



Diretrizes para proteção de cavernas e do carste

Segunda Edição



Caverna Xe Bang Fai, Laos

Foto de Steven Bourne

Traduzido do original Inglês para o Português Brasileiro por: Cláudia Pessoa

Diretrizes para Proteção de Cavernas e do Carste

Segunda Edição

2022

Editado por David Gillieson, John Gunn, Augusto Auler e Terry Bolger

Colaboradores: Augusto Auler, Terry Bolger, Ferdinando Didonna, Rolan Eberhard, Stefan Eberhard, Hein Gerstner, David Gillieson, John Gunn, Ana Komericki, Denise Matias, Jasmine Moreira, Ana Sofia Reboleira, Geary Schindel, Maria-Laura Tîrlă, Bärbel Vogel e Brad Wuest

Publicado por International Union of Speleology (UIS)
e International Union for Conservation of Nature (IUCN)



Diretrizes para proteção de cavernas e do carste

A primeira edição destas Diretrizes foi publicada pela IUCN em 1997. Esta segunda edição foi publicada pela International Union of Speleology – UIS em 2022, com o apoio da International Union for Conservation of Nature – IUCN. Eles foram sintetizados e editados por membros do Grupo de Trabalho de Cavernas e Carste na Comissão Mundial da IUCN, grupo de Especialistas em Geo Patrimônio da Comissão Mundial de Áreas Protegidas.

As opiniões expressas nesta publicação não refletem necessariamente as da UIS, IUCN ou quaisquer outras organizações participantes.

Direitos autorais: © 2022 UIS, International Union of Speleology and IUCN, International Union for Conservation of Nature. A reprodução desta publicação para fins educacionais ou outros fins não comerciais é autorizada sem permissão prévia por escrito do detentor dos direitos autorais, desde que a fonte seja totalmente citada. A reprodução desta publicação para revenda ou outros fins comerciais é proibida sem a permissão prévia por escrito do detentor dos direitos autorais.

Citação recomendada: Gillieson, David S., Gunn, J., Auler, A. and Bolger, T. (editores), 2022. *Diretrizes para Proteção de Cavernas e do Carste*, 2ª Edição, Postojna, Slovenia: International Union of Speleology and Gland, Switzerland, IUCN. 112 pp.

Catálogo da Biblioteca Nacional da Austrália – em – Entrada de publicação:

Gillieson, D., Gunn, J., Auler, A. and Bolger, T. (editores)

ISBN: 978-0-646-84911-9 (pdf)

Inclui informação bibliográfica

Cavernas – conservação e gestão

Karst – conservação e gestão

Foto da capa: Steven Bourne, usada com permissão

Layout e produção por: David Gillieson e Jeremy Garnett

Sobre UIS

A Union Internationale de Spéléologie (União Internacional de Espeleologia ou UIS) é o órgão internacional de espeleologia. A UIS é uma organização não governamental sem fins lucrativos que promove a interação entre espeleólogos acadêmicos e técnicos de uma ampla gama de nacionalidades para desenvolver e coordenar a espeleologia internacional em todos os seus aspectos científicos, técnicos, culturais e econômicos. O UIS continua sendo o principal órgão científico e esportivo global que promove a conservação de cavernas em nível internacional. Atua em parceria com a União Internacional para a Conservação da Natureza (IUCN). Se solicitado, o UIS apóia eventos espeleológicos internacionais, esforços dos países membros para proteger suas cavernas e recursos cársticos, pedidos à UNESCO para a listagem do Patrimônio Mundial, pedidos a governos para o estabelecimento de instituições cársticas e exploradores de cavernas e cientistas em seus esforços para arrecadar fundos para seus projetos. A UIS, em parceria com 57 países membros e mais de 250 instituições e organizações em todo o mundo, proclamou o Ano Internacional das Cavernas e Karst em 2021–22.

secretary@uis-speleo.org

<http://uis-speleo.org/>

Sobre IUCN

A União Internacional para a Conservação da Natureza – IUCN é uma união de membros composta exclusivamente por organizações governamentais e da sociedade civil. Fornece a organizações públicas, privadas e não-governamentais o conhecimento e as ferramentas que permitem que o progresso humano, o desenvolvimento econômico e a conservação da natureza aconteçam juntos.

Criada em 1948, a IUCN é hoje a maior e mais diversificada rede ambiental do mundo, reunindo o conhecimento, os recursos e o alcance de mais de 1.400 organizações membros e cerca de 18.000 especialistas. É um fornecedor líder de dados, avaliações e análises de conservação. Sua ampla adesão permite que a IUCN cumpra o papel de incubadora e repositório confiável de melhores práticas, ferramentas e padrões internacionais.

A IUCN oferece um espaço neutro no qual diversas partes interessadas, incluindo governos, ONGs, cientistas, empresas, comunidades locais, organizações de povos indígenas e outros, podem trabalhar juntas para criar e implementar soluções para os desafios ambientais e alcançar o desenvolvimento sustentável.

Trabalhando com muitos parceiros e apoiadores, a IUCN implementou um amplo e diversificado portfólio de projetos de conservação em todo o mundo. Combinando a ciência mais recente com o conhecimento tradicional das comunidades locais, esses projetos trabalham para reverter a perda de habitat, restaurar ecossistemas e melhorar o bem-estar das pessoas.

www.iucn.org

<https://twitter.com/IUCN/>

Índice

Escopo do documento	ii
Colaboradores	ii
Agradecimentos	iii
A Natureza dos Sistemas Cárstico	
Introdução: Carste, cavernas e sua proteção	1
Carste e solubilidade de rocha	4
Alguns valores de carste e cavernas	5
A natureza especial dos ambientes cársticos e sistemas de cavernas	10
Escalas de gestão em áreas cársticas	12
Atividades Humanas no Carste: Impactos e Mitigação	16
Cavernada recreativa e de aventura	16
Caverna de exibição	27
Atividades de aventura e turismo na superfície cárstica	39
Pesquisa científica	41
Agricultura e silvicultura	45
Indústrias extrativas	52
Desenvolvimento e infraestrutura	59
Abastecimento de água	67
Gestão do carste em áreas protegidas	71
Desenvolvimento de monitoramento e mitigação eficazes	71
Planejamento de gestão de áreas protegidas cársticas	74
Envolvimento dos povos indígenas na gestão do carste	79
Conclusões	88
Leitura Adicional	89
Recursos da Internet	90
Referências Científicas	91
Apêndice 1: Carste e Cavernas em Rochas Não Carbonáticas	94
Apêndice 2: Diretrizes Completas	102

Escopo do documento

Estas diretrizes fornecem uma atualização e expansão das 'Diretrizes para Proteção de Cavernas e do Carste' originais, publicadas pela União Internacional para a Conservação da Natureza – IUCN em 1997 (ver Leitura Adicional). Em 2012, a União Internacional de Espeleologia (UIS) concordou em publicar uma segunda edição das diretrizes, com a IUCN concordando posteriormente em patrocinar a publicação. As diretrizes originais preocupavam principalmente com geo patrimônio e, embora isso continue sendo uma consideração importante na segunda edição, também abordamos as questões biológicas envolvidas na conservação de cavernas e carste.

A proteção dos ecossistemas cársticos superficiais e subterrâneos é particularmente relevante para o Objetivo 15 da Agenda 2030 das Nações Unidas para o Desenvolvimento Sustentável (Proteger, restaurar e promover o uso sustentável dos ecossistemas terrestres, gerir de forma sustentável as florestas, combater a desertificação e deter e reverter a degradação da terra e deter a perda da biodiversidade). Essas diretrizes também são relevantes para o Objetivo 6 do Desenvolvimento Sustentável (Garantir a disponibilidade de gestão sustentável da água e saneamento para todos), pois cerca de 10% da população mundial obtém seu abastecimento de água cárstica, seja de nascentes discretas ou de águas subterrâneas cársticas. As novas diretrizes constroem e expandem as Diretrizes para Geoconservação em Áreas Protegidas e Conservadas, publicadas pela IUCN em 2020, considerando especificamente a proteção e conservação da geodiversidade, geo patrimônio e ecologia em áreas cársticas e de cavernas, onde quer que ocorram.

É apropriado que esta publicação apareça durante o Ano Internacional das Cavernas e Karst (IYCK) 2021–22, organizado pela International Union of Speleology, a organização mundial de exploradores, cientistas, gerentes e educadores de cavernas e carste. Os três temas centrais do IYCK são Explorar, Compreender e Proteger, e embora esta publicação se concentre no terceiro desses temas, nosso objetivo é aumentar a compreensão da sensibilidade das cavernas e do carste. Embora tenha havido um aumento bem-vindo no conhecimento de cavernas e carste desde que a primeira edição foi publicada, eles continuam ameaçados por atividades humanas em todo o mundo. De fato, existem cavernas e paisagens cársticas excepcionais, insubstituíveis e hidrológicas, ecológica e culturalmente importantes que estão sendo danificadas ou ameaçadas continuamente.

Os editores e muitos dos colaboradores das diretrizes são membros do IUCN-WCPA Grupo de Trabalho de Cavernas e do Carste (CKWG), que faz parte do Grupo de Especialistas em Geo Patrimônio. Outros membros do CKWG, membros do IUCN SSC Grupo de Especialistas em Invertebrados de Caverna e membros da comunidade global de especialistas em carste revisaram esta publicação. Fornecemos listas de materiais de leitura adicional, recursos úteis da Internet e referências científicas usadas para produzir este documento. Esperamos que essas diretrizes contribuam significativamente para o conhecimento das considerações especiais de manejo essenciais para a proteção efetiva de cavernas e carste. As diretrizes de 1997 foram um 'primeiro passo' na estrada e esta segunda edição reflete nosso maior conhecimento em nível geral. O desafio agora é que mais estratégias nacionais e específicas sejam desenvolvidas em áreas cársticas ao redor do mundo.

Colaboradores

David Gillieson, School of Geography, Earth and Atmospheric Sciences, University of Melbourne, Clayton, Victoria, Australia
John Gunn, School of Geography, Earth & Environmental Sciences University of Birmingham, England, UK
Augusto Auler, Research Director, Carste Ciência Ambiental / Instituto do Carste, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil
Terry Bolger, Cave & Karst Specialist, Vientiane, Laos
Ferdinando Didonna, Member European Cave Protection Commission ECPC/FSE; Member IUCN/WCPA Geoheritage Specialist Group GSG, Italy
Rolan Eberhard, Natural and Cultural Heritage Division, Department of Primary Industries, Parks, Water and Environment, Hobart, Tasmania, Australia
Stefan Eberhard, Director, Subterranean Ecology Pty Ltd, Coningham, Tasmania, Australia; Adjunct Affiliate, University of New South Wales; Honorary Associate, Western Australian Museum
Hein Gerstner, Park Manager, Mulu World Heritage, Borsamulu Park Management Sdn Bhd, Mulu, Sarawak, Malaysia
Ana Komerički, Croatian Biospeleological Society, Zagreb, Croatia
Denise Margaret S. Matias, Biodiversity and People, Institute for Social-Ecological Research (ISOE), Frankfurt am Main, Germany
Jasmine Cardozo Moreira, Tourism Department, Land Management Grad Program, Ponta Grossa State University, Brazil
Ana Sofia Reboleira, Departamento de Biologia Animal, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisbon, Portugal
Geary Schindel, Chief Technical Officer, Edwards Aquifer Authority, San Antonio, Texas, USA and President, NSS, USA
Maria-Laura Tîrlă, Department of Regional Geography and Environment, University of Bucharest, Bucharest, Romania
Bärbel Vogel, President, German Speleological Federation; Adjunct Secretary, International Union of Speleology-UIS; Secretary IUCN/WCPA GSG Cave and Karst Working Group
Brad Wuest, President, International Show Caves Association, Natural Bridge Caverns, San Antonio, Texas, USA

Agradecimentos

Agradecemos às seguintes pessoas que revisaram a segunda edição destas diretrizes e/ou fizeram comentários úteis:

Gordana Beltram, Slovenia	Kyung Sik Woo, South Korea
Rosana Cerkvenik, Slovenia	Don McFarlane, USA
Phil Chapman, UK	Jasmine Moreira, Brazil
Mick Day, USA	John Parr, Laos
Martin Ellis, UK	Andy Spate, Australia
Hans Friederich, Malta	Tim Stokes, Canada
Jeremy Garnett, Top End Editing, Australia	George Veni, USA
Paul Griffiths, Canada	John Watson, Australia
Nadja Zupan Hajna, Slovenia	Nick White, Australia
Eko Haryono, Indonesia	Paul Williams, New Zealand

Agradecemos às seguintes pessoas que forneceram fotografias para estas diretrizes:

Luciana Alt	Vittorio Grobu
Steven Bourne	Peter Hofmann
Philippe Crochet	Tony Marsden
Rob Eavis	Vitor Moura
Csaba Egri	John Spies
Paul Griffiths	Rainer Straub

Agradecemos a Maria-Laura Tîrlă pelo seu diagrama de blocos do sistema hidrológico cárstico, organização espacial das bacias hidrográficas cársticas e impactos das atividades humanas no cárstico.

A Natureza dos Sistemas Cársticos

Introdução: Carste, Cavernas e sua proteção

Carste e cavernas foram testemunhas silenciosas da evolução da Terra e da ascensão das civilizações humanas. As cavernas e o carste retiveram e protegeram partes importantes do longo e tumultuado passado geológico da Terra. Estes vão desde depósitos minerais antigos, oceanos há muito desaparecidos e formas de vida primitivas, até organismos únicos adaptados a cavernas, restos de megafauna extinta e as primeiras manifestações da arte humana. Sem cavernas e carste, tais informações não estariam disponíveis para nós. Karst e cavernas estão entre as paisagens mais requintadas e valiosas do nosso planeta, com valor turístico e econômico intrínseco. Proteger as cavernas e o carste é vital para a preservação da nossa história e do planeta. O conhecimento do carste e das cavernas é essencial para salvaguardar uma convivência saudável entre o carste e nossa civilização, minimizando e evitando impactos ambientais que, em última instância, se refletirão em nós. O uso seguro e sustentável de carste e cavernas, e como protegê-los e gerenciá-los adequadamente, é o assunto deste livro. Nosso objetivo é transmitir uma atualização das melhores práticas globais que seja acessível aos leitores em geral, ao mesmo tempo em que fornecemos detalhes técnicos de interesse do especialista.

O que é carste?



O Cares Gorge no Parque Nacional Picos de Europa e Reserva da Biosfera da UNESCO, na Espanha, é um belo exemplo de superfície cárstica nua em um cenário alpino. Foto de David Gillieson.

O termo 'Carste' deriva de uma palavra antiga, karra/gara, que significa pedra, e foi usado pela primeira vez cientificamente na atual região fronteiriça da Eslovênia e da Itália, agora comumente conhecida como 'Carste clássico'. Esta região tem formas de relevo distintas e contém grandes áreas de calcário nu que foi – pelo menos em parte – exposto devido à erosão do solo após o pastoreio excessivo. Posteriormente, o carste foi aplicado globalmente a uma variedade de configurações, algumas das quais têm pouco em comum com o carste clássico e, para muitas das quais, há pouca ou nenhuma rocha superficial nua. Tem havido numerosas, e às vezes contraditórias, definições de carste, mas um bom ponto de partida é dizer que as áreas cársticas são caracterizadas por formas distintas de relevo e hidrologia resultantes de uma combinação de alta solubilidade de rocha e movimento de água subterrânea ao longo de vias preferenciais (canais). O fluxo de águas subterrâneas através dos canais menores é laminar e não pode transportar sedimentos. Com o tempo, os canais são alargados por dissolução; quando grande o suficiente para fluxo turbulento (comumente em uma largura de vazão de ~ 10 mm), eles são conhecidos como conduítes. As formas de relevo de superfície distintas em áreas cársticas incluem depressões fechadas, como dolinas (comumente conhecidas

como sinkholes) e o maior polje de piso plano. Córregos afundando, vales secos e nascentes também são comuns. A Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos produziu um útil Léxico de Terminologia das Cavernas e do Carste (consulte Recursos da Internet).



Em contraste com o desfiladeiro de Cares, a maior parte do carste no clima úmido e temperado da Nova Zelândia fica sob um manto espesso de cinzas vulcânicas. Grande parte da mata nativa foi retirada e substituída por pastagens. Foto de John Gunn.

O que é uma caverna?

Uma caverna é um vazio formado naturalmente em um material terrestre (rocha ou sedimento) que é grande o suficiente para a entrada humana. Esta definição distingue cavernas de túneis artificiais e outros vazios subterrâneos construídos – às vezes referidos incorretamente como cavernas. A dimensão mínima do vazio é arbitrária, dependendo do tamanho do explorador humano, mas um diâmetro de 0,3 m é uma aproximação razoável. Um comprimento vazio mínimo arbitrário de 5 m também é comumente aplicado, embora cavernas menores que 5 m possam ser remanescentes de passagens outrora mais longas, a maioria das quais foram encurtadas pela erosão. Conforme discutido na seção anterior, as cavernas cársticas são formadas por dissolução e fazem parte de um espectro de tamanhos de vazios que variam de cerca de 1 mm a dezenas de metros. Uma ampla distinção é comumente feita entre cavernas epigênicas e hipogênicas. Cavernas epigênicas são formadas onde a água desce da superfície por gravidade e dissolve rochas solúveis. No caso das rochas carbonáticas, a dissolução é pelo ácido carbônico formado quando o dióxido de carbono é dissolvido em água. Em contraste, as cavernas hipogênicas são formadas por fluidos de fluxo ascendente que recarregam a zona cavernosa a partir de unidades rochosas inferiores e não dependem de fontes de superfície derivadas localmente de água ácida. Esses fluidos se originam de fontes distantes (confinadas por estratos de baixa permeabilidade) ou de fontes profundas (geralmente geotérmicas) e são independentes da recarga da superfície terrestre sobrejacente ou imediatamente adjacente. Como resultado, a maioria das cavernas hipogênicas tem pouca ou nenhuma expressão de superfície. Um terceiro tipo de caverna cárstica se forma onde rochas carbonáticas afloram na costa e a dissolução ocorre na interface de água doce e salgada. Estas são denominadas cavernas de margem de flanco.

Além das cavernas cársticas (formadas por dissolução), existe uma variedade de cavernas formadas por outros agentes não químicos juntamente com cavernas de construção (ver Apêndice 1). No reino marinho, praticamente toda costa de rocha dura contém cavernas litorâneas (cavernas marinhas) que são formadas em grande parte por processos mecânicos. Em terra, o vento pode contribuir para o desenvolvimento de cavernas e a erosão mecânica subsuperficial de sedimentos comumente forma tubos, alguns dos quais podem atingir dimensões de cavernas. Globalmente, existem muitas milhares de cavernas vulcânicas (cavernas de lava) que se formam durante episódios de erupção de lava, e como muitas delas são formadas perto da superfície, dolinas de colapso são comuns. As cavernas também se formam no gelo sob as geleiras e podem ser acessadas, como no Parque Nacional Vatnajökull, na Islândia. Cavernas de construção que se formam durante a deposição também são encontradas em tufo e travertino, como observado em Huangguoshu em Guizhou, China.



Um exemplo de uma caverna epigênica ativa com espeleotemas e sedimentos clásticos. A Caverna Baradla fica nas Cavernas de Aggtelek e Slovak Karst, Patrimônio Mundial da UNESCO, Hungria. A caverna também é uma Reserva da Biosfera da UNESCO e um Sítio Ramsar. Foto de Csaba Egri.

Proteção de cavernas e carste

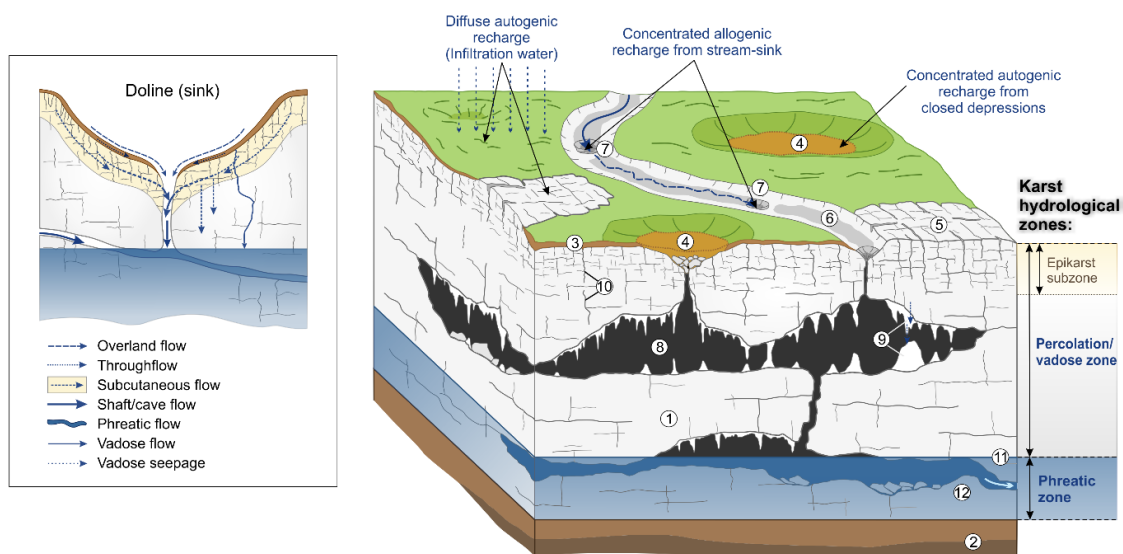
A IUCN define uma Área Protegida como "um espaço geográfico claramente definido, reconhecido, dedicado e gerido, através de meios legais ou outros meios eficazes, para alcançar a conservação a longo prazo da natureza com serviços ecossistêmicos associados e valores culturais". Eles expandiram isso estabelecendo seis categorias de gerenciamento e quatro tipos de governança (consulte Recursos na Internet). Formas de relevo e cavernas são especificamente mencionadas na Categoria III, Monumento ou feição natural, como "áreas reservadas para proteger um monumento natural específico, que pode ser uma forma de relevo, monte marinho, caverna marinha, feição geológica como uma caverna ou uma feição viva como um bosque antigo". Espera-se que os relevos cársticos superficiais e as cavernas neste tipo de área protegida sejam bem documentados e explicitamente protegidos. No entanto, aquelas cavernas e áreas cársticas que estão presentes em cada uma das outras categorias podem não receber o mesmo grau de atenção, especialmente se elas formarem apenas uma pequena parte da Área Protegida Geral ou o objetivo for proteger outros recursos de interesse. Este problema ocorre em toda a gama de tamanhos e tipos de Área Protegida. Por exemplo, uma organização de vida selvagem pode comprar uma área de terra com o objetivo principal de gerenciar a flora e a fauna. Se rochas carbonáticas afloram em parte da área, é provável que haja formas cársticas e cavernas que podem não ser de interesse direto para os proprietários. Isso pode ser visto em escala internacional, onde a proteção é oferecida através das quatro designações de áreas protegidas da Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (UNESCO), contendo áreas de carste carbonático ou evaporítico: Reservas da Biosfera (23%), Sítios Ramsar (5%), Propriedades do Patrimônio Mundial (7%) e Geoparques Globais da UNESCO (38%). No entanto, esses números escondem uma grande variabilidade interna, já que alguns locais são quase inteiramente cársticos (por exemplo, o Škocjan Caves WHP na Eslovênia, que também é um Sítio Ramsar e uma Reserva da Biosfera), enquanto em outros a maioria do local pode ser não cárstico, com pequenas áreas de calcário (por exemplo, a WHP Tassili n'Ajjer na Argélia). Uma outra questão surge quando um local que contém cavernas ou carste é protegido principalmente por outros recursos; por exemplo, vários WHP que contêm cavernas ou carste foram designados como tal por seu interesse cultural. É importante que todas as áreas protegidas que contenham carste, designadas pela IUCN ou outras organizações, sejam geridas de forma a respeitar a natureza especial dos ambientes cársticos, conforme descrito nestas diretrizes.

