

DIREÇÕES DOS FLUXOS SUBTERRÂNEOS NO CARSTE DA BACIA DO RIO SOBRADO – TO

Hugo Lopes Pereira¹
Fernando de Moraes²

INTRODUÇÃO

Aquíferos cársticos são reconhecidos por sua importância hídrica, sendo responsável pelo abastecimento de 20 a 25% da população mundial (HAMED et al., 2024). Sabe-se, no entanto, que estes ambientes são dotados de elevada heterogeneidade e anisotropia no que concerne à organização da sua estrutura, sendo comum ocorrer perfurações de poços próximos com diferenças significativas de produtividade. Assim, o conhecimento das direções preferenciais do fluxo de água subterrânea pode ajudar na definição de áreas potencialmente exploráveis e pontos de recarga (GAIKWAD et al., 2023; PARDESHI et al., 2024).

Existem três técnicas para este mapeamento: (i) A técnica de rastreamento de entrada e saída; (ii) o levantamento topográfico de cavernas e (iii) o método geofísico (HARYONO et al., 2005). No entanto, todas estas técnicas demandam custos que podem inviabilizar pesquisas com poucos recursos, realidade não rara no Brasil.

Deste modo, esta pesquisa fundamenta-se na premissa de que a estimativa da direção do fluxo de base utilizando imagens de satélite pode ser validada se houver forte associação entre a orientação preferencial dos lineamentos extraídos automaticamente de MDE's, a direção das depressões cársticas e da potenciometria de uma determinada área.

A bacia do rio Sobrado constitui a área de estudo, tendo sua maior porção pertencente ao Sistema Aquífero Bambuí (SAB), que é um sistema aquífero interfronteiriço de natureza cárstica e fissuro-cárstica situado nos estados do Tocantins, Goiás e Bahia. A bacia abrange os municípios de Taguatinga – TO e Aurora do Tocantins – TO, com área de 1.100,00 km².

METODOLOGIA

Foi realizada uma análise da associação conjunta das direções preferenciais das depressões cársticas potenciais, dos lineamentos extraídos automaticamente por meio de MDE's e da potenciometria da bacia do rio Sobrado, de modo que fosse possível inferir a direção preferencial do fluxo subterrâneo de forma regionalizada. Para isso, a área da bacia foi

¹ Doutorando pelo Curso de Ciências do Ambiente da Universidade Federal Tocantins, hugo.pereira@uft.edu.br;

² Doutor em Evolução Crustal e Recursos Naturais da Universidade Federal de Ouro Preto, morais@uft.edu.br.

dividida em quadrículas de 5 km de lado em ambiente SIG. Para cada quadrícula foram adicionados atributos com as direções preferenciais das variáveis agrupadas em quatro classes de azimutes: N-S ($337,5^\circ - 22,5^\circ$ ou $157,5^\circ - 202,5^\circ$), NE-SW ($22,5^\circ - 67,5^\circ$ ou $202,5^\circ - 247,5^\circ$), E-W ($67,5^\circ - 112,5^\circ$ ou $247,5^\circ - 292,5^\circ$) e NW-SE ($112,5^\circ - 157,5^\circ$ ou $292,5^\circ - 337,5^\circ$).

Esta classificação das direções foi realizada para as variáveis: (i) Direção preferencial das depressões internas e com maior parte em uma determinada quadrícula, (ii) direção preferencial dos lineamentos internos e com maior parte em uma determinada quadrícula e (iii) direção preferencial das depressões que se interseccionaram com lineamentos.

Para representar a intensidade da associação entre as três variáveis tomadas duas a duas, foi elaborada uma matriz da associação com os coeficientes V de Cramer, considerando um nível de significância de 5% ($p\text{-valor} < 0,05$) para rejeitar a ocorrência de não associação. Este teste origina-se da estatística qui-quadrado e fornece um valor de 0 a 1. Sendo que valores maiores ou iguais a 0,00 e menores que 0,20 representam uma associação fraca, valores maiores que 0,20 e menores ou iguais a 0,50 representam uma associação moderada e valores maiores que 0,50 representam uma associação forte (OLIVEIRA e MORÉGULA, 2020).

