



ANAIS do 37º Congresso Brasileiro de Espeleologia

Curitiba - Paraná, 26 a 29 de julho de 2023



O artigo a seguir é parte integrante dos Anais do 37º Congresso Brasileiro de Espeleologia, disponível gratuitamente em www.cavernas.org.br.

Sugerimos a seguinte citação para este artigo:

ASSUNÇÃO, P.; GALVÃO, P.; MATOS, A.. Favorabilidade de rotas cársticas e índices de sinuosidade aplicando o método preliminar “MISSE”. In: MISE, K. M.; GUIMARÃES, G. B.. (orgs.) CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 37, 2023. Curitiba. *Anais...* Campinas: SBE, 2023. p.225-228.

Disponível em: <http://www.cavernas.org.br/anais37cbe/37cbe_225-228.pdf>. Acesso em: *data do acesso*.

Esta é uma publicação da Sociedade Brasileira de Espeleologia.
Consulte outras obras disponíveis em www.cavernas.org.br

FAVORABILIDADE DE ROTAS CÁRSTICAS E ÍNDICES DE SINUOSIDADE APLICANDO O MÉTODO PRELIMINAR “MISSE”

*FAVORABILITY OF KARST ROUTES AND SINUOSITY
INDEX APPLYING THE PRELIMINARY “MISSE” METHOD*

Pedro ASSUNÇÃO^{1,2,3}; Paulo GALVÃO³; Allan MATOS³

- (1) Sociedade Excursionista e Espeleológica (SEE).
- (2) Espeleogrupo Pains (EPA).
- (3) Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

Contatos: pedroassuncao94@hotmail.com; hidropaulo@gmail.com; thiago.n.lucon@gmail.com.

Resumo

Para estimar parâmetros de fluxo e transporte de águas subterrâneas a partir de testes com corantes fluorescentes, é necessário saber o índice de sinuosidade cárstica (S) que, devido a dificuldades em se conhecer a geometria do conduto, o S é muitas vezes simplificado, considerando apenas uma distância em linha reta entre o ponto de injeção do corante e o ponto de amostragem. A fim de minimizar essas limitações, este estudo propõe um método preliminar de indexação baseado em SIG via matriz de classificação ponderada chamada “MISSE”, sigla em inglês que combina cinco parâmetros: (M) fratura/falha Mapeada, (I) lineamentos Inferidos, (S) mapeamento eSpeleológico, (S) Sumidouro e (E) Entradas de cavernas. O método foi testado em dois sistemas cársticos na bacia do rio São Miguel (MG), onde parâmetros favoráveis à carstificação, como feições geológico-estruturais, geomorfológicas e espeleológicas foram associados. Os resultados determinaram previamente as rotas mais favoráveis e seus respectivos índices de sinuosidades, sendo validados por meio de mapeamento de cavernas, levantamentos de espeleomergulho e testes de corantes fluorescentes.

Palavras-Chave: Rota cárstica; SIG; Sinuosidade; Espeleologia.

Abstract

To estimate groundwater flow and transport parameters using dye tests and hydrodispersive models, it is necessary to know the karst sinuosity index (S) that, due to difficulties in determining conduit geometry, S is often simplified by considering only a straight-line distance between the dye injection point and its sampling location. To minimize these limitations, this study proposes a preliminary indexing method based on GIS using a weighted classification matrix called “MISSE”, which combines five parameters: (M) Mapped fracture/fault, (I) Inferred lineaments, (S) Speleological survey, (S) Sinkhole, and (E) Entrance of cave. The method was tested in two karst hydrosystems in the São Miguel River basin (MG), where favorable karstification parameters, such as geological-structural, geomorphological, and speleological features, were associated. Results mapped the most favorable routes, validated by cave mapping, diving surveys, and dye tests.

Keywords: Karst route; GIS; Sinuosity; Speleology.

1. INTRODUÇÃO

Determinar direções e caminhos de fluxo de águas subterrâneas em redes de condutos cársticos heterogêneos e anisotrópicos, a partir de testes com corantes fluorescentes, não é uma tarefa simples. Pesquisadores, com o objetivo de estimar parâmetros de fluxo e transporte tendo como referência modelos hidrodispersivos cársticos, precisam de dados sobre índices de sinuosidade cárstica (S) (WORTHINGTON, 1991). Este parâmetro é estimado com base na relação entre distâncias lineares ou radiais (X) e sinuosas (Xs) de um determinado conduto. Assim sendo, um mapa de configuração de rotas cársticas

é minimamente necessário. No entanto, devido a dificuldades inerentes para determinar a geometria de condutos, esses estudos geralmente simplificam o valor de S considerando apenas uma distância em linha reta entre a injeção do corante (entrada) e o ponto de amostragem (saída).

