

XXV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

CARACTERIZAÇÃO HÍDRICA DA LAGOA DA GRUTA DA FAUSTINA, REGIÃO CÁRSTICA DE LAGOA SANTA, MUNICÍPIO DE MATOZINHOS, MG.

*Wallace Maciel Pacheco Neto*¹; *Rodrigo Sérgio De Paula*²; *Leila Nunes Menegasse Velásquez*³; *Leonardo Alves Reis*⁴; *Igo de Souza Tavares*⁵; *Bruno Pandolf Ladeira*⁶

1, 2, 3, 4, 5 e 6 – Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)

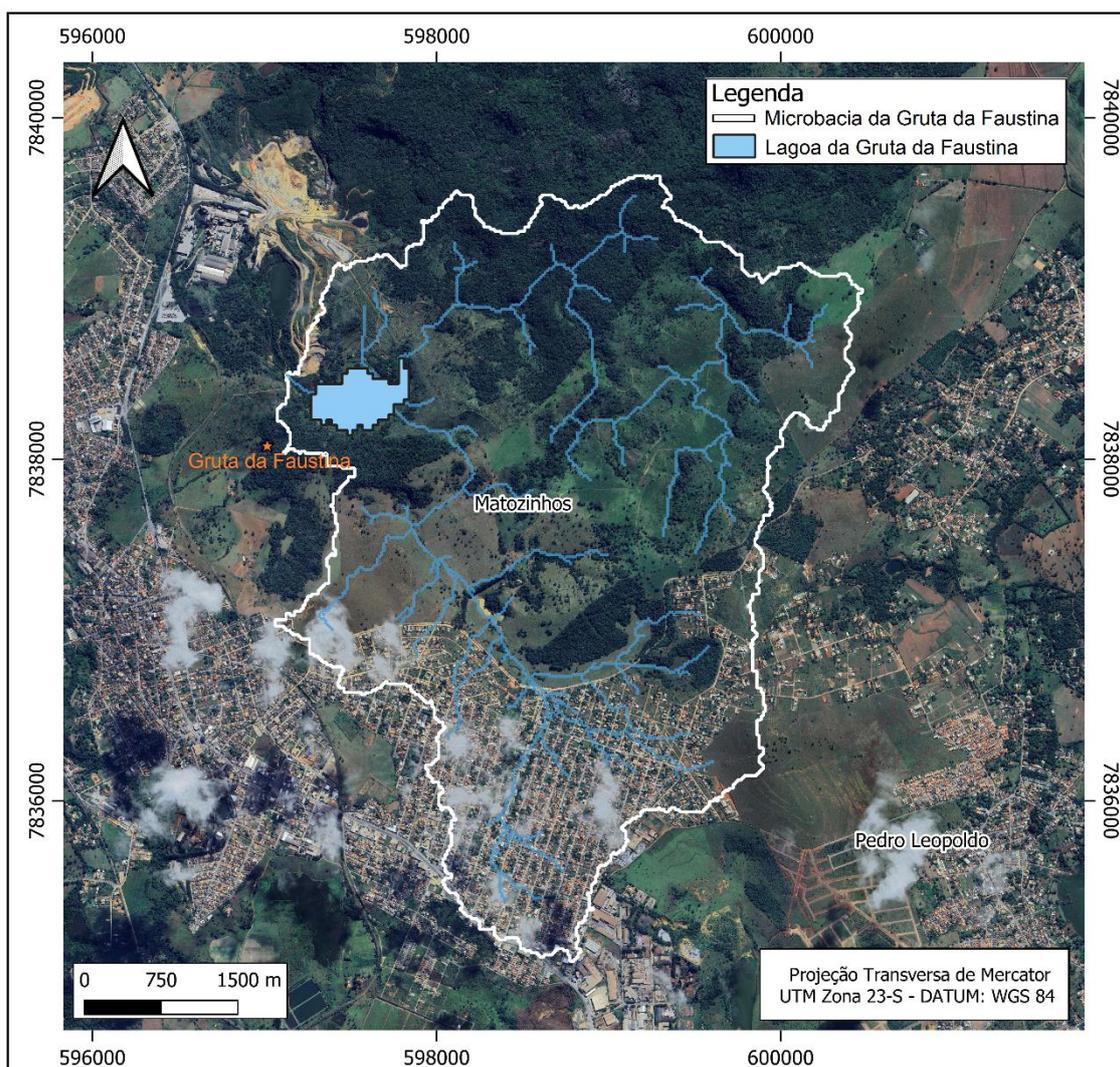
Resumo: O carste de Lagoa Santa é uma área de proteção ambiental localizada próximo ao município de Belo Horizonte, a região é dotada de inúmeras lagoas fruto do seu sistema hídrico complexo devido a evolução cárstica existente na região. Este trabalho tem como objetivo o entendimento da dinâmica hídrica de uma das lagoas presentes no carste, a lagoa da Gruta da Faustina, a partir do monitoramento de dados hidrológicos e levantamento de dados geoespaciais. O estudo se baseou na identificação de dados históricos climatológicos de modo a avaliar o balanço climatológico da região, posteriormente enfatizado por meio de geoprocessamento métodos para a identificação e detecção dos espelhos d'água da lagoa da Gruta da Faustina. As variações de precipitação, apesar de contribuir em parte pelo aumento do volume, não se mostraram suficiente para as variações de volume existente na lagoa, apontado assim uma relação da lagoa com as águas subterrâneas que circulam no carste. A geomorfologia do sistema é típica de um sistema aquífero cárstico, sendo um dos fatores responsáveis pela manutenção do nível aquífero. O nível elevado de água da lagoa marcado em alguns períodos secos, confirma uma alimentação da água subterrânea, pois apesar do elevado percentual e evapotranspiração real da região o espelho da água da lagoa em vários períodos se manteve elevado, indicando que provavelmente o sistema aquífero se encontra conectado e elevado na região.