Solubilidade cársica e rochosa

rochas de silicato são suficientemente solúveis para que formas de relevo cársticos e cavernas possam se formar. As cavernas são mais comuns em rochas carbonáticas e evaporíticas, embora existam algumas extensas áreas cársticas sem cavernas. Na Inglaterra, Reino Unido, existem relevos cársticos superficiais, como vales secos e dolinas, e até mesmo alguns riachos afundando, em áreas sustentadas por calcários cretáceos e jurássicos. O rastreamento das águas subterrâneas demonstrou um fluxo rápido para suas nascentes, no entanto, existe apenas um sistema de cavernas hidrologicamente ativo com mais de 50 m de comprimento.

Onde os carbonatos e evaporitos mergulham sob rochas não cársticas, a circulação da água continuará e as cavernas podem se formar. Em Kentucky, EUA, o calcário é coberto por arenitos. Por grande parte de sua extensão, Mammoth Cave, Kentucky, a caverna mais longa do mundo e uma propriedade do Patrimônio Mundial, se estende sob essas rochas não calcárias. Em casos de carste interestratal, depressões fechadas em rochas não cársticas (dolinas caprock) na superfície são causadas pelo colapso de rochas carstificadas em profundidade. Em outros lugares, pode não haver evidência de superfície da extensa passagem da caverna presente abaixo, com um dos melhores exemplos sendo Ogof Draenen, País de Gales, Reino Unido. Menos de 15% dos 70 km de passagens conhecidas estão abaixo de áreas onde rochas carbonáticas afloram na superfície e a caverna restante passa sob áreas que não seriam consideradas cársticas com base nas formas de relevo da superfície.

As cavernas epigênicas são formadas onde a água desce da superfície e no caso das rochas carbonáticas a dissolução é pelo ácido carbônico que se forma quando o dióxido de carbono é dissolvido na água; as rochas evaporíticas não requerem ácido e se dissolvem em água pura. Em contraste, as cavernas hipogênicas são formadas por águas termais ácidas que sobem das profundezas. Cavernas hipogênicas geralmente têm pouca ou nenhuma expressão de superfície. Situada sob uma paisagem com poucas características cársticas superficiais e acessível apenas por um único poço formado por colapso, a Caverna Lechuguilla no Parque Nacional Carlsbad Caverns, Patrimônio da Humanidade no Novo México EUA, estende-se por 242 km de passagem em cavernas, com 480 m alcance vertical. Em alguns casos, processos hipogênicos formaram grandes câmaras que subsequente colapsam para formar depressões que podem ter várias centenas de metros de largura e profundidade, como observado nos obruks da Turquia, que cavam um planalto de calcário plano e sem características.



Esquema de um sistema hidrológico cárstico. Diagrama de Maria-Laura Tîrlă e John Gunn; conteúdo inserido modificado de Gunn (1985). Legenda: 1 – Rocha base carbonática (por exemplo, calcário); 2 – Base rochosa impermeável; 3 – Cobertura do solo; 4 – Dolina; 5 – Karen; 6 – Vale seco; 7 – Ponor (afundar); 8 – Caverna; 9 – Espeleotemas; 10 – Articulações ou fraturas; 11 – Nível freático; 12 – Sump (conduta cheia de água).

Em resumo, as formas de relevo mais comumente consideradas cársticas têm formas de relevo distintas na superfície (dolinas, vales secos, karren) com cavernas abaixo. No entanto, existem áreas com relevo cárstico na superfície, mas que não possuem cavernas, e outras áreas com cavernas em profundidade, mas que não possuem relevo cárstico de superfície, ou que possuem apenas relevo cárstico interestratal.

As configurações cársticas mais óbvias ocorrem onde rochas carbonáticas e evaporíticas afloram na superfície em uma extensa área (carste aberto), mas em muitas áreas elas são cobertas por sedimentos não consolidados acumulados durante a evolução da paisagem. Estes são denominados cársticos cobertos ou cobertos; distinguido de cársticos enterrados onde a paisagem evoluiu, mas foi preenchida e enterrada por sedimentação ou rochas mais jovens. Na maioria dos casos, esse soterramento reduz a transmissão de fluidos e sedimentos e essas configurações podem ser descritas como carste fóssil ou paleocarste.

Passagens com fluxos inativos às vezes são chamadas de 'fósseis', embora esse uso comum não seja estritamente correto. Essas passagens são simplesmente 'reliíquias', pois na maioria dos casos ainda estão evoluindo como consequência de entradas de água de percolação que alimentam espeleotemas (um termo geral para todos os depósitos minerais formados em cavernas) ou de quebra mecânica do teto ou das paredes da passagem.



Espeleotemas espetaculares de gesso no salão de festas Chandelier, Lechuguilla Cave (Carlsbad Caverns Propriedade do Patrimônio Mundial), Novo México, EUA. Lechuguilla é uma caverna hipogênica onde mais de 200 km de passagem são acessados através de um poço. Foto de Rainer Straub

Alguns valores de carste e cavernas

Além da importância de reter exemplos de relevo e paisagens cársticas como parte de uma estratégia para salvaguardar a biodiversidade e a geodiversidade globais, as áreas cársticas geralmente têm valores econômicos, científicos e culturais. Pode haver uma diversidade de demandas que podem entrar em conflito umas com as outras.

Os terrenos cársticos contém muitos recursos naturais e fornecem serviços ecossistêmicos valiosos, como água doce para consumo humano; ecossistemas aquáticos e irrigação agrícola; grande biodiversidade tanto na superfície como no ambiente subterrâneo; paisagens e grutas de elevado valor recreativo e cultural; e solos que fornecem a base para a produção agrícola. Os terrenos cársticos atuam como sumidouros naturais de dióxido de carbono (CO₂), ajudando assim a mitigar as mudanças climáticas. Todos esses recursos e serviços ecossistêmicos não podem ser considerados tão isolados, pois estão intensamente interconectados. Devido a esses complexos mecanismos de feedback, impactos em elementos isolados do ecossistema cárstico podem ter impactos inesperados em outros elementos ou mesmo em todo o ecossistema.

Os recursos hídricos cársticos são importantes para a humanidade há milhares de anos, inclusive para consumo humano, na agricultura (irrigação e aquicultura) e, ao longo dos últimos cem anos, na geração de energia hidrelétrica. Como as nascentes cársticas tendem a ser maiores e mais confiáveis do que as de outras rochas, os padrões de assentamento foram fortemente influenciados por essas fontes de água. Por volta de 450 aC, as fontes cársticas estavam sendo usadas para irrigação na China, enquanto o povo maia da América Central fazia uso extensivo de cavernas e cenotes (dolinas cheias de água). Em 2019, estimou-se que cerca de 10% da população mundial, cerca de 700 milhões de pessoas, obteve seu abastecimento de água potável do carste, seja de fontes ou poços. O maior consumidor é a China, com cerca de 150 milhões de pessoas, dependendo das águas cársticas. Os EUA são o segundo, com cerca de 50 milhões, principalmente nas áreas rurais. O Aquífero Edwards, Texas, EUA, abastece vários milhões de pessoas, incluindo grandes cidades como San Antonio.

É necessária infraestrutura para transportar águas subterrâneas das nascentes até usuários. Há mais de 2.000 anos, onze aquedutos levavam água de nascente à cidade velha de Roma em distâncias que variavam de 16 a 91 km. O maior sistema de abastecimento da Europa é aquele que abastece 1,7 mi. de cidadãos em Viena, Áustria, onde o primeiro de dois principais aquedutos foi inaugurado em 1873. Durante os séculos 20 e 21, grandes obras de engenharia foram realizadas em muitas áreas, principalmente nos Carstes Dináricos da Croácia e Bósnia-Herzegovina, e na China. A montante das nascentes, as áreas cársticas são caracterizadas pela ausência de água superficial, o que restringe o desenvolvimento. Nas áreas onde os calcários têm porosidade e permeabilidade altas, os furos podem fornecer um bom suprimento (por exemplo, nos calcários cretáceos na Inglaterra), mas em muitos calcários estima-se que haja de 1% a 2% de chance de um furo ser produtivo. Poluentes industriais e agrícolas podem ser transportados rapidamente através das redes de subsuperfície do carste, tornando o gerenciamento eficaz do uso da terra muito importante.

As áreas cársticas continuam a ser usadas como fonte de calcário para obter cimento, com um crescimento do desenvolvimento urbano demandando calcário de alta pureza. Ele também é usado para cal agrícola, como fundente na produção de ferro e aço e como carga nas indústrias de tintas, plásticos e farmacêuticas. A exploração de pedreiras tem o potencial de destruir cavernas, eliminar organismos cavernícolas e degradar a qualidade da água; no entanto, com uma gestão cuidadosa, impactos podem ser minimizados. A mineração de salitre (nitrato de potássio) em cavernas nas Américas (principalmente nos EUA e no Brasil) foi essencial para a produção de pólvora durante os séculos XVIII e XIX. Milhares de cavernas tiveram seu solo rico em nitrato removido e a coroa portuguesa até publicou instruções sobre como regenerar o solo lixiviado, colocando-o de volta nas cavernas.

A mineração de depósitos de guano em cavernas para fertilizantes foi um fenômeno mundial. Antes da introdução de fertilizantes artificiais ou químicos, fertilizantes naturais eram utilizados de fontes como guano de pássaros e morcegos. O guano de pássaros foi extraído em ilhas do Pacífico, como Nauru e a Christmas, no Índico, e o guano de morcego ainda é extraído em cavernas do Texas, como fonte de fertilizante orgânico. Em Niah Cave, Bornéu, guano de andorinhões é extraído para fertilizante, bem como seus ninhos. Há uma extração generalizada de minerais em áreas cársticas, como bauxita, chumbo-zinco e carvão na China, enquanto na área da Chapada Diamantina, no Brasil, havia extensa mineração de diamantes em cavernas no século XIX e século XX. Espeleotemas, especialmente estalagmites e estalactites, também foram levados ilegalmente para venda.

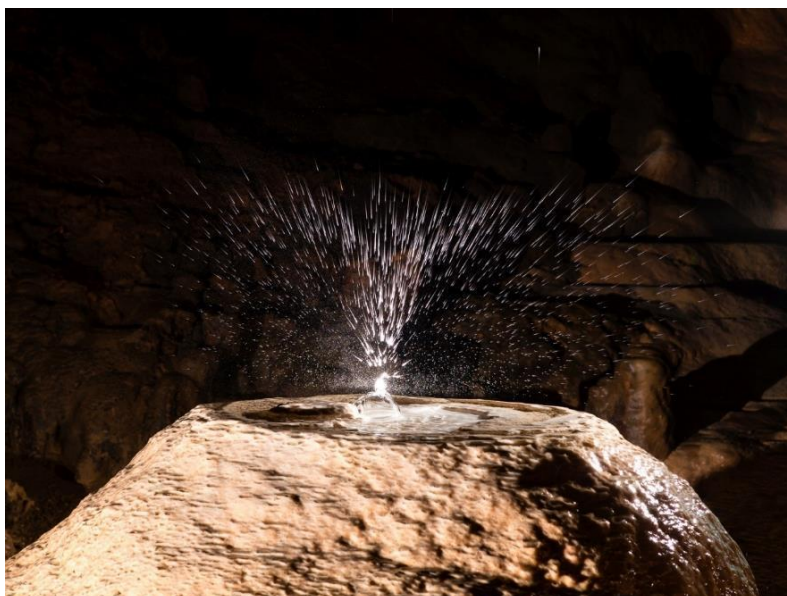
As paisagens cársticas apresentam alta geodiversidade, com grande variação topográfica. Elas, portanto, fornecem uma maior variedade de habitats potenciais que a maioria das paisagens não cársticas e geralmente são isolados dos arredores, como em paisagens cársticas de torre. Sendo amplamente protegidas, as cavernas podem fornecer visualizações 3D únicas de relações geológicas que não podem ser vistas devido à falta de afloramentos ou foram obliteradas pelo intemperismo na superfície ou cobertas por solo e vegetação. Desde o final do século 20, eles têm sido usados como superfície facilmente acessíveis de reservatórios de petróleo carbonático. Em ambientes tropicais, podem abrigar grande biodiversidade de espécies animais e vegetais, incluindo espécies raras e endêmicas tanto acima quanto abaixo do solo. Alguns carstes serviram de refúgio à espécies que persistiram no subsolo por meio de mudanças ambientais que eliminaram parentes acima do solo ou superfície em micro climas úmidos e frios formados por dolinas e entradas de cavernas.

Os morcegos são as criaturas mais associadas a cavernas, mas outros animais vertebrados e invertebrados endêmicos habitam o carste, alguns podem ter apenas pequenos números populacionais ou são altamente adaptados ao ambiente subterrâneo. Em muitos, mas não em todos cárstes, as condições ambientais subterrâneas podem ser constantes e as espécies podem ter pouca tolerância às mudanças ambientais subterrâneas. No Vietnã, o langur de Delacour (*Trachypithecus delacouri*), uma espécie de primata ameaçada de extinção, é endêmica de algumas áreas cársticas. No carste da fronteira entre Vietnã e Laos, grandes blocos calcários são separados por rios, que fornecem barreiras à dispersão de espécies. Existem pelo menos seis espécies de langures comedores de folhas (*Trachypithecus* spp.), cada uma endêmica de um bloco específico de calcário. Da mesma forma, na província de Guangxi, na China, a fragmentação do habitat separa as populações do langur de cabeça branca (*Trachypithecus leucocephalus*). Ambientes subterrâneos únicos podem ser formados por cavernas hipogênicas desenvolvidas por espeleogênese de ácido sulfúrico, e abrigam comunidades ou ecossistemas igualmente excepcionais, muitas vezes completamente isolados e que evoluíram independentes do ambiente de superfície. A Movile Cave, rica em H₂S, na Romênia, abriga pelo menos 51 espécies, das quais 34 endêmicas. O Aquífero Edwards abriga mais de 60 espécies, incluindo peixes altamente adaptados e salamandras, com algumas espécies conhecidas apenas em poços com mais de 250 m de profundidade.

O ambiente deposicional em cavernas facilita a preservação de material fóssil e DNA associado. Os animais podem cair, entrar em busca de água ou ser arrastados e seus restos fornecem um registro da evolução da fauna ao longo do tempo. Colônias de morcegos e abrigos de corujas contribuem para o acúmulo de ossos e fornecem amostras da fauna de vertebrados menores. A utilização de cavernas por mamíferos como abrigos, locais de hibernação ou tocas para jovens, com a inevitável morte in situ de alguns indivíduos, permite estudar séries de crescimento e relações predador-presa. Pistas do ambiente deposicional de todos esses restos criam uma imagem da mudança da fauna de longo prazo contra o clima, o que pode ajudar a desenvolver

ferramentas para prever onde as espécies podem existir à luz da rápida mudança climática moderna, expansão humana e fragmentação do habitat. O registro fóssil fornece o único meio para avaliar os padrões de longo prazo da mudança da fauna em relação ao clima e fornecer dados significativos para tais modelos preditivos.

Estimativas de condições climáticas passadas há muito interessam às ciências naturais, pois fornecem alguma explicação para os padrões de mudança de distribuição de espécies de plantas e animais no planeta, incluindo nossa própria espécie. Desde a década de 1960, tem havido um interesse renovado na reconstrução do clima do passado como meio análogos para a atmosfera que provavelmente resultarão do aquecimento global. A disciplina da ciência do espeleotema desenvolveu-se para fornecer longos arquivos de paleoclima. Dentro das cavernas, as estalagmites são construídas camada por camada, geralmente anualmente, e, portanto, uma seção longitudinal através de tal estalagmite fornece uma micro estratigrafia que pode abranger milhares a dezenas de milhares de anos. A datação da série de urânio fornece uma cronologia absoluta que pode se estender de até ~ 650.000 anos (U-Th) e vários milhões de anos (U-Pb) atrás. As análises de isótopos estáveis podem fornecer substitutos para a variação climática nessas escalas de tempo. Os registros de isótopos de oxigênio das cavernas chinesas forneceram dados de longo prazo sobre as mudanças na força das monções do leste asiático e no clima global em geral. O extenso registro chinês cobre os últimos 640.000 anos de vários locais e é um dos mais longos registros climáticos contínuos do planeta. Os crescimentos excessivos de espeleotemas nas cavernas costeiras do Mediterrâneo são arquivos detalhados excepcionais de mudanças passadas do nível do mar, voltando no tempo à época do Plioceno. Na floresta amazônica, os isótopos de carbono das estalagmites forneceram informações cruciais sobre a resiliência da floresta. Estes depósitos de cavernas são capazes de fornecer pistas sobre previsões climáticas futuras, altamente valorizadas devido à inevitável questão do desaparecimento de terrenos costeiros densamente povoados, devido ao aumento global do nível do mar.



A deposição de calcita em espeleotemas de água de gotejamento fornece um valioso arquivo de longo prazo das mudanças na química dos isótopos de oxigênio e, portanto, um registro substituto de climas passados. Foto de Csaba Egri.

Carste e cavernas têm valores paisagísticos e recreativos muito altos. No final de 2021, havia 76 Propriedades do Patrimônio Mundial em quarenta e quatro países e 68 Geoparques Globais da UNESCO em vinte e seis países com carste carbonático e cavernas. O turismo é, portanto, uma atividade econômica importante em alguns carstes, incluindo o uso de cavernas desenvolvidas e não desenvolvidas e paisagens de superfície, gerando assim empregos locais. O crescimento do turismo em cavernas, desde o modesto início no final do século 19 com lanternas de velas até os dias de hoje, quando luzes LED e trens elétricos são empregados, expandiu drasticamente o uso e a gama de impactos nas cavernas. Existem aproximadamente 1.600 cavernas turísticas em todo o mundo, algumas recebendo várias centenas de milhares de visitantes a cada ano, por exemplo, Mammoth Cave Propriedade do Patrimônio Mundial, EUA, recebendo 500.000 visitantes, e Postojna Cave, na Eslovênia, recebendo mais de um milhão. Essas estatísticas provavelmente subestimam o número de cavernas turísticas na China, onde pode haver mais de 300 abertas ao público. Em 2019, houve 150 milhões de visitantes para mostrar cavernas e até 70.000 pessoas podem ser empregadas globalmente no turismo de cavernas. A apreciação remota também é possível por meio de sites online com interpretação, vídeos e fotografias, cuja produção pode ser um componente significativo de algumas economias locais. Tais mídias reforçam o valor das cavernas e do carste para o turismo e como ambientes que precisam de cuidados.

As cavernas sempre foram usadas como abrigos, espaços de convivência e refúgio em tempos de conflito. Eles são usados como santuários ou templos – como espaços sagrados que engendram sentimentos de admiração e veneração e facilitam as observâncias religiosas por serem lugares separados da vida diária. As cavernas são muitas vezes consideradas como espaços ambíguos, oferecendo proteção e abrigo, mas também podem prender e aprisionar pessoas. Em muitas culturas, um local dentro da terra é identificado como feminino, e as cavernas foram identificadas como representando o útero da Mãe Terra e estão associadas ao nascimento e à regeneração. Existem mitos sobre pessoas que entram em cavernas e ficam presas, apenas para serem libertadas após alguma provação. Embora a sacralidade possa ser investida em muitas outras formas e objetos naturais, como árvores, nascentes e montanhas, os primeiros lugares sagrados conhecidos na pré-história foram em cavernas formadas naturalmente, como as do vale de Dordogne, na França. Monges budistas tailandeses procuram cavernas como refúgios tranquilos para praticar meditação. Se o monge se tornar um famoso mestre de meditação, então seus seguidores podem transformar a caverna em um santuário mais ornamentado em sua memória.

As cavernas naturais têm sido um foco de veneração e aparecem com frequência em histórias mitológicas e religiosas. O filósofo Porfírio (234–305 EC) afirmou que antes de haver templos, todos os ritos religiosos ocorriam em cavernas. Ele argumentou que a arquitetura dos templos emular a escuridão e a entrada única da maioria das cavernas, e que a penetração da luz em uma caverna em certas épocas do ano tinha significado ritual. Uma caverna sagrada também pode conter uma fonte sagrada que se acredita possuir propriedades curativas ou divinatórias especiais.