Para minimizar essas limitações, este trabalho propõe um método preliminar de indexação baseado em SIG por meio de uma matriz de classificação ponderada chamada “MISSE”, sigla em inglês que combina cinco parâmetros: (M) *Mapped fracture/fault* (fratura/falha mapeada), (I) *Inferred lineaments* (lineamentos inferidos via geoprocessamento), (S)

Speleological survey (mapeamento espeleológico), (S) *Sinkhole* (sumidouro), (E) *Entrances of caves* (entradas de cavernas).

O método foi aplicado e testado em uma área de calcário carstificado, onde foram escolhidos dois sistemas (W e E) na bacia do rio São Miguel (MG), onde mapas de parâmetros favoráveis à carstificação, como feições geológico-estruturais, geomorfológicas e espeleológicas regionais e locais foram associados.

2. METODOLOGIA

O método preliminar “MISSE” é uma análise de classificações, ponderações e interpolações de parâmetros favoráveis à carstificação, a partir de evidências diretas e indiretas de dados regionais e locais geológico-estruturais, geomorfológicos e espeleológicos, e combina cinco parâmetros (sigla em inglês): (M) *Mapped fracture/fault*, (I) *Inferred lineaments*, (Ss) *Speleological survey*, (Sk) *Sinkhole*, (E) *Entrance of cave* (Figura 1).

Cada parâmetro é georreferenciado como arquivo vetorial em *raster*, sendo que, para informações como linhas e pontos, se aplica a densidade de Kernel. São estabelecidas, então, quatro classes e atribuídos pesos de 1 a 4, via ferramenta de reclassificação, resultando em submapas de densidades de dados para cada parâmetro.

Os submapas de densidade dos parâmetros M e I são calculados em m/m², enquanto os parâmetros S_k e E em pontos/m². Como todos os parâmetros apresentam áreas de influência (e.g. caverna e entorno, sumidouro dentro de bacias fechadas, ou grupos de fraturas em epicarstes), alguns *buffers* são considerados. No caso de S_s, a partir da linha de contorno da caverna, definem-se *buffers* de 50 m, 100 m e 250 m, considerando quatro classes e conforme legislação brasileira de área de proteção de cavernas. Para os demais

parâmetros, aplica-se um *buffer* de 100 m.

Um fator multiplicador é atribuído para cada submapa com base no método multicritério AHP (*Analytic Hierarchy Process*), que consiste na decomposição hierárquica do problema em critérios, correlacionando-os entre si de acordo com uma escala de importância, reduzindo a subjetividade na atribuição de pesos entre parâmetros (SAATY, 1987).

Ademais, considera-se a importância hidrogeológica/espeleológica de cada parâmetro na região testada, com base em pesquisas anteriores (FERRARI *et al.*, 2018; LUCON *et al.*, 2020). Assim, é estabelecida uma equação para a matriz de detalhamento de dados, que é a soma de todos os parâmetros com seus respectivos pesos, conforme a Figura 1.

Para se executar a álgebra de mapa da equação, usa-se a ferramenta calculadora de raster em ambiente SIG (ArcGIS ou QGIS).

O produto do geoprocessamento trata-se do mapa de favorabilidade de rota cárstica com quatro classes: (1) baixo, (2) moderado, (3) alto e (4) muito alto. Assim, são delineados os trajetos das rotas subterrâneas considerando os fatores mais favoráveis à carstificação, como intersecção de estruturas, alinhamento de cavernas, sumidouros etc.

A partir dessas rotas, é possível estabelecer os índices de sinuosidade (S) para trechos de seções transversais de sistemas cársticos, com base na relação entre distâncias lineares (X) e sinuosas (Xs), dada pela equação a seguir (WORTHINGTON, 1991): $S = X_s/X$.

Ressalte-se que a classificação e ordem de grandeza das unidades podem variar dependendo da quantidade de dados, intervalo de cada parâmetro e sua distribuição espacial. Para esse estudo, foi considerada a escala de 1:25.000.

