



## O USO DO KARST DISTURBANCE INDEX (KDI) PARA DIAGNÓSTICO DE ALTERAÇÕES NO CARSTE SERGIPANO

Heleno dos Santos Macedo <sup>1</sup>

Hélio Mário de Araújo <sup>2</sup>

Luana Pereira Lima <sup>3</sup>

### RESUMO

Entre os ambientes mais vulneráveis às interferências humanas estão as paisagens cársticas — formadas em rochas carbonáticas e conhecidas por sua beleza e complexidade. Essas paisagens surgem, principalmente, da ação do intemperismo químico, que dissolve a rocha ao longo do tempo. Mas toda essa singularidade vem acompanhada de fragilidade: essas áreas são extremamente sensíveis a impactos ambientais, e suas águas subterrâneas podem ser facilmente contaminadas. Em Sergipe, essa realidade não é diferente. O que torna o cenário ainda mais preocupante é a falta de estudos e ações voltadas especificamente para o carste local. Por isso, este trabalho tem como proposta aplicar o Karst Disturbance Index (KDI) — um método desenvolvido por Van Beynen e Townsend (2005) que busca medir o quanto a presença humana tem interferido nesses ambientes. O KDI avalia cinco grandes categorias (Geomorfologia, Hidrologia, Biotas, Atmosfera e Fatores Culturais), divididas em 13 atributos e 30 indicadores, analisados em três níveis de escala: macro, meso e micro. Na escala macro, são considerados os impactos de grande alcance, como a mineração, desmatamento, hidrelétricas e o uso excessivo da água subterrânea. A meso escala se concentra em mudanças mais pontuais, como edificações sobre as feições do carste. Já a escala micro olha para dentro das cavernas, avaliando aspectos específicos que podem ser alterados pela presença humana direta. Os resultados obtidos no carste sergipano mostram que a maioria dos atributos avaliados apresenta alterações leves — como os relacionados ao solo, à qualidade da água e à vegetação no interior das cavernas — ou até mesmo ausência de ocorrência. Já os danos classificados como catastróficos foram observados na superfície, especialmente em áreas onde a vegetação foi removida, a mineração avança ou construções foram erguidas sobre feições cársticas.

**Palavras-chave:** Formação Olhos d'água, Bacia Sergipe, Carste Tradicional, Planejamento Ambiental.

### INTRODUÇÃO

As paisagens cársticas figuram entre os sistemas naturais mais singulares e complexos do planeta, destacando-se tanto pela riqueza geomorfológica quanto pela relevância ecológica. Desenvolvidas sobre rochas carbonáticas, como calcários e dolomitos, essas paisagens abrigam amplos sistemas de águas subterrâneas, cavernas com registros paleo ambientais e processos geomorfológicos que, diferentemente de outras paisagens, ocorrem majoritariamente no subsolo. São ambientes de grande sensibilidade, onde pequenas alterações podem desencadear impactos de longa duração.

Com o avanço do que se convencionou chamar de processo civilizatório, sobretudo ao longo dos últimos séculos e início do século XXI, os ambientes cársticos passaram a sofrer

<sup>1</sup> Doutor pelo PPGEIO da Universidade Federal de Sergipe - SE, helenosamac@gmail.com;

<sup>2</sup> Professor orientador: Doutor, Universidade Federal de Sergipe - SE, heliomarioaraujo@yahoo.com.br;

<sup>3</sup> Doutora pelo PPGEIO da Universidade Federal de Sergipe - SE, luana.pl.lua@gmail.com;



múltiplas pressões oriundas de um modelo de desenvolvimento marcado pela expansão agropecuária e mineradora, intensa urbanização, poluição difusa e concentrada, bem como crescimento demográfico acelerado. Essas pressões não apenas degradam o patrimônio natural e cultural, mas comprometem a funcionalidade ecológica dos sistemas cársticos, com consequências diretas para a disponibilidade hídrica, a biodiversidade e a geodiversidade. Como destaca Van Beynen e Townsend (2005), a ausência de medidas eficazes de manejo em regiões cársticas pode levar a perdas significativas de recursos e comprometer a resiliência desses ecossistemas.

Diante desse contexto, torna-se imperativo adotar ferramentas metodológicas que permitam diagnosticar e monitorar as perturbações antrópicas nos ambientes cársticos, subsidiando ações de gestão ambiental mais precisas e integradas. Nesse sentido, o *Karst Disturbance Index* (KDI), proposto por Van Beynen e Townsend (2005), constitui uma importante abordagem interdisciplinar para a análise de impactos em sistemas cársticos.