A extração dos lineamentos geológicos foi realizada a partir de imagem sombreada obtida com um Modelo Digital de Elevação oriundo de interferometria de par de imagens Sentinel-1 IW (ESA, 2014), com resolução horizontal de 15 m. A ferramenta computacional utilizada para processamento das imagens Sentinel-1 foi o software livre Snap (ESA, 2022), com o módulo adicional Snaphu (SNAPHU, 2021) instalado previamente, que por sua vez foi utilizado para o desempacotamento automático do interferograma de fases. A precisão vertical obtida para este MDE foi de 7,16 m (EMQ) e foi calculada a partir de 384 pontos de controle obtidos na área por receptores GNSS com desvio padrão de 0,00 a 0,10 m.

A extração dos lineamentos foi realizada de forma automática, por meio do algoritmo *Line* no software Catalyst Professional – versão 2222.0.8 (CATALYST, 2024). Kumwenda et al. (2024) esclarecem que, apesar dos lineamentos poderem ser traçados manualmente percorrendo imagens sombreadas do relevo, existem vantagens na extração automática, diminuindo tempo de trabalho e subjetividade na identificação dos lineamentos. O algoritmo requer como entrada imagens sombreadas do relevo, sendo que depois de identificados nos rasters, os lineamentos são convertidos em vetores de linhas (KUMWENDA et al., 2024).

Imagens sombreadas multidirecionais vêm sendo utilizadas para a aplicação do método. Nugroho e Tjahjaningsih (2016), por exemplo, utilizaram imagens sombreadas para os azimutes de insolação 0° , 45° , 90° e 135° , posteriormente combinados em uma única imagem multidirecional. Barreiro (2020) gerou separadamente imagens sombreadas considerando 8

azimutes distintos, posteriormente somados pela calculadora raster do software QGIS perfazendo duas imagens sombreadas multidirecionais, uma negativa e outra positiva. Aqui, optou-se por utilizar uma única imagem sombreada multidirecional com insolação à 45°, gerada automaticamente pelo algoritmo “Sombreamento” do módulo GDAL. Este algoritmo combina as imagens sombreadas iluminadas por azimutes de 225°, 270°, 315° e 360° (GDAL, 2024).

A extração automática de lineamentos requer uma sucessão de tentativas para calibração prévia de alguns parâmetros de configuração para definir os tamanhos e o nível de detecção das feições. Os filtros limites são: raio, borda de gradiente, comprimento de curva, linha de erro de ajuste e limiar de ligação de distância. Tais são representados por siglas em inglês, e os valores limites adotados neste trabalho foram respectivamente: $RADI = 10$, $GTHR = 100$, $LTHR = 30$, $FTHR = 3$, $ATHR = 30$ e $DTHR = 20$ (NUGROHO e TIAHJANINGSIH, 2016; BARREIRO, 2020; KUMWENDA et al., 2024).

Em seguida foram elaborados mapas de densidades dos lineamentos com duas direções mais representativas das quatro em estudo, de modo que fosse possível traçar *trends* de lineamentos dentro da área de estudo, e comparar suas direções com as direções definidas perpendicularmente às linhas potencimétricas. Este procedimento foi realizado por meio do algoritmo “densidade de linha” no software QGIS-Versão 3.22.7.

As linhas potencimétricas para o SAB na bacia do rio Sobrado foram traçadas a partir dos dados de 77 poços disponíveis no Sistema de Informações de Águas Subterrâneas – SIAGAS. O raster da superfície potencimétrica foi gerado com o algoritmo B-spline multinível para interpolação espacial de dados dispersos proposto por Lee et al. (1997). Este método foi escolhido por mostrar-se apropriado após comparação de resultados obtidos a partir do método IDW e por krigagem ordinária.