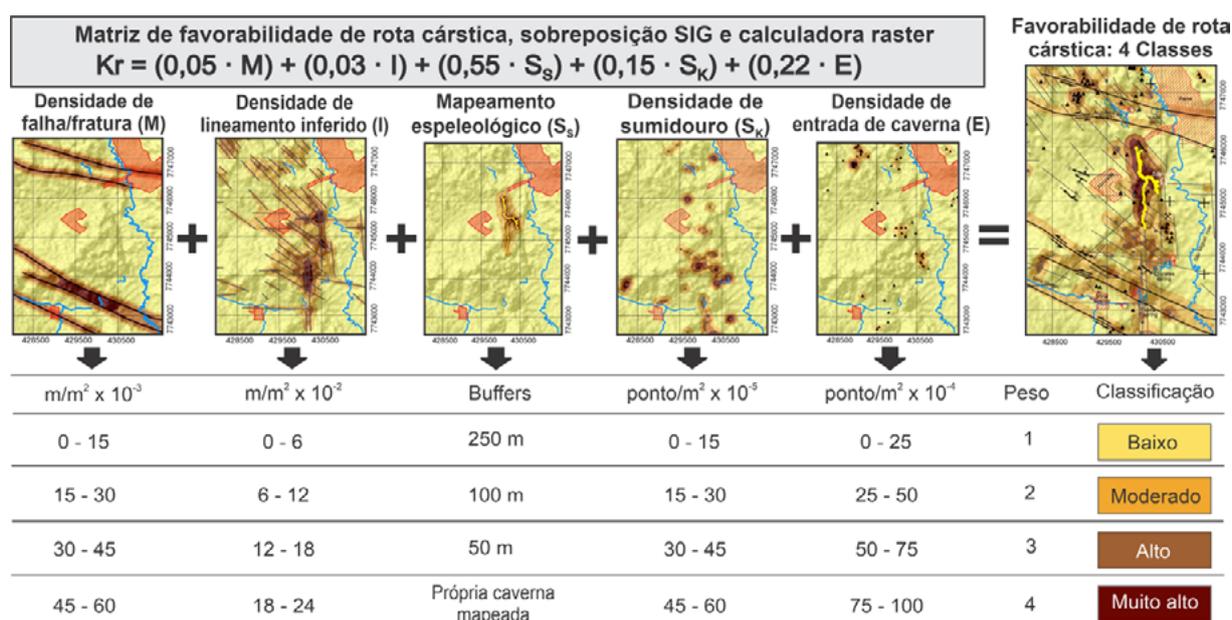


Figura 1: Matriz de favorabilidade da rota cárstica usando o sistema oeste como exemplo. O mapa final indica quatro classificações (baixa, moderada, alta, muito alta) de acordo com parâmetros favoráveis à carstificação e suas respectivas ordens de grandeza (x10⁻ⁿ).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Sistema Leste (E)

No sistema leste, quatro cavernas (Lagoa do Retiro, Narigudo, Loca Feia e Mastodonte) representam trechos mapeados da zona epifreática, totalizando um comprimento de 1.914 m mapeados (rotas em amarelo na Fig. 2 E). Ou seja, cerca de 30% da rota já é conhecida. A caverna do Narigudo é a segunda maior da bacia do São Miguel, com 62 m de desnível da superfície até à sua drenagem subterrânea, com 1.347 m de desenvolvimento de salões e condutos (CARVALHO *et al.*, 2015). Conforme equação do método (Figura 1), esse é o parâmetro de maior valor (caverna mapeada), o que resultou nas regiões consideradas de classe 4 (muito alto). As classes 3 e 2 (alto e moderado) estão relacionadas às maiores ocorrên-

cias de entradas de cavernas (total de 242, indicadas por triângulos pretos, Fig. 2 E), situadas a nordeste e centro do sistema, associadas às áreas com maiores agrupamentos de dolinas (total de 107, círculos cinzas, Fig. 2 E), sendo que estas ocorrem na intersecção ou alinhadas aos lineamentos estruturais (fraturas e falhas), nas porções noroeste e norte. A classe 1 (baixo) de menor favorabilidade está relacionada a dolinas e lineamentos estruturais mapeados/inferidos isolados ou a áreas com nenhuma informação.