Diferente de outros métodos de avaliação de impactos, o KDI destaca-se por considerar as especificidades intrínsecas das paisagens cársticas, promovendo uma articulação entre fatores físicos, ecológicos e socioculturais. Essa característica o torna particularmente relevante para contextos onde há carência de dados sistematizados e de políticas públicas voltadas ao carste, como o estado de Sergipe. A realidade sergipana, marcada por uma escassez de estudos aprofundados sobre seus sistemas cársticos, impõe desafios adicionais ao diagnóstico ambiental e à construção de estratégias eficazes de conservação e manejo sustentável.

Neste trabalho, propõe-se aplicar o KDI como ferramenta de diagnóstico de perturbações antrópicas em áreas cársticas do estado de Sergipe, contribuindo para preencher lacunas existentes na literatura regional e fomentar a elaboração de políticas e ações de gestão territorial voltadas à conservação desse patrimônio natural. A análise dos resultados obtidos, embora técnica, reflete a complexidade e fragilidade dos sistemas analisados, revelando não apenas os níveis de distúrbio presentes, mas também a urgente necessidade de revisão de práticas territoriais que historicamente negligenciaram a especificidade do carste sergipano.

### **Área de estudo**

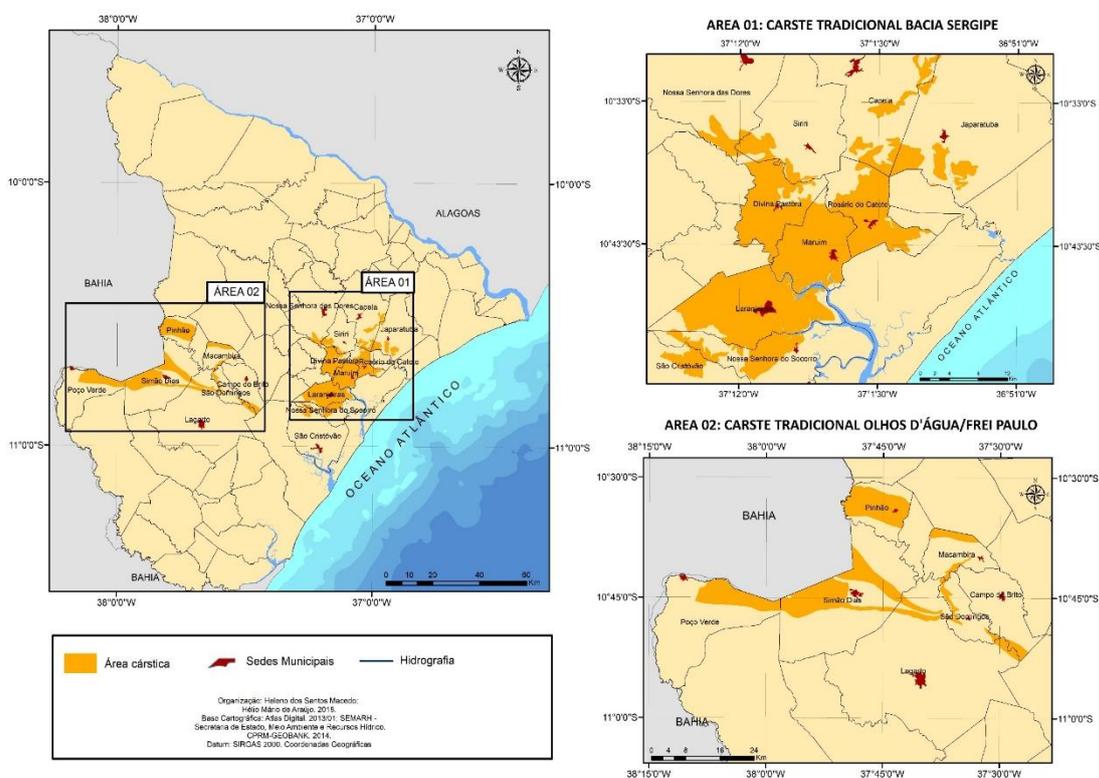
O recorte espacial da pesquisa compreende as áreas em que se encontram paisagens desenvolvidas sobre rochas carbonáticas, associadas à morfologia cárstica tradicional, dentro do espaço territorial do estado de Sergipe (MACEDO, 2019).