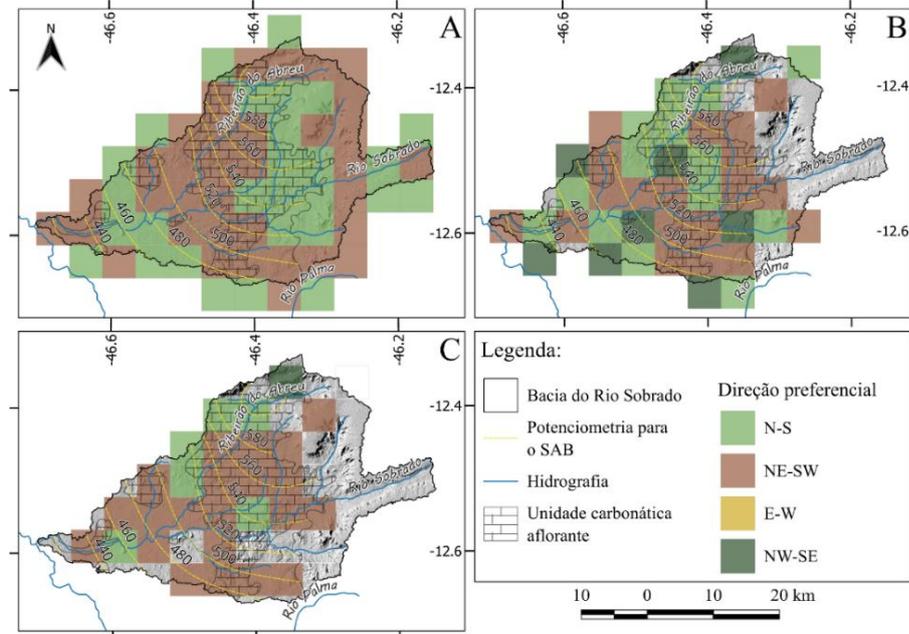
RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para análise comparativa das direções preferencias de lineamentos extraídos automaticamente e de depressões cársticas potenciais para a bacia do rio Sobrado, foi elaborada a Figura 1, nela estão indicadas separadamente para áreas de quadrículas de 5 x 5 km as direções preferenciais de lineamentos (Figura 1-A), da alongação de depressões (Figura 1-B) e da direção preferencial das depressões que coincidem com lineamentos (Figura 1-C). A partir das análises dos lineamentos, é possível observar que predominam as direções N-S e NE-SW.

A proximidade direcional do lineamento com depressões cársticas sugere possível associação entre a estrutura geológica subjacente e a formação das depressões. Por exemplo, uma falha geológica pode fornecer uma rota para a água subterrânea fluir e dissolver as rochas

carbonáticas, resultando na formação de dolinas ao longo da falha. A comparação das direções onde ocorrem a coincidência dolina-lineamento com as direções preferencias destes grupos separados apontou similaridade entre as direções preferencias de cada quadrícula, sendo possível inferir a direção do fluxo subterrâneo do aquífero cárstico.

Figura 1 – Direção preferencial de: (A) lineamentos geológicos extraídos automaticamente, (B) Depressões cársticas potenciais e (C) Depressões potenciais com direção coincidente os lineamentos que a interceptam.

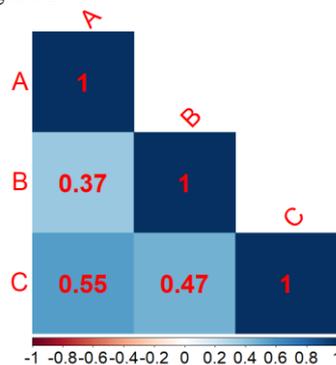


Fonte: Elaborado pelos autores.

Observou-se na porção correspondente à unidade carbonártica, que existem menos direções preferenciais de dolinas destoantes das direções dos lineamentos (Figura 1-B). A unidade terrígena apresenta-se com menor altitude e menos escarpada.

