

Universidade Federal de Minas Gerais
Instituto de Ciências Agrárias
Especialização em Recursos Hídricos e Ambientais

Pedro Magleau Martins

**AVALIAÇÃO DE CORRELAÇÃO ENTRE SUPEREXPLORAÇÃO DE AQUÍFERO
CÁRSTICO E SISMICIDADE NA REGIÃO DO ALTO VERDE GRANDE**

Montes Claros, MG
2024

Pedro Magleau Martins

**AVALIAÇÃO DE CORRELAÇÃO ENTRE SUPEREXPLOTAÇÃO DE AQUÍFERO
CÁRSTICO E SISMICIDADE NA REGIÃO DO ALTO VERDE GRANDE**

Monografia apresentada ao Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Recursos Hídricos e Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Flávio Pimenta

Montes Claros, MG
2024

Martins, Pedro Magleau.

M379a
2024 Avaliação de correlação entre superexploração de aquífero cárstico e sismicidade na região do Alto Verde Grande [manuscrito] / Pedro Magleau Martins. Montes Claros, 2024.
23 f.: il.

Monografia (especialização) - Área de concentração em Recursos Hídricos e Ambientais. Universidade Federal de Minas Gerais / Instituto de Ciências Agrárias.

Orientador(a): Flávio Pimenta de Figueiredo.

Banca examinadora: Flávio Pimenta de Figueiredo, Dalton Rocha Pereira, Osmar de Vasconcelos Costa.

Inclui referências: f. 22-23.

1. Poços. 2. Aquíferos. 3. Águas subterrâneas. I. Figueiredo, Flávio Pimenta de. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Ciências Agrárias. III. Título.

CDU: 556.1



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
ESPECIALIZAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTAIS

FOLHA DE APROVAÇÃO

AVALIAÇÃO DE CORRELAÇÃO ENTRE SUPEREXPLORAÇÃO DE AQUÍFERO CÁRSTICO E SISMICIDADE NA REGIÃO DO ALTO VERDE GRANDE

PEDRO MAGLEAU MARTINS

Trabalho Final de Curso de Especialização (TFCE) submetido à Comissão de Avaliação designada pela Comissão de Coordenação do curso de Especialização em Recursos Hídricos e Ambientais, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Recursos Hídricos e Ambientais.

TFCE aprovado em dez de abril de 2024 pela comissão de avaliação constituída pelos membros:

Flávio Pimenta de Figueiredo
Orientador - ICA/UFMG

Dalton Rocha Pereira
Avaliador - ICA/UFMG

Osmar de Vasconcelos Costa
Avaliador - Externo

Montes Claros, data da assinatura eletrônica.

Leidivan Almeida Frazão
Succoordenadora de Pós-graduação *Lato Sensu*



Documento assinado eletronicamente por **Leidivan Almeida Frazao, Professora do Magistério Superior**, em 11/04/2024, às 10:36, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3176551** e o código CRC **BF187210**.

RESUMO

Em bacias hidrográficas com disponibilidade hídrica limitada e com déficit hídrico, a captação de água subterrânea por poços profundos torna-se fundamental para atender a demanda dos diversos usuários da bacia. A bacia do Alto Verde Grande, localizada em Minas Gerais, Brasil é constituída predominantemente por rochas do Grupo Bambuí, onde se tem a ocorrência de aquíferos cársticos. De acordo com o levantamento realizado no Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS) da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), existem mais de 1.200 poços de bombeamento de água subterrânea na área (3.101,23 km²). A captação de água subterrânea dessa densidade de poços pode levar ao rebaixamento do lençol freático, resultando na variação temporal e geográfica das poro-pressões nos aquíferos que podem induzir terremotos a poucos quilômetros de profundidade. Em paralelo, identificou-se que em um raio de 200 km da região de Montes Claros foram registrados 142 sismos entre 1931 a 2019, sendo 105 deles em um raio de 30 km de Montes Claros. Através da avaliação de locais de eventos sísmicos, de gráficos climatológicos e de mapas geológicos, a análise indica déficit hídrico e atividade sísmica na região. De forma a fomentar a Agenda de Águas Subterrâneas da ONU para 2022 - Tornando o Invisível Visível - o presente estudo procurou entender a relação, se houver, entre a atividade sísmica na bacia do Alto Verde Grande e a captação de água subterrânea por poços profundos.

Palavras chave: sismicidade induzida; poços tubulares; cárstico.

ABSTRACT

In river basins with limited water availability and water deficits, abstracting groundwater through deep wells becomes essential to meet the demand of the basin's various users. The Alto Verde Grande basin, located in Minas Gerais, Brazil, is predominantly made up of rocks of the Bambuí Group, where karst aquifers occur. According to a survey in the Groundwater Information System (SIAGAS) of the Mineral Resources Research Company (CPRM), there are more than 1,200 groundwater pumping wells in the area (3,101.23 km²). Groundwater abstraction of this density from wells can lower the water table, resulting in temporal and geographical variations in pore pressures in aquifers that can induce earthquakes a few kilometers underground. In parallel, it was discovered that in a 200 km radius of the Montes Claros region, 142 earthquakes happened between 1931 and 2019, 105 of them within a 30 km radius of Montes Claros. Evaluating the locations of seismic events, climatological graphs, and geological maps, the analysis indicates a water deficit and seismic activity in the region. To foster the UN Groundwater Agenda for 2022 - Making the Invisible Visible - this study sought to understand the relationship, if any, between seismic activity in the Alto Verde Grande basin and groundwater abstraction by deep wells.

Keywords: induced seismicity; tube wells; karst.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	3
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	4
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	5
3.1 Dados de normais climatológicas.....	6
3.2 Dados dos poços tubulares profundos.....	7
3.3 Dados geológicos.....	9
3.4 Dados das atividades sísmicas.....	12
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	13
5 CONCLUSÃO.....	17
REFERÊNCIAS.....	18
AGRADECIMENTOS.....	20

AVALIAÇÃO DE CORRELAÇÃO ENTRE SUPEREXPLOTAÇÃO DE AQUÍFERO CÁRSTICO E SISMICIDADE NA REGIÃO DO ALTO VERDE GRANDE

*Evaluation of the correlation between overexploitation of karst aquifers and seismicity in the
Alto Verde Grande region*

Pedro Magleau Martins^{1*}

Ana Kátiuscia Pastana de Souza Weber²

Chris Strachotta³

Felipe Abbas da Gama⁴

Flávia Braga Vieira⁵

Flávio Pimenta de Figueiredo⁶

Raphael Duarte Viola⁷

RESUMO

Em bacias hidrográficas com disponibilidade hídrica limitada e com déficit hídrico, a captação de água subterrânea por poços profundos torna-se fundamental para atender a demanda dos diversos usuários da bacia. A bacia do Alto Verde Grande, localizada em Minas Gerais, Brasil é constituída predominantemente por rochas do Grupo Bambuí, onde se tem a ocorrência de

¹ Graduado em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Engenheiro Hidrólogo na Klohn Crippen Berger (KCB) – e-mail: pmartins@klohn.com. * Autor correspondente

² Mestra em Geologia pela Universidade Federal do Ceará (UFC). Especialista em Gestão de Recursos Hídricos em Bacias Hidrográficas pela Universidade de Taubaté (UNITAU). Graduada em Geologia pela Universidade Federal do Pará (UFPA). Coordenadora de barragens na Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) – email: ana.weber.awl@csn.com.br.

³ Graduada em Geologia pela Queensland University of Technology (QUT). Vice-presidente de estratégia corporativa e desenvolvimento de negócio na Klohn Crippen Berger (KCB) – email: cstrachotta@klohn.com.

⁴ Mestre em Gestão de Riscos – Riscos, Água e Geotecnia pela École Nationale Supérieure de Géologie (ENSG). Graduado em Engenharia de Minas pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Hidrogeólogo na Klohn Crippen Berger (KCB) – email: fabbas@klohn.com.