Em países católicos como o Brasil, santuários e até mesmo igrejas inteiras dentro de cavernas representam locais de peregrinação populares, com a grande caverna de Bom Jesus da Lapa contendo duas igrejas que são locais de culto desde o final do século XVII e são visitadas a cada ano por mais de um milhão de pessoas. A Caverna de Lourdes, na França, é reconhecida pela igreja católica romana como o local de uma aparição da Virgem Maria em 1858, recebendo milhões de turistas todos os anos, muitos em busca de cura ou crescimento espiritual.



As grutas e o carste têm valores paisagísticos e recreativos muito elevados. Dois espeleólogos exploram um lago subterrâneo intocado em Krizna Jama, na Eslovênia. Foto de Csaba Egri.

Existem muitos templos em cavernas no sudeste da Ásia, tanto porque são cavidades convenientes perto das cidades quanto porque têm um ar de mistério com câmaras escondidas. Muitas cavernas na Tailândia, Laos e algumas na China contêm santuários budistas, com vários templos taoístas e budistas em cavernas perto de Ipoh, no norte da Malásia, enquanto na Índia e na Malásia muitas cavernas são usadas como templos hindus. O templo de cavernas mais conhecido fica no complexo Batu Caves, nos arredores de Kuala Lumpur (Malásia), que serve como foco do festival Thaipusam anual da comunidade hindu. Tornou-se um local de peregrinação não apenas para hindus da Malásia, mas também para hindus de outros países, incluindo Índia, Austrália e Cingapura. Na ilha japonesa de Okinawa, vários santuários xintoístas estão localizados nas entradas das cavernas.



Santuário de caverna budista, rio Nam Ou, Laos. Foto de David Gillieson

Os critérios usados para avaliar a importância de uma caverna individual podem, portanto, incluir:

- Considerações geológicas – como características específicas relacionadas à estrutura, estratigrafia, paleontologia e mineralogia.
- Considerações geomorfológicas – como morfologia de passagem, sequências de sedimentos clásticos e espeleotemas, particularmente onde fornecem evidências de ambientes de superfície do passado.
- Considerações hidrológicas – como a presença de grandes riachos ou lagos subterrâneos, brechas subterrâneas de divisores de drenagem superficial ou elementos-chave para entender a rede de condutos.
- Considerações biológicas – relativas à riqueza de espécies, a presença de espécies raras e ameaçadas, estruturas tróficas incomuns ou locais chave de maternidade de morcegos.
- Considerações arqueológicas e culturais – como a presença de depósitos profundos e bem estratificados, o papel da caverna na evolução pré-histórica regional, exemplos de uso histórico de cavernas, como mineração ou gerenciamento de água, ou seu significado espiritual e religioso.
- Considerações geográficas – valores remotos e selvagens, proximidade com a infraestrutura do parque, como estradas e áreas de camping, oportunidades recreativas e acessibilidade dos principais centros populacionais.

Auler et al. (2018) forneceram uma abordagem para priorização de cavernas na proteção ambiental, avaliando rigorosamente os níveis de significância. Usaram 70 parâmetros cobrindo as considerações acima em amostras de 401 cavernas, que analisaram estatisticamente. Os resultados indicaram que parâmetros bióticos, juntamente com amplas dimensões de comprimento e área, foram mais úteis. Esta abordagem pode ser adaptada para outras áreas cársticas, dada a disponibilidade de dados relevantes.

Diretrizes

- (1) *O planejamento eficaz para as regiões cársticas exige uma avaliação completa de todos os seus valores econômicos, científicos e humanos, dentro do contexto cultural e político local.*
- (2) *Os gerentes devem reconhecer que em bacias cársticas, as ações de superfície resultam em impactos diretos ou indiretos no subsolo ou mais a jusante.*
- (3) *Uma boa compreensão das características das cavernas e seus valores únicos é essencial para o melhor gerenciamento de qualquer área cárstica.*

A natureza especial dos ambientes cársticos e sistemas de cavernas

Rochas solúveis e o desenvolvimento da drenagem subterrânea através de condutos, que integram processos superficiais e subterrâneos, dão origem à complexidade e particularidades das paisagens cársticas. Este alto nível de conectividade significa que qualquer mudança ou impacto na superfície é rapidamente transferido ao subsolo, afetando o ambiente da caverna que a vida terrestre e aquática depende.

Ambientes de superfície podem ser difíceis. Os ambientes cársticos são áridos na superfície, mesmo em climas úmidos, porque a chuva escoar rapidamente para o subsolo. A menos que o leito rochoso seja coberto por depósitos superficiais, as superfícies tendem a ser rochosas, com solos rasos e irregulares. A quantidade de minerais solúveis, como calcita e dolomita, no leito rochoso de carbonato costuma chegar a 90% – 99%. Consequentemente, o teor total de minerais insolúveis, que levam à formação do solo, é de apenas 1% a 10%. Assim, a vegetação no carste carbonático tende a ser adaptada a solos rochosos, alto teor de cálcio (alcalinidade) e condições secas. A exceção é onde as rochas solúveis são cobertas por depósitos superficiais derivados externamente (alógênicos), como glacial till (no norte dos Estados Unidos), loess (no English Peak District) ou cinzas vulcânicas no carste da Nova Zelândia King Country. Em áreas tropicais, o carste coberto de solo é mais comum sob a vegetação de floresta tropical ou Cerrado e pode ter mantos de solo derivados de cinzas vulcânicas.

*Os ecossistemas de superfície no carste são diferentes das paisagens adjacentes em termos de topografia, geomorfologia, hidrologia, solos e vegetação. As paisagens cársticas, com sua topografia acidentada e condições ambientais adversas, oferecem variedade maior de habitats diferentes do que as paisagens não cársticas. Assim, promovem uma biodiversidade de plantas e animais, incluindo espécies raras e endêmicas. No Laos, existem 21 espécies conhecidas de alcaparras (*Capparis* spp. L.), sendo a maioria endêmica de um único local cárstico. Da mesma forma, cerca de 90 espécies de lagartos tortos (*Cyrtodactylus* spp.) são endêmicas de locais cársticos em toda a sua distribuição, da Índia, ao longo do sudeste da Ásia, até a Melanésia.*

Ambientes subterrâneos em carste são distintos e mais desenvolvidos que em rochas não cársticas. Todos tipos de rocha permitem algum movimento de águas subterrâneas em fraturas, mas apenas rochas cársticas que a dissolução pela água aumenta as fraturas para formar condutos, que direcionam parte ou toda drenagem superficial para o subsolo. Cavernas em rochas carbonáticas são maiores, mais longas e profundas do que em outras rochas, como arenito (quartzito), conglomerado, lava ou evaporitos. Deer Cave, Sarawak, e Hang Son Doong Cave, Vietnã, estão entre as maiores cavernas do mundo em tamanho de passagem sustentado, enquanto Mammoth Cave, EUA, é a caverna mais longa, e Vryovkina Cave, Geórgia, é mais profunda (todas após janeiro 2022).

Além de cavernas com dimensões exploráveis, existe habitats subterrâneo pouco pesquisado no carste de condutos com diâmetro inferior a 0,3 m, portanto inacessível à humanos. Este é o habitat da mesocaverna. Embora tenha recebido pouco estudo até agora, acredita-se que seja importante para a biota subterrânea e, em alguns terrenos cársticos, pode abrigar o grosso da população de muitas espécies descritas como 'fauna de caverna'. Acima do lençol freático, habitats de mesocavernas cheios de ar provavelmente experimentarão microclimas mais estáveis do que cavernas de diâmetro maior e podem, portanto, fornecer à fauna das cavernas condições ideais. A maior parte da discussão geral sobre impactos antropogênicos ou mitigação de impactos em habitats de 'cavernas' ou estigofauna pode ser considerada como afetando tais condutos de menor diâmetro e sua fauna.

Algumas cavernas são relíquias, recebendo apenas água de percolação da superfície, enquanto outras são ativas, com entradas de água e sedimentos de riachos de superfície, incluindo algumas inundações periódicas. A ausência de luz solar para a produção primária significa que a maior parte do material orgânico para a cadeia alimentar da caverna deve vir do ambiente da superfície. Alguns ecossistemas de cavernas dependem de fontes de energia geoquímica, como a oxidação de sulfetos.

As características óbvias do ambiente da caverna são os níveis de luz reduzidos a ausentes e temperatura quase constante longe das entradas. A vida na escuridão exige que outros sentidos – principalmente o tato e o olfato – se tornem dominantes. Assim, a fauna adaptada às cavernas tem antenas maiores ou apêndices alongados, bem como órgãos especializados para detectar vibração. Os olhos podem ser reduzidos em tamanho ou mesmo ausentes. Essas características são denominadas troglomórfico, e os animais terrestres desse tipo são denominados troglóbiontes, enquanto suas contrapartes aquáticas são denominadas estigobiontes.

A fauna subterrânea foi classificada de acordo com a posição e a duração de sua permanência nas cavernas como troglo ou stygobites (moradores obrigatórios das cavernas), -philes (moradores facultativos das cavernas) e -xenes (visitantes das cavernas). Os peixes cegos das cavernas fornecem um exemplo de estigobionte adaptado. No entanto, existem exceções e existem animais cavernícolas obrigatórios que mostram pouca ou nenhuma adaptação ao escuro.

A fauna subterrânea, particularmente a estigofauna, pode ser encontrada em ambientes não cársticos, mas cavernas e sistemas de águas subterrâneas cársticas oferecem maiores vazios e diversidade de habitats. Portanto, a fauna subterrânea do carste tem uma biodiversidade maior do que em ambientes subterrâneos não cársticos. As comunidades subterrâneas são frequentemente caracterizadas por um elevado número de espécies raras e endêmicas, devido ao seu elevado grau de isolamento. Incapazes de deixar seus habitats subterrâneos, os troglóbios geralmente ficam restritos a uma única área cárstica ou sistema de cavernas.

Áreas de drenagem não são facilmente delimitadas. Bacias de drenagem e rotas seguidas pelas águas cársticas não são óbvias, porque os caminhos de drenagem são em grande parte subterrâneos e as bacias de águas subterrâneas não seguem divisões superficiais. Além disso, divisores de águas subterrâneas em carste são melhor considerados como zonas, porque sua posição no plano pode mudar entre condições de águas altas e baixas. Grande parte da água que passa pelo carste é introduzida por riachos que afundam. Se esses fluxos se originarem em rochas impermeáveis que se encontram além do limite da área cárstica, eles são denominados fluxos alogênicos, em oposição aos fluxos autogênicos (ou água) derivados inteiramente de rochas cársticas.

Ecossistemas cársticos são frágeis porque as condições ambientais podem ser extremas e porque o alto grau de interconectividade nos ecossistemas significa que impactos diretos em um único elemento do ecossistema podem ter consequências indiretas para todo o ecossistema. Essas condições resultam em ecossistemas cársticos com baixa resiliência, o que significa baixa capacidade de responder a distúrbios, resistindo a danos ou em recuperação. As águas subterrâneas cársticas são vulneráveis à contaminação devido à sua estrutura hidrogeológica, os contaminantes podem entrar facilmente através de solos finos e do epicarste, através de dolinas ou riachos que afundam. O termo 'epicarste' refere-se aos poucos metros do leito rochoso em que ocorre a maior dissolução e que, portanto, tem mais vazios do que a rocha profunda. Uma vez no subsolo, a água se move mais rapidamente (quilômetros por dia) do que na maioria das águas subterrâneas não cársticas (metros por ano), de modo que os contaminantes podem se espalhar por grandes distâncias e impactar espécies e ecossistemas. Os poluentes podem ficar presos em aquíferos cársticos e então serem liberados ao longo do tempo nas nascentes.

Os solos cársticos são frágeis e vulneráveis à erosão essencialmente irreversível, pelo menos em uma escala de tempo humana. A remoção ou degradação da vegetação (por exemplo, por extração de madeira, pastagem de gado ou agricultura) pode causar erosão severa do solo e levar à 'desertificação rochosa', um grande problema ambiental no Karst Dinaric da Europa e no Karst do Sul da China. A degradação da vegetação natural e a erosão do solo estão inter-relacionadas (ou seja, a degradação da vegetação pode causar erosão e vice-versa). A erosão do solo e o declínio associado da vegetação e da atividade biológica reduzem a eficiência das paisagens cársticas ou atuam como um sumidouro natural para o CO₂ atmosférico. A dissolução cárstica constitui até 29,4% do sumidouro terrestre de CO₂ ou 10,4% do total das emissões antrópicas de CO₂.

A salvaguarda dos processos naturais, especialmente do sistema hidrológico, é fundamental para a proteção e gestão das paisagens cársticas. Isto implica a necessidade de uma abordagem holística, com uma gestão cuidadosa da vegetação e dos solos de toda a bacia hidrográfica, para a proteção das águas subterrâneas e preservação da biodiversidade. A necessidade de gerenciamento da captação é mais vital para paisagens cársticas do que em muitas outras litologias. A gestão da qualidade da água dos córregos alogênicos que drenam para o carste e a proteção das dolinas que fornecem recarga pontual são os principais problemas no gerenciamento de todas as áreas cársticas.

Existem relativamente poucos lugares onde existe a oportunidade de salvaguardar paisagens cársticas verdadeiramente intocadas. Além de preservar e manter esses locais, o foco deve ser colocado na correção dos impactos negativos do manejo passado e atual, incluindo a restauração da vegetação natural e habitat da fauna em paisagens cársticas degradadas. Esses tipos de melhorias podem ajudar a restaurar os processos cársticos naturais.

Diretrizes

- (4) *A salvaguarda dos processos naturais, especialmente do sistema hidrológico, é fundamental para a proteção e gestão das paisagens cársticas.*
- (5) *Preeminente entre processos cársticos é a cascata de dióxido de carbono (CO₂) de baixas concentrações na atmosfera externa através de concentrações aumentadas na atmosfera do solo até concentrações reduzidas em passagens de cavernas. Elevadas concentrações de dióxido de carbono provem da respiração das raízes, das atividades microbianas e do solo saudável. Esta cascata deve se manter para melhor funcionar os processos de solução cárstica.*
- (6) *Necessidade de gerenciamento total da captação é mais vital para as paisagens cársticas do que para outras litologias.*
- (7) *Existem relativamente poucas paisagens cársticas intocadas e as que restam devem ser preservadas e mantidas com alta prioridade. Em outros lugares, o foco deve estar na correção de quaisquer impactos negativos das práticas de gestão passadas e presentes.*

Escalas de gestão em áreas cársticas

Há uma percepção de que prescrições de gerenciamento devam levar em consideração variações naturais impostas na estrutura e função dos sistemas cársticos. É improvável que uma única prescrição de manejo aplicada a um sistema hidrológico cárstico (ou sistema integrado complexo de cavernas) proteja adequadamente os processos geomorfológicos e ecológicos em andamento nas diferentes partes do sistema e, portanto, o planejamento do manejo deve levar em consideração o fator escala. Mesmo em áreas cársticas áridas, pode haver um forte gradiente no microclima e nas fontes de energia que se estendem para um sistema de cavernas desde a entrada. Portanto, as prescrições de manejo devem levar em conta variações naturais na ecologia das cavernas.

Para uma bacia não cárstica, onde fluxos de água são predominantemente na superfície, o conceito de rio contínuo argumenta que processos biológicos e químicos de um rio estão intimamente relacionados aos seus atributos físicos, principalmente temperatura da água, regime de fluxo e transporte de sedimentos. Assim, as comunidades biológicas mudam previsivelmente na direção a jusante, assim como o próprio rio. Isso implica que as comunidades biológicas se adaptam às condições particulares de um pequeno trecho de riacho, ou 'alcance do riacho', onde existem condições geomorfológicas e ecológicas semelhantes.

Para tal captação, poderíamos conceituar as escalas espaciais de gestão como:

Bacia hidrográfica total > sub-bacia hidrográfica (definida pela ordem do rio, litologia) > alcance do rio (gradiente semelhante, substrato, regime de fluxo) de acordo com o conceito de rio contínuo.

No entanto, para uma bacia hidrográfica cárstica, nossa conceituação seria:

Bacia hidrográfica contribuinte não cárstica > bacia cárstica > sub-bacias cársticas > passagem em caverna (vários tipos de conectividade e níveis de energia) > nascente.

Acesso a alimentos e energia de fontes externas torna-se crítico à sobrevivência dos organismos que compõem a ecologia das cavernas. A principal fonte externa são detritos orgânicos levados por água corrente, seja na percolação ou discretos rios. Esse material pode ser húmus fino, utilizado pela biota cavernícola, ou detritos mais grossos (folhas e galhos), que devem ser decompostos por bactérias e fungos para serem utilizáveis. A caverna é, portanto, equivalente ao curso superior de um riacho de superfície. Locais dentro de uma caverna raramente inundada podem ser depauperados em fauna, enquanto locais ao longo de riachos principais com conexão externa direta podem ser ricos em espécies e ter um número alto de organismos. Embora essas espécies e organismos possam ser arrastados por inundações, as populações podem recolonizar a partir de fendas nas rochas ou meso-cavidades. Outra fonte significativa de material externo são os processos de queda de ar abaixo das dolinas, poços ou sistemas de fratura abertos na superfície. Isso é importante para passagens secas de alto nível distantes de fontes de água ou para cavernas em climas secos. A penetração das raízes das árvores nas passagens fornece uma fonte de energia muito importante nas cavernas tropicais e temperadas. Morcegos e aves podem ser importante fonte externa de energia, na forma de guano e cadáveres, e em alguns ecossistemas serão a principal ou única fonte de energia.

A frequência e magnitude de entradas de energia no ecossistema da caverna tornam-se importantes para manutenção das populações de organismos. Em áreas de clima frio com movimento de água restrito ao degelo da primavera, a atividade biológica é faseada para seguir o influxo de água e matéria orgânica, enquanto em outras épocas pode ser amplamente inativa. Em áreas com forte precipitação sazonal, os organismos precisam se adaptar para sobreviver à dessecação por até seis meses; talvez mais se a variabilidade climática for alta. A fauna das cavernas em áreas tropicais é menos restrita e pode estar ativa durante todo o ano, embora a reprodução possa ser faseada para reduzir a

competição por recursos. É importante reconhecer que riqueza de espécies associada à matéria orgânica nem sempre reflete riqueza da fauna troglóbia onde a matéria orgânica está presente. Os troglóbios ocorrem em áreas de cavernas pobres em alimentos e menos frequentemente em cavernas tropicais onde o material orgânico é mais disperso. Grandes mudanças na magnitude e na frequência das entradas de água podem ter sérias consequências para a biologia das cavernas e são comuns em áreas rurais onde a água cárstica é desviada ou superutilizada, ou se as mudanças na superfície, como o desmatamento da vegetação, alteram a quantidade e a qualidade da água de percolação.

A passagem da caverna torna-se equivalente ao alcance do riacho, bem como a unidade fundamental de gestão. Uma passagem com córrego corrente deve ser gerenciada de forma diferente da passagem de nível superior que raramente, tem água corrente. A conectividade desses tipos de passagem torna-se importante para a compreensão dos fluxos de massa e energia em qualquer sistema de cavernas. Passagens de cavernas relíquias, de origem hipógena ou em paleo cárstico têm conectividade baixa e pouca capacidade de recuperação após uma perturbação. Passagens que alargam periodicamente possuem alguma chance de recuperação, dependendo da frequência das perturbações. Passagens ativas de riachos com um fluxo significativo de sedimentos, carbono orgânico e alguns particulados podem lidar com distúrbios e sustentar ecossistemas resilientes.

Pode haver cavidades cheias de água profundas no carste que tenham origem hipógena (formada por águas subterrâneas ascendentes). No Aquífero Edwards, Texas, existem locais que podem estar a mais de 1.000 m abaixo do lençol freático e preenchidos com água. Com maior número conhecido de espécies adaptadas, eles possuem fauna única não derivada de insumos de superfície. Eles são suscetíveis à extração de água e aos impactos potenciais de poços de água mal conservados e abandonados. Mais de sessenta espécies aquáticas são conhecidas apenas de poços artesianos, incluindo dois bagres cegos.

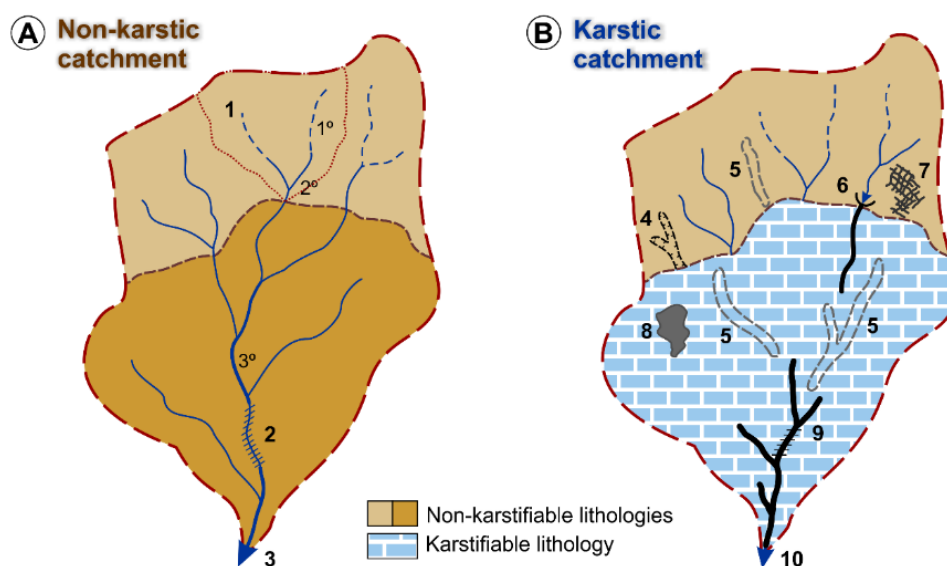
Um sistema hidrológico cárstico individual (ou sistema de cavernas) pode conter vários componentes ou tipos de passagem, desde passagens de fluxo ativas até inativas, de nível superior, bem como passagens de relíquias mal conectadas. Cada um requer uma prescrição de gerenciamento diferente, mas deve ser integrado em nível de bacia ou sub-bacia onde considerações de caminhos de fluxo, fontes de energia, tipos e regimes de perturbação e estratégias de mitigação podem ser enunciadas. No nível mais amplo de toda a bacia hidrográfica contribuinte, os componentes cársticos e não cársticos devem ser avaliados em termos de fluxos de matéria e energia e prováveis perturbações e/ou fontes de poluição.