Palavras-Chave – Carste; Levantamento Hidrológicos; Dinâmica Hídrica.

INTRODUÇÃO

Na porção central do estado de Minas Gerais está localizada a área de proteção ambiental Carste de Lagoa Santa, onde há a presença de uma série de lagoas associadas ao grande sistema fluvial do rio das Velhas, pertencente à bacia do rio São Francisco. A natureza geológica desta região atraiu diversas indústrias, notadamente ligadas à extração de calcário. Situada próxima à zona urbana do município de Matozinhos, Minas Gerais, está localizada a Gruta da Faustina que tem em suas proximidades uma lagoa, esta, o alvo deste estudo (Figura 1).

Figura 1 – Localização da Lagoa da Gruta da Faustina. Fonte: Google Earth, 2022.



A existência de numerosas lagoas é característico do Carste de Lagoa Santa. Diversos autores já pontuaram sobre a alta frequência destas formas de relevo nesta região, que apresenta lagoas com padrões irregulares de variação do nível d'água, destacando complexos ciclos de comportamentos hídricos.

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 maior denominada APA Carste de Lagoa Santa: lagos estáveis sobre o filito, lagos sazonais (sumidouros) nas porções mais altas/base de dolinas, e lagos de lençol freático que estão sobre o carbonato, em elevações mais baixas. Recentemente, Macedo e Alvarez (2021) analisaram o comportamento hidrogeológico da Lagoa do Sumidouro, grande representante destes corpos hídricos na região, ao longo dos seus últimos 40 anos, observando a relação de causa-efeito entre a pluviometria e o volume da lagoa, pontuando a dependência deste corpo hídrico em função da quantidade de chuvas.

A dinâmica hídrica de lagoas sobre carbonatos é enigmática. Muitos destes corpos hídricos não obedecem fielmente às variações propostas pela precipitação. Não é diferente com a lagoa da Gruta da Faustina, foco deste relatório. A lagoa da Gruta da Faustina é hospedada sobre depressões carbonáticas no domínio da Formação Sete Lagoas cercada por maciços carbonáticos encobertos.