Para delimitação desse tipo de morfologia, além da presença das rochas carbonáticas, que por sua natureza são solúveis e permeáveis, outros fatores foram levados em consideração

como: a porosidade secundária da rocha (fissuradas e fraturadas); a topografia; a presença de drenagem vertical e subterrânea; percolação da água através das fissuras/fraturas ou condutos; dissolução de CaCO<sub>2</sub> (carbonato de Cálcio); carste subjacente; e a presença de feições sub/superficiais típicas desse ambiente, como, cavernas, dolinas, lapiás, entre outros.

O recorte espacial abrange 1.453,37 km<sup>2</sup>, correspondendo a 6,63% da área total do estado, encontrando-se estabelecidos sobre esse tipo de morfologia (total ou parcialmente) dezessete municípios: Campo Brito, Capela, Divina Pastora, Japarutuba, Lagarto, Laranjeiras, Macambira, Maruim, N<sup>a</sup> Senhora das Dores, Nossa Senhora do Socorro, Pinhão, Poço Verde, Rosário do Catete, São Cristóvão, São Domingos, Simão Dias e Siriri. Desses municípios, seis vão concentrar a maioria da paisagem cárstica tradicional: Divina Pastora, Laranjeiras, Nossa Senhora do Socorro, São Domingos, Simão Dias e Poço Verde (MACEDO, 2019).

Para uma melhor caracterização, a área de estudo foi dividida em duas partes: área 01 compreendendo o Carste tradicional da Bacia Sergipe e área 02, o Carste Tradicional Olhos d'Água / Frei Paulo (figura 1).



**Figura 1** – Localização da área de estudo. Organização: Autores, 2019.

## METODOLOGIA

O *Karst Disturbance Index* (KDI) é uma metodologia proposta por Van Beynen e Townsend (2005), na qual tem por objetivo criar um índice que mede os fatores de perturbação

no carste, levando em consideração o grau de interferência antrópica, podendo demonstrar, através dos resultados, as consequências /eficácia de gerenciamento em ambientes dessa natureza.

Para a construção desse índice, são avaliadas cinco categorias: geomorfologia, hidrologia, Biota, Atmosfera e Fatores Culturais; 13 atributos e 30 indicadores avaliados em três escalas diferentes: macro, meso e micro. Van Beynen e Townsend (2005) apresentam uma proposta interdisciplinar, uma vez que direciona o estudo a todo o sistema cárstico ao invés de se concentrar especificamente sobre uma determinada área (quadro 1).

**Quadro 1** – Indicadores utilizados para KDI (*Karst sturbance Index*).

ITENS	ATRIBUTOS	ESCALA	INDICADOR
Geomorfologia	Superfície do relevo	Macro	Mineração
		Macro/Meso	Inundações (Hidrelétrica, irrigação)
		Meso	Drenagem de águas pluviais
		Meso	Entupimento/entulhamento
		Meso	Depósito de Lixo
	Solo	Macro	Erosão
		Micro	Impermeabilização
	Subsuperfície cárstica	Macro	Inundações na caverna
		Micro	Vandalismo (remoção de decoração)
		Micro	Remoção de sedimentos minerais
Micro		Compactação de sedimentos no chão	
Atmosfera	Qualidade do ar	Macro	Dissecação
		Micro	Condensação/Corrosão induzidas pelo homem
Hidrologia	Qualidade da água	Meso	Pesticidas/herbicidas
		Micro	Derramamentos industriais/petróleo
	Qualidade da água	Macro/Meso/Micro	Floração de algas
	Quantidade da água		Alteração na tabela de água
		Macro	Alterações nas águas da caverna/gotejamento
		Micro	
Biota	Perturbação na vegetação	Macro/Meso/Micro	Remoção de vegetação
	Vegetação na caverna	Micro	Riqueza de espécies
		Micro	Densidade populacional
	Biota do subsolo	Micro	Riqueza de espécies
		Micro	Densidade populacional
Fatores Culturais	Artefatos humanos	Macro/Meso/Micro	Destruição/remoção de artefatos históricos
		Macro/Meso/Micro	Proteção regulamentar
		Macro/Meso/Micro	Cumprimento dos regulamentos
		Macro/Meso/Micro	Educação pública
	Infraestrutura	Macro	Construção de estradas
		Meso	Construção sob feições cársticas
		Micro	Construção dentro das cavernas

Elaboração: Autores, 2019.

