Mb. Lagoa Santa			
Sobre Influência de:	Lineamentos Estruturais	Dolina	Uvala	Maciço Carbonático
	Sim	Não	Sim	Não
Imagem – Google Satellite (2025)			Informações Poços	
			Identificação	Distância
			-	-
			-	-
			-	-
			-	-
			-	-
			-	-
Variação Perimétrica x Médias Pluviométricas				
				

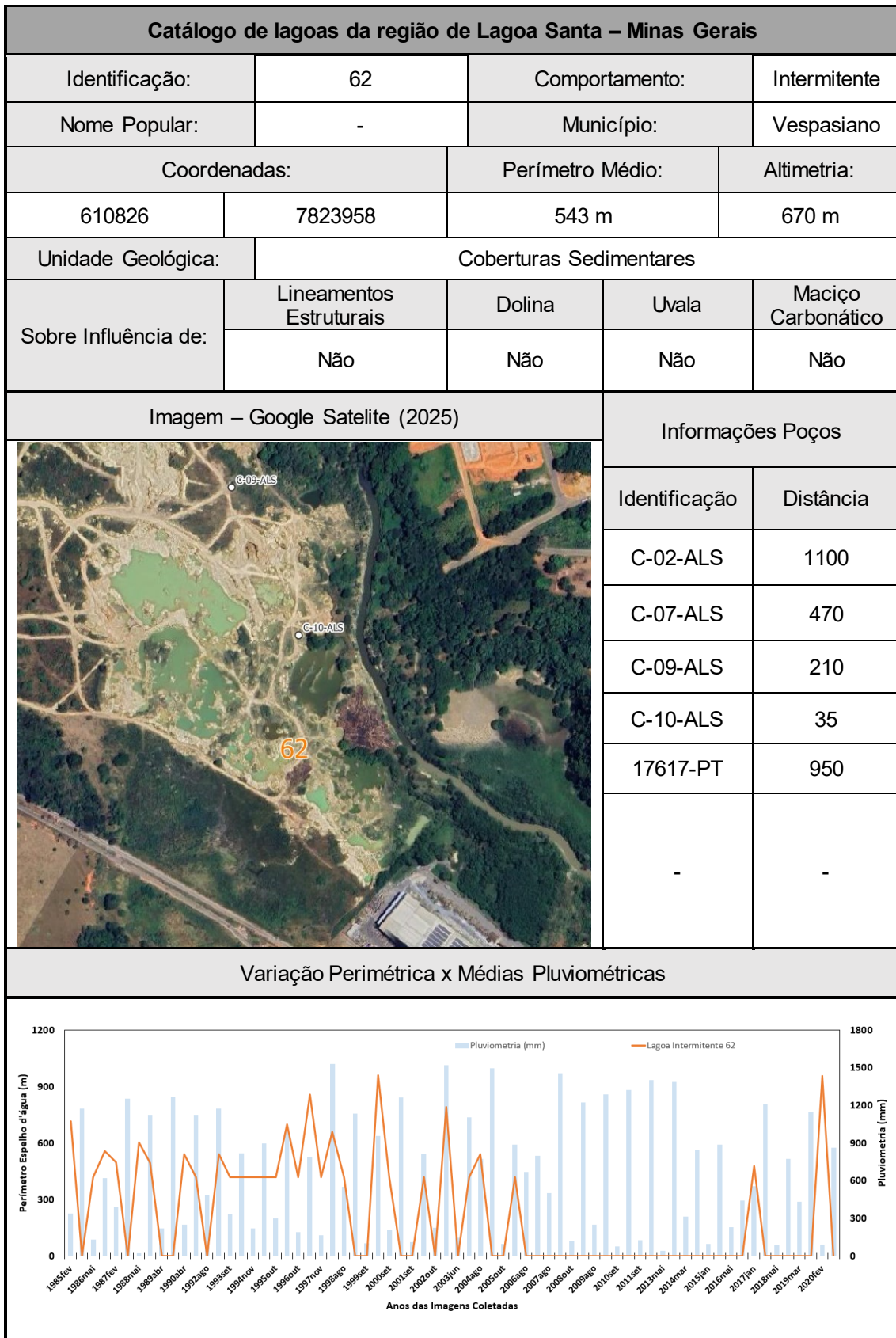


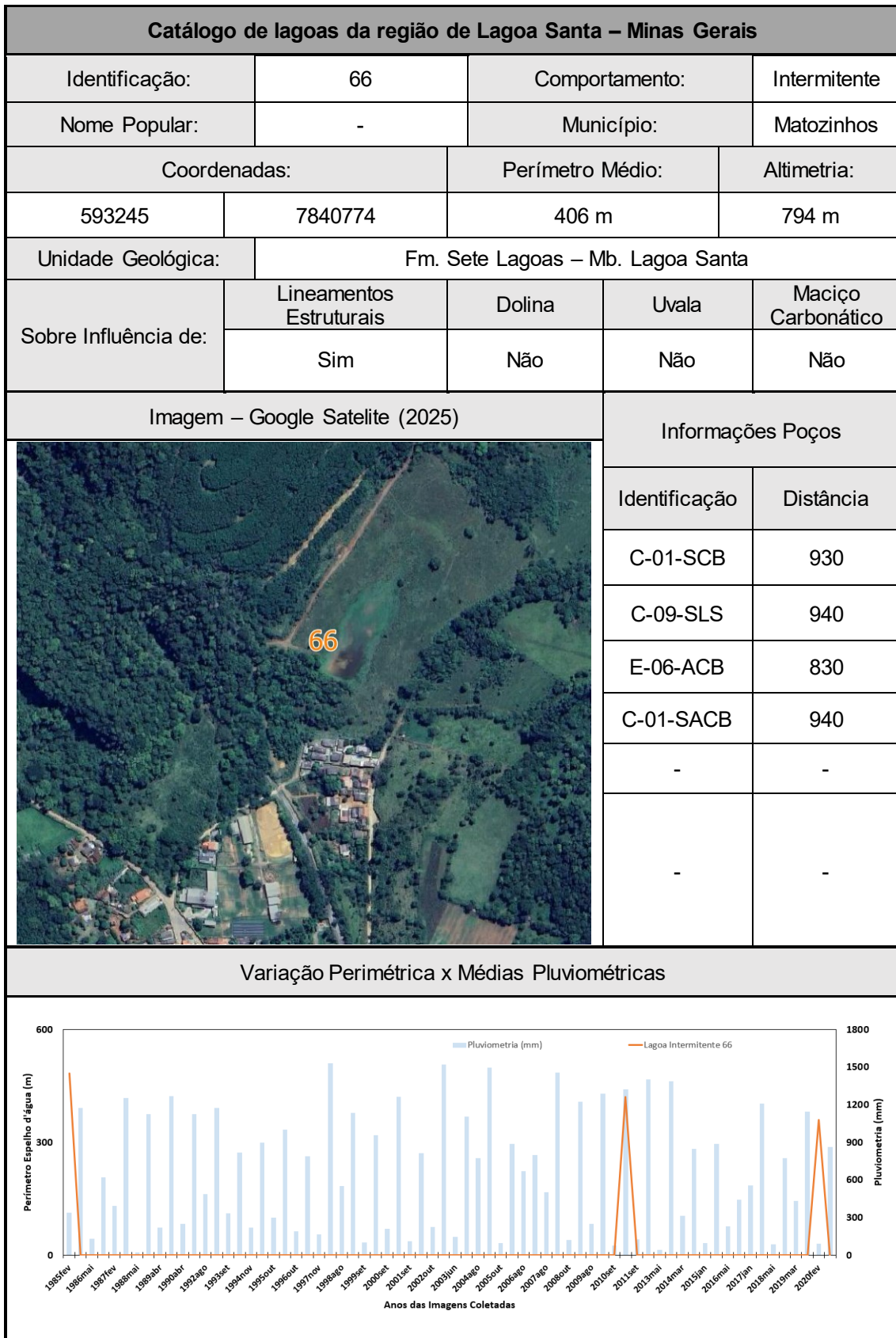


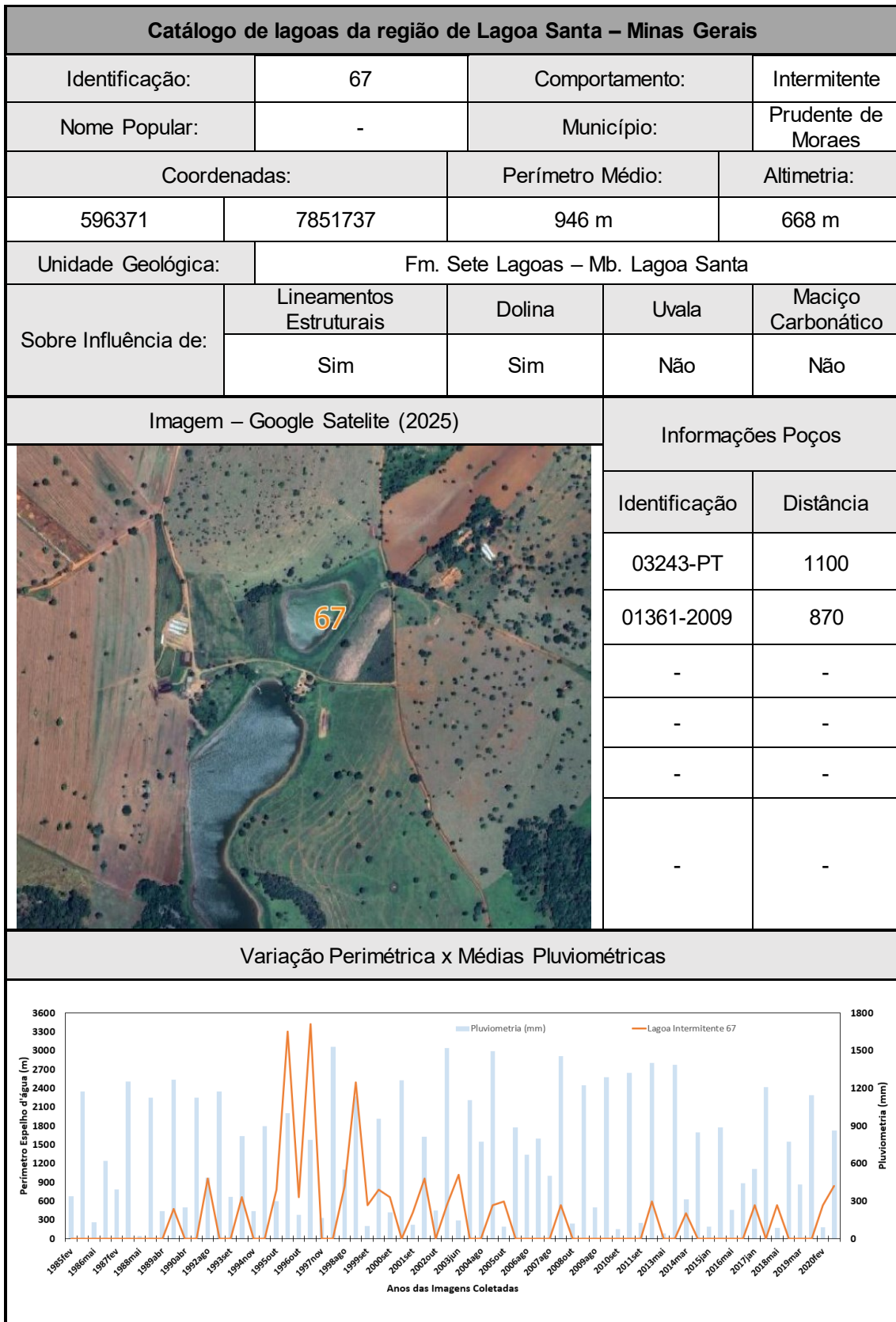