A seção A-A' (o trajeto vermelho indicado na Fig. 2 E) apresentou o índice de sinuosidade (S) igual a 1,11, o que significa dizer que a distância sinuosa ($X_s = 3.661$ m) é 11% maior do que a distância linear ($X = 3.311$ m). A seção B-B' (trajeto verde indicado na Fig. 2 E) apresentou $S = 1,23$, com $X = 2.394$ m e $X_s = 2.943$ m.

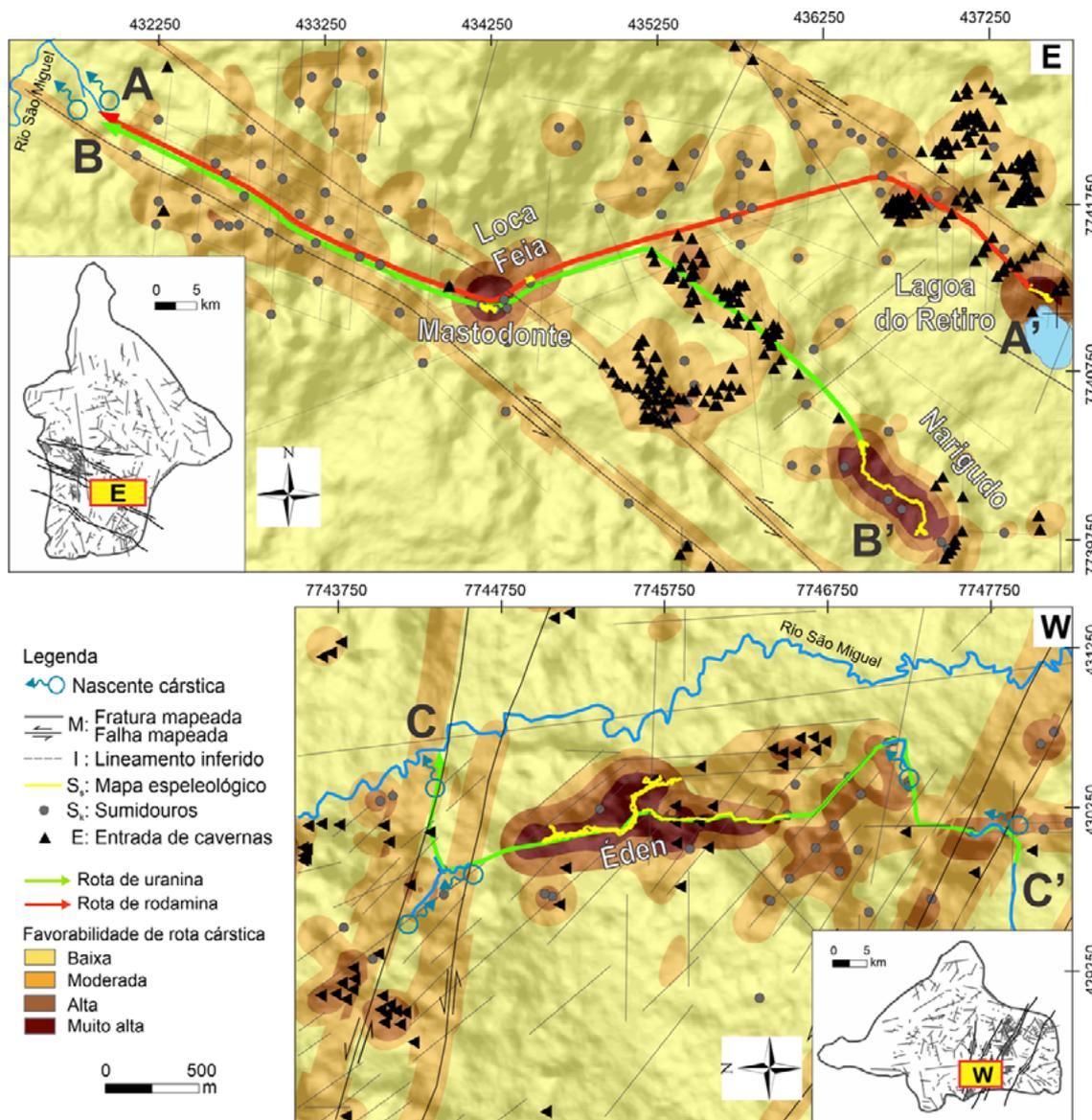


Figura 2: Mapa dos parâmetros favoráveis à formação de rotas de carstificação (dolina, entrada de caverna, caverna mapeada, características da geologia e as direções principais dos lineamentos estruturais - fraturas e falhas) usados para determinar os trajetos sinuosos dos traçadores de cada sistema estudado.