A variação das escalas ocorre devido à necessidade de entender como esses processos ocorrem sobre a paisagem, a partir de uma escala macro a uma escala local ou micro. A escala macro abrange a avaliação dos processos em larga escala, que podem afetar toda a região do

carste, como, por exemplo, os fenômenos ao ar livre como minas, hidrelétricas, desmatamento e excesso de bombeamento de águas subterrâneas.

A meso escala é a mais localizada, ou seja, seus impactos são em menor escala, por exemplo, as construções que cobrem ou degradam feições cársticas, poluição do solo e remoção ou degradação de artefatos culturais –históricos. Por último, a escala micro, que envolve as condições individuais da caverna, pode ser incorporada no estudo, os condutos acessíveis à exploração humana (VAN BEYNEN; TOWNSEND, 2005).

Para a avaliação desses índices, foi atribuída a cada indicador uma pontuação de 0 a 3, baseando-se na extensão e gravidade do problema. De acordo com Van Beynen e Townsend (2005), a pontuação 0 significa que não há perturbação antrópica. A nota 1 é atribuída quando a alteração for leve, a nota 2 demonstra alteração grave e a nota 3, quando a perturbação for catastrófica e irremediável. A limitação dos escores para apenas quatro possibilidades remove parte da subjetividade, quando comparada a escalas que abrangem de 0 a 10, por exemplo, evitando dessa forma que o avaliador opte por um escore de nível médio, por exemplo, o que tornaria menos objetivo (VAN BEYNEN; TOWNSEND, 2005).

Na presente pesquisa, após os valores serem atribuídos para cada indicador, os mesmos foram somados. A soma dos indicadores avaliados foi então dividida pelo número de indicadores presentes na tabela de estudo multiplicado por 3, que é a pontuação máxima. A interpretação deste valor é resumida na tabela 1. Quanto maior for o valor, ou seja, o número for mais próximo de 1, maior será o grau de impacto.

**Tabela 1**– Classificação de Impactos em áreas cársticas.

PONTUAÇÃO	GRAU DE DISTÚRBIO
0,8 – 1	Altamente perturbado
0,6 – 0,79	Moderadamente perturbado
0,4 – 0,59	Perturbada
0,2 – 0,39	Baixo Impacto
0,0 – 0,19	Intacta

Organização: Heleno dos Santos Macedo, 2019.

Fonte: VAN BEYNEN e TOWNSEND, 2005.

Quando um indicador não é aplicável na área, o mesmo deverá ser retirado da avaliação. Para os indicadores considerados importantes para a região, mas com dados insuficientes para avaliá-lo, será atribuída uma variável LD “*Lack of Data*”, que significa falta de dados, sugerindo que mais estudos na área são necessários para avaliar o indicador.

A soma de LDs permite que se avalie a credibilidade do índice aplicado na área de estudo. Para se calcular a nota, divide-se o número de LDs pelo número total de indicadores.

Quanto maior for o valor, maior a conservação do patrimônio, a confiança no índice. Valores de LD menores que 0,1 demonstram alta confiança no KDI e valores maiores que 0,4 sugerem que os dados são insuficientes para permitir a avaliação do grau de distúrbio daquela área, sendo, desta forma, necessários mais estudos na área antes da aplicação do mesmo.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para o carste tradicional Bacia Sergipe, a pontuação dos indicadores demonstrou que a maioria dos atributos se encontra numa situação de alterações leves, como os atributos solos, qualidade da água, vegetação na caverna, ou mesmo não possuem exemplares nessa área cárstica (quadro 2).