Esse maciço fraturado pode promover a recarga do sistema para lagoa ou mesmo drenar a água desta, porém, não há evidência de sumidouro ou análise de recarga na região para corroborar essa hipótese.

No período chuvoso dos anos hidrológicos de 2019/2020 e 2020/2021, moradores reportaram que o nível d'água da lagoa subiu consideravelmente, ocorrendo inclusive inundações nas ruas próximas à lagoa. Desta forma, este trabalho tem como objetivo o entendimento da dinâmica hídrica da lagoa da Gruta da Faustina a partir do monitoramento de dados hidrológicos e levantamento de dados geoespaciais.

METODOLOGIA

A etapa metodológica inicial constituiu na identificação de dados históricos climatológicos de modo a avaliar o balanço climatológico da região, posteriormente enfatizado por meio de geoprocessamento métodos para a identificação e detecção dos espelhos d'água da lagoa da Gruta da Faustina. Essa feição foi aferida por sensoriamento remoto, junto com a parametrização e medição de algumas variáveis morfológicas e estruturais existentes na região. A análise hídrica seguiu por meio da investigação do comportamento dos espelhos d'água no interior da lagoa em épocas distintas, entre os anos hidrológicos 1984-1985 e 2019-2020. O conjunto de dados hídricos, morfológicos e estruturais foram processados por ferramentas de estatística elementar e descritiva.

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).

Balanço Climatológico

Para cálculo do balanço climatológico foram considerado dados históricos de pluviometria da estação de Pedro Leopoldo assim como valores de temperatura, a partir destes dados e da metodologia proposta por Thornthwaite (1948) e Thornthwaite & Matter (1955), obtendo valores de excedente hídrico para os anos hidrológicos históricos avaliados e demais parâmetros quanto ao balanço climatológico.

Identificação e Detecção da Lagoa

Inicialmente foi selecionado cenas dos satélites Landsat de cobertura terrestre fornecidas no site do Serviço Geológico Norte Americano (USGS, 2021). A escolha destas imagens teve como critério cenas entre os períodos de 1984 e 2020, em dois períodos distintos (período seco e chuvoso) 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.

A partir dos mosaicos gerados foi realizada a composição de bandas espectrais, para 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 cenas devido aos diferentes intervalos entre os comprimentos de onda (bandas espectrais) dos sensores Landsats (SILVA, LOPES & AZEVEDO, 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*), onde foi classificado 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 é fundamentada na cor, textura, tonalidade e sombras, estas características são fundamentais para auxiliar na separabilidade das áreas de treinamento das classes pré-definidas (MENESES e ALMEIDA, 2012).