3.2 Sistema Oeste (W)

No sistema oeste, apenas a caverna do Édén representa o trecho mapeado das zonas vadosa (572 m), epifreática (746 m) e freática (412 m), totalizando 1.730 m de caverna mapeada (FERRARI *et al.*, 2018), constituindo cerca de 40% de conhecimento de toda a rota. Este sistema é o que apresenta a maior ocorrência da classe 4 (muito alto) dentre os demais sistemas, proporcionalmente à sua área. Na porção central, próximo à caverna do Édén, há algumas entradas de cavernas, dolinas e lineamentos estruturais mapeados que contribuem para o raio de influência da classe 4, devido à sobreposição dos mapas de densidade. As classes 2 e 3 (alto e moderado) estão relacionadas a entrada de cavernas, dolinas e lineamentos mapeados, distribuídos isoladamente. A classe 1 (baixo) está associada a áreas com pouca ou nenhuma informação existente. No geral, foram identificadas 61 entradas de cavernas e 46 dolinas associadas às direções de lineamentos estruturais (fraturas e falhas), alinhadas principalmente nas direções NW-SE e N-S.

A seção C-C' (o trajeto verde indicado na Fig. 2 W) apresenta S igual a 1,26, com X de 862 m e Xs de 1.085 m.

As sinuosidades da rede de conduto e cavernas são ocasionadas pelas descontinuidades estruturais (fratura/falha e acamamento), que facilitam a passagem da água e, conseqüentemente, o desenvolvimento de carstificações. Ou seja, elas são influenciadas pelas condições geológico-estruturais, onde as intersecções dos lineamentos com o acamamento promovem zonas de carstificação.

O sistema E possui sinuosidade estimada de 1,11 para a seção A-A' e 1,23 para seção B-B', enquanto o sistema W de 1,26 para a seção C-C'. A complexidade geológico-estrutural reflete diretamente nos índices de sinuosidades e distâncias sinuosas.

REFERÊNCIAS

- CARVALHO, M. G. *et al.* **Caracterização espeleológica do abismo do Narigudo, Pains – MG.** In: RASTEIRO, M. A.; SALLUN FILHO, W. (orgs.) Congresso Brasileiro de Espeleologia. Anais. Campinas: SBE, Eldorado, p. 291-298, 2015.
- FERRARI J. A., *et al.* **Identificação e Caracterização Hidrológica da Área de Influência da Gruta Do Édén - Pains – MG.** Relatório Técnico, São Paulo, 2018
- LUCON, T. N. *et al.* Recharge sources and hydraulic communication a karst aquifer, São Miguel watershed, MG, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 100, p. 102591, 2020.
- SAATY, R. W. The Analytic Hierarchy Process - What it is and how it is used, **Mathematical modelling**, v. 9, n. 3, p. 161-176, 1987
- WORTHINGTON, S. R. **Karst hydrogeology of the Canadian Rocky Mountains: McMaster University** (Doctoral dissertation, Ph. D. thesis), 1991.

O sistema oeste (mais complexo estruturalmente), por exemplo, apresentou os maiores valores de sinuosidades.

Vale destacar que o método considera apenas a sinuosidade horizontal. As sinuosidades verticais não foram consideradas, uma vez que não foi possível obter informações em profundidade.

4. CONCLUSÕES

O método MISSE trata-se de uma ferramenta útil para determinar distâncias sinuosas e índices de sinuosidade, pois considera os parâmetros mais propícios para carstificação e formação de condutos. O método possibilita visualizar espacialmente os trechos com a maior favorabilidade de formação de rotas de fluxo subterrâneo.

Os índices de sinuosidade, por sua vez, possibilitam uma estimativa mais próxima da realidade das rotas da rede cárstica e, conseqüentemente, reduzindo as incertezas nos cálculos dos parâmetros do fluxo via teste de traçadores corantes fluorescentes.

Além disso, o método pode ser adaptado de acordo com cada contexto geológico-estrutural, hidrogeológico e espeleogenético.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecimentos especiais ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Geologia da Universidade Federal de Ouro Preto, ao Departamento de Geologia do Instituto de Geociências da UFMG, aos espeleólogos da Sociedade Excursionista e Espeleológica (SEE), Espeleogrupo Pains (EPA). À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (CECAV) (Processo nº 02667.000006/2013-00).