⁵ Graduada em Geologia pelo Centro Universitário de Belo Horizonte (UniBH). Hidrogeóloga na Klohn Crippen Berger (KCB) – email: fvieira@klohn.com

⁶ Doutor em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa (UFV). Mestre em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Lavras (UFLA). Graduado em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Lavras (UFLA). Professor pesquisador efetivo na Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) – email: figueiredofp@ica.ufmg.br

⁷ Especialista em Engenharia Geotécnica pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC-MG). Graduado em Engenharia Civil pela Faculdade Kennedy. Engenheiro Geotécnico na Klohn Crippen Berger (KCB) – email: rviola@klohn.com

aquíferos cársticos. De acordo com o levantamento realizado no Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS) da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), existem mais de 1.200 poços de bombeamento de água subterrânea na área (3.101,23 km²). A captação de água subterrânea dessa densidade de poços pode levar ao rebaixamento do lençol freático, resultando na variação temporal e geográfica das poro-pressões nos aquíferos que podem induzir terremotos a poucos quilômetros de profundidade. Em paralelo, identificou-se que em um raio de 200 km da região de Montes Claros foram registrados 142 sismos entre 1931 a 2019, sendo 105 deles em um raio de 30 km de Montes Claros. Através da avaliação de locais de eventos sísmicos, de gráficos climatológicos e de mapas geológicos, a análise indica déficit hídrico e atividade sísmica na região. De forma a fomentar a Agenda de Águas Subterrâneas da ONU para 2022 - Tornando o Invisível Visível - o presente estudo procurou entender a relação, se houver, entre a atividade sísmica na bacia do Alto Verde Grande e a captação de água subterrânea por poços profundos.

Palavras-chave: Sismicidade induzida; Poços tubulares; Cárstico.

ABSTRACT

In river basins with limited water availability and water deficits, abstracting groundwater through deep wells becomes essential to meet the demand of the basin's various users. The Alto Verde Grande basin, located in Minas Gerais, Brazil, is predominantly made up of rocks of the Bambuí Group, where karst aquifers occur. According to a survey in the Groundwater Information System (SIAGAS) of the Mineral Resources Research Company (CPRM), there are more than 1,200 groundwater pumping wells in the area (3,101.23 km²). Groundwater abstraction of this density from wells can lower the water table, resulting in temporal and geographical variations in pore pressures in aquifers that can induce earthquakes a few kilometers underground. In parallel, it was discovered that in a 200 km radius of the Montes Claros region, 142 earthquakes happened between 1931 and 2019, 105 of them within a 30 km radius of Montes Claros. Evaluating the locations of seismic events, climatological graphs, and geological maps, the analysis indicates a water deficit and seismic activity in the region. To foster the UN Groundwater Agenda for 2022 - Making the Invisible Visible - this study sought to understand the relationship, if any, between seismic activity in the Alto Verde Grande basin and groundwater abstraction by deep wells.

Keywords: *Induced seismicity; Tube wells; Karst.*

Data de submissão: 02/10/2023

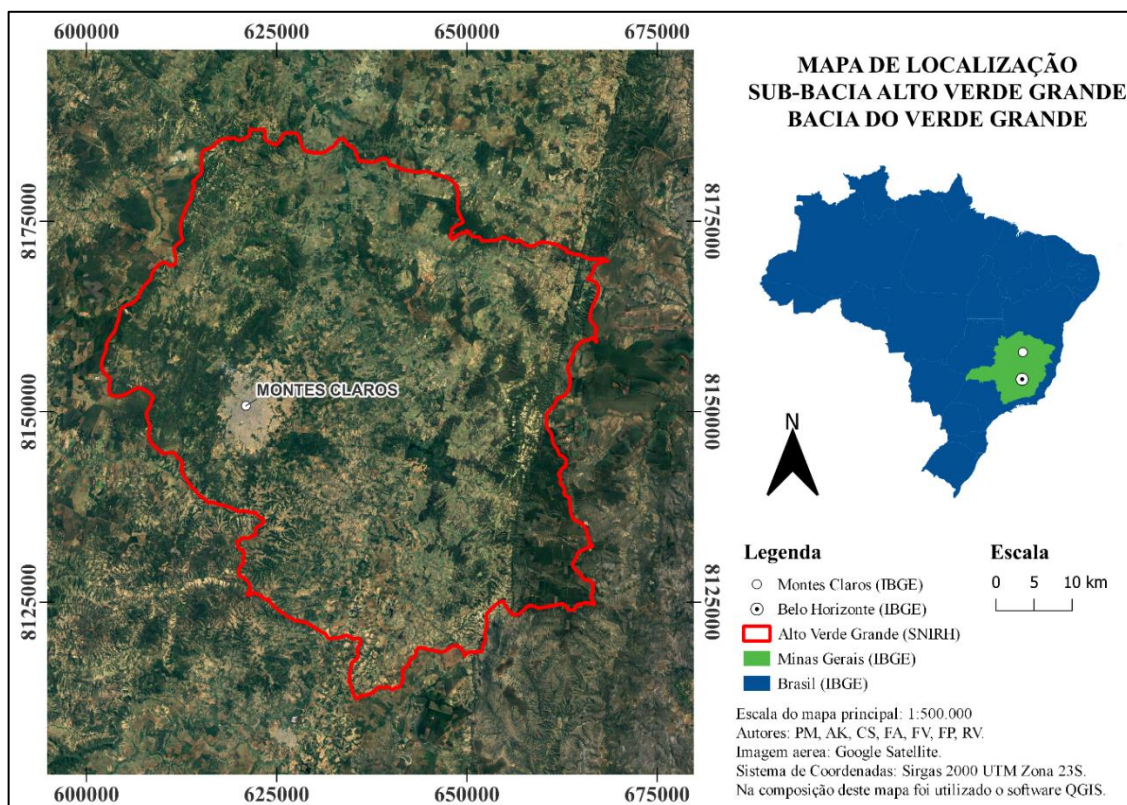
Data de aprovação: 27/03/2024

1 INTRODUÇÃO

O Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Verde Grande elaborado pela Agência Nacional de Águas (ANA, 2016), apresenta a sub-bacia do Alto Verde Grande (AVG), com área de 3.101,23 km², localizando-se no extremo sul da bacia hidrográfica (MAPA 1). O principal município localizado no AVG é a cidade de Montes Claros que, conforme o mais recente censo demográfico do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2022), possui uma população de 414.240 pessoas.

Em consulta às normais climatológicas apresentadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2022) do período contemplado entre 1991-2020 para a Estação Convencional de Montes Claros (Código 83437), verifica-se que o acumulado anual de evaporação total é significativamente maior que o acumulado anual de precipitação. Este dado sugere que a região apresenta um déficit hídrico e que, para atender a demanda por recursos hídricos dos usuários da sub-bacia, é necessário contar com a captação de água subterrânea por meio de poços profundos.

Mapa 1 – Localização da área de estudo



Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

Dado este cenário, em consulta ao Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS), mantido pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), verifica-se que existem mais de 1.200 poços tubulares profundos na área do AVG. Estes poços foram perfurados principalmente em um contexto geológico que apresenta rochas dolomíticas e calcárias do Grupo Bambuí, que por sua vez abrigam aquíferos cársticos (CPRM, 2011).

Por outro lado, a região do AVG apresenta considerável atividade sísmica. Em uma análise realizada no Boletim do Catálogo Brasileiro (SISBRA), que fornece registros sísmicos em todo o Brasil, entre 1931 a 2019 são observados 142 sismos em um raio de 200 km da cidade de Montes Claros, sendo que 105 destes estão em um raio de 30 km da área urbana (Boletim Sísmico, 2022).

Considerando as caracterizações hídricas, hidrogeológicas e sísmicas apresentadas acima, e fomentando a Agenda de Águas Subterrâneas da Organização das Nações Unidas (ONU, 2022) – Tornando o Invisível Visível⁸, este trabalho procura entender a relação entre a captação de água subterrânea por poços profundos e a atividade sísmica observada na sub-bacia do AVG.

2 REVISÃO DE LITERATURA

A correlação entre atividades sísmicas e bombeamento de águas subterrâneas foi estudada ao redor do globo, por exemplo, Jayaraman (2021), sugere que a crescente atividade sísmica na região ao norte da capital Delhi pode estar ligada com a super-exploração de aquíferos na região.