A Figura 2 mostra a matriz de intensidade da associação para as variáveis A, B e C detalhadas na Figura 1 por meio do coeficiente V de Cramer. Verifica-se que as associações variam de moderada a forte. Existe concordância com o aqui obtido e com o relatado nas pesquisas de Maldonado (2000) e Souei et al. (2023), com direções coincidentes das dolinas e lineamentos com as direções prováveis do fluxo subterrâneo (Figura 1).

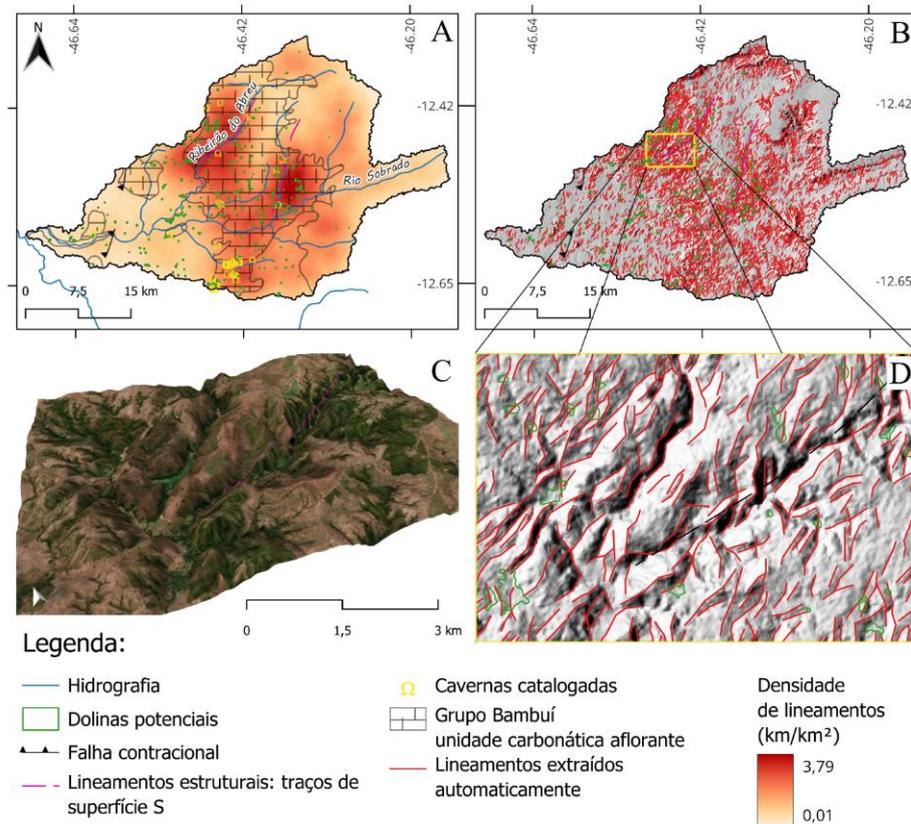
Figura 2 – Matriz de intensidade de associação definida pelo coeficiente V de Cramer para as variáveis das quadrículas A, B e C apresentadas na figura 1.



Fonte: Elaborado pelos autores.

A área correspondente à unidade carbonática aflorante do SAB tem maior densidade de lineamentos, em maior intensidade nas imediações do Ribeirão do Abreu o qual contempla muitos pontos de controle estrutural sobre rocha carbonática. Além disso, a área mencionada aparece indicada no mapa geológico do Tocantins com traços de Superfície S (RIBEIRO et al., 2022). O local mencionado tem seus lineamentos e relevo detalhados nas Figuras 3-C e 3-D. Os traços de superfície S geralmente ocorrem em planos de falha, o que demonstra assertividade dos lineamentos extraídos pelo método automático aqui utilizado.