Esquema de conectividade e níveis de energia para componentes de sistemas cársticos

Componente do sistema Karst	Conectividade com a superfície	Níveis de energia e fluxo
Coletor de fluxo ativo	Alto	Inundações altas e regulares trazendo detritos lenhosos grosseiros, partículas e carbono orgânico dissolvido (DOC)
Outra fonte de recarga concentrada, principalmente depressões fechadas	Alto	Altos, os volumes de água são comumente menores do que os dos córregos que afundam, mas transportam detritos vegetais, particulados e DOC
passagem de fluxo ativo	Alto	Inundação alta e regular trazendo algumas partículas e DOC
Nascente	Alto	Saídas altas e regulares de DOC e partículas comuns
Passagem de corrente inativa (nível superior)	Médio	Enchentes médias e periódicas trazendo carbono orgânico dissolvido
Caverna de relíquias (antiga passagem de riacho)	Médio	A água de percolação traz DOC em áreas úmidas; o fluxo de carbono é limitado em áreas mais secas com percolação limitada. Guano pode ser significativo
Meso-cavidades ou habitats subterrâneos rasos subterranean habitats	Médio	Conectividade com passagens de riachos, refúgio importante
caverna hipogênica	Baixo	Ecossistemas baseados em enxofre e ferro, fluxo de carbono localizado
Paleocarste	Baixo	Muito baixo, fluxo ausente

Um método de alcançar tal dimensionamento de gerenciamento é com uso de modelos espaciais. O Índice de Distúrbios Cársticos, desenvolvido pela primeira vez por van Beynen e Townsend (2005), é para avaliar impactos humanos em paisagens cársticas. Emprega cinco categorias de índices ambientais – geomorfologia, hidrologia, atmosfera, biota e cultural – a partir dos quais podem ser definidos níveis ou faixas de perturbação. Em princípio, os indicadores em cada categoria devem ser de baixo custo, facilmente reproduzíveis e responsivos a mudanças nas condições ambientais. As fontes de dados incluem pesquisas de campo, dados espaciais, mapas topográficos, fotografias aéreas e opiniões de especialistas locais e funcionários do governo. A pontuação dos indicadores pode ser semiquantitativa (dados classificados, áreas categorizadas ou porcentagem de cobertura) ou qualitativa (tipo de assentamento ou desenvolvimento de caverna). Um indicador pode ser descartado se não for relevante para a área em questão. O Índice de Perturbação Total é calculado tomando a soma de todas as pontuações obtidas e dividindo pela pontuação total máxima possível, para produzir uma fração. A vantagem de um índice é que as partes interessadas podem examinar cada indicador e ver como ele foi derivado, enquanto o estado geral do ambiente cárstico é reduzido a uma categoria facilmente comparável para gestores ambientais e formuladores de políticas.

Sistemas hidrológicos cársticos são particularmente vulneráveis à contaminação por conexões rápidas entre a superfície e o aquífero. A vulnerabilidade intrínseca é determinada por propriedades ambientais cársticas que influenciam o seu grau. Estes dizem respeito ao 'encanamento' do carste em termos de espessura do solo e taxas de infiltração, a densidade de fratura da zona epikarst, a distribuição de dolinas e variações na condutividade hidráulica. Juntos eles determinam a vulnerabilidade potencial, enquanto o uso da terra e infraestrutura (estradas, abastecimento de água, aterros sanitários ou fontes pontuais de poluição) cria a vulnerabilidade específica. Essas abordagens para avaliar a vulnerabilidade são integradas espacialmente nos modelos de vulnerabilidade das águas subterrâneas (GVM), que visam quantificar a vulnerabilidade do aquífero à contaminação induzida pelo homem. Um dos GVMs mais bem aceitos, o EPIK foi projetado especificamente para aquíferos cársticos. Qualquer usuário do GVM precisa ter confiança na validade dos parâmetros de entrada usados, pois alguns são muito difíceis de quantificar.



Comparação da organização espacial de bacias não cársticas e cársticas. Legenda: 1 – sub-bacia hidrográfica; 2 – alcance do fluxo; 3 – saída da bacia de drenagem; 4 – caverna sem teto; 5 – caverna de relíquias; 6 – sumidouro ativo; 7 – caverna hipógena; 8 – paleocarste; 9 – passagem pela caverna; 10 – nascente cárstica. Diagrama de Maria-Laura Tîrlă.

Diretrizes

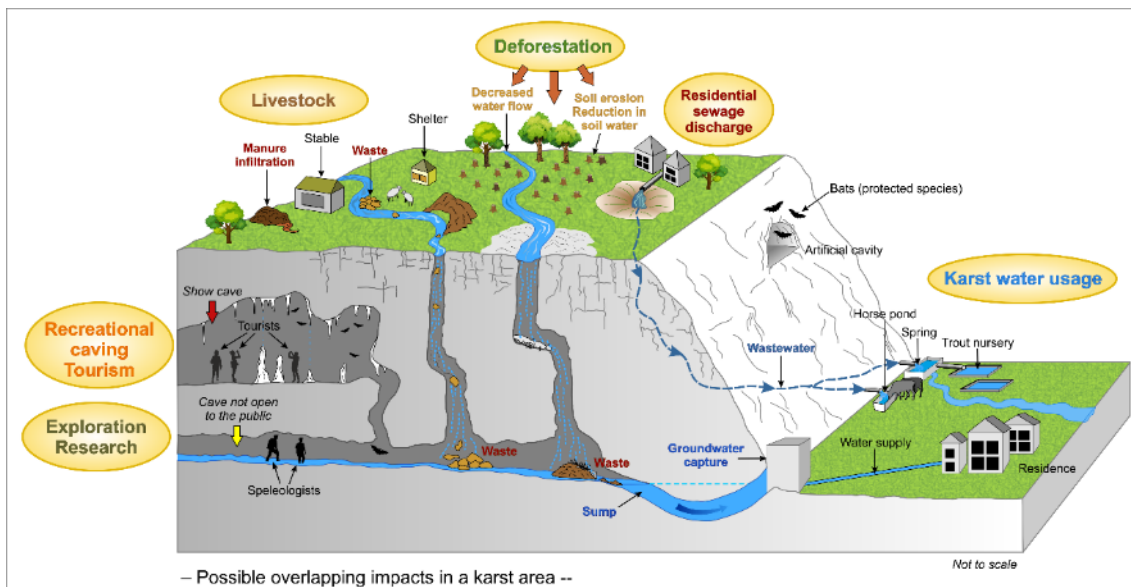
- (8) É improvável que uma única prescrição de manejo aplicada a um sistema hidrológico cárstico complexo (ou sistema integrado complexo de cavernas) proteja adequadamente os processos geomorfológicos e ecológicos em andamento em diferentes partes do sistema. O planejamento da gestão deve, portanto, levar em consideração os fatores de escala no sistema cárstico.
- (9) A biologia da maioria das cavernas é amplamente dependente de fontes de alimentos trazidas do ambiente de superfície. O acesso de alimentos e energia de fontes externas é crítico para a sobrevivência de populações viáveis de organismos, e a frequência e magnitude das entradas de energia no ecossistema da caverna são essenciais para a manutenção das populações de organismos.

- (10) *Um sistema hidrológico cárstico individual (ou sistema de cavernas) pode conter vários componentes ou tipos de passagem, desde passagens de fluxo ativas e inativas, de nível superior, bem como passagens de relíquias mal conectadas. Cada um exigirá uma prescrição de gerenciamento diferente.*
- (11) *Em área cárstica, algumas seções podem ser mais sensíveis à contaminantes das águas subterrâneas, enquanto outras áreas são menos. É necessário planejamento amplo do uso da terra para proteger os recursos hídricos subterrâneos.*



Uma seção altamente ativa da passagem da caverna que sofre inundações regulares em Škocjanske Jame, Eslovênia. O rio Reka que atravessa a gruta pode subir mais de 50m, atingindo o nível do caminho turístico que se vê no canto superior esquerdo. Škocjanske Jame é um local Ramsar que fica dentro da propriedade do Patrimônio Mundial das Cavernas Škocjan e da Reserva da Biosfera Karst da UNESCO. Foto de Csaba Egri.

Atividades Humanas no Carste: Impactos e Mitigação



Alguns dos impactos das atividades humanas em uma área cárstica. Diagrama de Maria-Laura Tîrlă e Bogdan Bădescu.

Caving recreativo e de aventura

Introdução

Os humanos visitam cavernas desde as origens de nossa espécie, como evidenciado pela arte e artefatos deixados para trás. As entradas eram mais amplamente utilizadas, pois forneciam um bom abrigo, mas também havia visitas à zona escura além da entrada, provavelmente para fins rituais ou em busca de água, como era feito pelos maias na América Central. Embora os humanos tenham continuado a viver nas áreas de entrada das cavernas até os dias atuais, essa fase inicial foi seguida por uma em que as cavernas se tornaram assuntos de mitos e eram comumente temidas como o lar de monstros imaginários e espíritos malignos ou forneciam portais para o Inferno. Na Europa, esse período dominado pela ignorância e superstição continuou até o século 16, que foi uma época de viagens, investigações e o início das ciências naturais, pelo menos para aqueles que tinham riqueza e recursos suficientes para essas atividades.

Visitas históricas a cavernas para fins investigativos foram documentadas principalmente na Europa, mas também ocorreram na China, onde Xu Xiake (1587–1641) foi o primeiro cientista cárstico e espeleólogo da região. Gradualmente, as pessoas começaram a ver o submundo como um lugar a ser explorado e apreciado, em vez de um lugar a ser temido. As cavernas foram inicialmente estudadas por cientistas como arqueólogos, biólogos, geólogos e geógrafos que trabalham principalmente fora das cavernas. No século 19, alguns indivíduos começaram a se concentrar principalmente em cavernas e a se referir a si mesmos como espeleólogos. Mais ou menos na mesma época houve um crescimento da 'exploração', com visitas a 'terras estrangeiras', subidas de montanhas e, inevitavelmente, descidas de cavernas. No século 21, restam poucos lugares facilmente acessíveis na Terra que não receberam a visita de humanos e poucas montanhas que permanecem não escaladas, mas todos os anos os espeleólogos exploram e pesquisam muitas dezenas de quilômetros de cavernas nunca antes penetradas. Atrás dos primeiros exploradores vieram outros cujas visitas eram puramente recreativas e de lazer, o que acontecia tanto nas cavernas quanto em grande parte da superfície terrestre. Há um ditado, supostamente do século 15; "Assim que um homem encontra uma maneira de se divertir, outro encontra uma maneira de ganhar dinheiro com isso", e cresceu uma indústria na qual os guias oferecem seus serviços para aqueles que desejam participar de aventuras ao ar livre (inclusive subterrâneas). Acredita-se que a mais antiga caverna de exibição conhecida no mundo seja a Reed Flute Cave na China, que contém inscrições de 792, na época da Dinastia Tang. O primeiro passeio de caverna registrado na Europa foi na Caverna de Postojna, na Eslovênia, em 1213. A Caverna de Vilenica, também na Eslovênia, cobra taxas de entrada dos visitantes desde 1633.

Com essa história em mente, no século 21, podemos identificar vários grupos amplos de indivíduos que entram em cavernas:

- o público em geral visitando cavernas turísticas ou visitando para fins religiosos.
- espeleólogos envolvidos na exploração e documentação de cavernas.
- espeleólogos recreativos (acesso gratuito).
- viagens de aventura (conduzidas por instrutor).
- Cientistas que realizam pesquisas subterrâneas ou usam material de cavernas em suas pesquisas.
- usuários 'incidentais' de cavernas para quem a caverna não é o objetivo principal de sua visita, por exemplo, aqueles que participam de eventos que incluem uma seção de passagem pela caverna.

Grutas de uso religioso dispõem de luz artificial e passarelas para a visita de qualquer público, algumas mais afastadas e até acesso para deficientes. Em contraste, aqueles em visitas de aventura, recreativas e exploratórias usam uma fonte de luz individual no capacete e roupas e equipamentos de proteção. A espeleologia recreativa envolve visitas a locais já explorados e pesquisados, enquanto os exploradores de cavernas visam obter acesso a passagens desconhecidas, pesquisar e documentar suas descobertas. Isso pode ser conseguido de várias maneiras, inclusive montar uma expedição para área inexplorada, remover bloqueios no final de passagens conhecidas, escalada interna ou mergulho. Esses usuários podem ser úteis para examinar impactos e necessidades de manejo. Deve-se reconhecer que uma pessoa pode participar de mais de uma das atividades. Por exemplo, um espeleólogo pode passar parte de seu tempo em exploração, mas também desfrutar de visitas recreativas, bem como participar (ou estar envolvido na liderança) de viagens de aventura, e é provável que goste de visitas a cavernas turísticas.

Do ponto de vista da gestão, é provável que as áreas cársticas tenham vários tipos de uso. Primeiro serão as cavernas de significado religioso. Em segundo lugar, estão os locais de aventura, muitos terão recebido alguma modificação para aumentar a segurança. Por fim, a maior parte dos locais são reservados para exploração recreativa. Cavernas religiosas são consideradas em outros lugares, portanto, esta seção se concentra em espeleologia de aventura, espeleologia recreativa e exploração. Para muitas cavernas subdesenvolvidas ou 'cavernas selvagens', a espeleologia é o fator de risco imediato a ser considerado quando se trata da conservação, especialmente onde o status de área protegida prevê uma gestão de captação favorável.

Exploração e documentação de cavernas

Em contraste com outros relevos, a extensão da passagem em cavernas cresce quilômetros a cada ano como resultado dos esforços de exploradores. Tais esforços podem ser divididos em dois grupos: 1) exploração por meio de entrada conhecida e 2) exploração que requer modificação de entradas da caverna. Países com uma longa história de atividades espeleológica, existem poucas entradas de cavernas abertas que não tenham sido exploradas e documentadas. Em outros lugares, expedições de espeleologia ainda são capazes de documentar sistemas desconhecidos. Em áreas tropicais, é provável que as cavernas tenham sido acessadas por pessoas locais, a menos que o acesso seja particularmente difícil, por exemplo, em poços profundos ou entradas no fundo de dolinas íngremes. Exploradores dessas cavernas têm a responsabilidade de documentar as descobertas, incluir informações sobre características de interesse científico, e de medir para garantir que a caverna seja conservada (consulte o Código de [Ética da UIS](#)). É essencial que povos locais se envolvam, a fim de ensinar sobre as localizações das cavernas, bem como quaisquer valores sagrados ou outros que possam ter, para fornecer informações sobre os valores das cavernas para os exploradores e a comunidade em geral, e informá-los sobre como esses valores combinados podem ser protegidos.

Em cavernas conhecidas, ainda pode haver passagens não acessadas por exploradores, o motivo mais comum é que a passagem não pode ser alcançada, geralmente porque está bem acima da passagem conhecida ou está cheia de sedimentos ou água. As passagens altas são acessadas por escaladores que geralmente precisam colocar parafusos ou outras ajudas fixas para garantir uma subida segura. Isso inevitavelmente resulta em cicatrizes menores nas paredes da passagem. A exploração de passagens cheias de água é realizada por mergulhadores em cavernas que podem obter acesso a passagens cheias de ar. Onde essas passagens são extensas, pode haver pressão de não mergulhadores para o desenvolvimento de entradas alternativas que não envolvam mergulho, o que pode ser problemático se as novas passagens forem de alto valor estético ou científico.

Muitas passagens de cavernas 'novas' são encontradas por modificação de passagem, comumente conhecida como 'escavação'. As técnicas empregadas podem incluir remoção de sedimentos, engenharia para estabilizar rotas através de áreas de colapso, desvio de córregos, drenagem de poços estáticos (passagens cheias de água) e uso de explosivos para ampliar passagens estreitas. Tais obras devem ser restritas à modificação mínima necessária para obter acesso e somente após uma consideração completa dos impactos potenciais a curto e longo prazo, e se a importância da descoberta superar os impactos causados pelas modificações.



Explorando um poço profundo no Abisso Michelle Gortani, planalto de Canin, Itália. Foto de Csaba Egri.

Em áreas protegidas, é importante que os gestores exijam o consentimento para todas as atividades de escavação e, em alguns países, foram desenvolvidas diretrizes específicas. Um documento produzido pela Derbyshire Caving Association em parceria com a Natural England – o consultor do governo do Reino Unido para a conservação da natureza – aborda especificamente a escavação em Locais de Interesse Científico Especial (consulte Recursos da Internet). Ao considerar as aplicações, deve-se reconhecer que escavações bem-sucedidas aumentam o interesse científico de um local, fornecendo acesso a novas passagens e recursos de interesse. No entanto, aqueles que solicitam escavações devem demonstrar um compromisso em minimizar os impactos, por exemplo, cavando valas cuidadosamente através de uma passagem cheia de sedimentos, em vez da remoção total do sedimento. Se a escavação for bem-sucedida, deve haver um requisito para documentar e descrever completamente as descobertas, incluindo um mapa e fotografias. Essas informações devem ser enviadas ao gerente da área protegida, que pode decidir se é necessária uma investigação científica de acompanhamento. No momento em que uma nova caverna ou seção de caverna é inserida, deve-se considerar a melhor forma de conservá-la. Onde a descoberta contém áreas sensíveis, os exploradores devem considerar a melhor rota por essas áreas e garantir que ela esteja claramente marcada para aqueles que seguem. Deve haver um requisito para remover todos os equipamentos redundantes após a conclusão de uma escavação, especialmente se a escavação não for bem-sucedida. Com exceção de áreas remotas, cavernas e passagens recém-descobertas podem atrair forte interesse dentro da comunidade de espeleologia e a janela de oportunidade para proteger o local antes que seja impactado pode ser bastante curta.



A exploração da caverna às vezes requer a remoção de sedimentos para acessar a passagem além. Ambas as imagens mostram poços sendo afundados através de sedimentos e o uso de barras e pranchas de andaimes para evitar o colapso. Na imagem da esquerda, o poço foi escavado por 4 m de profundidade até uma fenda aberta levando a 50 m de passagem com espeleotemas finos. Na imagem da direita, o tubo à esquerda da figura foi instalado para melhorar a ventilação. Nenhum sedimento foi removido da caverna, mas foi ensacado e empilhado no espaço disponível. Após cerca de 5 m, a escavação abriu uma passagem aberta de alto valor científico. Ambas as escavações foram em sítios de Interesse Científico Especial e foram realizadas com permissão das autoridades estatutárias. A escavação à direita fica no final de uma caverna turística e foi realizada com o incentivo do proprietário. Fotos de Rob Eavis.

A maioria dos envolvidos na exploração de cavernas publica detalhes de suas descobertas em jornais, boletins ou, cada vez mais, online. Esses relatórios geralmente contêm mapas detalhados e descrições que fornecem importantes fontes de informações sobre os recursos da caverna. Em muitas áreas cársticas, praticamente tudo o que se sabe sobre as cavernas é resultado de esforços de grupos de espeleologia. Embora algumas áreas protegidas dependam da comunidade de espeleologia para obter informações sobre cavernas e, em alguns casos, façam parceria com eles em aspectos de gestão, um estilo de gestão menos reativo é possível onde as agências estatais desenvolvem conhecimentos espeleológicos internos. Isso pode ser feito empregando pessoal científico especializado para aconselhar sobre assuntos relacionados a cavernas e desenvolvendo a capacidade de espeleologia no nível operacional por meio de treinamento de pessoal.



A entrada a montante da Caverna Xe Bang Fai, Hin Nam No National Park, Laos. A caverna está aberta para passeios de aventura desde 2012. Foto de John Spies.

Espeleologia recreativa

A espeleologia recreativa (às vezes chamada de esportiva) é essencialmente “cavernar” puramente pelo prazer de cavernar e envolve visitas a cavernas conhecidas. Como tal, é semelhante a outras atividades de lazer ao ar livre, como caminhar ou escalar. Em muitos países americanos e europeus, a espeleologia recreativa (em oposição à exploração) começou no início do século 20, é realizada em clubes ou grupos que variavam de alguns indivíduos com ideias semelhantes a grandes grupos bem organizados. Com aumento da disponibilidade de equipamentos pessoais e, principalmente, após adoção de técnicas de corda estática, tornou-se possível para um pequeno número de indivíduos realizar visitas a cavernas profundas e complexas sem depender de um clube de apoio. No entanto, no século 21, a maioria dos espeleólogos recreativos continua sendo membro de pelo menos um clube. O acesso às cavernas é um requisito fundamental para a espeleologia recreativa e, em muitos países, os clubes de espeleologia se uniram para formar órgãos regionais com o objetivo principal de manter e melhorar o acesso às cavernas, com a maioria considerando a conservação de igual importância. Órgãos nacionais também costumam fornecer cobertura de seguro aos membros, bem como para proprietários de terras com cavernas em suas propriedades. Em 1965, a Union Internationale de Spéléologie (UIS) foi formada como órgão internacional de espeleologia e espeleologia e, em janeiro de 2022, havia 57 países membros. Dentro do UIS, há uma Comissão de Proteção Karst e Caverna, cujos membros contribuíram para estas Diretrizes.