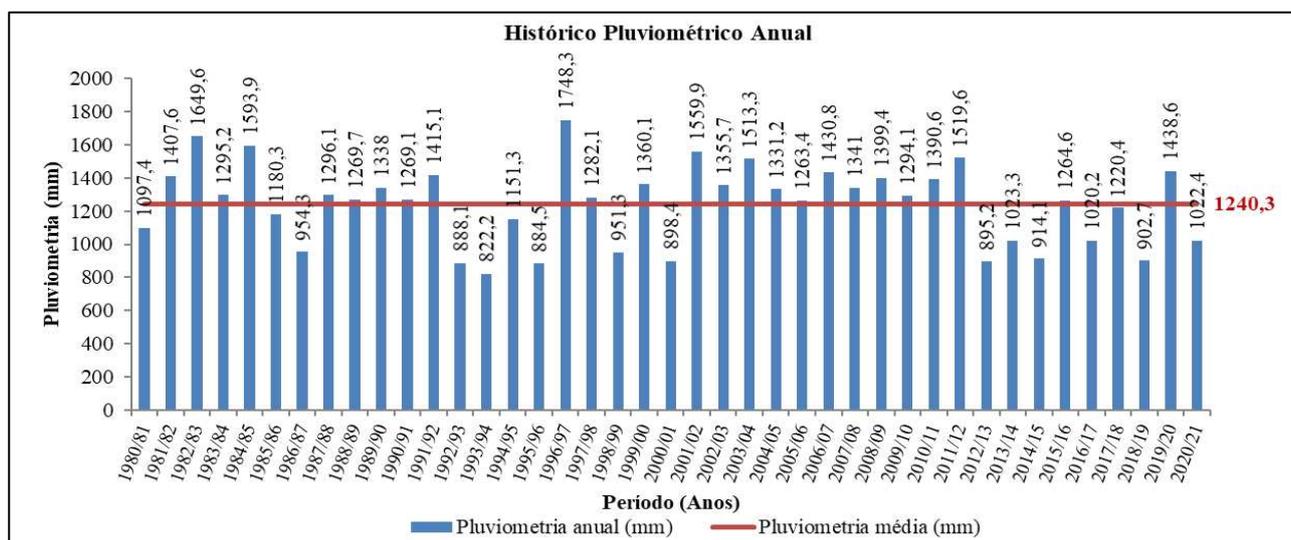
Por fim, com as áreas de treinamento já realizadas, foi utilizado a ferramenta *Semi-Automatic Classification* para efetuar a classificação por meio do classificador de Máxima Verossimilhança, esta ferramenta calcula a probabilidade que um dado pixel tem de pertencer a uma classe específica e rotula a classe que tem mais alta probabilidade (MENESES E ALMEIDA, 2012 e ANDRADE et al., 2014). O resultado esperado no final do processo é a geração de imagens *Raster* da cobertura terrestre de dois períodos (seco e chuvoso) para todos os anos entre 1984 e 2020. Com os espelhos d'água definidos para os períodos secos e úmidos, entre os anos hidrológicos de 1985 e 2021, foi possível observar o comportamento da lagoa da Gruta da Faustina frente a periodicidade que aparecem cheias ou secas. Assim, foi definido nesta etapa a perenidade desta lagoa no intervalo temporal definido para esta pesquisa.

RESULTADOS

Análise de Dados Climatológicos

A Pluviometria da região foi realizada a partir dos dados da estação pluviométrica de Pedro Leopoldo – Código 1944009 – entre 1980 e 2020. O gráfico abaixo indica as médias anuais (Figura 2) para a estação estudada.

Figura 2 – Histórico pluviométrico anual da estação pluviométrica de Pedro Leopoldo, representativa da lagoa da Gruta da Faustina.



A área apresentou média anual pluviométrica de 1240,3 mm, considerando os anos hidrológicos de 1980/81 a 2020/21. O ano que apresentou a menor pluviometria acumulada foi em 1993/94, com 822,2 mm. Já o ano com maior pluviometria registrada neste período foi em 1996/97, com um acumulado de 1748,3 mm neste período. É importante ressaltar que os últimos anos hidrológicos apresentaram valores totais pluviométricos abaixo da média histórica. Aparentemente, ocorrem ciclos de baixa e alta pluviométrica a cada 10 anos (Figura 2).

No ciclo de alta pluviométrica de 1980/81 a 1991/92, há registro de apenas três anos hidrológicos com pluviometria abaixo da média histórica. Na sequência, ocorre o ciclo de baixa pluviométrica, entre o período de 1992/93 a 2000/01, com apenas três anos com pluviometria abaixo da média histórica. O próximo ciclo, de alta pluviométrica, ocorre de 2001/02 a 2010/11, e todos os anos apresentaram pluviometria acima da média histórica. O ciclo atual, de 2012/13 a 2020/21, é um ciclo de baixa pluviométrica, em que apenas dois anos apresentaram pluviometria acima da média histórica.

De posse dos dados de pluviometria e temperatura, foi possível calcular a evapotranspiração do sistema e, com isso, o balanço hídrico pelo método de Thornthwaite & Matter (1955). Foram realizados os balanços hídricos para cada ano hidrológico entre 1980/1981 a 2020/2021, desconsiderando os anos com dados incompletos. Como resultado, são apresentados os dados de evapotranspiração real e calculada, déficit e excedente hídrico de cada ano na Tabela 1.