Catálogo de lagoas da região de Lagoa Santa – Minas Gerais				
Identificação:	58	Comportamento:	Intermitente	
Nome Popular:	-	Município:	Confins	
Coordenadas:		Perímetro Médio:	Altimetria:	
606316	7832157	690 m	718 m	
Unidade Geológica:	Fm. Sete Lagoas – Mb. Lagoa Santa			
Sobre Influência de:	Lineamentos Estruturais	Dolina	Uvala	Maciço Carbonático
	Sim	Não	Sim	Sim
Imagem – Google Satellite (2025)			Informações Poços	
			Identificação	Distância
			-	-
			-	-
			-	-
			-	-
			-	-
			-	-
Variação Perimétrica x Médias Pluviométricas				
				

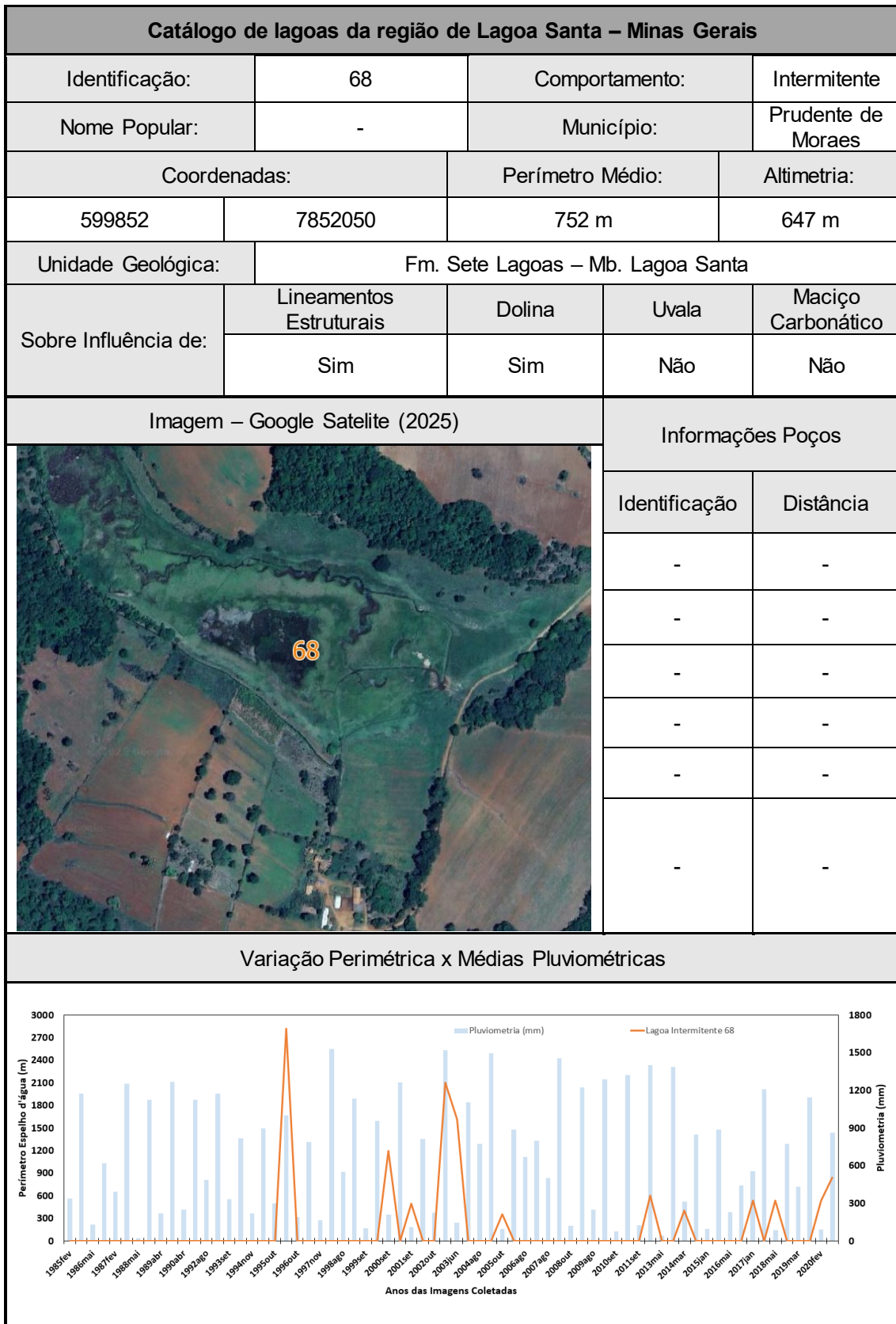


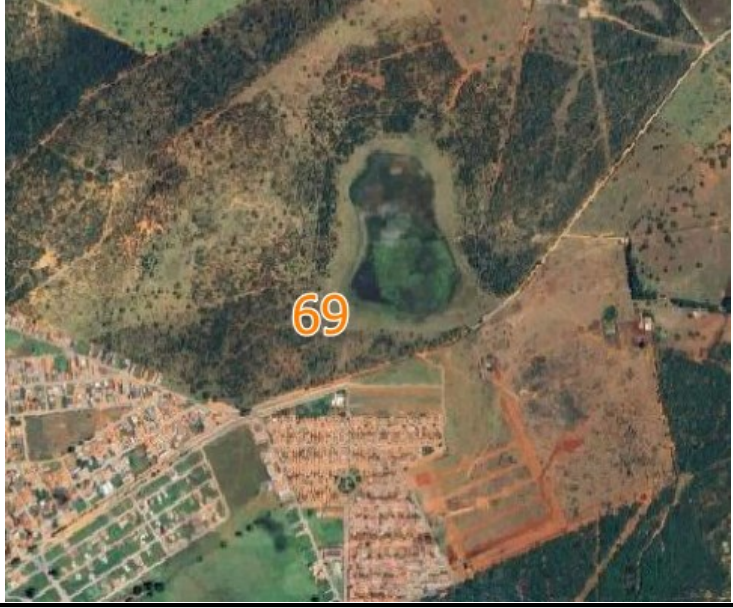










Catálogo de lagoas da região de Lagoa Santa – Minas Gerais				
Identificação:	69	Comportamento:	Intermitente	
Nome Popular:	-	Município:	Sete Lagoas	
Coordenadas:		Perímetro Médio:	Altimetria:	
586698	7853570	1352 m	723 m	
Unidade Geológica:	Fm. Serra de Santa Helena			
Sobre Influência de:	Lineamentos Estruturais	Dolina	Uvala	Maciço Carbonático
	Sim	Sim	Não	Não
Imagem – Google Satellite (2025)			Informações Poços	
			Identificação	Distância
			-	-
			-	-
			-	-
			-	-
			-	-
			-	-
Variação Perimétrica x Médias Pluviométricas				