Embora a maioria dos espeleólogos recreativos aprecie a beleza, fragilidade e importância científica do ambiente subterrâneo, nem sempre foi assim e muitas cavernas sofreram danos graves, tanto deliberadamente quanto por ignorância. Um problema particular no século 21 foi um aumento no que pode ser chamado de 'cavidade rápida', onde o objetivo é chegar a um ponto específico da caverna e retornar à superfície no menor tempo possível, com pouca consideração dos impactos. O vandalismo deliberado geralmente envolve a remoção de espeleotemas como lembranças, a destruição de sequências de sedimentos clásticos durante lutas na lama ou para criar esculturas e slides e a inscrição de grafites. Quando uma caverna é protegida ou situada em uma área protegida, às vezes podem ser tomadas ações legais se os culpados forem identificados (houve processos judiciais bem-sucedidos nos EUA), mas isso não pode compensar a perda. Em uma escala de tempo humana, espeleotemas e sequências de sedimentos clásticos são insubstituíveis. Danos inadvertidos resultam de uma falha em entender e respeitar o ambiente da caverna. Em particular, muitos espeleólogos que reconhecem o valor dos espeleotemas e a necessidade de protegê-los geralmente falham em apreciar a importância científica dos sedimentos clásticos, tratando-os como 'lama'.



Espeleotemas delicados de palha em Castle Grotto, Hollow Hill Cave, Waitomo, Nova Zelândia. Estes foram protegidos por uma política de acesso cuidadosa e diretrizes de espeleologia de impacto mínimo. Foto de John Gunn.

A partir da década de 1990, a preocupação com os impactos dos espeleólogos nas cavernas levou ao desenvolvimento em muitos países de Códigos de Ética, de Conservação de Cavernas e de prospecção de Impacto Mínimo. O objetivo desses códigos é encorajar os espeleólogos a pensar em cada viagem que fazem em termos de conservação, bem como de segurança, destacando o importante papel de conservação de muitos organismos nacionais e locais de espeleologia. Em um país com um código estabelecido, os espeleólogos devem estar familiarizados e seguir esse código. Em áreas protegidas, a adesão ao código deve ser obrigatória. Nos países onde não há código estabelecido, os gerentes de áreas protegidas devem estabelecer um código para cavernas em sua área com base em material relevante de códigos publicados. Exemplos destes são dados abaixo.

EXEMPLOS DE CÓDIGOS DE CAVERNAS

A União Internacional de Espeleologia (UIS) tem um 'Código de Ética para Exploração de Cavernas e Ciência no Estrangeiro' [<https://uis-speleo.org/wp-content/uploads/2020/03/Code-of-Ethics-of-the-UIS-English-Language.pdf>]. O título é um pouco enganador, pois é documento importante que abrange 'Expedições de espeleologia a países estrangeiros', bem como 'Aventura, geoturismo e ecoturismo' e 'Espeleologia geral em seu próprio país'. Existem diretrizes para o 'Desenvolvimento de Grutas Turísticas' e para 'Amostragem Científica', sendo que ambos são tópicos separados no documento UIS.

A Federação Espeleológica Australiana produziu primeiros 'Códigos de espeleologia de impacto mínimo' em 1995 e a versão mais recente (2010) está em <https://www.caves.org.au/administration/codes-and-standards>. Este código é dividido em duas seções: uma relativa às visitas gerais às cavernas e a outra à exploração de caverna ou seção de caverna recém-descoberta.

A Associação Britânica de Cavernas (UK) produziu 'Diretrizes de espeleologia de impacto mínimo' em parceria com Natural England, o consultor do governo do Reino Unido para o ambiente natural na Inglaterra [<https://british-caving.org.uk/our-work/cave-conservation/>]. As diretrizes visam minimizar o impacto, mas também incluem recomendações para trabalhos de conservação e restauração tanto em cavernas quanto na superfície.

O Departamento de Conservação da Nova Zelândia tem um 'Código de cuidados de espeleologia' [<https://www.doc.govt.nz/parks-and-recreation/things-to-do/caving/caving-guidelines/>] que promove a espeleologia de uma forma que minimiza o impacto sobre o meio ambiente e outras pessoas.

A Sociedade Nacional de Espeleologia (USA) tem conjunto de 'Diretrizes de espeleologia de impacto mínimo' atualizadas regularmente, mais recentemente em fevereiro de 2021, para levar em consideração a pandemia de Covid [<https://caves.org/conservation/cavingcode.shtml>]. Os autores destacam que as diretrizes devem ser atualizadas à medida que se aprende mais sobre ambientes de cavernas e os espeleólogos avaliam e redefinem sua conduta em espeleologia.

Durante o século 20, era comum que informações sobre cavernas, incluindo entradas, fossem restritas a membros de clubes de espeleologia, o que fornecia alguma proteção. Este ainda é o caso em alguns países, particularmente para cavernas frágeis. Nos EUA, a Lei Federal de Proteção de Recursos de Cavernas de 1988 cobre cavernas em terras federais, diz que a localização de cavernas significativas não pode ser disponibilizada ao público. No entanto, em outros lugares, o interesse em espeleologia recreativa levou à publicação de guias que fornecem informações básicas e, em alguns casos, detalhadas. A internet tem visto um aumento de informações sobre cavernas, incluindo locais exatos de entrada, permitindo que qualquer pessoa com um GPS localize-as facilmente. Ao mesmo tempo, tem havido um crescimento maciço no uso de mídias sociais e um crescimento no número de indivíduos e grupos sem treinamento ou experiência, que decidem visitar cavernas e postar vídeos de suas visitas. Uma consequência tem sido o aumento de acidentes e danos em cavernas, tanto deliberados, como grafites e remoção de 'souvenirs', quanto inadvertidos, incluindo o não cumprimento de rotas em torno de sedimentos clásticos ou áreas com espeleotemas abundantes, bem como tentativas de registrar a rota para fora da caverna usando montes de pedras ou marcando as paredes da caverna. Este tipo de atividade representa um desafio para os gestores de áreas protegidas, pois os indivíduos não fazem parte da comunidade de espeleologia e, portanto, desconhecem os códigos de conservação. A sinalização nas entradas das cavernas ou dentro das cavernas pode ajudar, mas o único meio de fornecer proteção total é proteger a entrada da caverna ou o acesso a áreas sensíveis dentro da caverna (consulte Classificação de cavernas como uma ferramenta de gerenciamento). O projeto dos portões das cavernas requer consideração cuidadosa para garantir que sejam seguros e não prejudiquem desnecessariamente a estética, impeçam o movimento da fauna, do ar ou da água ou inibam a extração de uma pessoa ferida.

O mergulho em cavernas é uma ferramenta exploratória e, como tal, é discutido em Exploração e documentação de cavernas, mas em alguns países é realizado como uma recreação. Em contraste com o mergulho exploratório em cavernas, que é amplamente realizado por indivíduos com experiência em espeleologia, o mergulho recreativo em cavernas é mais comumente realizado por mergulhadores em águas abertas que podem não entender completamente os riscos que a caverna representa para eles ou os riscos que eles representam para o ambiente de caverna subaquática.

Espeleólogos recreativos envolvidos no esporte há mais anos geralmente se especializam em aspectos da espeleologia, como fotografia subterrânea, mapeamento, resgate, ciência ou exploração. Isso tem benefícios mais amplos, pois a fotografia pode ajudar a promover a conscientização sobre os valores das cavernas, apoiando os esforços de conservação; mapas de cavernas são ferramentas essenciais para gerentes, cientistas e equipes de resgate; a preparação para resgate traz benefícios de segurança e conservação; colaborações entre espeleólogos e cientistas aumentam o conhecimento desses sistemas e reduzem o risco de cavernas serem impactadas. Grupos de espeleologia também são conhecidos por iniciar projetos de 'cuidados cársticos' para limpar o lixo da caverna ou restaurar recursos danificados. Embora as atitudes dos espeleólogos variem, há muitos exemplos de relacionamentos altamente construtivos entre administração e grupos locais de espeleologia. Construir essas relações tem benefícios óbvios, entre eles encorajar o cumprimento das condições de acesso. Algumas áreas protegidas abordam isso de forma estruturada, envolvendo as partes interessadas em comitês de gestão ou grupos de trabalho. Isso cria oportunidades de diálogo sobre questões controversas, incluindo a chave para muitos espeleólogos, as restrições de acesso à caverna. Qualquer imposição de novas restrições de acesso provavelmente será recebida negativamente, podendo não ser acatada se a justificativa não for compreendida pela comunidade espeleológica.



Lago Chandelar, Caverna Lechuguilla, Propriedade do Patrimônio Mundial do Parque Nacional Carlsbad Caverns, Novo México, EUA. Como a caverna tem um alto valor científico e é vulnerável a danos por exploradores, o acesso é limitado a pesquisadores científicos aprovados, equipes de pesquisa e exploração e viagens relacionadas ao gerenciamento do Serviço de Parques Nacionais. Um plano de manejo foi publicado (consulte Recursos na Internet). Foto de Rainer Straub.

Espeleologia de aventura

A espeleologia de aventura (também conhecida como 'espeleologia instruída' ou 'espeleo selvagem') abrange uma ampla variedade de experiências subterrâneas comerciais muito organizadas. Muitos dos que oferecem uma experiência de espeleologia de aventura são instrutores freelance (autônomos) que desempenham um papel semelhante ao de guias de montanha e trilhas e outras ocupações relacionadas na superfície. Membros do público que gostariam de uma experiência de espeleologia e, menos comumente, espeleólogos recreativos que gostariam de um guia em um complicado sistema de cavernas, empregam instrutores que fornecem todo o equipamento necessário para a caverna escolhida. Os instrutores de espeleologia também são empregados em centros de educação ao ar livre que atendem principalmente a grupos escolares, embora também existam centros e grupos que fornecem experiências corporativas de 'formação de equipes' e 'gerenciamento' para adultos. Além disso, algumas cavernas turísticas oferecem espeleologia de aventura como complemento do(s) passeio(s) disponível(is) ao público em geral. Embora a maioria dos instrutores de cavernas receba pagamento por seus serviços, há alguns que fornecem uma experiência de aventura em cavernas de forma voluntária, principalmente para organizações como o Movimento Escoteiro.

Em países desenvolvidos, um alto nível de treinamento de segurança para instrutores é uma exigência legislativa ou de seguro. Na Austrália e Nova Zelândia, instrutores são obrigados a realizar treinamento específico, geralmente por meio do curso de um ano em período integral que cobre aspectos do guia de aventura, incluindo primeiros socorros, resgate e interpretação. Embora a segurança de quem está sendo guiado seja importante, é essencial dar igual peso à segurança da caverna, enfatizando a importância da conservação do patrimônio geológico e dos ecossistemas. Infelizmente, algumas cavernas carregam marcas da má prática do passado, quando era comum o incentivo de grupo a participar de lutas na lama, para 'melhorar' a experiência subterrânea. Isso resultou em danos a importantes sedimentos clásticos e lama aderida a espeleotemas e paredes de cavernas.

Onde houver um órgão nacional de espeleologia, esta organização provavelmente está em melhor posição para fornecer certificação de instrutor e garantir que a segurança e a conservação recebam a mesma atenção. A British Caving Association (BCA) oferece duas certificações reconhecidas nacionalmente para instrutores de espeleologia e guias que conduzem pessoas no subsolo - o Local Cave and Mine Leader Assessment Scheme (LCMLA) e o Cave Instructor Certificate (CIC). O Esquema LCMLA "oferece um prêmio que reconhece a competência daqueles que desejam assumir a responsabilidade por outros no subsolo, em benefício de empregadores ou outras autoridades. As principais considerações são igualmente a segurança do grupo e a conservação de um ambiente frágil". Existem também grupos locais de instrutores no Reino Unido, como o Peak Instructed Caving Affiliation (PICA), que cobre a área de espeleologia do English Peak District e é afiliado à Derbyshire Caving Association, um dos conselhos regionais da BCA. Parte da missão do PICA é "Divulgar informações de segurança e conservação sobre as cavernas e minas que podem ser usadas para viagens lideradas pelo LCMLA e CIC em nossa região".



A Caverna dos Brejões, no semiárido brasileiro, é frequentemente utilizada para o turismo de aventura. Possui grandes passagens e espeleotemas maciços. Foto de Philippe Crochet.

Referência a locais de viagens guiadas por instrutores é importante pois reconhece que existem locais que podem ser inadequados para a aventura, seja porque existem riscos de segurança ou porque existe risco de danos ao ambiente. Uma abordagem complementar em cavernas mais extensas é realizar avaliação de vulnerabilidade usada para dividir as cavernas em zonas. Passagens consideradas robustas, com poucas características interessantes suscetíveis a danos, podem ser zoneadas para o tipo de espeleologia de aventura para indivíduos com pouca ou nenhuma experiência. Passagens com valor médio serão apropriadas apenas para espeleologia de aventura se os participantes tiverem experiência ou se a proporção de instrutor(es) por participantes for tal que o risco de danos possa ser minimizado. Haverá algumas cavernas, e algumas áreas de cavernas, onde o risco de danos ao geo patrimônio ou ecossistemas é tão alto que não são adequados para espeleologia de aventura. Ao realizar avaliações de vulnerabilidade, é importante considerar a capacidade de carga de uma caverna, pois a visita humana inevitavelmente tem impactos cumulativos nos valores físicos e biológicos de uma caverna ou seção de caverna.

Embora atividades de pequena escala representam a maior parte da aventura em cavernas, há um número crescente de empreendimentos comerciais que oferecem o que é chamado de experiências de aventura em cavernas "de alto nível", por exemplo, aquelas que oferecem "rafting em águas negras" e experiências semelhantes em a área de Waitomo da Nova Zelândia. Uma das mais longas e mais caras visitas guiadas às cavernas é a experiência de quatro dias oferecida pela Oxalis Adventure Company em Hang Son Doong, Vietnã, que possui uma das maiores passagens de cavernas do mundo em volume e fica dentro do Parque Nacional Phong Nha-Ke Bang. Esses empreendimentos comerciais têm mais em comum com as cavernas turísticas do que com outras formas de espeleologia de aventura, pois exigem investimentos em infraestrutura, o número de visitantes é alto e geralmente houve modificações significativas na infraestrutura das cavernas para melhorar a segurança ou aumentar a experiência do visitante. Exemplos incluem a instalação de auxiliares de escalada fixos e de tirolesas dentro da caverna.



A aventura em cavernas agora inclui visitas a cavernas de gelo com seu próprio conjunto especial de desafios. Eiskogelhöhle, Áustria. Foto de Csaba Egri.

Classificação de cavernas como ferramenta de gestão

Para gerenciar cavernas é necessário 1) ter inventário da cavernas e seus conteúdos e 2) ter sistema de classificação para identificar adequação aos diferentes usos. Para cavernas onde há poucos recursos ou extensão horizontal ou vertical limitada, a caverna inteira é a unidade lógica de gerenciamento para muitos propósitos. No entanto, para cavernas longas, e particularmente aquelas que apresentam variabilidade interna em seus valores e sensibilidade aos impactos, uma abordagem de zoneamento provavelmente será mais apropriada. Uma passagem de fluxo ativa sujeita a inundações, por exemplo, provavelmente será mais robusta à impactos do que uma passagem seca de nível superior. Ao considerar todo o nível da caverna, o local deve ser considerado em relação à área que o circunda, ao restante da área onde está localizado e ao contexto nacional e global. Dentro da caverna, essa abordagem é recomendada onde nenhum sistema está instalado no momento:

1. Faça um inventário da(s) caverna(s) e marque as características de interesse particular em uma pesquisa.
2. Avalie a vulnerabilidade de cada tipo de feição, ou seja, a morfologia da passagem da caverna é geralmente robusta, enquanto espeleotemas e sedimentos clásticos são mais propensos a serem facilmente danificados.
3. Identifique usos potenciais, como para espeleologia recreativa, espeleologia de aventura guiada, exploração e pesquisa.

4. Com base nos pontos 1 a 3, identifique as zonas que são adequadas para usos específicos. Um esquema simples que pode ser adotado para atender aos fatores locais é classificar passagens ou áreas de cavernas como:
- *A – Baixa sensibilidade. Áreas da caverna que são consideradas robustas e capazes de resistir a tudo menos à destruição deliberada. Estes são adequados para todos os usos.*
 - *B – Sensibilidade moderada. Áreas onde existem características interessantes que podem ser facilmente danificadas, a menos que sejam tomados cuidados básicos. Essas áreas são adequadas para espeleólogos recreativos que cumprem um código de impacto mínimo. Eles não são adequados para aventura, mas podem acomodar pequenos grupos de espeleólogos com um líder devidamente qualificado. A exploração com o objetivo de encontrar novas passagens e pesquisas científicas são permitidas, sujeitas a proposta de projeto e avaliação.*
 - *C – Alta sensibilidade. Áreas com características de alto valor e facilmente danificadas. O uso dessas áreas deve ser minimizado e deve haver controles para minimizar impactos. Os espeleólogos recreativos são obrigados a fornecer um bom motivo para solicitar acesso (ou seja, fotografia) e podem ser solicitados a visitar um líder que tenha conhecimento específico da caverna ou de seus recursos interessantes. A exploração com o objetivo de encontrar novas passagens e para pesquisa científica só deve ser permitida após uma forma de análise de 'custo-benefício' que avalie o risco de danos contra a probabilidade de um resultado bem-sucedido e o valor das descobertas.*
 - *X – Extremamente sensível. Uma seção da caverna que é de valor muito alto, onde há um alto risco de danos. Essas seções devem ser proibidas, exceto em circunstâncias excepcionais, ou seja, pesquisas que visam entender uma característica específica na área sensível.*

Resgate em caverna

Como em todas formas de recreação ao ar livre, existe o risco de incidente em caverna onde um indivíduo precisa ser resgatado. Existem quatro principais perigos objetivos nas cavernas: hipotermia, colapso de material, enchentes e gases perigosos. Todos os outros perigos são subjetivos. Os exemplos incluem emergências médicas, como um ataque cardíaco, que pode ocorrer em outro lugar, mas que acontece enquanto o indivíduo está no subsolo, um indivíduo ou grupo em uma caverna e incapaz de encontrar o caminho de volta para a entrada ou ficar preso por enchentes e acidentes resultando na incapacidade de uma pessoa. Na maioria dos países onde existe uma história de espeleologia, existem organizações nacionais ou locais de resgate em cavernas que realizam resgates subterrâneos diretamente ou auxiliam os serviços de emergência do estado na realização de um resgate. Os resgates em cavernas geralmente são difíceis, principalmente se envolverem o transporte de uma pessoa ferida e tiverem o potencial de impactar a caverna. A primeira prioridade em qualquer resgate é a segurança e o bem-estar dos socorristas e daqueles que estão sendo resgatados, mas, na medida do possível, o resgate deve impactar minimamente o ambiente da caverna. Onde a equipe de resgate é composta em grande parte ou totalmente por espeleólogos experientes, eles vão querer minimizar seus impactos na caverna e há pelo menos um 'Código de Resgate de Caverna de Impacto Mínimo', que foi produzido em 2006 pela Australian Cave Rescue Commission com uma grande revisão em 2019 ([consulte fontes da Internet](#)).

Impactos biológicos da visita em cavernas

Cavernas fornecem habitat para muitos animais. Os morcegos são os mais conhecidos e mais presentes globalmente. Outros vertebrados são os peixes e salamandras, enquanto os invertebrados adaptados às cavernas são mais comuns. Muitos desses animais têm distribuições restritas. A atividade de espeleologia pode afetar os animais cavernícolas diretamente, como no caso de pequenos invertebrados feridos ou deslocados por pessoas que se deslocam em uma caverna, ou indiretamente, como no caso da introdução de patógenos, nutrientes ou alterações no habitat. É improvável que consequências desses impactos para a biodiversidade sejam totalmente apreciadas sem uma pesquisa adequada. Estratégias de conservação incluem planos de conservação de espécies; informações para aumentar a conscientização sobre práticas de impacto mínimo; restauração de habitat; e restrições de acesso a habitats críticos por meio de zoneamento. Algumas cavernas são ambientes de energia média ou baixa, com entrada pequena de energia em escala de tempo humana. A entrada de um único espeleólogo nessas cavernas pode alterar o equilíbrio de energia afetando o calor, a luz e os nutrientes nelas contidos. Um fator que só se tornou aparente desde a década de 1990 é a introdução potencial de microflora e microfauna por espeleólogos. Os efeitos dos visitantes das cavernas são geralmente cumulativos e possivelmente sinérgicos.

Em contraste com perturbações da superfície, vestígios de atividades humanas em ambientes subterrâneos de média ou baixa energia podem persistir por centenas ou milhares de anos. Por exemplo, o que se acredita ser uma pegada de Cro-Magnon, de 48.000 anos, foi descoberto na superfície de sedimentos na Caverna de Chauvet, na França. Uma preocupação particular é a Síndrome do Nariz Branco (WNS), doença fúngica infecciosa que matou milhões de morcegos na América do Norte e em outros lugares desde sua aparição em 2006. É causada pelo fungo *Pseudogymnoascus destructans*, que têm sido identificados em morcegos na Europa e na China sem causar declínios populacionais.

Preferindo alta umidade, afeta adversamente os morcegos que vivem em cavernas em hibernação. Os sintomas visíveis incluem manchas brancas difusas no nariz e manchas brancas no corpo e asas. Muitas vezes é fatal. O fungo foi encontrado pela primeira vez numa caverna norte-americana, sugerindo que pode ter sido introduzido nos sapatos de turistas. Humanos podem espalhar o fungo de uma caverna para outra, carregando acidentalmente o fungo em sapatos, roupas ou equipamentos. Turistas que visitam cavernas também podem espalhar a doença. Procedimentos como estações de descontaminação de calçados já foram criadas em cavernas turísticas, como Mammoth Cave, e são adotados por espeleólogos nos Estados Unidos e em alguns outros países. Procedimentos para descontaminar equipamentos foram propostos pela Equipe de Descontaminação da WNS (consulte fontes na Internet). Embora estes procedimentos tenham sido uma resposta a um problema específico, são recomendados para todos, especialmente aqueles que visitam Áreas Protegidas. No entanto, a transmissão primária de WNS é de morcego para morcego. Muitos morcegos são mamíferos sociais e migram das áreas de alimentação no verão para cavernas de berçário e depois para locais de hibernação no inverno. O fungo é encontrado tanto em morcegos quanto em sedimentos.