Percebe-se que a região tem sido afetada por um aumento de temperatura nos últimos anos (Tabela 1), e, ao mesmo tempo, uma diminuição do excedente hídrico, o que resulta em um comportamento histórico de perdas do sistema ao longo dos anos. Por outro lado, a evapotranspiração não apresenta variações expressivas.

Apesar da última década, em anos hidrológicos, apresentar pluviometria abaixo, e excedente hídrico e temperatura acima da média histórica, os relatos dos moradores são de que a lagoa se manteve perene e com nível de água transbordado por longos períodos durante ao ano. Esse fato é contra intuitivo aos registros históricos, e, dessa forma, é pressuposto que existam conexões bem marcadas entre os sistemas superficial e subterrâneo.

Tabela 1 – Balanço hídrico de Thornthwaite & Matter da lagoa da Gruta da Faustina.

Ano Hidrológico	Pluviometria	Temperatura	ETP	ETR	DEF (mm) -	EXC (mm)
1984/85	1593,9	21,2 °C	1006,04	901,6	104,4	692,3
1985/86	1180,3	21,3 °C	994,41	899,5	94,9	280,8
1986/87	954,3	21,4 °C	1003,15	842	161,2	112,3
1987/88	1296,1	21,3 °C	1006,04	864,3	141,8	431,8
1988/89	1269,7	21,4 °C	1006,04	903,4	102,7	366,3
1989/90	1338	21,2 °C	1006,04	866,4	139,6	488,9
1990/91	1269,1	21,4 °C	1006,04	897,3	108,7	475,3
1991/92	1415,1	21,4 °C	1006,04	895,5	110,5	519,6
1992/93	888,1	21,4 °C	1003,22	855,9	147,3	32,2
1993/94	822,2	21,4 °C	998,67	806,2	192,5	108,4
1994/95	1151,3	21,5 °C	1031,06	901,3	129,8	250
1995/96	884,5	21,2 °C	984,96	908,3	76,6	793,1
1996/97	1748,3	21,3 °C	972,84	865,6	107,2	882,7
1997/98	1282,1	21,7 °C	1093,21	854,6	238,6	427,5
1998/99	951,3	21,8 °C	1016,06	832,3	183,8	119
1999/00	1360,1	21,4 °C	973,83	796,9	176,9	563,2
2000/01	898,4	21,4 °C	1042,14	790,3	251,9	108,1
2001/02	1559,9	21,7 °C	1011,17	863,8	147,4	696,1
2002/03	1355,7	21,7 °C	1032,1	804,3	227,9	551,4
2003/04	1513,3	21,5 °C	998,41	853,1	145,3	660,2
2004/05	1331,2	21,3 °C	1030,57	863,6	167	467,6
2005/06	1263,4	21,2 °C	998,75	793,8	204,9	469,6
2006/07	1430,8	21,3 °C	997,89	835,8	162,1	595
2007/08	1341	21,6 °C	1029,44	941,1	88,4	399,9
2008/09	1399,4	21,8 °C	1051,91	868,6	183,3	530,8
2009/10	1294,1	21,9 °C	1046,2	929,6	116,6	364,5
2010/11	1390,6	22,3 °C	1044,92	842,6	202,3	548
2011/12	1519,6	22,4 °C	993,27	851,6	141,7	668
2013/14	1023,3	21,9 °C	1036,2	758,4	277,8	264,9
2014/15	914,1	21,8 °C	1083,94	893,3	190,7	20,8

2015/16	1264,6	22,5 °C	1078,28	902,6	175,6	362
2016/17	1020,2	21,8 °C	1022,17	886,1	136,1	210,5
2017/18	1220,4	21,6 °C	1022,17	828,1	194	392,3
2018/19	902,7	21,7 °C	1022,17	871,7	150,5	143,3
2019/20	1438,6	20,5 °C	1022,17	857,8	164,4	580,8

Obs: ETP – Evapotranspiração Potencial; P-ETP – Diferença entre precipitação e evapotranspiração real; DEF – Deficiência Hídrica Anual (mm – milímetro); EXC – Excedente Hídrico Anual (mm – milímetro).