**Quadro 2** – Indicadores e pontuação atribuída para o KDI do Carste Bacia Sergipe.

CATEGORIA	ATRIBUTOS	ESCALA	INDICADOR	PONTUAÇÃO
Geomorfologia	Superfície do relevo	Macro	Mineração	3
		Macro/Meso	Inundações (Hidrelétrica, irrigação)	1
		Meso	Drenagem de águas pluviais	1
		Meso	Entupimento/entulhamento	1
		Meso	Depósito de Lixo	2
	Solo	Macro	Erosão	1
		Micro	Impermeabilização	1
	Sub-superfície cárstica	Macro	Inundações na caverna	0
		Micro	Vandalismo (remoção de decoração)	2
		Micro	Remoção de sedimentos minerais	2
Micro		Compactação de sedimentos no chão	1	
Atmosfera	Qualidade do ar	Macro	Dissecação	LD
		Micro	Condensação/Corrosão induzidas pelo homem	LD
Hidrologia	Qualidade da água	Meso	Pesticidas/herbicidas	LD
		Micro	Derramamentos industriais/petróleo	LD
	Quantidade da água	Macro/Meso/Micro	Floração de algas	1
		Macro	Alteração na tabela de água	1
Biota	Perturbação na vegetação	Macro/Meso/Micro	Remoção de vegetação	Conclusão
		Micro	Riqueza de espécies	1
	Biota do subsolo	Micro	Densidade populacional	1
		Micro	Riqueza de espécies	2
		Micro	Densidade populacional	2
Fatores Culturais	Artefatos humanos	Macro/Meso/Micro	Destruição/remoção de artefatos históricos	LD
		Macro/Meso/Micro	Proteção regulamentar	LD
	Proteção do carste	Macro/Meso/Micro	Cumprimento dos regulamentos	0
		Macro/Meso/Micro	Educação pública	0
	Infraestrutura	Macro	Construção de estradas	Continuação
		Meso	Construção sob feições cársticas	3
	Micro	Construção dentro das cavernas	0	

Elaboração: Heleno dos Santos Macedo, 2019.

Os atributos que foram indicados estado grave foram os de subsuperfície cárstica, principalmente ligados ao vandalismo, muito comum nas cavernas desse setor cárstico, bem

como a remoção de sedimentos (figura 02). Depósitos de lixo, riquezas de espécies e densidade populacional da fauna também se encontram em uma situação considerada grave (MACEDO, 2022).



**Figura 02** – Espeleotemas destruídos em cavidade em Laranjeiras.  
Créditos: Heleno dos Santos Macedo, 2019.

Os atributos que se encontram em estado catastrófico estão relacionados à superfície do relevo, perturbação na vegetação e infraestrutura, para os indicadores mineração, remoção de vegetação e construção sobre feições cársticas. Essa pontuação ocorre devido ao uso da terra nessa área cárstica, que está principalmente relacionada ao benefício do calcário, e que conseqüentemente acabou implementado toda uma infraestrutura urbana e de escoamento do produto sobre esse ambiente (MACEDO, 2022).

Nos atributos proteção do carste, artefatos humanos, qualidade do ar e alguns indicadores de qualidade da água foram definidos como LD “*Lack of Data*”, que significa falta de dados, sugerindo que mais estudos na área são necessários para avaliar o indicador.

No tocante à classificação dos impactos sobre a paisagem cárstica da Bacia Sergipe, foi considerada de baixo impacto (pontuação de 0,38). Mesmo apresentando indicadores catastróficos, no contexto geral, vai possuir paisagens cársticas com processos de antropização de baixa relevância. Isso também decorre devido ao tamanho das cavidades, ao número

reduzido de feições do exocarste e da dificuldade de acesso à maioria dessas feições. O valor de LD para o carste Bacia Sergipe foi de 0,2, indicando que o método KDI atingiu o esperado na avaliação da área.

O carste tradicional Olhos d'água/Frei Paulo, assim como o carste Bacia Sergipe, a pontuação dos indicadores demonstrou que se encontram numa situação de alterações leves (quadro 3). Indicadores como mineração, drenagem de águas pluviais, impermeabilização do solo, compactação de sedimentos no chão, variedades de espécies de vegetação foram considerados de baixa alteração. Isso é em decorrência de que as paisagens cársticas dessa área encontram-se mais afastadas das principais áreas urbanas, e também, os acessos a tais feições acabam sendo dificultados pela cobertura vegetal ou gradiente do relevo (MACEDO, 2022).

Os indicadores que se encontram em situação grave foram os atrelados à irrigação, a processos erosivos, remoção de sedimentos minerais e à pequena biota de subsolo, pois a partir das visitas de campo foi possível observar que a fauna é bem menor nessa unidade cárstica.

Os indicadores que foram atribuídos uma situação catastrófica estão relacionados ao manejo da paisagem pela sociedade no seu processo de uso e ocupação. A ausência de aterros se configura como um grave problema para esse setor cárstico, pois a ausência do mesmo acaba levando a população a depositar seus resíduos em dolinas (figura 03).



**Figura 03** – Descarte de resíduos sólidos em dolina no município de Simão Dias. Créditos: Heleno dos Santos Macedo, 2019.