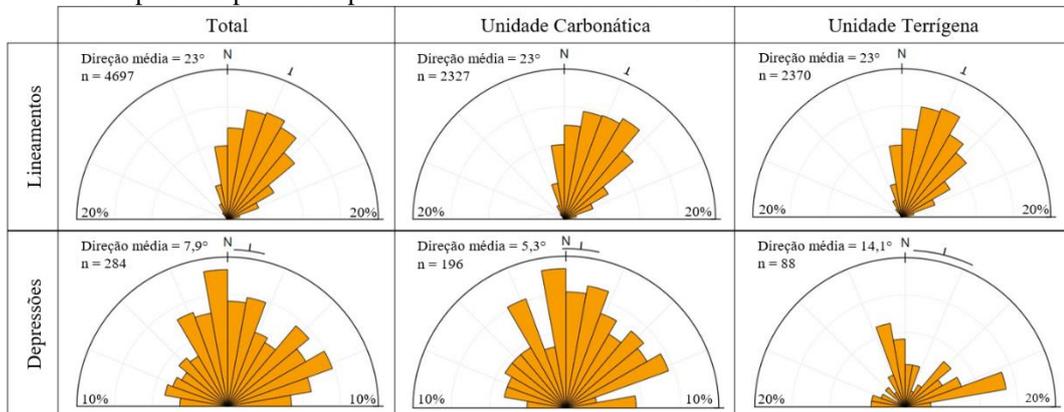
Figura 3 – (A) Densidade de lineamentos extraídos automaticamente; (B) Lineamentos extraídos automaticamente sobre imagem sombreada com exagero vertical Z = 3; (C) Perspectiva 3D do detalhe D com exagero vertical de 5 vezes; (D) Detalhe de lineamentos extraídos automaticamente.



Fonte: Elaborado pelos autores.

A associação entre as direções preferenciais das depressões e lineamentos, também é verificada por meio de diagramas de rosetas. A Figura 4, apresenta três comparações da associação destas direções. As direções dos lineamentos, apresentam-se parecidas para cada situação, tendo a direção média para os três casos definida em 23° caracterizando-se na faixa definida para a direção NE-SW, por outro lado está no limiar da direção N-S que seria 22,5°. Para as rosetas das depressões cársticas potenciais, apesar de haver maior variação de direções, predomina as direções N-S e NE-SW, com exceção para a unidade terrígena do SAB, a qual apresenta maior aleatoriedade, o que se atribui a descaracterização da forma original da depressão pelo acúmulo de material alógeno.

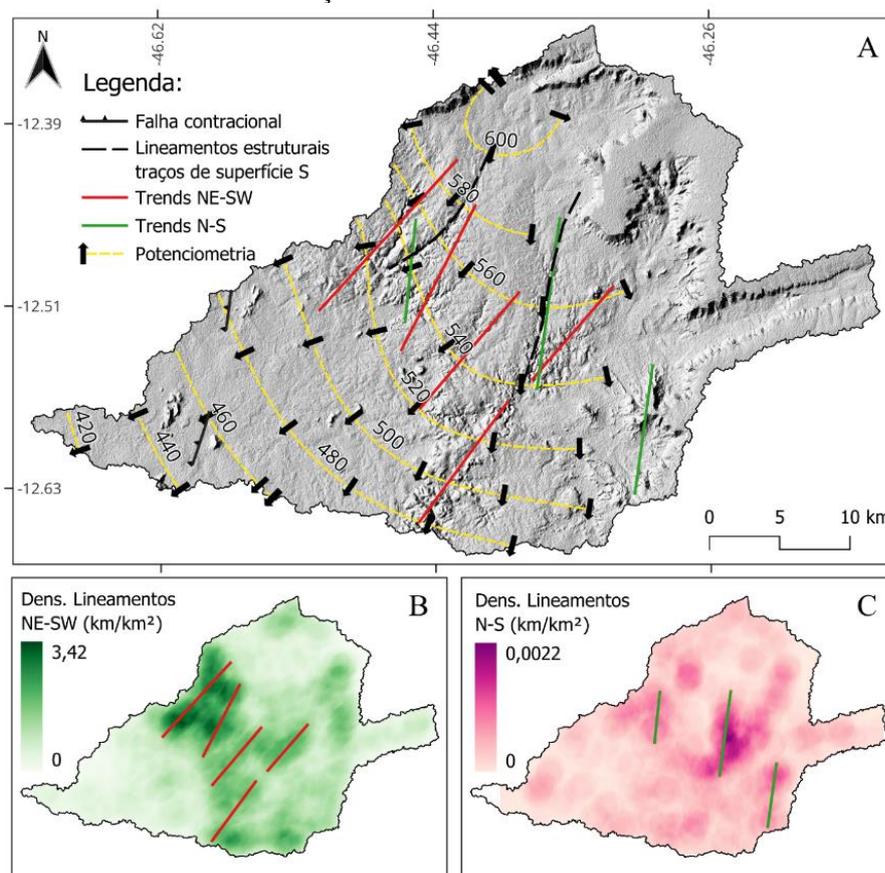
Figura 4 – Comparação da direção preferencial de lineamentos extraídos automaticamente versus a direção preferencial das depressões potenciais para a área total da bacia do rio Sobrado.