No contexto nacional, um estudo sobre duas cidades do interior do estado de São Paulo, Nuporanga e Presidente Prudente, evidencia que abalos sísmicos tornaram-se mais frequentes nestas cidades após a perfuração de poços profundos e da captação de água subterrânea (Yamabe; Berrocal, 2000). Por meio da caracterização geológica-estrutural das regiões, da análise de frequência dos sismos e do histórico de captação, concluiu-se no estudo que, o fluxo de água subterrânea pode ser capaz de acumular e liberar tensões elásticas em casos de poços tubulares não revestidos em formações da Bacia do Paraná. Assumpção *et al.* (2008), sugere que as atividades sísmicas na região de Bebedouro, São Paulo, foram iniciadas após a

⁸ <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380721>

perfuração de poços tubulares profundos, que exploram fraturas do basalto da Formação Serra Geral – também pertencente à Bacia do Paraná, a partir de estudos geofísicos.

Já para os tremores identificados na região norte da área urbana de Montes Claros, apresentados no Boletim Sísmico do Norte de Minas (2022), identificou-se como causa, uma falha geológica inversa, cuja movimentação é causada por tensões geológicas naturais do tipo de compressão, sendo que esta falha está localizada de 1 a 2 km de profundidade,

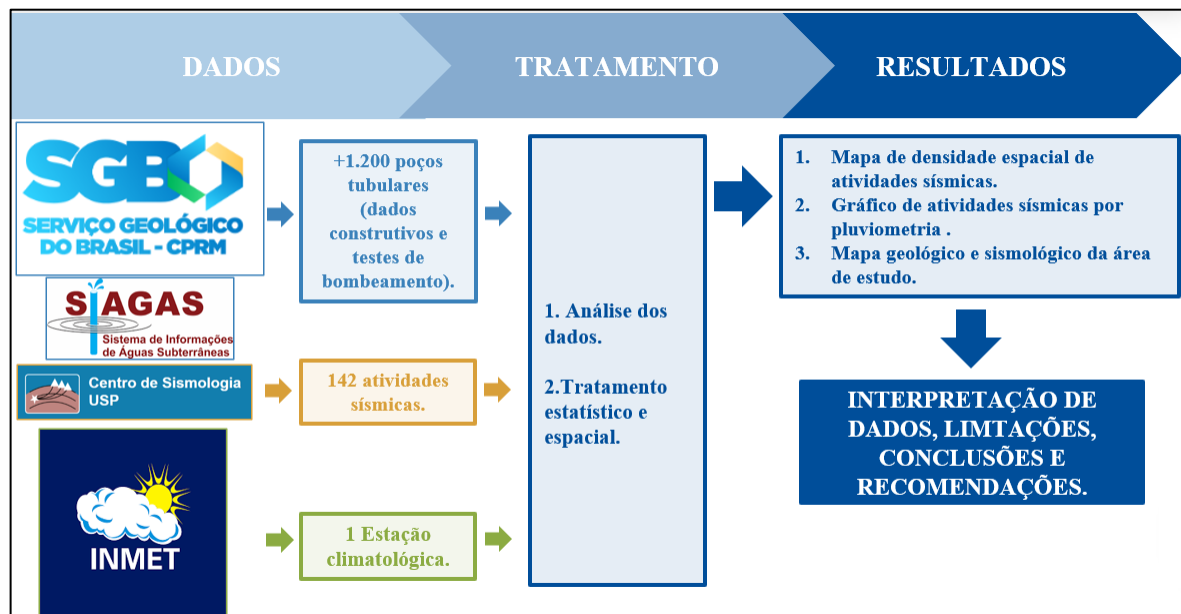
Assim, com base nestes estudos de Jayaraman (2021), Yamabe e Berrocal (2000), Assumpção *et al.* (2008), nos dados do Boletim Sísmico do Norte de Minas (2022) e no contexto geológico, em conjunto com dados das normais climatológicas, do histórico de perfuração de poços profundos e da série histórica das atividades sísmicas observadas na região, encontrou-se motivação para realizar este trabalho, de forma a entender se há uma correlação entre a captação de água subterrânea e a atividade sísmica da região.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram realizadas três etapas metodológicas nesta pesquisa: 1) foram utilizados dados da estação do INMET (Código 83437), 2) dados de poços registrados no SIAGAS e 3) dados de sismos registrados no catálogo do Centro de Sismologia da USP para permitir uma sobreposição entre informações pluviométricas, hidrológicas, hidrogeológicas e sismológicas (FLUXOGRAMA 1).

O tratamento espacial é realizado por meio de técnicas de geoprocessamento com auxílio do *software* de Sistema de Informação Geográfica (SIG) denominado QGIS, de domínio público, cujo resultado são mapas de localização dos poços, de distribuição espacial dos sismos e da geologia local. Já o tratamento estatístico é executado com auxílio do *software* Microsoft Excel e técnicas de organização do banco de dados, em que o resultado são gráficos de distribuição temporal das informações climatológicas e sismológicas.

Fluxograma 1 – Metodologia empregada neste estudo



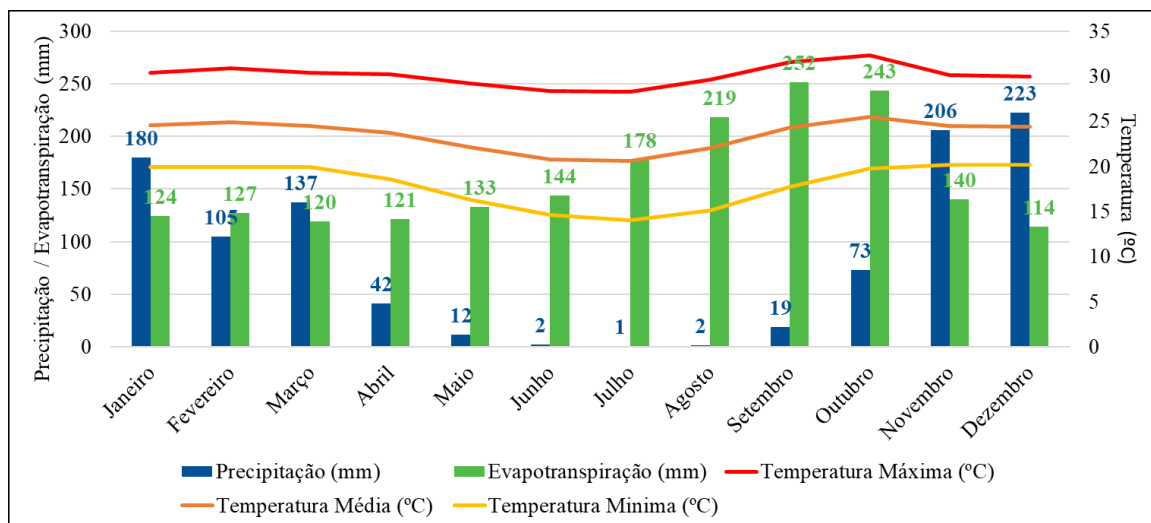
Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

3.1 Dados de normais climatológicas

O Gráfico 1 apresenta-se a síntese dos dados climatológicos da estação Montes Claros (Código 83437), que foram coletados no site do INMET para o período de 1991-2020. A classificação climática é do tipo tropical úmido (Aw), de acordo com a classificação *Köppen-Geiger*, ou seja, a região registra temperaturas médias mensais superiores a 18°C durante todo o ano e uma estação chuvosa no verão, com chuvas abundantes.