Além do potencial para os espeleólogos impactarem inadvertidamente a microbiologia das cavernas, em algumas partes do mundo entrar em cavernas representa um risco potencial para a saúde humana. O risco mais difundido é o da histoplasmose, uma infecção causada pela respiração de esporos de um fungo frequentemente encontrado em excrementos de pássaros e morcegos. Os morcegos também podem ser vetores de outras doenças e devem ser manuseados apenas por indivíduos experientes que realizam pesquisas. Os riscos à saúde devem fazer parte de qualquer avaliação de risco para uma caverna.

Procedimentos para descontaminar artes e equipamentos de espeleologia

Para itens submersíveis em água:

- Limpe completamente o equipamento de espeleologia removendo toda a sujeira.
- Mergulhe em água quente, mantendo uma temperatura superior a 55 °C durante um mínimo de 20 minutos.

Para itens não submersíveis em água:

- Desinfete usando spray de peróxido de hidrogênio a 6% ou lenços desinfetantes com isopropanol.
- As botas devem ser esfregadas para remover toda a lama e sujeira e, em seguida, esterilizadas como acima.

Qualquer equipamento que tenha sido levado para cavernas potencialmente infectadas e não possa ser tratado usando os procedimentos de descontaminação apropriados NÃO deve ser levado para outras áreas de cavernas ou cavernas em outros países. Algumas áreas protegidas não permitirão equipamentos que estavam em cavernas potencialmente infectadas, mesmo que descontaminadas.

Usuários ocasionais de cavernas

Durante o século 21, uma demanda crescente por 'experiências de aventura' levou algumas cavernas a serem usadas como parte de eventos de corrida, e há casos em que veículos motorizados foram usados. A realização de eventos que ocorrem em cavernas turísticas e usam infraestrutura existente provavelmente não terão um impacto adicional além daqueles já experimentados. O mesmo se aplica à corrida em passarelas que passam por cavernas que formam arcos naturais. No entanto, o uso de cavernas selvagens para este tipo de evento, ou para outros eventos competitivos ou esportivos, não deve ser permitido, pois é impossível evitar danos ao geo patrimônio e aos ecossistemas. Considerações semelhantes se aplicam ao uso de veículos movidos a eletricidade, pois embora haja uma longa história de seu uso em algumas cavernas turísticas, é totalmente inapropriado permitir qualquer forma de veículo motorizado em cavernas selvagens por causa dos danos que inevitavelmente resultarão.

Diretrizes

- (12) *Um inventário de cavernas é desejável como base para o gerenciamento. As características de interesse particular em cada caverna devem ser identificadas em um mapa.*
- (13) *A avaliação de risco é desejável e deve abranger grupos de cavernas, cavernas individuais ou seções dentro de uma caverna, conforme cada local. A avaliação deve abranger tanto o risco para os exploradores quanto o risco que os exploradores representam para a caverna. A vulnerabilidade de cada tipo de feição deve ser avaliada para facilitar a identificação, ou zonas dentro de cavernas que são adequadas para usos específicos.*
- (14) *A gestão dos impactos da espeleologia é melhor abordada por meio de um processo de planejamento estratégico com o envolvimento das partes interessadas. Uma abordagem adequada provavelmente exigirá uma combinação de iniciativas, das quais a política de acesso sempre desempenha um papel fundamental.*

- (15) *Qualquer instrutor que ofereça espeleologia de aventura deve ser capaz de fornecer evidências de que recebeu treinamento adequado em aspectos de segurança e conservação de cavernas.*
- (16) *Espera-se que os espeleólogos estejam cientes e sigam um código de impacto mínimo (MICC). Onde nenhum MICC nacional ou regional se aplica a área protegida, um código específico deve ser criado com base nos códigos publicados.*
- (17) *Escavação, exploração original e pesquisa em cavernas dentro de áreas protegidas devem ser controladas por meio de acordos específicos ou pela exigência de licenças.*
- (18) *Recomenda-se aos gerentes de áreas protegidas que elaborem um plano que possa ser implementado caso ocorra um acidente de espeleologia na área. O plano deve ser elaborado com a participação do órgão de espeleologia regional ou nacional e dos órgãos estaduais responsáveis por situações de acidentes e emergências, devendo incluir orientações para minimizar o impacto do resgate na caverna e na superfície.*
- (19) *É totalmente inapropriado permitir qualquer forma de transporte motorizado para cavernas selvagens e cavernas selvagens nunca devem ser usadas para corridas ou outros tipos de eventos esportivos.*

Cavernas Turísticas

Introdução

Neste documento, usamos os termos caverna turística e caverna turística de forma intercambiável para descrever uma caverna à qual o público pode obter acesso mediante o pagamento de uma taxa. Algumas dessas cavernas são de propriedade e/ou operadas por autoridades governamentais federais, estaduais ou locais. Algumas cavernas turísticas de propriedade do governo são operadas por concessionárias, enquanto muitas outras cavernas turísticas são de propriedade e operação privadas. Na maioria das áreas protegidas, haverá apenas algumas cavernas turísticas, com a maior parte dos locais usados para aventura ou espeleologia recreativa (consulte Cava recreativa e de aventura). Cavernas usadas para fins religiosos, como santuários ou igrejas, podem ser consideradas um tipo especial de caverna turística. A associação de cavernas e práticas religiosas (incluindo xamanismo) é comum em muitas religiões e algumas cavernas foram convertidas em locais de culto. Estas grutas são especialmente frequentes em países católicos e budistas e recebem um número substancial de visitantes, tanto turistas como pessoas que desejam rezar ou adorar (ver Alguns valores do carste e das grutas). O grau de modificação varia muito, desde simples abrigos e grutas com imagens religiosas até grandes capelas. Algumas cavernas são usadas como igrejas, com áreas de estar, altares e santuários e têm missas regulares e um padre designado. As grutas utilizadas para práticas religiosas são normalmente controladas pelas autoridades religiosas e raramente são considerados os impactos da sua utilização no ambiente cavernícola. Portanto, o restante deste capítulo discute apenas o uso não religioso de cavernas, embora os princípios sejam igualmente aplicáveis a cavernas usadas para fins religiosos.

A International Show Caves Association (ISCA) desenvolveu 'Recommended International Guidelines for the Development and Management of Show Caves' em associação com a IUCN e UIS (ver Recursos na Internet). O objetivo dessas recomendações é fornecer orientações sobre as melhores práticas para o desenvolvimento e gerenciamento de cavernas turísticas, onde quer que estejam situadas no mundo. Não é objetivo das Diretrizes Internacionais Recomendadas criar regras rígidas ou que sejam interpretadas como leis. Eles são diretrizes para uma abordagem profissional ao desenvolvimento e gerenciamento de cavernas. Muitas cavernas turísticas estão em operação há décadas e algumas há centenas de anos. Em suas diretrizes, a ISCA reconhece que as cavernas turísticas existentes podem achar difícil e, em alguns casos, impossível, cumprir todas as Diretrizes Internacionais Recomendadas. Nesses casos, as Diretrizes da ISCA fornecem exemplos de melhores práticas e padrões que podem ser trabalhados ao longo do tempo.

As Diretrizes Internacionais Recomendadas devem ser consideradas a fonte definitiva para as melhores práticas de desenvolvimento e gerenciamento de cavernas turísticas e devem ser mantidas em um formato atualizado para levar em consideração novas informações e descobertas. Isso é particularmente importante em áreas protegidas onde as cavernas turísticas devem ser gerenciadas com os mais altos padrões possíveis e fornecer exemplos para as cavernas turísticas que operam fora das áreas protegidas. Onde for necessário substituir a infraestrutura, por exemplo, isso deve ser feito após avaliar a melhor opção para o ambiente de caverna, em vez de uma simples substituição do tipo "igual por igual".



O Grande Salão no caminho turístico pela Carlsbad Cavern, Novo México, EUA. Esta é a única caverna de exibição na Propriedade do Patrimônio Mundial do Parque Nacional Carlsbad Caverns. Existem muitas outras cavernas, algumas das quais abertas para espeleologia de aventura, enquanto outras só podem ser acessadas por cientistas e outros que trabalham sob um sistema de permissão. Foto de Csaba Egri.

É um facto que as regras gerais nunca podem ser absolutamente aplicáveis a todas as situações. Pode haver parâmetros incomuns em algumas cavernas ao redor do mundo onde, por razões aceitáveis, algumas partes dessas diretrizes não podem ser aplicadas sem grandes dificuldades. Estas Diretrizes e as Diretrizes Internacionais Recomendadas pela ISCA são fornecidas como metas que mostram que as cavernas podem atingir conforme fornecido por suas circunstâncias e capacidade econômica. Além disso, existem muitas associações nacionais de gerenciamento de cavernas turísticas, como ABIS (Associação de Cavernas Britânicas e Irlandesas), ACKMA (Australasian Cave and Karst Management Association Inc.), ANECAT (Associação Nacional Francesa de Operadores de Cavernas Desenvolvidos para Turismo) e NCA (Associação Nacional de Cavernas dos EUA) que compartilham as melhores práticas para o desenvolvimento e gerenciamento de cavernas turísticas com membros e colegas. As diretrizes que fornecemos complementam as fornecidas pela ISCA.

Considerações para transformar uma caverna em uma caverna turística

Onde as cavernas turísticas já foram desenvolvidas, a taxa de entrada e a receita de outras amenidades, como lembranças de varejo, cafés e bebidas e outras atrações auxiliares, é geralmente um importante fluxo de renda e as cavernas fornecem uma valiosa fonte de emprego local. Eles também podem fornecer proteção ao ambiente da caverna se problemas, como vandalismo, ameaçarem. Isso fornece um incentivo para abrir novas cavernas, especialmente nos países em desenvolvimento. No entanto, antes que tal desenvolvimento ocorra, deve haver um estudo completo do impacto econômico e da viabilidade do projeto proposto, bem como uma avaliação do impacto ambiental que inclua a consideração dos efeitos do desenvolvimento no interesse biológico e das ciências da terra na caverna. O desenvolvimento só deve prosseguir se puder ser demonstrado 1) que os impactos podem ser gerenciados com sucesso e que há financiamento suficiente para a construção que atenda aos requisitos ambientais e de segurança pública e 2) que o provável fluxo de renda permitirá que a caverna seja gerido de forma ambientalmente responsável e sustentável. Em particular, é importante evitar que o desenvolvimento seja iniciado, mas não concluído, deixando assim a caverna em um estado mais vulnerável, ou que uma caverna turística seja aberta, mas não atraia turistas suficientes para fornecer a renda necessária para uma operação sustentável e responsável contínua. Além disso, pode ser aceitável a abertura de grutas para visitação do público quando o plano econômico não é positivo, mas o sucesso econômico é garantido pelo Estado ou mesmo por um clube local de voluntários. Uma caverna turística bem administrada geralmente fornece proteção para a caverna, além de fornecer uma fonte de renda e educação para a economia local.

As cavernas turísticas são o meio pelo qual a maioria do público experimenta o ambiente subterrâneo. Como tal, oferecem uma grande oportunidade para explicar a importância cultural, histórica e científica e a fragilidade dos ambientes cavernícolas. Isso é particularmente importante em áreas protegidas onde as cavernas são comumente a principal razão para a designação.



Caverna Paraíso é uma caverna no Parque Nacional Phong Nha-Ke Bang, um Patrimônio Mundial da UNESCO no Vietnã. Foto de Steven Bourne.

Segurança

A segurança do visitante e funcionários deve ser um objetivo fundamental de qualquer caverna turística. Isso inclui acima e abaixo do solo e inclui todas as partes da propriedade. O tráfego que entra e sai da propriedade deve ser feito por estradas pavimentadas e áreas de estacionamento apropriadas. Uma boa organização é essencial. Nem sempre é possível cumprir os padrões do código de construção abaixo do solo. Ao planejar caminhos na caverna, a segurança do visitante deve ser a principal consideração. A altura livre é especialmente importante no subsolo - onde a altura adequada não é alcançável, devem ser dados avisos para evitar possíveis ferimentos. Corrimãos devem ser fornecidos quando necessário.

O planejamento de segurança garante que serviços de emergência possam ter acesso à caverna da melhor maneira possível. Deve ser estabelecida relação com serviços de emergência locais, para que todos tenham conhecimento das dificuldades que irão encontrar, normalmente envolve muito esforço físico, podendo ter um impacto no próprio ambiente, a menos que planos estejam em vigor. O treinamento para resgate e primeiros socorros também deve ser fornecido ao pessoal da caverna turística.

Capacidade de carga para visitantes

A capacidade de carga de uma caverna turística é uma ferramenta de planejamento e gerenciamento para estabelecer o número máximo de visitantes que a caverna pode acomodar durante um determinado período de tempo. Determinar a capacidade de carga de uma caverna turística encontra o equilíbrio entre fornecer uma experiência em caverna segura, informativa e agradável e minimizar o impacto no ambiente enquanto atinge os objetivos econômicos. Todos esses fatores devem ser considerados ao determinar se a capacidade apropriada de carga de visitantes para uma caverna turística deve ser verdadeiramente sustentável.

O foco das informações a seguir será na minimização dos impactos ambientais. A visitação turística em cavernas turísticas terá algum grau de impacto, mas os impactos negativos podem ser minimizados e a satisfação do visitante aumentada por meio de procedimentos e práticas de gerenciamento de visitantes. O primeiro passo é considerar os parâmetros físicos. Os fluxos de visitantes devem ser direcionados para dentro, através e fora da caverna de maneira eficiente que minimize o impacto. Os fatores a serem considerados incluem o tamanho das

passagens, a distância dos espeleotemas, a infraestrutura (como grades) e se os visitantes entrarão e sairão da caverna em locais diferentes, proporcionando um fluxo linear de visitantes ou se entrarão e sairão no mesmo local. Se os visitantes estiverem se cruzando na caverna, esses locais devem ser considerados para garantir espaço adequado.

O segundo passo é considerar os parâmetros ambientais, como fluxo de ar, qualidade do ar, temperatura, umidade e fauna cavernícola. Um grande número de visitantes em algumas cavernas aumentam significativamente a temperatura do ar e a concentração de dióxido de carbono. Uma única pessoa libera energia térmica de 80 a 120 W, aproximadamente o mesmo que uma única lâmpada incandescente. Assim, um grupo de 50 ou 60 pessoas num passeio pode elevar temperaturas em 1–2 °C. O manejo de cavernas deve garantir que essas flutuações estejam dentro da faixa de variação natural da caverna e que retornem aos níveis normais dentro de um curto período de tempo em circunstâncias normais. Os aumentos na concentração de CO₂ devido à respiração podem variar de 1.500 a 5.000 ppm, ponto que algumas pessoas podem começar a ficar angustiadas. O gerenciamento dos níveis de dióxido de carbono, pode exigir um monitoramento de acordo com os padrões de saúde apropriados. Poços de ventilação ou modificação para melhorar a circulação do ar podem melhorar a qualidade do ar, mas devem ser cuidadosamente consideradas e aplicadas para não criar problemas, como alterar o ambiente natural da caverna.



Visitantes em uma visita guiada na Caverna Baradla Domica, que abriu pela primeira vez como uma caverna de exibição em 1806. O sistema de cavernas atravessa a fronteira entre a Hungria e a Eslováquia e está nas Cavernas de Aggtelek e na Propriedade do Patrimônio Mundial Karst Eslovaco. A caverna também está em duas Reservas da Biosfera da UNESCO separadas - Aggtelek, Hungria e Slovensky Kras (Eslováquia) - e dois Sítios Ramsar separados (sistema de cavernas de Baradla e zonas úmidas relacionadas, Hungria e Domica, Eslováquia). Foto de Csaba Egri.

Presença de fauna cavernícola, como morcegos ou espécies adaptadas, também deve ser considerada, para minimizar os impactos sobre os seres que vivem na caverna. Quando morcegos se empoleiram em uma caverna, deve-se tomar cuidado para garantir que não sejam perturbados pelos visitantes, principalmente quando os morcegos estão hibernando ou se reproduzindo.

Como atributos e parâmetros de cada caverna são específicos para uma, as capacidades de carga não podem ser aplicadas de maneira uniforme, mas devem ser determinadas individualmente para cada caverna e experiência de tour pela caverna. Muitas cavernas utilizam a economia como ferramenta para maximizar a experiência do visitante e minimizar o impacto ambiental. Um exemplo é aumentar a taxa de admissão sazonalmente ou períodos de maior movimento – chamado de 'preço variável' – para reduzir a superlotação em períodos de maior movimento, o que pode melhorar a experiência do visitante e, ao mesmo tempo, minimizar impactos ambientais. Outro exemplo de cavernas turísticas considerando todos os fatores ao tomar decisões sobre capacidade de carga pode ser um fim de semana movimentado, onde a administração pode determinar que os benefícios econômicos superam o impacto ambiental de um número maior que o normal de visitantes, fazendo com que a temperatura na caverna suba mais. do que o normal por um número limitado de dias.

É responsabilidade da administração de cavernas turísticas levar em consideração cada um desses impactos ambientais e pesá-los juntamente com a experiência do visitante e os fatores econômicos, a fim de estabelecer a capacidade máxima de carga de visitantes para sua caverna turística específica.

Acesso à Cavernas Turísticas

Um dos primeiros e óbvios impactos do desenvolvimento de uma caverna para turismo é a modificação da entrada existente (uma atividade que às vezes também é realizada para controlar o acesso a uma caverna selvagem) ou construção de uma nova entrada. Em muitas grutas turísticas é necessário fornecer um acesso diferente à gruta turística para os visitantes, do que o acesso à gruta natural que era utilizado antes da conversão. Esse acesso artificial pode ser feito por um túnel ou por uma nova entrada escavada. Quando uma entrada artificial é criada, isso pode alterar a circulação de ar e causar uma perturbação no ecossistema. Para evitar qualquer interrupção da circulação de ar, uma câmara de ar deve ser instalada em qualquer entrada artificial de uma caverna. A decisão de não instalar uma eclusa de ar só deve ser tomada após a realização de um estudo especial. O método preferível de instalar sistema de bloqueio de ar eficiente é através do uso de um conjunto duplo de portas.

Quando as grutas turísticas tiverem entrada natural adequada para os visitantes, deve ser instalada uma forma de controle de acesso. No passado, era comum instalar portões em todas as entradas que permitissem aos visitantes contornar o ponto de entrada principal, pelo qual era cobrada uma taxa. Isso teve o impacto de restringir ou mesmo impedir totalmente a introdução de nutrientes e o movimento da fauna cavernícola, especialmente morcegos. Se forem instaladas cancelas em entradas utilizadas por morcegos, é aconselhável que a parte superior tenha barras horizontais com entreferro de 15 cm de altura e 45–75 cm de largura. Essas aberturas permitirão que morcegos tenham passagem livre. Todos os portões devem ser projetados de forma a permitir passagem livre de morcegos. Algumas espécies evitarão qualquer portão, no entanto, caso em que uma solução alternativa, como cercas, deve ser encontrada (consulte fontes da Internet: portões da caverna).

Trabalhos acima do nível do solo

Para relacionar a topografia do local com o vazio subterrâneo da caverna, é necessário ter uma planta do local que descreva os detalhes da superfície e os detalhes do subsolo da caverna. Esta informação é tão crítica para uma caverna turística existente, como no caso de uma que está sendo planejada. Uma vez conhecida a relação entre as feições acima do solo e o detalhe subterrâneo, então os fatores relacionados à água podem ser avaliados. Em muitos casos, o único fator pode ser a percolação da água superficial através da rocha acima da caverna, que não deve ser perturbada. Além disso, o risco de a água da superfície ter acesso à caverna como água de inundação precisa ser examinado com muito cuidado.

É importante que áreas de superfície dura, como edifícios e estacionamento, não sejam posicionadas acima da captação imediata da caverna (a caverna acessível e os condutos que drenam para ela) onde ocorre a infiltração natural de água da chuva. Se houver possibilidade de interferência na percolação natural, outras soluções devem ser procuradas. Estas soluções podem ser converter a superfície de uma área de estacionamento estanque em uma forma de revestimento que permite a passagem da água da chuva por ela. Quando as edificações estiverem situadas acima da caverna, elas devem preferencialmente ser realocadas ou, se as finanças não permitirem, devem ser realocadas quando a edificação chegar ao fim de sua vida útil. Água de escoamento de telhados e outras superfícies não deve se concentrar e deve ser amplamente dispersa. Também é fundamental garantir que qualquer efluente gerado seja descartado adequadamente e não permita que contamine o mundo subterrâneo.

Existe uma tendência natural para tentar colocar os edifícios necessários para o funcionamento de uma gruta turística o mais próximo possível da entrada da gruta e, em alguns casos, a entrada ou saída de uma gruta turística está dentro de um edifício que tem outros usos, comumente como museu, centro de interpretação ou loja de presentes. No entanto, muitas cavernas têm naturalmente altas concentrações de radônio, um gás radioativo, e se isso vazar da caverna para locais onde os funcionários estão trabalhando, eles acumularão uma dose de radiação. Portanto, é uma boa prática garantir que haja uma área ventilada entre uma entrada e/ou saída da caverna e qualquer edifício em que a equipe trabalhe.