Fonte: Elaborado pelos autores.

A concentração de lineamentos numa direção específica pode indicar a presença de uma estrutura geológica regional dominante. Com intuito de analisar como os lineamentos estão distribuídos em relação às direções preferenciais detectadas, foram elaborados mapas de densidade de lineamentos correspondentes às direções NE-SW (Figura 5B) e N-S (Figura 5C). Pode-se notar uma relação dos *trends* dos lineamentos com os gradientes potenciométricos para o SAB, permitindo inferir a direção preferencial do fluxo subterrâneo na área.

Figura 5 – (A) Trends obtidos por meio de mapas de densidades de lineamentos sobre imagem sombreada multidirecional com exagero vertical Z = 3; (B) Mapa de densidade de lineamentos com direção NE-SW; (C) Mapa de densidade de lineamentos com direção N-S.



Fonte: Elaborado pelos autores.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa permitiu inferir de forma regionalizada as direções mais prováveis do fluxo de água subterrânea para o Sistema Aquífero Bambuí presente na bacia do rio Sobrado, Tocantins.

A coincidência na direção de lineamentos e alinhamento de dolinas que ocorrem ao longo da mesma fratura, reafirmam que as mesmas atuam como caminhos preferenciais para fluxos subterrâneos, muitas vezes condicionados pelos planos de fraqueza da rocha.

Além da possibilidade de inferir a direção preferencial do fluxo subterrâneo, a identificação dessas relações pode ser importante em estudos geológicos, hidrogeológicos e de engenharia, pois pode ajudar na compreensão dos processos de formação do relevo e na avaliação de riscos associados, como colapsos de terreno ou instabilidade geotécnica.

Palavras-chave: Depressões Cársticas, Fluxo de água subterrânea, Modelos digitais de elevação, Lineamentos; Potenciometria.

REFERÊNCIAS

BARREIRO, H. S. **Extração automática de lineamentos na exploração de água subterrânea: Caso dos aquíferos metassedimentares da Chapada Diamantina centro-sententrional.** (Dissertação de mestrado) Universidade Federal da Bahia. Salvador, p. 43. 2020.

CATALYST. Catalyst Professional. **Catalyst earth data, simplified**, 2024. Disponível em: <<https://catalyst.earth/solutions/catalyst-professional/>>. Acesso em: 27 Maio 2024.

CPRM. Sistema de Informações de Águas Subterrâneas. SIAGAS. **SIAGAS**, 2021. Disponível em: <<http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/index.php>>. Acesso em: 22 Dezembro 2021.

ESA. Sentinel online (Sentinel-1). **The European Space Agency**, 2014. Disponível em: <<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1>>. Acesso em: 27 Outubro 2022.