Identificação e Avaliação de Perenidade da Lagoa

Inicialmente para avaliar a ocorrência da lagoa foi verificado a ortofoto de 1965 (Figura 3) para verificar a ocorrência da lagoa e se está apresentava alguma interferência ao seu redor. Conforme se pode observar na imagem de 1965 e 2022 (utilizada como referência de localidade), na década de 60 não existia a mineradora a jusante da lagoa assim como a mancha urbana era pouco desenvolvida na região, e a lagoa já tinha um formato semelhante ao observado em 2022.

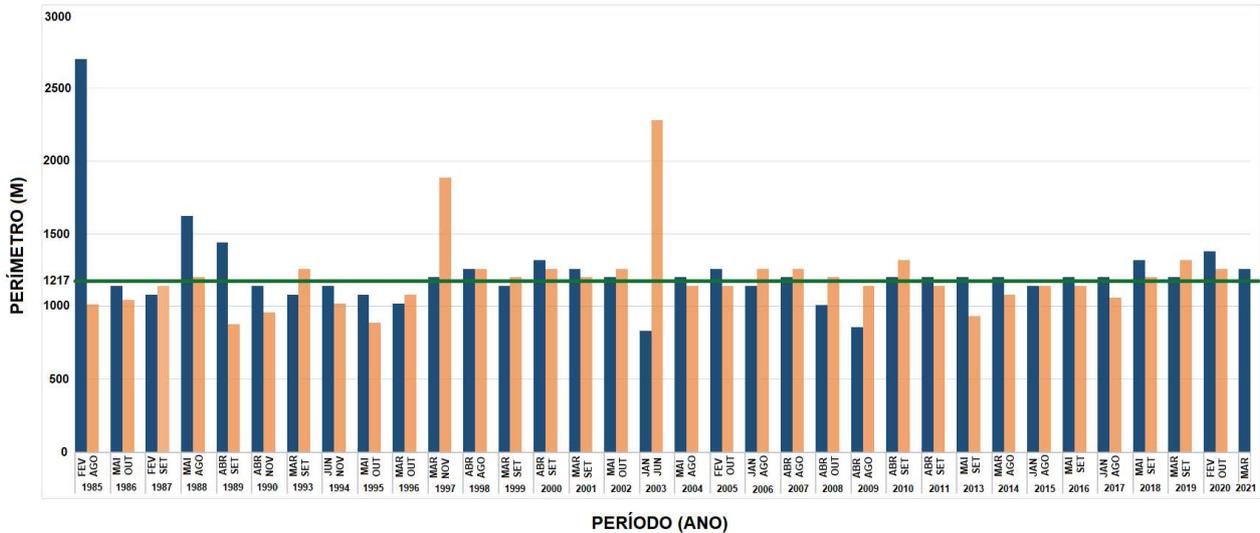
Figura 3 – Ortofoto da lagoa no ano de 2022 e a comparação com a ortofoto do ano 1965 com a lagoa da Gruta da Faustina identificada pela delimitação em branco.



A partir da avaliação da existência do espelho de água na década de 60, foram avaliadas imagens disponíveis do google Earth de 1985 até 2021, de modo a verificar a perenidade da lagoa, além de outras características. A perenidade da lagoa da Gruta da Faustina foi definida a partir das imagens históricas em dois períodos distintos (período seco e chuvoso) para todos os anos entre 1985 a 2021. Neste intervalo temporal, a lagoa nunca esteve totalmente seca, podendo ser classificada como uma lagoa perene.

Com base em mais de 30 anos de avaliação de imagens, foi determinada a perenidade da lagoa e mensurado como o perímetro dos espelhos d'água reagiram às variações pluviométricas ao longo dos anos, e esta quantificação pode ser observada na Figura 4. Os meses escolhidos foram os meses de seca e de cheia que possuem registros de imagens históricas.