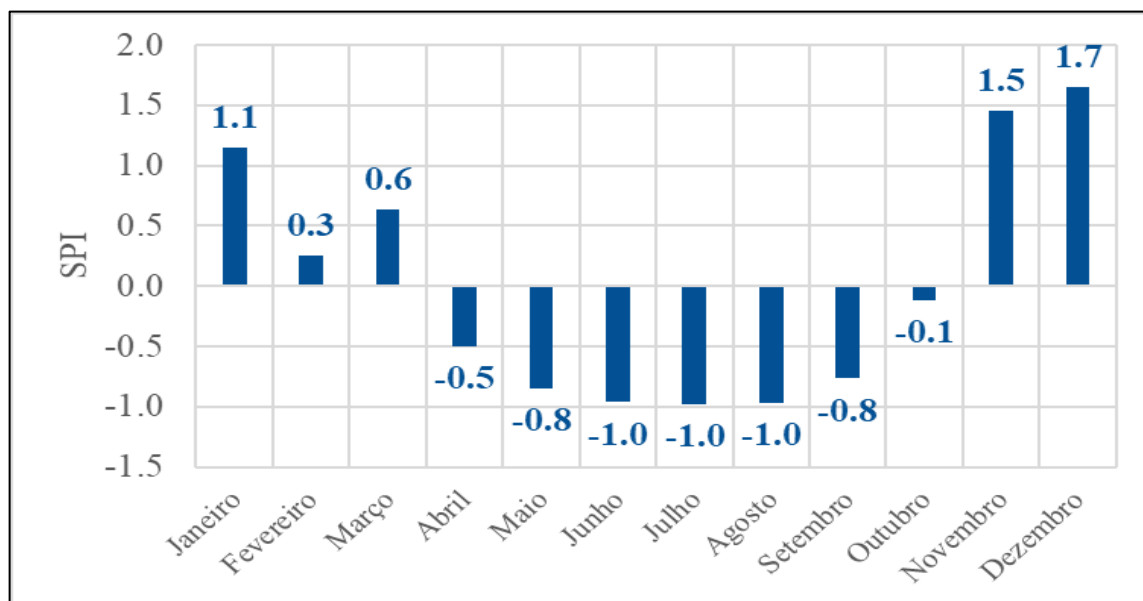
A partir destes dados, é calculado o Índice Padronizado de Precipitação (SPI) para avaliar o déficit ou o excesso de precipitação no período do tempo (GRÁFICO 2). Dessa forma, define-se o período seco do ano hidrológico de abril a outubro, em que são observados valores negativos de SPI.

Gráfico 1 – Síntese dos dados climatológicos da estação Montes Claros (código 83437) para o período de 1991-2020



Fonte: Adaptado de INMET (2022)

Gráfico 2 – Índice Padronizado de Precipitação (SPI) da área no período de 1991-2020

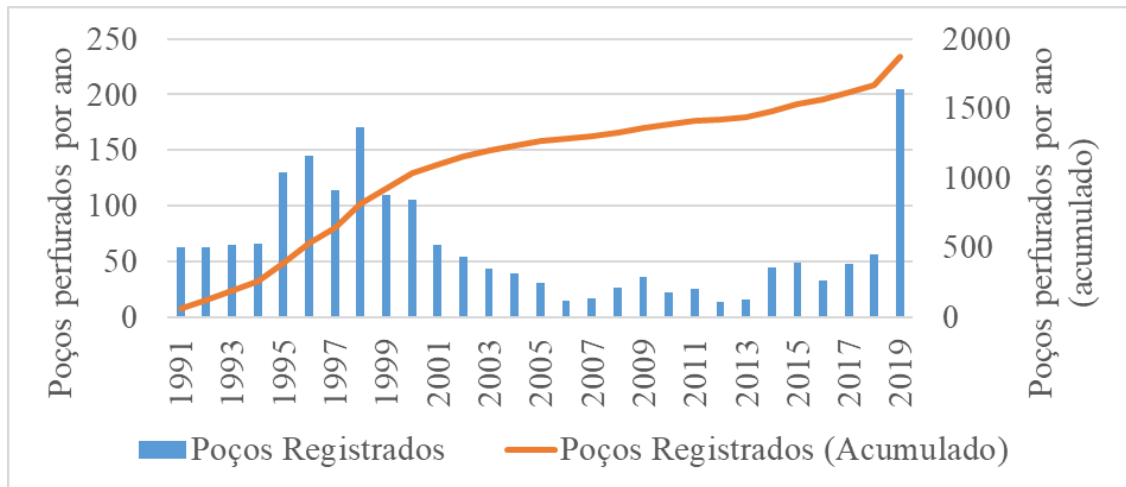


Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

3.2 Dados dos poços tubulares profundos

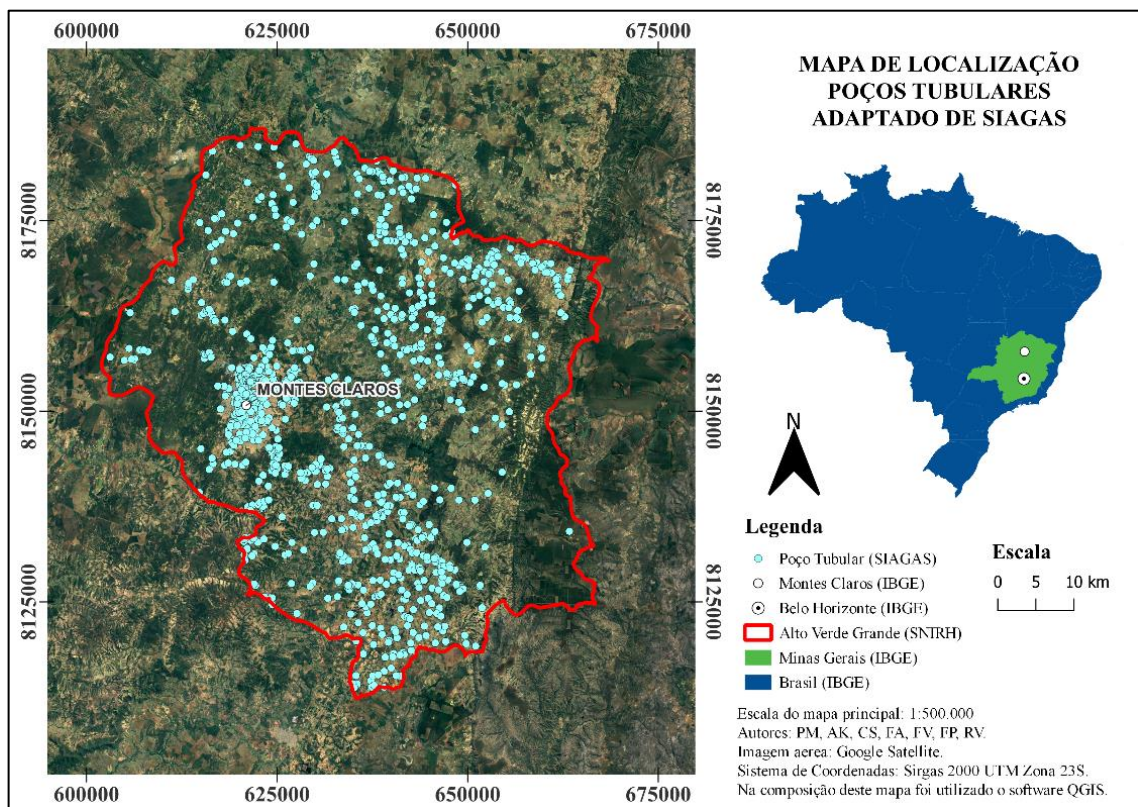
Os dados construtivos dos poços tubulares na região do AVG foram coletados no site do SIAGAS e foram sintetizados nas imagens abaixo (GRÁFICO 3 e MAPA 2).

Gráfico 3 – Poços registrados na sub-bacia do AVG no período de 1991-2020



Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

Mapa 2 – Localização dos poços tubulares na sub-bacia do AVG



Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

Na Tabela 1 são apresentadas as informações disponíveis dos poços e os levantamentos de profundidades (mínima, média e máxima) e vazões calculadas a partir dos testes de bombeamento (mínima, média e máxima). Vale destacar que nem todos poços construídos são registrados no sistema do SIAGAS, ou seja, o número real de poços na região é maior do que o apresentado.