ESA. SNAP - Sentinel Application Platform v 9.0.1. **Science Toolbox Exploitation Platform**, 2022. Disponível em: <<http://step.esa.int/main/snap-9-0-released/>>. Acesso em: 1 Novembro 2022.

GAIKWAD, V. et al. GIS-based comparative analysis of lineament extraction by using different azimuth angles: a case study of Mula river basin, Maharashtra, India. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 16, n. 538, p. 1-17, 2023.

GDAL. gdaldem: multidirectional. **GDAL documentation**, 2024. Disponível em: <<https://gdal.org/programs/gdaldem.html>>. Acesso em: 27 Maio 2024.

HAMED, Y. et al. Hydrogeological investigation of karst aquifers using an integrated geomorphological, geochemical, GIS, and remote sensing techniques (Southern Mediterranean Basin—Tunisia). **Environment, Development and Sustainability**, n. 26, p. 6943–6975, 2024.

HARYONO, E. et al. **Underground river network modelling from lineaments and fracture traces by means of remote sensing and geographic information system**. Water Resource and Environmental Problem in Karst. Belgrade: National Committee of IAH-Serbia Montenegro. 2005. p. 1-7.

KUMWENDA, J.; BETTS, P.; ARMIT, R. Geophysical insights into basement faults influencing basin evolution: A case study from Tennant Creek Block, North Australian Craton. **Precambrian Research**, v. 406, p. 1-21, 2024.

LEE, S.; WOLBERG, G.; SHIN, S. Scattered data interpolation with Multilevel B-Splines. **IEEE Transactions on visualization and computer graphics**, v. 3, n. 3, 1997.

MALDONADO, F. et al. Distribución espacial, morfometría y actividad de la subsidencia por disolución de evaporitas en un campo de dolinas de colapso (Valle del Ebro, Zaragoza). **Revista C & G**, v. 14, n. 3-4, p. 9-24, 2000.

NUGROHO, U. C.; TIAHJANINGSIH, A. Lineament density information extraction using DEM SRTM Data To Predict The Mineral Potential Zones. **International Journal of Remote Sensing and Earth Sciences**, v. 13, n. 1, p. 67-74, 2016.

OLIVEIRA, P. T. N.; MORÉGULA, A. A. Correlação entre concepção de saúde e comportamento preventivo relativo à exposição solar. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 6, n. 3, p. 0404-10417, Março 2020.

PARDESHI, S. S.; PARDESHI, S. D.; AUTADE, S. E. Rendering lineament induced stream alignment in Upper Krishna Basin, India: a geospatial approach. **Discover Geoscience**, v. 2, n. 2, p. 1-13, 2024.

QGIS. Interpolation - Line density. **QGIS Documentation**, 2023. Disponível em: <https://docs.qgis.org/3.22/en/docs/user_manual/processing_algs/qgis/interpolation.html#qgis-linedensity>. Acesso em: 5 Maio 2024.

RIBEIRO, P. S. E. et al. Mapa geológico e de recursos minerais do Estado do Tocantins. **RIGeo**, 2022. Disponível em: <<https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/22530>>. Acesso em: 27 Maio 2024.

SILVA, A. B. Hidrogeologia de meios cársticos. In: FEITOSA, F. A. C. **Hidrogeologia conceitos e aplicações**. 3ª. ed. Rio de Janeiro: CPRM-LABHID, 2008. Cap. 3.3, p. 153-174.

SNAPHU. Statistical-Cost, Network-Flow Algorithm for Phase Unwrapping. **Stanford Radar Interferometry Research Group**, 2021. Disponível em: <<https://web.stanford.edu/group/radar/softwareandlinks/sw/snaphu/>>. Acesso em: 1 Novembro 2022.

SOUEI, A.; ZOUAGHI, T.; KHEMIRI, S. Lineament characterization for groundwater targeting using satellite images and field data. **Earth Science Informatics**, n. 16, p. 455-479, 2023.