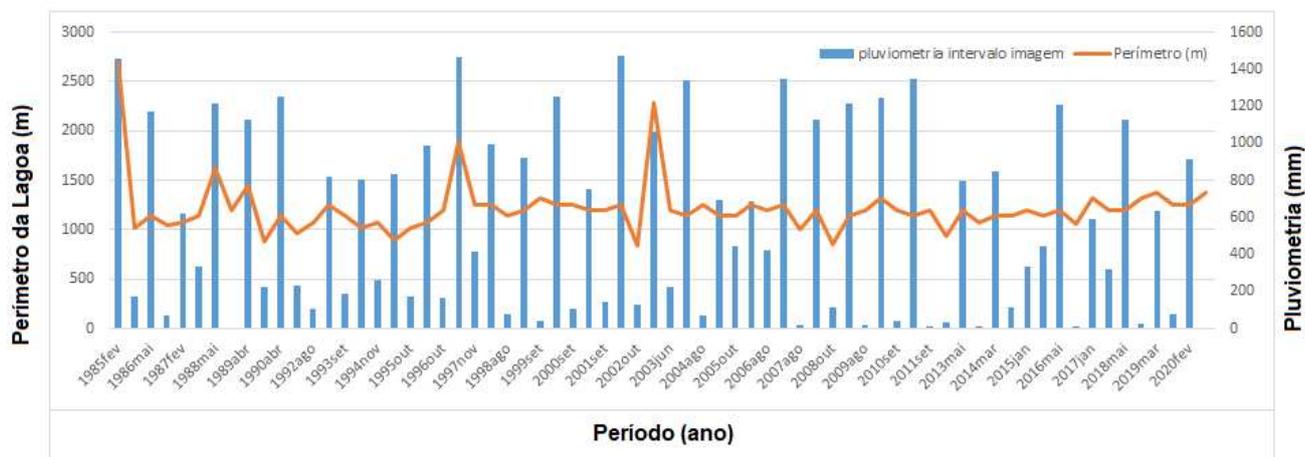
Figura 4 – Variação do perímetro da lagoa da Gruta da Faustina ao longo dos anos



É notável que a variação do ciclo de cheia e seca entre um mesmo ano é sutil, indicando que a lagoa deve estar conectada com o sistema aquífero. Em alguns anos ainda é possível observar que o perímetro da lagoa na seca é maior que na chuva. O perímetro médio da lagoa (linha verde no gráfico) de 1217 m não apresenta grande variação quando comparado com a mediana de 1263 m (mais apropriada para sistemas com mais variáveis), o que reforça a contribuição de águas subterrâneas para esse sistema. Outro fato que reforça a participação da água subterrânea em manter o sistema da Lagoa é que a variação pluviométrica observada na figura 2 é não verificada da mesma maneira no gráfico de variação perimétrica, apesar de notar alguma interferência da pluviometria, principalmente nas décadas de altas pluviométricas de 2001 a 2011.

Apesar da lagoa apresentar uma variação perimétrica de 835 a 2701 m, o desvio padrão amostral observado é de 532 m, o que corrobora com a hipótese de um sistema controlado por água subterrânea. Retirando os anos em que a lagoa esteve mais cheia ou vazia do que o normal, as variações do seu perímetro são normais de lagoas influenciadas pelo aquífero. Essa relação de água subterrânea fica mais evidente quando se avalia a área da lagoa com a pluviometria anual (Figura 5). Mesmo que em anos de alta pluviométrica a lagoa responde com o aumento de sua área (1988, 1997 e 2003), em vários outros anos de elevações pluviométricas (2002 a 2011) observa-se até mesmo diminuição da área alagada, mostrando que o controla o nível da lagoa é a flutuação do nível do aquífero.

Figura 5 – Variação da área relacionada com a pluviometria ao longo dos anos.