Infraestrutura dentro de uma caverna turística

O desenvolvimento de grutas para turismo requer a alteração física de passagens naturais, bem como instalação de iluminação, caminhos, plataformas e infra-estrutura. Em todos os novos empreendimentos, seja em cavernas turísticas existentes ou em novos locais, as necessidades de infraestrutura devem ser cuidadosamente avaliadas, projetadas e instaladas. Claramente, há uma necessidade de proporcionar satisfação e segurança ao visitante, mas o objetivo deve ser minimizar a alteração ou perturbação do ambiente natural. O desenvolvimento deve ter como objetivo minimizar as alterações na morfologia da passagem e os danos aos sedimentos e espeleotemas. Questões associadas com passarelas de cavernas e iluminação de cavernas são consideradas em mais detalhes abaixo. Em algumas grandes grutas turísticas é utilizado transporte

mecanizado para facilitar o acesso e permitir um maior número de turistas, incluindo elevadores, autocarros e comboios. Estes meios de transporte, embora sejam amigáveis para os visitantes com problemas de mobilidade, podem implicar grandes modificações no ambiente cavernícola e, como tal, devem ser cuidadosamente planejados.

Caminhos em caverna turística

Caminhos são essenciais para fornecer uma caminhada segura e limites definidos para os visitantes. As rotas turísticas através da caverna devem ser projetadas para ter impacto mínimo nos habitats biológicos dentro da caverna e espeleotemas. O alinhamento do percurso deve levar o visitante suficientemente perto dos principais pontos de interesse para que os possa ver e fotografar, mas não tão perto que os possa tocar ou perturbar. Os fundos de sedimentos das cavernas devem ser protegidos por passarelas elevadas sempre que possível, a fim de preservar o valor de seu habitat, registro fóssil e histórico de sedimentos.

Caminhos em uma caverna não precisam ser muito largos. Por exemplo, não é necessário – embora desejável – que duas pessoas caminhem lado a lado. Um caminho individual é adequado, mas é aconselhável criar algumas áreas mais amplas onde um grupo de turistas possa se reunir para ouvir o guia. Os caminhos em uma caverna turística podem ser usados para a instalar tubulações, conduítes e cabos, seja sob a superfície do caminho ou ao lado dele. É preferível que esses utilitários não sejam envoltos em concreto. Interruptores do sistema de iluminação devem ser facilmente acessíveis a partir do caminho.

O percurso deve ser constituído por três componentes fundamentais, compreendendo uma superfície de passagem, passeios laterais e corrimãos. É desejável que os materiais utilizados na instalação dos caminhos tenham o menor impacto possível tanto na estética da caverna quanto em seu ambiente subterrâneo.

Superfícies de caminhada



Uma passarela elevada na caverna turística Gouffre d'Esparros, França. A seta indica uma rede usada para fornecer proteção extra e evitar que sedimentos caiam nos espeleotemas abaixo. Foto de John Gunn.

Materiais usados nas superfícies de caminhada devem ser atóxicos. Tradicionalmente, e particularmente em cavernas de calcário, o material preferido para a superfície de caminhada tem sido o concreto, que geralmente é a substância mais próxima da rocha em que a caverna é formada. O concreto também tem sido amplamente utilizado onde as passarelas não podem ser elevadas. O concreto tem vantagens distintas, incluindo a integração estética com a caverna e a durabilidade, no entanto, suas desvantagens incluem seu peso, a sujeira potencial quando misturado e derramado e a dificuldade de removê-lo depois de colocado. Há também algumas evidências de que os lixiviados do concreto podem ter impactos biológicos adversos. Concreto de baixa densidade pode ser feito usando perlita, pedra-pomes ou escória vulcânica, e que oferecem algumas vantagens em termos de peso reduzido, mantendo a resistência adequada da passarela. A grade de aço inoxidável também se tornou cada vez mais

popular como material para a construção de passarelas. O aço inoxidável tem a desvantagem distinta de ser caro e requer técnicas especiais para montar e instalar. A grade de plástico reforçado com fibra de vidro (FRP) com fixadores inoxidáveis é outro material popular para caminhos de cavernas com custo e peso menores do que o aço inoxidável.

As superfícies elevadas de caminhada construídas em aço inoxidável, FRP ou outros materiais de grade adequados têm a vantagem de durar muito tempo, requerem muito pouca manutenção, têm um impacto reduzido no chão da caverna e são relativamente fáceis de remover, de modo que, se necessário, a caverna pode ser quase devolvido à sua condição natural. No entanto, grades (grades) de todos os tipos permitem que fiapos, lixo, sujeira, lama e pequenos objetos caiam no chão da caverna e, a menos que o projeto leve isso em consideração, pode ser muito difícil remover a grade e limpar o chão da caverna abaixo.

Meio fio

Meio fio ou rodapé têm propósitos distintos. Uma delas é conter os pés dos visitantes, que protegem as características da caverna além da passarela. Outra é a parte externa do meio-fio, longe da passarela, oferece local conveniente para conduítes, canos e cabos de serviços públicos. Os meios-fios também podem ajudar a conter resíduos dos visitantes.

Corrimãos

Os corrimãos (ou grades de proteção) fornecem estabilidade ou suporte para os visitantes, evitando que eles saiam do caminho onde pode ser delicado ou perigoso. O material preferido para a construção de corrimãos em cavernas turísticas tem sido o aço inoxidável. Este material tem as vantagens de exigir pouca ou nenhuma manutenção, poder ser montado e soldado na caverna e ter potencial para ser usado como tubulação de água para transportar água doce para dentro da caverna. As desvantagens desse material são o custo e o brilho – pois não é esteticamente agradável. O uso de cabo de aço inoxidável, em vez de montantes intermediários sólidos ou trilhos sólidos instalados abaixo do próprio corrimão, pode reduzir significativamente o impacto visual do aço sólido. Curvas em vez de ângulos agudos também ajudam. Os trilhos de plástico reforçado com fibra de vidro (FRP) com fixadores de aço inoxidável estão se tornando mais populares e fornecem uma solução eficaz e de baixo custo.

Embora a infraestrutura, como caminhos, tenha o de objetivo fornecer acesso seguro aos visitantes e proteger a caverna de seus impactos, a própria instalação pode causar grandes impactos se não for feita com cuidado. Uma avaliação de impacto ambiental deve ser realizada e um plano de mitigação e gestão ambiental (EMMP) elaborado antes do início dos trabalhos de construção. O EMMP deve ser implementado e monitorado para minimizar os danos aos recursos da caverna durante a construção.

Iluminação da caverna

O equilíbrio de energia em caverna turística deve estar nas faixas de variações naturais . Iluminação elétrica libera luz e calor, portanto, qualquer luz deve ser de alta eficiência, e produzir a menor quantidade de calor possível. Muitas cavernas substituíram sistemas de iluminação antigos por iluminação de diodo emissor de luz (LED) moderna e de alta eficiência, energizada por fonte de alimentação de baixa tensão, devem ser usados em todos novos desenvolvimentos e atualizações de iluminação de cavernas.

Nas grutas turísticas onde visitantes se deslocam em grupos, é conveniente dividir o percurso do passeio em áreas onde as luzes são acesas e apagadas pelo guia. Isso permite que apenas a parte da caverna ocupada pelos visitantes seja iluminada. Isso é importante para reduzir o aquecimento do ambiente e impedir o crescimento da lampenflora, além de reduzir a quantidade de energia necessária e seu custo financeiro. Em cavernas turísticas onde visitantes se movem de forma independente, a iluminação pode ser ligada a sensores de movimento e temporizadores. Sistema elétrico deve ser em circuitos seguros e balanceados.

É importante que uma forma de iluminação emergencial esteja sempre disponível em caso de falha na fonte principal. A iluminação de emergência deve ter uma fonte de alimentação ininterrupta ou um sistema de iluminação de emergência com fonte de alimentação independente. Códigos locais podem ser aplicáveis e permitir lâmpadas de bateria ou semelhantes.

Uma consideração importante em qualquer esquema de iluminação é como posicionar as luminárias, a fiação e as caixas de energia para minimizar impactos visuais e danos à caverna. Lampenflora é uma consequência comum da introdução de suprimento de luz artificial em cavernas. Muitos tipos de algas e outras plantas podem se desenvolver como resultado da introdução de luz artificial. A iluminação deve ter espectro de emissão com a menor contribuição para o espectro de absorção da clorofila, a fim de minimizar o crescimento da lampenflora. Outra forma de prevenir crescimento da lampenflora é reduzir o nível de energia que atinge a superfície onde vivem as plantas. A distância segura entre a lâmpada e a superfície da caverna depende da intensidade da lâmpada. Como indicação aproximada, a distância de um metro pode ser segura. A luz deve ser direcionada para o local a ser iluminado e o derramamento de luz nas áreas circundantes ou nos olhos dos visitantes deve ser evitado – a

blindagem das luminárias é muito útil nesse sentido. No passado, luzes quentes localizadas muito perto de espeleotemas ou arte rupestre causavam danos significativos, embora isso seja menos problemático quando a iluminação LED fria é usada.

Um projeto de iluminação que evita excessos não apenas minimiza impactos ambientais na caverna, mas também pode melhorar a experiência de visitantes com o uso deliberado da escuridão e o sequenciamento da iluminação em alguns pontos selecionados. Há dois princípios a serem considerados: acesso e atmosfera. A iluminação de acesso deve ter nível mínimo compatível com o movimento seguro de todos. Uma iluminação eficaz pode ser usada para criar um acesso seguro através de um ambiente desconhecido, uma zona familiar que relaxa os visitantes. O uso de fitas LED, spots de 12 V e outras tecnologias de baixo consumo podem atingir esse objetivo. Eles podem ser fixados em grades ou bordas de caminhos, com os conversores ou baterias escondidas. Em geral, todos os acessórios e cabeamento devem estar bem escondidos, mas permanecer acessíveis à manutenção sem maiores danos à caverna e seu conteúdo. A redução do consumo de energia traz benefícios além da redução das emissões de CO₂, pois os requisitos de energia mais baixos facilitam o uso de uma fonte de alimentação ininterrupta quando há uma falha de energia elétrica. Menos calor também é produzido. Atualmente, existem muitas dessas tecnologias disponíveis, mas elas devem ser usadas como ferramentas para atingir um fim, não como um fim em si mesmas.

A iluminação estética deve ser baseada em uma filosofia subjacente, por exemplo, para ilustrar aspectos da caverna, exploração, desenvolvimento ou história. Sempre que possível, a iluminação deve ser sequencial, com os visitantes conduzidos de uma cena a outra, possivelmente culminando na iluminação de toda uma câmara. Qualquer luz em um ambiente escuro terá um efeito dramático, e uma luz muito distante às vezes pode aumentar a ilusão de profundidade e mistério. A iluminação dos recursos hídricos pode ser muito eficaz e esteticamente agradável. Alguns projetos de iluminação de cavernas utilizam iluminação colorida para aprimorar certos recursos, enquanto outros utilizam luz neutra e fria para mostrar as cores naturais da caverna, nenhuma das quais tem grande impacto no ambiente da caverna. Algumas cavernas turísticas têm shows de iluminação sincronizados com composições musicais para melhorar a experiência, que não tem nenhum impacto adverso conhecido no ambiente da caverna.

Limpeza de cavernas

Em muitas cavernas turísticas, caminhos e, às vezes, espeleotemas são limpos regularmente devido ao acúmulo de poeira, fiapos, sedimentos inundados, fungos e algas (lampenflora). Várias abordagens foram testadas, sendo os jatos de água de alta pressão o método mais comum empregado, embora, em alguns casos, a depuração, o uso de surfactantes e a limpeza a vapor também tenham sido tentados. Pode-se esperar que todos esses métodos tenham algum impacto nas superfícies de espeleotemas que estão sendo limpas. Quando jatos de água de alta pressão são usados, os operadores devem tentar limitar o número e a frequência das lavagens e usar o número mínimo de passagens de bico sobre uma superfície de calcita.

Lampenflora é o infame flagelo das cavernas turísticas – um problema persistente. O uso de agentes de limpeza fortes, como alvejante à base de cloro, desperta o desejo de se livrar de organismos contaminantes como algas. Infelizmente, o uso de produtos químicos, incluindo alvejante à base de cloro, não funciona bem a longo prazo porque a lampenflora cresce rapidamente nas condições certas. A única maneira de minimizar o crescimento de algas é controlar o desenvolvimento da lampenflora reduzindo a luz e o calor, em vez de um tratamento químico periódico, que apenas mata o crescimento por um curto período.

Porém, quando a lampenflora prolifera, é necessário destruí-la com compostos químicos. Os herbicidas, no entanto, nunca devem ser usados em uma caverna, pois são muito tóxicos para o ambiente da caverna. Usados com frequência na agricultura, os herbicidas devem ser evitados porque sua degradação é lenta e sua toxicidade pode afetar seriamente a fauna cavernícola. O uso de produtos químicos branqueadores fortes para a redução ou remoção da lampenflora foi investigado por Cigna (2011). Os dois produtos químicos mais amplamente utilizados são o hipoclorito de sódio (lixívia à base de cloro a 5% por vol) e o peróxido de hidrogênio (a 15% por vol). O hipoclorito de sódio libera cloro no ambiente da caverna e, embora seja um agente de limpeza eficaz, é venenoso para a vida nas cavernas, embora possa se dispersar rapidamente. O peróxido de hidrogênio também pode ter efeitos biológicos indesejáveis onde estão presentes sedimentos ricos em ferro. Um novo estudo nos EUA (Kieft et al., 2021) mostra que alvejante e peróxido de hidrogênio não devem ser usados devido à toxicidade do alvejante e que o peróxido de hidrogênio degrada espeleotemas. O cloreto de benzalcônio é um biocida não tóxico eficaz que remove a lampenflora quando usado em concentrações de 1% – 10%. Os autores também recomendam o uso de luz UV germicida (UV-C). Independentemente do agente utilizado, recomenda-se a lavagem cuidadosa das superfícies após a limpeza, preferencialmente com água de caverna em vez de água clorada de abastecimento público. A limpeza anual é provavelmente a frequência mais apropriada, mas alguns locais podem se beneficiar de uma limpeza mais frequente usando apenas água da caverna.

Novos materiais

Novos materiais são desenvolvidos e alguns parecem ter grande potencial para uso em cavernas. No entanto, enquanto alguns novos materiais provaram ser excelentes, outros, como a madeira composta, não, causando impactos adversos. Um aspecto do problema é que existem muitos tipos de materiais compósitos e aqueles com fibras de madeira devem ser evitados, pois favorecem ao crescimento de bactérias, algas e mofo. Especificações de materiais compostos devem ser verificadas para garantir que não contenha madeira ou papel. Se for planejado o uso de material composto, ele só deve ser usado após o tipo de material compósito proposto ter passado por testes no ambiente em que se propõe a ser usado. O aço inoxidável provou ser excelente para uso em cavernas. No entanto, o aço inoxidável tem uma variedade de graus e qualidades diferentes. Grande parte do custo do uso do aço inoxidável é encontrar o tipo certo. Recomenda-se o uso de graus mais elevados quando este material foi planejado para ser usado em uma caverna. Novos plásticos foram desenvolvidos com grande potencial para uso em cavernas. Uma grande vantagem desses plásticos é que são leves, têm características mecânicas próximas ao aço e são fáceis de trabalhar com ferramentas simples. As partes de plástico são unidas com parafusos de aço inoxidável, o que facilita a atualização do design no futuro. Os caminhos podem ser construídos por meio de pultrusão - que é um plástico criado pelo perfil de fibras revestidas com resina através de matriz aquecida. Geralmente são revestidos com areia para fornecer melhor tração, mas podem se desgastar rapidamente se houver um grande número de visitantes. Os corrimãos também podem ser criados com plástico reforçado em fibra de vidro.

Materiais que normalmente não pertencem a uma caverna turística

Ao considerar a questão de quais materiais não pertencem a uma caverna turística, deve-se reconhecer que muitos dos materiais listados nesta seção foram, em algum momento no passado, considerados apropriados para uso. Como consequência, provavelmente é difícil encontrar uma caverna turística existente que não contenha um ou mais dos materiais que agora são considerados indesejáveis. Cavernas que estão em processo de desenvolvimento como caverna turística devem evitar o uso de todos os materiais agora conhecidos como indesejáveis, conforme descrito abaixo.

Metais galvanizados.

Nas décadas anteriores, a tubulação de aço galvanizado era o material de escolha para uso como corrimãos, escadas e plataformas de cavernas. No entanto, o zinco no material galvanizado é facilmente oxidado e lixiviado no ambiente da caverna. A lixiviação de revestimentos galvanizados pode ter impactos adversos, particularmente em faunas de cavernas de invertebrados sensíveis e deposição de calcita. Onde o aço galvanizado estiver em uso em uma caverna turística existente, um programa deve ser desenvolvido para sua substituição por outro material.

Metais diferentes

O uso de metais diferentes, como diferentes graus de alumínio, sempre induzirá corrosão quando em contato um com o outro em um ambiente úmido. A primeira e melhor solução é não usar metais diferentes em contato entre si. A próxima melhor solução é isolar os materiais uns dos outros, usando dispositivos como arruelas de neoprene e nylon, mas isso só pode atrasar o inevitável se um filme de água se estender pela barreira. Também é recomendado que não sejam usados ânodos de sacrifício, pois estes irão produzir algum tipo de composto químico, que pode ter um efeito adverso na caverna.

Metais não ferrosos

Muitos metais não ferrosos também tiveram uso anterior em cavernas. Talvez o mais comum deles tenha sido o cobre e suas ligas relacionadas, que têm sido a fonte de muitas manchas verdes em cavernas.

Ferro e aço

Ferro e aço não tratados são suscetíveis à ferrugem. Mesmo aquelas formas de aço macio que contêm uma pequena porcentagem de carbono são suscetíveis à oxidação (ferrugem). Consequentemente, o aço bruto e o ferro não devem ser usados em cavernas turísticas, pois podem ocorrer manchas de ferrugem.

Betume (asfalto)

O betume (asfalto) é uma mistura viscosa e negra de hidrocarbonetos obtida do petróleo. O betume tem a capacidade de lixiviar produtos que são tóxicos para a biota e podem interferir na deposição de calcita. Se o betume for encontrado em uma caverna turística existente, devem ser desenvolvidos planos para removê-lo o mais rápido possível. O betume nunca deve ser usado dentro de uma caverna que está sendo desenvolvida como uma caverna turística.

Madeira

Por séculos, a madeira tem sido o melhor material para a construção e fabricação de itens, como móveis. Portanto, era natural que a madeira fosse usada nos início do uso de cavernas turísticas. Infelizmente, a madeira tem vida curta antes de se deteriorar. Isso inclui madeira creosotada tratada sob pressão. Geralmente, o ambiente de uma caverna é isolado e a introdução de energia do lado de fora altera o equilíbrio da caverna. Exceções ocorrem quando um rio ou córrego passa por uma caverna ou onde pode haver um alto teor orgânico por algum motivo.

Quando a madeira se decompõe na caverna, o material em decomposição se torna parte da cadeia alimentar. A madeira em decomposição causa o crescimento de fungos ou bactérias e ainda apresentam risco de invasões de espécies exóticas que substituem espécies nativas de cavernas. Se usar a madeira em fôrmas, andaimes ou usos semelhantes, não deve usá-los em cavernas, se possível. Removê-los após a conclusão da obra, tendo o cuidado de retirar quaisquer restos ou lascas resultantes da obra ou do desmonte da estrutura. Se a madeira em decomposição tiver que ser removida da caverna, deve-se tomar cuidado para garantir que não se desintegre durante o transporte e, assim, fornecer nutrientes não naturais. Mesmo pequenos vestígios de madeira podre podem causar explosões populacionais entre as espécies que habitam as cavernas, que devem ser removidas da caverna.

Onde for encontrado madeira em uma caverna turística, deve ser feito um plano para substituí-la por outros materiais, como a economia permitir lá onde o uso de madeira causaria uma mudança significativa no ambiente. O período de tempo desse plano deve ser limitado pelo tempo de vida previsto da madeira in situ. Durante o desenvolvimento de uma caverna turística, outros materiais devem ser selecionados. Somente nas cavernas de gelo as características ambientais são compatíveis com a madeira, que é frequentemente utilizada para a construção de caminhos e corrimãos, pois não é escorregadia e pode ser facilmente trabalhada em condições de congelamento.

Monitoramento

O monitoramento do clima da caverna deve ser realizado regularmente e um cronograma formal deve ser adotado. Podem ser monitorados a temperatura do ar, umidade, radônio (se sua concentração estiver próxima ou acima do nível prescrito por lei) e temperatura da água (se aplicável). O monitoramento do dióxido de carbono deve ser incluído se suas concentrações estiverem fora da faixa de variações naturais. O fluxo de ar dentro e fora da caverna também pode ser monitorado. Ao selecionar cientistas para realizar estudos em uma caverna, é muito importante que apenas cientistas com experiência em ambientes cavernícolas sejam contratados para assuntos de cavernas. Muitos cientistas, de outra forma competentes, podem não estar totalmente cientes dos ambientes de cavernas. Se um conselho incorreto for dado ao gerenciamento da caverna, isso pode resultar em perigo para o ambiente da caverna. A ciência das cavernas é um campo altamente especializado.

Gestores de Cavernas Turísticas

Os gestores de cavernas turísticas devem ser competentes tanto na gestão dos negócios da caverna turística quanto na proteção ambiental. Os gestores de uma caverna turística nunca devem esquecer que a caverna é "a galinha dos ovos de ouro" e que a caverna deve ser preservada com muito cuidado.

Guias nas Cavernas Turísticas

Guias em grutas turísticas têm um papel importante, pois são o elo de ligação entre a gruta e o visitante. É importante que os guias sejam devidamente treinados. A administração de uma caverna turística deve produzir um manual do guia, especificamente sobre como guiar em sua caverna. Os guias devem ser treinados em dinâmica de grupo, bem como os atributos da caverna, incluindo geologia, biologia, paleontologia, significado cultural e histórico, e formas de fornecer essa interpretação de maneira informativa e divertida. Guias de cavernas têm a oportunidade de inspirar os visitantes a se tornarem defensores de nossas cavernas e paisagens cársticas. Eles também são responsáveis pela segurança dos visitantes e proteção das cavernas.