Tabela 1 – Informações disponíveis dos poços tubulares na sub-bacia do AVG

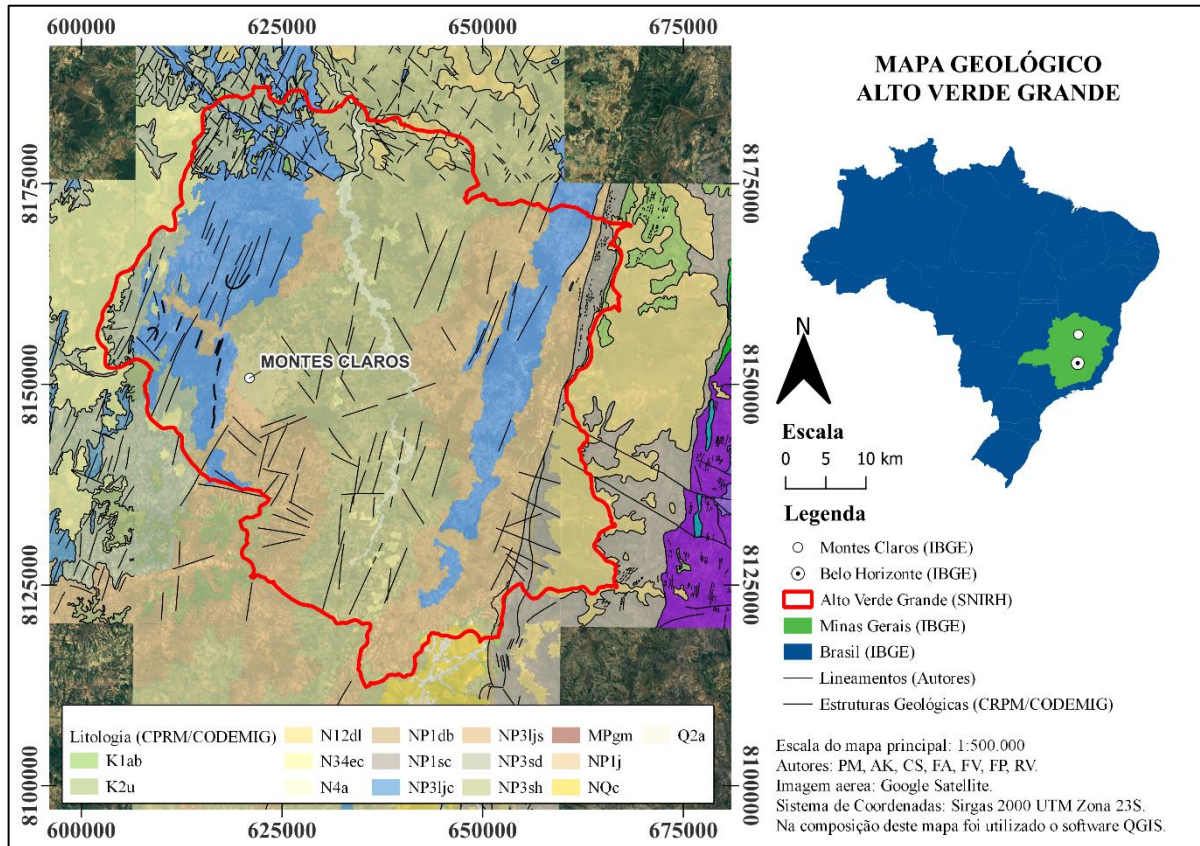
Informação	Valor
Poços Registrados	1.885
Poços com situação "Bombeando"	360
Poços com situação "Equipados"	597
Poços com situação "Não instalado, não utilizável, abandonado, colmatado, obstruído, fechado" ou não disponível	400
Poços com teste de bombeamento registrado	1.224
Poços sem teste de bombeamento registrado	663
Poços sem registro de profundidade	89
Características dos poços com registros	
Profundidade mínima (m)	1
Vazão mínima (m ³ /h)	0,075
Profundidade média (m)	89
Vazão média (m ³ /h)	27
Profundidade máxima (m)	600
Vazão máxima (m³/h)	360

Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

3.3 Dados geológicos

A litologia da área de estudo foi obtida por meio de mapas geológicos produzidos pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM, 2011) e pela Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais (CODEMIG, 2012, 2013a, 2013b) (MAPA 3). São diversas litologias, identificadas abaixo (TABELA 2).

Mapa 3 – Geologia da sub-bacia do Alto Verde Grande



Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

Tabela 2 – Litologias identificadas na área de estudo

(Continua)

Litologia	Descrição	Litologia	Descrição
Formação Abaeté K1ab	Conglomerados clasto-sustentados	Formação Lagoa do Jacaré NP3ljs	Ritmitos
Formação Urucuia K2u	Arenitos Finos	Formação Serra da Saudade NP3sd	Predomínio de siltitos e argilitos
N12dl	Depósitos detrítico-lateríticos	Formação Serra De Santa Helena NP3sh	Metassiltitos
N34ec	Depósitos colúvio-eluviais	MPgm	Quartzito

(Conclusão)			
Litologia	Descrição	Litologia	Descrição
N4a	Depósitos aluvionares	Formação Jequitaiá NP1j	Metadiamicritos
Formação Duas Barras NP1db	Quartzo-metarenitos	NQc	Depósitos colúvios-eluviais
Formação Serra Do Catuni NP1sc	Metadiamicritos	Q2a	Depósitos aluvionares
Formação Lagoa do Jacaré NP3ljc	Calculutitos e calcarenitos predominantes	-	-

Fonte: Adaptado de CPRM (2011); CODEMIG (2012, 2013a, 2013b)

Destaque para a Formação Lagoa do Jacaré (NP3ljc e NP3ljs), pertencente ao Grupo Bambuí, onde existe a presença predominante de calculutitos e de calcarenitos, que se constituem de rochas calcárias. Este tipo de rocha possui potencial para desenvolvimento de feições cársticas, como dolinas, sumidouros e cavernas.

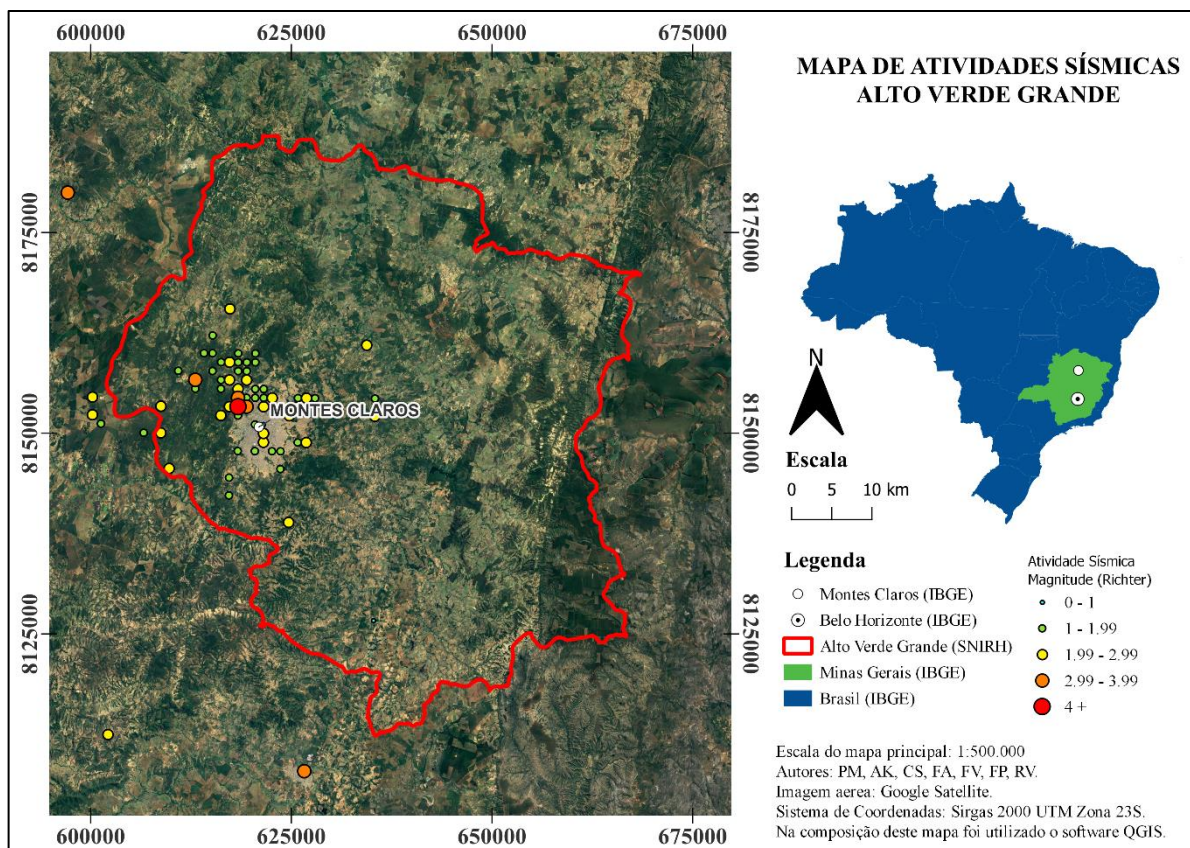
Hidrogeologicamente, a formação Lagoa do Jacaré é identificada como parte dos domínios Cárstico e Cárstico Fissural (Gurita, 2020). Esses domínios apresentam potencial de transmissividade média de 109 m²/d e armazenamento específico de 82,3 m²/d para o domínio Cárstico Fissural e valores de transmissividade que podem chegar até a 7.700 m²/d para o domínio Cárstico, além de um armazenamento específico médio de 458 (adimensional).