**Quadro 3** – Indicadores e pontuação atribuída para o KDI do Carste Olhos d'água/Frei Paulo.

CATEGORIA	ATRIBUTOS	ESCALA	INDICADOR	PONTUAÇÃO
Geomorfologia	Superfície do relevo	Macro	Mineração	1
		Macro/Meso	Inundações (Hidrelétrica, irrigação)	2
		Meso	Drenagem de águas pluviais	1
		Meso	Entupimento/entulhamento	1
		Meso	Depósito de Lixo	3
	Solo	Macro	Erosão	2
		Micro	Impermeabilização	1
	Sub-superfície cárstica	Macro	Inundações na caverna	0
		Micro	Vandalismo (remoção de decoração)	2
		Micro	Remoção de sedimentos minerais	2
Micro		Compactação de sedimentos no chão	1	
Atmosfera	Qualidade do ar	Macro	Dissecação	LD
		Micro	Condensação/Corrosão induzidas pelo homem	LD
Hidrologia	Qualidade da água	Meso	Pesticidas/herbicidas	LD
		Micro	Derramamentos industriais/petróleo	LD
	Qualidade da água	Macro/Meso/Micro	Floração de algas	0
	Quantidade da água	Macro	Alteração na tabela de água	0
Micro		Alterações nas águas da caverna/gotejamento	1	
Biota	Perturbação na vegetação	Macro/Meso/Micro	Remoção de vegetação	3
	Vegetação na	Micro	Riqueza de espécies	1
		Micro	Densidade populacional	1
	Biota do subsolo	Micro	Riqueza de espécies	2
Micro		Densidade populacional	1	
Fatores Culturais	Artefatos humanos	Macro/Meso/Micro	Destruição/remoção de artefatos históricos	LD
	Proteção do carste	Macro/Meso/Micro	Proteção regulamentar	LD
		Macro/Meso/Micro	Cumprimento dos regulamentos	0
		Macro/Meso/Micro	Educação pública	0
	Infraestrutura	Macro	Construção de estradas	2
		Meso	Construção sob feições cársticas	1
		Micro	Construção dentro das cavernas	0

Organização: Heleno dos Santos Macedo, 2019.

Além disso, o processo de substituição de mata para a prática da produção de grãos também vem corroborando para essa situação no tocante aos impactos sofridos pelas coberturas vegetais em todos os municípios dessa unidade cárstica.

Nos atributos proteção do carste, artefatos humanos, qualidade do ar e alguns indicadores de qualidade da água foram definidos como LD, sugerindo novos estudos para avaliar o



indicador. Outros indicadores não foram encontrados na área, por esse motivo, foram atribuídos a pontuação zero aos mesmos.

No tocante à classificação dos impactos sobre a paisagem cárstica, Olhos d'água /Frei Paulo acabou sendo considerado de baixo impacto (pontuação de 0,31). Isso decorre do tamanho das cavidades e da dificuldade de acesso, do número reduzido de feições do exocarste. O valor de LD para esse carste foi de 0,2, indicando que o método KDI atingiu o esperado na avaliação da área.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para o carste da Bacia Sergipe, o KDI foi classificado como de baixo impacto (pontuação de 0,38). Mesmo apresentando indicações de uso do solo incompatível com as características naturais do sistema cárstico, no contexto geral. O carste da Bacia Sergipe possui processos de antropização de baixa relevância, decorrente do tamanho das cavidades, do número reduzido de feições do exocarste e da dificuldade de acesso à maioria dessas feições. O valor de LD para o carste Bacia Sergipe foi de 0,2, indicando que o método KDI atingiu o esperado na avaliação da área.

A classificação dos impactos sobre a paisagem cárstica Olhos d'água /Frei Paulo foi de baixo impacto (pontuação de 0,31), decorrente do tamanho das cavidades, da dificuldade de acesso e do número reduzido de feições do exocarste. O valor de LD para esse carste foi de 0,2, indicando que o método KDI atingiu o esperado na avaliação da área.

## REFERÊNCIAS

MACEDO, H. S. **Ambientes Cársticos em Sergipe: vulnerabilidade e instrumentos para sua gestão**. São Cristóvão, 2019. Tese doutorado (Geografia) – Programa de PósGraduação em Geografia, Universidade Federal de Sergipe.

VAN BEYNEN, P. E.; TOWNSEND, K.M. A disturbance index for karst environments. **Environmental Management**, n. 36, p. 101-116, 2005