CONCLUSÃO

O levantamento de dados hidrogeológicos referentes à Lagoa da Gruta da Faustina possibilitou a avaliação da existência da lagoa desde 1965 (ortofoto mais antiga levantada), sendo essa lagoa classificada como uma lagoa perene dentro de uma depressão cárstica. A perenidade desta lagoa foi verificada com mais de 30 anos de análise de variação de perímetro e de área da lagoa durante período seco e chuvoso de cada ano hidrológico.

A geomorfologia do sistema (maciço e depressão) é típica de um sistema aquífero cárstico, sendo esse um dos fatores responsáveis pela manutenção do nível aquífero. As variações de precipitação, apesar de contribuir em parte pelo aumento do volume, a parcela principal da água na região está relacionada à água subterrânea, já que a variação pluviométrica anual não é completamente correlata com a variação do perímetro da lagoa da Gruta da Faustina.

O nível elevado de água da lagoa marcado em alguns períodos secos, confirma uma alimentação da água subterrânea, pois apesar do elevado percentual e evapotranspiração real da região o espelho da água da lagoa em vários períodos se manteve elevado, indicando que provavelmente o sistema aquífero se encontra conectado e elevado na região.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, A. C.; FRANCISCO, C. N.; ALMEIDA, C. M. 2014. Desempenho de Classificadores Paramétrico e Não Paramétrico na Classificação da Fisionomia Vegetal. RBC. Revista Brasileira de Cartografia (Online), v. 66.

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. 110p. (Thesis, Master of Science).

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

CVIJIĆ, J. 1893. Das Karstphänomen. Versuch einer morphologischen Monographie. In: Penck, A. (Ed.), *Geographische Abhandlungen*, Bd. V. Heft. 3, pp. 1– 114. Wien.

DE PAULA R. S. 2019. Modelo Conceitual de Fluxo dos Aquíferos Pelíticos-Carbonáticos da Região da APA Carste de Lagoa Santa, MG. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais.

JAXA – Japan Aerospace Exploration Agency. 2021. ALOS. Disponível em: <http://www.jaxa.jp/projects/sat/alos/index_e.html>. Acesso em: 25 out. 2021.

GRASS PROJECT. 2013. Geographic resource analysis support system. <http://grass.osgeo.org.com>.

MACEDO, C. A. R. & ALVAREZ, G. C. 2021. O desaparecimento da lagoa do sumidouro: Análise do comportamento hidrogeológico da lagoa ao longo dos últimos 40 anos – Trabalho de Conclusão de Curso (Geologia) – Instituto de Geociências (IGC), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte.

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. 2007. Utilização de Imagens CBERS para Mapeamento dos Espelhos D'água do Brasil. In: Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, INPE. Florianópolis, Brasil.

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. 2012. Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto. Universidade de Brasília: Brasília. P.121-160.

ROSA, L.; ALVES, M. de C.; SANCHES, L. 2011. Uso de composições de bandas do satélite Landsat 5 TM para caracterizar a dinâmica da variação de áreas alagadas no Pantanal mato-grossense. In: Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, PR, Brasil, INPE.

SILVA, B. B.; LOPES, G. M.; AZEVEDO, P. V. 2005. Balanço de Radiação em Áreas Irrigadas Utilizando Imagens Landsat 5 – TM. Revista Brasileira de Meteorologia, v.20, n.2.

THORNTHWAITE, Charles Warren. 1948. An approach toward a rational classification of climate. Geographical review, v. 38, n. 1, p. 55-94.

THORNTHWAITE, C.W.; MATTER, J.R. 1955. The water balance. Publications in Climatology, New Jersey, Drexel Institute of Thecnology, 104p.

USGS – UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. 2021. Landsat data continuity mission. U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey. 2012–3066. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em: 02 nov. 2021.

AGRADECIMENTOS

Ao Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (CECAV/ICMBio) pelo financiamento, Proc. FUNDEP/GERDAU/UFMG Nº 22.317, Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais (IGC-UFMG). Ao Programa de Pós Graduação em Geologia (PPGEOL/UFMG) e ao Laboratório de Estudos Hidrogeológicos (LEHID).