Esses parâmetros são um reflexo do potencial de extração de água subterrânea da região para uso agrícola, industrial e doméstico. Para referência, aquíferos com baixo potencial para captação de água subterrânea, conforme Freezer e Cherry, (1979), são relacionados à transmissividade menores que 10 m²/d e armazenamento específico abaixo de 0,001 (adimensional), enquanto aquíferos com alto potencial apresentam transmissividade acima de 100 m²/d e armazenamento específico acima de 0,01 (Fetter, 2014).

3.4 Dados das atividades sísmicas

Dados relativos aos sismos registrados na região foram coletados do Boletim Sísmico da USP e foram tratados para um raio de 200 km da cidade de Montes Claros (MAPA 4). Foram identificados 142 sismos entre o período de 1931 até 2019.

Mapa 4 – Localização dos sismos registrados no Alto Verde Grande



Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

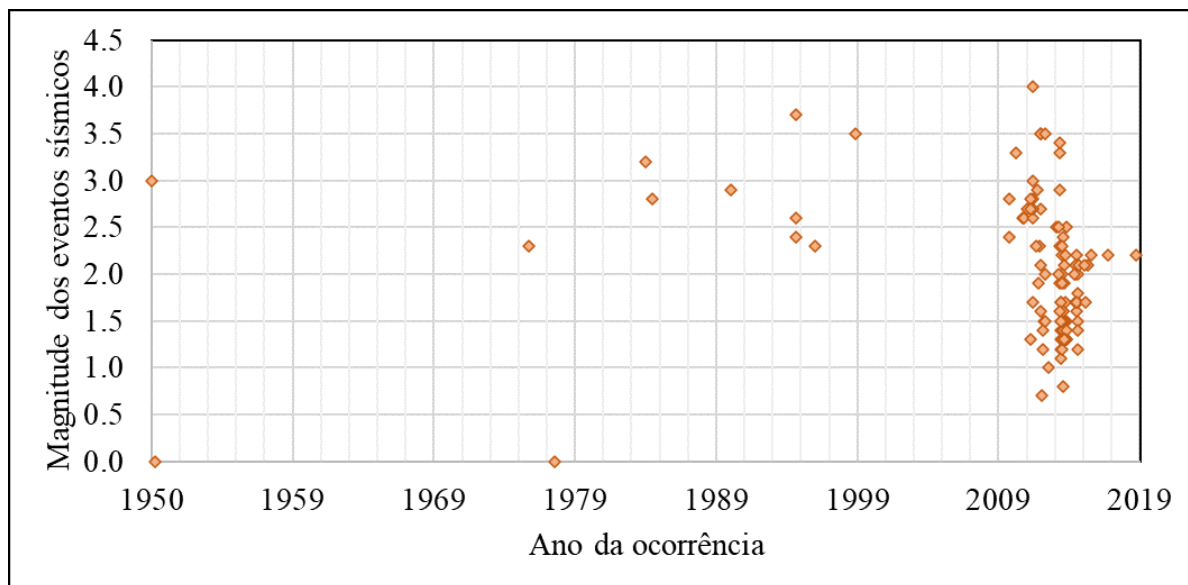
O catálogo brasileiro de eventos sísmicos disponibilizado publicamente pela Universidade de São Paulo (USP) carece de profundidades de terremotos devido à escassa cobertura das redes sísmográficas.

Os registros de terremotos disponíveis nos catálogos brasileiros geralmente não são considerados completos antes da década de 1980 devido aos registros limitados, especialmente para áreas escassamente povoadas (Assumpção *et al.*, 2016).

Abaixo, é apresentado o detalhe das atividades sísmicas em um raio de 100 km da cidade de Montes Claros, do período entre 1950 e 2019 (GRÁFICO 4). A magnitude dos

eventos é mensurada na Escala Richter. Verifica-se um aumento significativo nos registros de eventos sísmicos após 2009, mas não pode-se afirmar que esse aumento se deve diretamente à exploração dos aquíferos cársticos, mas se deve também ao aprimoramento da rede sísmica após este período.

Gráfico 4 – Série histórica das atividades sísmicas entre 1950 e 2019 em um raio de 100 km da cidade de Montes Claros

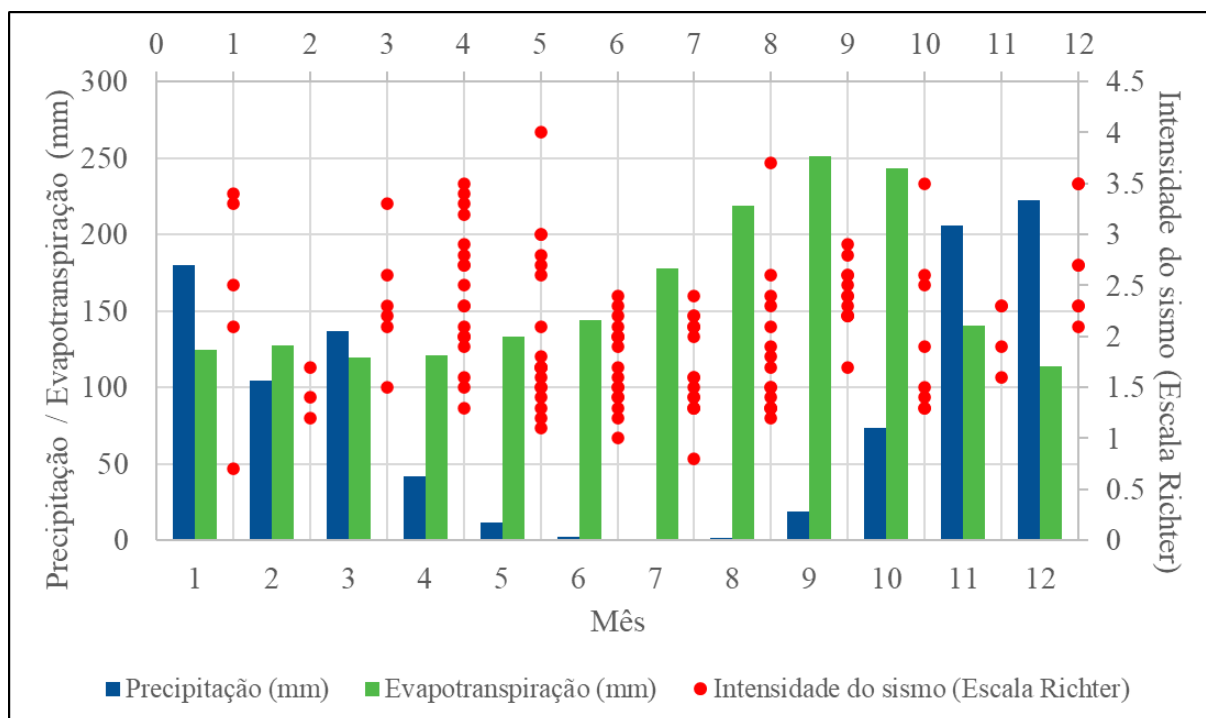


Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante a superposição da distribuição temporal dos sismos com os dados climatológicos apresentados no Gráfico 5, verificou-se que mais de 75% dos sismos foram registrados entre abril a outubro, janela de tempo que representa o período seco no ano hidrológico, conforme avaliação do índice SPI. Neste gráfico, são apresentados dados sismológicos e climatológicos entre 1991 a 2020, enquanto abaixo também é descrito a frequência de sismos por cada mês no mesmo período (TABELA 3).

Gráfico 5 – Superposição dos sismos registrados com dados climatológicos entre 1991 a 2020



Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

Tabela 3 – Frequência de sismos registrados em cada mês no período de 1991 a 2020

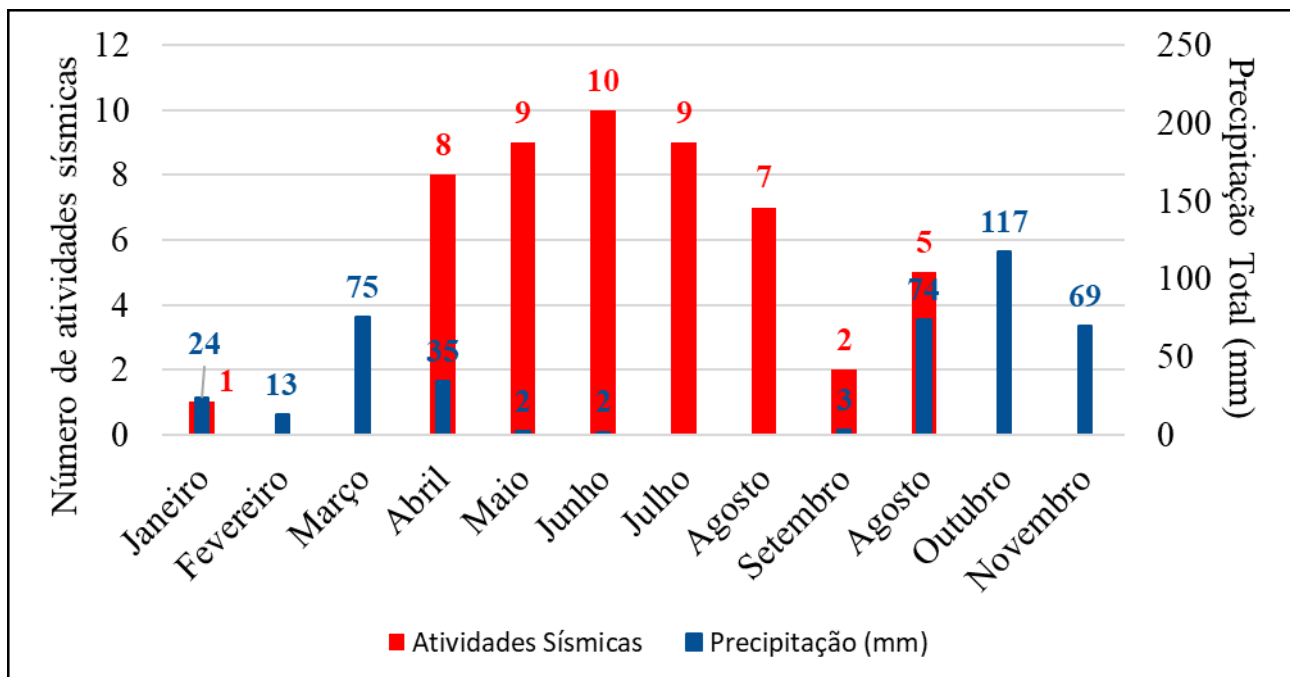
Mês	Frequência	Mês	Frequência
Janeiro	5	Julho	16
Fevereiro	3	Agosto	15
Março	6	Setembro	12
Abril	19	Outubro	8
Maio	19	Novembro	4
Junho	17	Dezembro	7

Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

No Gráfico 6, em que se apresenta as normais climatológicas, é visto que há uma frequência maior de terremotos que aconteceram no período seco em relação ao período chuvoso. Em uma análise específica para o ano de 2014, houve o maior número de terremotos e a menor quantidade de precipitação, com valor cinquenta por cento abaixo da média anual.

Neste ano, foram registrados 51 sismos, enquanto 110 atividades sísmicas foram registradas entre 1991 e 2020. Ainda, em 2014 foi registrado uma precipitação de 414 mm, comparada a precipitação média registrada entre 1991-2020 foi de 999 mm anuais.

Gráfico 6 – Número de atividades sísmicas e precipitação total em 2014 na região em estudo

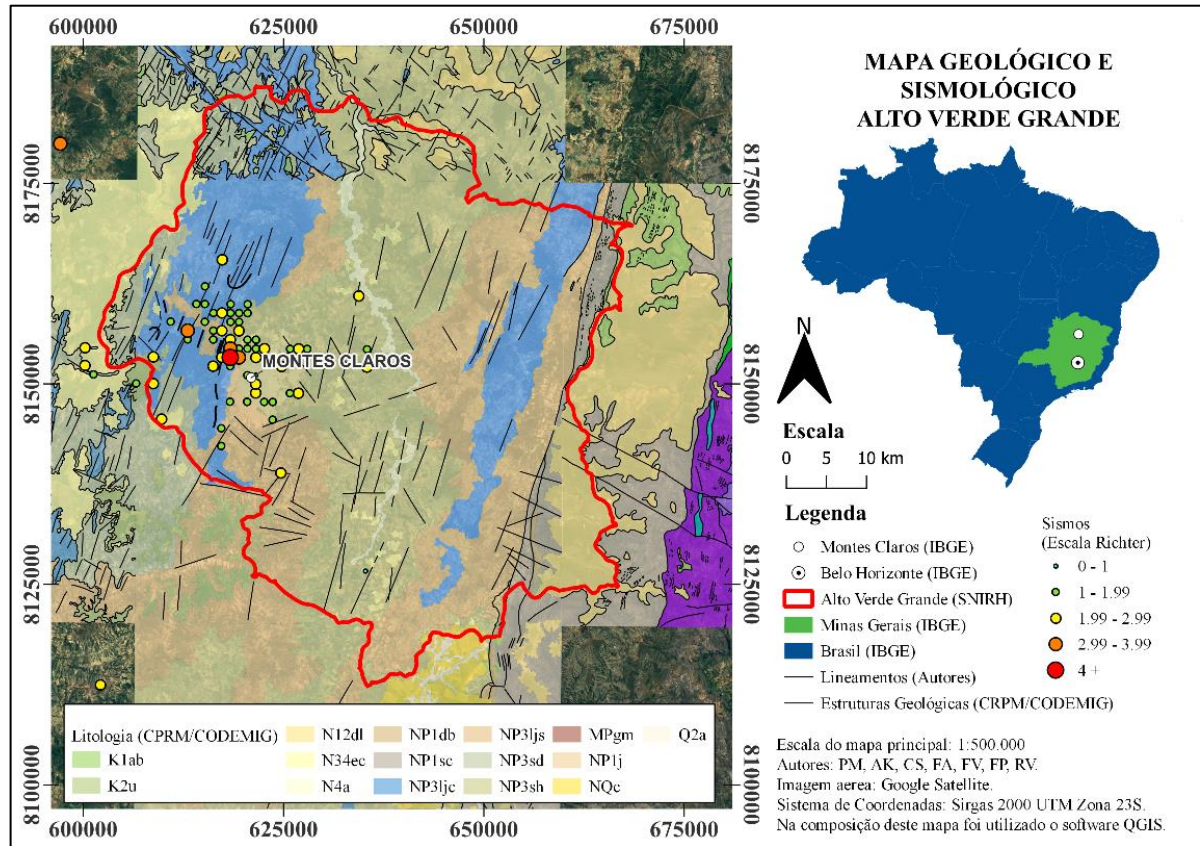


Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

Não estão disponíveis os dados de monitoramento vazão ou do estado de funcionamento dos poços cadastrados na plataforma do SIAGAS. Devido à diminuição de oferta de água superficial frente à demanda para irrigação, uso industrial e consumo doméstico a captação de água subterrânea se torna maior neste período. Este fenômeno também foi observado no estudo supracitado, na região da Índia (Jayaraman, 2021).

Quanto a sobreposição espacial dos sismos com o mapa geológico, é observado que a maior parte dos sismos se concentra na Formação Lagoa do Jacaré e nos lineamentos estruturais, além de se concentrarem na área urbana de Montes Claros (MAPA 5).

Mapa 5 – Superposição dos sismos registrados com o mapa geológico



Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

Especialmente, os sismos se concentram na Formação Lagoa do Jacaré, onde se observa potencial cárstico devido à sua natureza geológica. Nesta área, os poços possuem profundidade média de cerca de 82 m, com o máximo de 174 m e o mínimo de 58 m.

Eventos de subsidência induzida, que levam aos registros de sismos, podem acontecer naturalmente no meio cárstico, ou podem ser induzidos ou acelerados por ação antrópica. Os problemas geotécnicos induzidos nesses ambientes geralmente se formam devido à retirada de água subterrânea, atividades de construção ou uma combinação de ambas. No caso de retirada de água subterrânea de um aquífero urbano, os períodos de seca costumam ser os mais perigosos, correspondendo ao aumento da demanda por água subterrânea, levando a cones de rebaixamento ampliados (Galvão, 2015).

Dada a natureza das formações cársticas, que possuem porosidades associadas à matriz rochosa, ao fraturamento da rocha e à interconexão dessas fraturas a partir da dissolução decorrente do fluxo d'água pelo seu interior, os valores de transmissividade e condutividade hidráulica podem variar desde valores muito baixo a valores muito elevados - a permeabilidade

das rochas cársticas podem variar em até 9 ordens de grandeza (Halihan *et al.*, 2000). Esse elevado potencial hidrogeológico, somado ao crescente número de poços instalados na região, pode estar relacionado à maior recorrência de eventos sísmicos, sendo os mesmos consequência da influência da atividade antrópica na aceleração do processo de dissolução de rochas cársticas e de desaguamento de aquíferos (Galvão, 2015).

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho sugere uma correlação entre as atividades sísmicas na região do Alto Verde Grande com o ciclo hidrológico. Considerando a série de dados analisada, durante o período de seca, as atividades sísmicas são mais de três vezes mais frequentes que as atividades sísmicas durante o período chuvoso. Observou-se que com a diminuição da pluviosidade tem-se presumidamente um aumento do bombeamento dos poços e com este aumento, tem-se perda de carga dentro dos condutos cársticos, e esta perda de carga pode gerar sismicidade induzida.

O catálogo brasileiro de eventos sísmicos da USP não apresenta a profundidade da maioria dos eventos sísmicos registrados, logo não é possível comparar se a profundidade dos terremotos observados são coincidentes com a profundidade dos poços profundos em domínios cársticos.

Desta forma, para futuros estudos, recomenda-se o aprimoramento da rede de monitoramento sísmica na região, com mais estações sismológicas e uma menor grade de captação de sismos. Recomenda-se a consulta à plataforma da Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (Semad)/Instituto Mineiro de Gestão das Águas (Igam) para aferição das outorgas concedidas e comparação com os registros dos poços cadastrados na plataforma SIAGAS, permitindo melhor entendimento da produtividade desses poços e da magnitude da retirada de água subterrânea. Também recomenda-se o melhor registro de dados construtivos e dos testes de bombeamento dos poços tubulares profundos, além da disponibilização de dados sobre a situação dos poços (operante, desativado) e dados históricos de vazão, nível estático e nível dinâmico sobre os poços para aprofundamento das análises.

Uma pesquisa mais ampla é necessária para definir com precisão se o acréscimo de atividade sísmica na região do Alto Verde Grande é causado pelo déficit hídrico e pela superexploração de aquíferos e, caso positivo, qual o mecanismo por trás desse fenômeno.

Também é recomendado que outras bacias hidrográficas, com características geológicas semelhantes sejam avaliadas para afirmar com mais precisão se existe correlação ou não entre a sismicidade na região com a captação de água subterrânea em regiões cársticas.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Verde Grande**. Brasília: ANA, 2016. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/gestao-das-aguas/planos-e-estudos-sobre-rec-hidricos/plano-de-recursos-hidricos-da-bacia-hidrografica-do-rio-verde-grande>. Acesso em: 11 set. 2023.

ASSUMPÇÃO, M.S. *et al.* Terremotos no Brasil: preparando-se para eventos raros. **Boletim SBGf**, Rio de Janeiro, v. 96, p. 25-29, 2016. http://www.sbgf.org.br/home/images/Boletim_96-2016.pdf. Acesso em: 15 abr. 2024.

ASSUMPÇÃO, M.; YAMABE, T. H.; BARBOSA, J. R. Atividade sísmica na bacia do Paraná induzida pela perfuração de poços tubulares profundos. **Revista Águas Subterrâneas**, São Paulo, 2008. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23361>. Acesso em: 23 jun. 2022.

BOLETIM SÍSMICO. São Paulo: Centro de Sismologia da Universidade de São Paulo, 2022. Versão: v2022Jan27. Disponível em: <https://moho.iag.usp.br/eq/bulletin/>. Acesso em: 15 abr. 2024.

BOLETIM SÍSMICO DO NORTE DE MINAS. Montes Claros: Universidade Estadual de Montes Claros, ano 1, ago. 2022. Disponível em <https://unimontes.br/wp-content/uploads/2022/09/Boletim-agosto-2022.pdf>. Acesso em: 25 set. 2023.

COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO DE MINAS GERAIS (CODEMIG). **Mapa geológico da Folha Botumirim SE-23-X-B-IV**. Belo Horizonte, 2012. Mapa. Escala 1:100.000. Disponível em: <http://www.portalgeologia.com.br/index.php/mapa/#downloads-tab>. Acesso em: 15 abr. 2024.

COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO DE MINAS GERAIS (CODEMIG). **Mapa geológico da Folha Capitão Enéas SE-23-X-A-III**. Belo Horizonte, 2013a. Mapa. Escala 1:100.000. <http://www.portalgeologia.com.br/index.php/mapa/#downloads-tab>. Acesso em: 15 abr. 2024.

COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO DE MINAS GERAIS (CODEMIG). **Mapa geológico da Folha Coração de Jesus SE-23-X-A-V**. Belo Horizonte, 2013b. Mapa. Escala 1:100.000. <http://www.portalgeologia.com.br/index.php/mapa/#downloads-tab>. Acesso em: 15 abr. 2024.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS (CPRM). **Mapa geológico da Folha Montes Claros SE-23-X-A-VI**. Brasília: CPRM: 2011. Mapa. Escala 1:100.000. Disponível em: https://rigeo.cprm.gov.br/bitstream/doc/18279/1/mapa_geologico_montes_claros.pdf. Acesso em: 15 abr. 2024.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS (CPRM). **Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS)**. Disponível em: <https://siagasweb.sgb.gov.br/layout/>. Acesso em: 11 set. 2023.

FETTER, C.W. **Applied hydrogeology**. London: Pearson, 2014.

FREEZE, R. A.; CHERRY, J. A. **Groundwater**. London: Pearson, 1979.

GALVÃO, P. H. F. **Modelo hidrogeológico conceitual de Sete Lagoas (MG) e implicações associadas ao desenvolvimento urbano em regiões cársticas**. 2015. 136 f. Tese (doutorado em Recursos Mineiros e Hidrogeologia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44138/tde-22092015-151113/pt-br.php>. Acesso em: 15 abr. 2024.

HALIHAN, T., SHARP JR., J.M., MACE, R.E. Flow in the San Antonio segment of the Edwards Aquifer: matrix, fractures, or conduits? *In*: Wicks, C.M., Sasowsky, I.D. (ed.). Groundwater flow and contaminant transport in carbonate aquifers. Rotterdam: Balkema, 2000. p. 129-146.

GURITA, R. A. **Avaliação dos fatores condicionantes da favorabilidade hidrogeológica do sistema aquífero cárstico-fissural, região de Montes Claros, MG**. 2020. 78 f. Monografia (Graduação em Engenharia Geológica) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo Demográfico 2022**. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/montes-claros/panorama>. Acesso em: 11 set. 2023.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (Brasil). **Normais climatológicas 1991-2020**. Brasília: INMET, 2022. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/normais>. Acesso em: 11 set. 2023.

JAYARAMAN, K. S. **Frequent earthquakes around Delhi linked to groundwater pumping**. Nature India. New Delhi, may, 2021. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/nindia.2021.72>. Acesso em: 15 abr. 2024

UNITED NATIONS. **The United Nations World Water Development Report 2022: groundwater: making the invisible visible**. Paris, Unesco, 2022. Disponível em: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380721>. Acesso em: 15 abr. 2024.

YAMABE, T. H.; BERROCAL, J. Podem os poços tubulares profundos provocar abalos sísmicos? Casos estudados no Brasil. **Revista Águas Subterrâneas**, São Paulo, 2000. [Anais]. Trabalho apresentado no 11º Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 2000, Ceará. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23772>. Acesso em: 15 abr. 2024.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Minas Gerais, pelo ensino público e de qualidade.

À Klohn Crippen Berger, pelo incentivo à pesquisa e à qualidade técnica.

À todos(as) envolvidos direta e indiretamente neste estudo.