Interpretação

O objetivo da interpretação é fornecer informações sobre a caverna e seus valores de patrimônio natural e cultural aos visitantes, para aumentar sua apreciação e compreensão da experiência. Outro aspecto da interpretação inclui a comunicação eficaz de regras e regulamentos para a proteção dos recursos da caverna e para a segurança dos visitantes e funcionários da caverna. Esses 'faça e não faça' devem ser desenvolvidos, exibidos e comunicados verbalmente aos visitantes de uma forma que os ajude a entender e espero que apreciem sua importância e obtenham o cumprimento voluntário. Nas grutas onde os visitantes entram em grupo acompanhados por um guia cavernícola, ou individualmente acompanhados por guias estacionados ao longo da gruta, o guia

cavernícola deve ser devidamente formado para garantir o cumprimento das regras e regulamentos de proteção da gruta e segurança dos visitantes.

A experiência de um visitante de caverna é moldada por uma série de fatores que operam antes, durante e depois da visita real. Desses fatores, consciência, antecipação, recepção (chegada) e recordação podem ser mais importantes do que a experiência real da caverna em si e, a longo prazo, a recordação provavelmente conta mais para o indivíduo. Qualquer monitoramento da experiência do visitante deve ser projetado para avaliar esses fatores.

Alguns princípios básicos na concepção da experiência do visitante são:

- As informações disponibilizadas ao público, seja online ou no site, devem ser precisas e não transmitir uma impressão enganosa. Disponibilizar essas informações antes da visita pode reduzir o comportamento indesejado e aumentar a expectativa.
- Certifique-se de que a melhor aparência possível seja dada na entrada da área da caverna.
- Nas grutas que têm visitas guiadas, cada visita deve ser adaptada a um número adequado de visitantes, por um período de tempo adequado e ser conduzida por um guia experiente que tenta desenvolver uma relação ou afinidade com os visitantes.
- Todo esforço deve ser feito para identificar as necessidades e interesses culturais específicos de todos os visitantes e atendê-los.



Uma das quatro estações interativas que fornecem informações multimídia em alemão e inglês, Wendelstein Cave, Alemanha. Foto de Peter Hofmann.

Recomenda-se que cada gruta turística desenvolva temas específicos para utilização tanto em visitas turísticas como em material promocional na Internet, e que possam facilmente servir de base a um programa educativo. Embora o desenvolvimento desses temas apresenta alguns desafios para guias e gerentes, eles podem resultar em experiências de cavernas mais significativas para os visitantes e em uma força de trabalho mais realizada. No passado, a maioria dos passeios pelas cavernas eram guiados, mas durante o século 21, houve um movimento em direção aos passeios autoguiados que permitem que os visitantes se movam pela caverna em sua própria velocidade. A mudança para passeios autoguiados em cavernas, em alguns casos, é impulsionada pelo desejo de reduzir custos empregando menos guias, mas também é possível adotar um modelo em que os guias são implantados em locais específicos da caverna para garantir a segurança, evitar danos e fornecer interpretação adicional quando necessário. O último modelo é particularmente apropriado onde as comunidades rurais locais estão envolvidas no turismo de cavernas e o guia fornece empregos locais significativos. Algumas cavernas turísticas usarão cada um desses modelos ou híbridos sazonalmente, à medida que a visitação flutua.

Visitas autoguiadas requerem uma abordagem diferente de interpretação e as seguintes abordagens estão sendo usadas atualmente:

Abordagens de interpretação usadas em cavernas turísticas autoguiadas

Tipo interpretativo	Usado nestas cavernas:	
Apenas sinalização	Muitas cavernas, incluindo aquelas nos seguintes países:	
	Austrália	Caverna da Figueira, Nova Gales do Sul Mammoth Cave, Austrália Ocidental
	Austria	Caverna Lamprechtsofen
	China	Caverna Furong, Chongqing Caverna de Tenglong, província de Hubei
	Malásia:	Caverna do Cervo, Sarawak Niah Grande Caverna, Sarawak
	Eslovênia	Cavernas de Škocjan
	USA	Mammoth Cave, Kentucky
Fones de ouvido com mensagens em vários idiomas	Laos	Cavernas de Vieng Xai
	Espanha	Caverna de Nerja
	USA	Caverna Carlsbad
Estações fixas com mensagens de áudio	Mexico	Caverna Balankanche
	Reino Unido	Dan yr Ogof
App disponível para smartphones	Reino Unido	Caverna Treak Cliff

Seja qual for o tipo usado, uma boa interpretação é fundamental, incluindo o uso de interpretação temática e a incorporação de uma forte mensagem de conservação. Os quadros explicativos devem estar no idioma local, bem como em qualquer idioma internacional que prevaleça.

Diretrizes

- (20) *As grutas turísticas existentes devem ser geridas de acordo com os mais altos padrões possíveis e devem trabalhar no sentido da conformidade com as Diretrizes Recomendadas da ISCA, bem como com as diretrizes fornecidas aqui.*
- (21) *Um estudo completo deve ser conduzido para determinar a sustentabilidade ambiental e econômica antes de transformar uma caverna em uma caverna turística.*
- (22) *A segurança deve ser a prioridade número um para cada caverna turística.*
- (23) *Determinar a capacidade de carga de uma caverna turística específica é o equilíbrio entre fornecer uma experiência de passeio segura, informativa e agradável e minimizar o impacto no ambiente da caverna, ao mesmo tempo em que atinge os objetivos econômicos. Todos os três – experiência do visitante, impacto ambiental e objetivos econômicos – devem ser considerados.*
- (24) *É necessário ter uma planta do local que descreva o detalhe da superfície e o detalhe do subsolo de uma caverna para analisar o impacto potencial que as obras de superfície podem ter em uma caverna.*
- (25) *a manutenção do ambiente natural da caverna.*
- (26) *Em todos os novos empreendimentos, seja em cavernas turísticas existentes ou em novos locais, as necessidades de infraestrutura devem ser cuidadosamente avaliadas, projetadas e instaladas, levando em consideração as melhores práticas atuais.*
- (27) *A rede de iluminação elétrica de uma gruta deve preferencialmente ser dividida em zonas, permitindo assim que apenas as partes da gruta atualmente ocupadas por visitantes sejam efetivamente iluminadas. O uso da luz deve ser minimizado para iluminar apenas alguns recursos e criar uma atmosfera que melhore a experiência do visitante.*
- (28) *O gerenciamento eficaz de cavernas turísticas é sustentado pelo monitoramento para permitir o gerenciamento adaptativo do local. No mínimo, o monitoramento básico da caverna, fauna, clima e concentrações de dióxido de carbono deve ser realizado de acordo com um cronograma de monitoramento.*
- (29) *Os gerentes de cavernas turísticas devem ser competentes tanto na gestão dos negócios da caverna turística quanto na proteção ambiental.*

- (30) *Os guias em qualquer gruta turística desempenham um papel muito importante como ligação entre a gruta e o visitante. É essencial que os guias sejam devidamente treinados nos valores de cada gruta e na sua interpretação para os visitantes.*
- (31) *Todas as cavernas turísticas devem desenvolver informações interpretativas de alta qualidade para ajudar o público a entender e apreciar melhor o ambiente da caverna.*



*Os visitantes podem experimentar a beleza e a textura do gelo na caverna Eisriesenwelt, na Áustria.
Foto de Csaba Egri.*

Atividades de aventura e turismo em superfícies cársticas

Durante o século 21, houve um aumento nas atividades de aventura e turismo em superfícies cársticas, incluindo áreas de solo em calcário, falésias e cânions. Esses habitats acidentados e às vezes remotos podem ter valores de biodiversidade e geodiversidade não reconhecidos que devem ser conservados, especialmente em áreas protegidas. Portanto, é importante pesquisar essas áreas em busca de espécies raras ou endêmicas de plantas (por exemplo, orquídeas) ou animais (por exemplo, langures) ou para características cársticas frágeis (por exemplo, pináculos), como parte do processo de tomada de decisão sobre permitir ou não tais atividades, sob quais condições (regulamentos) e onde (zoneamento).

Qualquer infraestrutura necessária e permitida para suportar tais atividades deve ser projetada e instalada de forma que tenha pouco impacto no carste, tanto visualmente quanto em termos de integridade, e possa ser prontamente removida no futuro, se necessário, devolvendo o carste quase a sua condição natural.

Os circuitos cársticos baseados na via ferrata originaram-se no século XIX nas áreas cársticas alpinas da Europa. A via ferrata tornou-se muito mais popular desde o final do século 20, especialmente na Europa e está se espalhando pelo mundo. Circuitos cársticos com acesso facilitado por várias combinações de infra-estrutura foram desenvolvidos através do carste em vários locais. Na WHP Tsingy de Bemaraha em Madagascar, o circuito Big Tsingy envolve passarelas, plataformas, escadas, pontes suspensas e cabos de segurança em alguns lugares. Um circuito através do carste de Phu Pha Marn, no centro de Laos, envolve tirolesas, via ferrata, pontes suspensas, uma ponte de rede e plataformas, com cabos de segurança em todo o circuito. Esses circuitos permitem que os visitantes explorem e experimentem as espetaculares paisagens cársticas do pináculo e vejam a vida selvagem endêmica (por exemplo, lêmures e langures), que de outra forma seriam praticamente inacessíveis. Os visitantes em pequenos grupos são conduzidos pelos circuitos por guias treinados. As paisagens extremamente acidentadas e expostas garantem a permanência do visitante no percurso definido, deixando o menor impacto possível nos ecossistemas naturais. Não se deve

permitir que os visitantes caminhem ou subam em pináculos frágeis ou outras características de karren que possam ser facilmente quebradas.

A escalada tem uma longa história, mas durante o século 21, houve um aumento acentuado no número de participantes, particularmente no 'bouldering', onde nenhum auxílio fixo é empregado e nenhuma corda é usada. Os habitats das falésias, historicamente um dos menos perturbados pela atividade humana, estão enfrentando mais pressão do que nunca. Estudos demonstraram que as rotas de escalada têm menos cobertura vegetal e menor biodiversidade do que áreas de falésias semelhantes não usadas para escalada. Calcário geralmente não fratura de forma limpa como granito ou arenito. Isso pode dificultar a colocação de âncoras removíveis 'tradicionais' (calços e cames) para proteção em falésias calcárias. Em vez disso, a maioria das áreas de escalada de calcário usa âncoras aparafusadas pré-colocadas para proteção. Existem códigos de conduta para escalada em rocha, como o Climber's Pact ([consulte fontes da Internet](#)), que abordam a proteção da biodiversidade, geodiversidade e valores culturais (por exemplo, arte rupestre indígena) em áreas de escalada.



Tirolesa através do ápice cárstico na área protegida de Phou Pha Marn, Laos. Foto por Green Discovery Laos.

Canyoning é uma atividade recreativa ao ar livre que consiste em atravessar um desfiladeiro ou desfiladeiro, geralmente com um riacho, usando uma variedade de técnicas como rapel, scrambling, escalada, salto e natação. Embora o canyoning tenha se popularizado por americanos e europeus na década de 1970, suas origens remontam ao final do século XIX na França. Edouard Alfred Martel, conhecido como o 'pai da espeleologia moderna' e um pioneiro da exploração e estudo de cavernas, foi o primeiro a introduzir técnicas de canyoning para conduzir pesquisas científicas em áreas de desfiladeiros de difícil acesso. Para minimizar o impacto ambiental do canyoning, recomenda-se manter os canais de fluxo e evitar margens e vegetação sensíveis. Sempre que possível, use âncoras naturais e equipamentos removíveis de maneira a evitar danos e proteger as superfícies cársticas naturais. Um código de conduta da Organização Internacional de Canyoning para Profissionais ([consulte fontes da Internet](#)) inclui discussão sobre conscientização e proteção ambiental.

Diretrizes

- (32) *Habitats cársticos de superfície acidentada e remota podem ter valores de biodiversidade e geodiversidade não reconhecidos que devem ser pesquisados e avaliados como parte do processo de tomada de decisão sobre permitir ou não atividades de aventura e turismo neles, sob quais condições e onde.*
- (33) *A infraestrutura necessária para apoiar as atividades cársticas de superfície deve ser projetada e instalada de forma que tenha pouco impacto sobre o cárstico, tanto visualmente quanto em termos de integridade e, se necessário, possa ser facilmente removida no futuro, devolvendo o cárstico quase ao seu estado natural.*

Pesquisa científica

As cavernas são um dos melhores lugares para estudar as histórias passadas do nosso planeta e da humanidade, bem como os processos evolutivos biológicos. Eles são cápsulas do tempo efetivamente bem isoladas, predispostas de várias maneiras a preservar material orgânico, como ossos, conchas, pólen, carvão vegetal e material vegetal e material inorgânico, incluindo sedimentos clásticos e espeleotemas. Cavernas e entradas de cavernas servem como abrigo temporário ou refúgio permanente para muitas espécies de plantas, animais e microrganismos incapazes de sobreviver na superfície, especialmente naquelas regiões onde aridez, baixa umidade e temperaturas extremas são limitantes para os organismos.



Um bioespeleólogo amostrando invertebrados em Frauenhaldenhöhle, Alemanha. Foto de Rainer Straub.

Materiais orgânicos e inorgânicos são transportados para as cavernas através de uma variedade de processos geomorfológicos naturais, geralmente envolvendo água e, em alguns casos, vento. Uma vez que os materiais subterrâneos se acumulam e quando as passagens se tornam relíquias, os depósitos acumulados são protegidos dos processos de intemperismo que operam na superfície. A maioria dos sistemas hidrológicos cársticos ativos são caracterizados por tempos de fluxo rápidos, embora em algumas áreas, as águas subterrâneas sigam caminhos de fluxo profundos e possam levar centenas ou milhares de anos para retornar à superfície. Desde que não haja mistura com as águas próximas à superfície, elas emergem sem quaisquer poluentes antropogênicos, como clorofluorcarbonetos ou a radiação atômica introduzida pelo homem na década de 1950. Para o estudo de paleoambientes ou arqueologia, as cavernas agora fornecem o 'supermercado' de informações multidisciplinares que incluem isótopos preservados em espeleotemas, material esquelético e DNA ambiental (e-DNA) preservado em sedimentos. Para pesquisas com foco em indicadores de mudanças climáticas, um sítio de caverna bem preservado oferece muitas pistas e materiais de estudo. Estes incluem camadas de cinzas vulcânicas, depósitos de água parada de inundações e uma riqueza de isótopos e resíduos orgânicos presentes na água de gotejamento e espeleotemas.

Para a pesquisa biológica, as cavernas são comparadas a 'laboratórios subterrâneos' pois seus ambientes fortemente isolados e protegidos, onde muitas variáveis e perturbações que afetam os ambientes de superfície estão ausentes ou silenciadas. Isso inclui escuridão constante, temperatura constante e alta umidade, baixo suprimento de alimentos e sinais diurnos/sazonais ausentes ou silenciados. Essas condições estáveis e previsíveis tornam as cavernas e a fauna cavernícola altamente adequadas para as pesquisas biológicas fundamentais, como relacionadas à adaptação, fluxo de energia e processos evolutivos. Cavernas ativas recebem informações regulares da superfície, mas cavernas relíquias podem se tornar "ilhas subterrâneas" isoladas, nas quais espécies especializadas, localmente endêmicas, "troglobiontes" podem evoluir. Como essas espécies são raras e têm áreas de distribuição restritas, é importante avaliar os impactos que as atividades de pesquisa podem ter sobre elas.

Populações de aves e morcegos que vivem nas cavernas são vulneráveis à perturbação causada por pessoas, independentemente da pesquisa científica. A captura de morcegos e aves, ou a coleta de ninhos, em abrigos e locais de reprodução, seja para pesquisa ou fins alimentares/medicinais tradicionais, tem impactos significativos nas populações locais de aves e morcegos. A maioria das populações de invertebrados cavernícolas são menos perturbada pela presença humana. O atropelamento é uma ameaça direta aos invertebrados das cavernas, e o tráfego humano pesado pode ter um impacto nas espécies vulneráveis que vivem no chão, que tendem a ser enigmáticas. O pisoteio de sedimentos é, portanto, um problema para todos, não só para os cientistas. Andar sobre pedras soltas pode esmagar espécies que se abrigam sob delas. No entanto, é provável que a maioria das populações de invertebrados esteja em meso-cavidades e só saia quando as condições forem adequadas.

A coleta excessiva também foi percebida como uma ameaça à fauna das cavernas. Este foi o caso em países europeus onde a salamandra Olm (*Proteus*) foi valiosa peça de museu. Os besouros das cavernas ainda são procurados como espécimes colecionáveis, assim como as borboletas, por entomologistas amadores e profissionais. A coleta científica provavelmente só será uma ameaça quando o projeto de pesquisa exigir um grande número de espécimes, como estudos genéticos populacionais, e somente quando a população sendo amostrada for pequena e isolada. A maioria dos biólogos está ciente do impacto potencial da coleta excessiva, e a grande maioria dos estudos biológicos é realizada com o mínimo de perturbação e viabilidade das espécies. Isso inclui a remoção de armadilhas de queda que não estão mais em uso. No entanto, a coleta ocasional de espécimes individuais para identificação científica e taxonomia não deve ser percebida como uma ameaça; pelo contrário, é essencial para a identificação precisa e conservação das espécies. Experimentos científicos mal planejados (ou conduzidos) podem resultar em impacto ambiental. Na década de 1970, por exemplo, tentou-se replicar o famoso Laboratório Subterrâneo de Moulis (França) em uma caverna brasileira dentro de uma área protegida. A tentativa falhou, resultando na morte de muitos peixes adaptados às cavernas, com o problema exacerbado pela falha na remoção das estruturas degradantes do laboratório.

É importante ter em mente que as maiores ameaças à fauna cavernícola e aos ecossistemas cavernícolas não se originam de pesquisas científicas, mas sim de atividades fora da caverna, incluindo extração mineral, desmatamento, agricultura, extração de águas subterrâneas, poluição da água e sedimentação. Os espeleólogos em geral podem impactar inadvertidamente as cavernas ao introduzir micróbios nos ecossistemas subterrâneos (consulte Caving recreativo e de aventura).

A designação de áreas protegidas é comumente sustentada por extensa pesquisa científica, que às vezes se reflete no nome do local. Às vezes, as áreas protegidas são criadas porque pesquisas científicas demonstram a existência de ativos ambientais valiosos que merecem proteção. Tal é o caso em áreas com espécies raras ou ameaçadas ou geossítios chave. No entanto, existem muitas áreas cársticas protegidas, particularmente aquelas designadas principalmente por motivos paisagísticos, onde há uma compreensão limitada de como as formas de relevo evoluíram ou dos processos e ligações que operam para manter o sistema funcionando. Muitas áreas protegidas cársticas tornaram-se centros de pesquisa de alta qualidade porque apresentam valores naturais significativos e também porque, em muitas partes do mundo, as áreas protegidas acolhem atividades científicas.

Pesquisas em áreas protegidas contribuem muito para o entendimento dos sistemas cársticos. O Mammoth Cave National Park (NP), no Kentucky, e Carlsbad Caverns NP, no Novo México, ambos Patrimônios da Humanidade, EUA, têm sido o sítio para desenvolver a hidrogeologia e espeleogênese cárstica (Mammoth) e da espeleogênese hipogênica e geomicrobiologia de cavernas (Carlsbad). Há infra-estrutura em ambos os parques, incluindo acomodação, bem como equipe de apoio, o que às vezes não é o caso se a pesquisa é feita em área privada. Outra vantagem é a maior proteção para caros equipamentos de campo. Instrumentos de monitoramento, como fluorômetros que monitoram parâmetros ambientais, geralmente precisam ser implantados por períodos prolongados para coletar dados, com um risco sempre presente de danos ou roubo. A equipe da área protegida também pode ajudar na coleta de dados, verificando a integridade do equipamento e fornecendo informações científicas indisponíveis para um cientista em local remoto. Algumas áreas protegidas têm cientistas locais em sua equipe permanente, às vezes chamados de 'especialistas em cavernas'. Isso permitiu que pesquisas de alta qualidade fossem realizadas rotineiramente. No Mammoth Cave NP, a pesquisa da equipe residente produziu o mapeamento detalhado do mundo das bacias de águas subterrâneas no carste. Outra vantagem de ter cientistas residentes é a possibilidade de fornecer aos alunos e ao público informações detalhadas sobre carste e cavernas. Nos EUA, colaboração entre Mammoth Cave e a vizinha Western

Kentucky University permitiram a implementação do programa 'Karst Field Studies', uma série de seminários focados em cavernas e carste de uma semana, liderados por cientistas residentes e não locais, que está em andamento desde 1979.

O que é chamado de 'pesquisa com foco interno' visa aumentar a compreensão das áreas protegidas e pode contribuir para a gestão. Um programa de monitoramento estruturado (ver Desenvolvendo monitoramento e mitigação efetivos) representará uma forma de pesquisa na medida em que produzirá dados que serão objeto de análise rigorosa. No entanto, a pesquisa com foco interno difere do monitoramento por abordar questões específicas (Ex: programa de rastreamento de água com corantes para estabelecer a área de captação de nascente) ou problemas (Ex: investigar declínio em determinada espécie de planta ou animal). Em contraste, a pesquisa com foco externo usa dados coletados dentro da área protegida para abordar questões mais amplas (Ex: reconstrução de ambientes passados usando o registro preservado em espeleotemas ou uso de cavernas como laboratório). Um exemplo deste último é o Biotério a 50 m dentro da Caverna de Postojna, na Eslovênia, parte é um laboratório usado para pesquisas científicas. Cavernas também são usadas como campo de testes para robôs usados para explorar cavernas em outros planetas. Em algumas situações, o financiamento da pesquisa é direcionado preferencialmente para áreas protegidas. No Brasil, onde as cavernas são protegidas em nível federal, o dinheiro da compensação ambiental relacionado aos impactos em cavernas deve ser direcionado preferencialmente para a pesquisa em cavernas. Algumas cavernas turísticas, como a popular Caverna de Nerja, perto de Málaga, na Espanha, também financiaram pesquisas cársticas, incluindo conferências científicas.

Em todas as áreas protegidas, a pesquisa em cavernas e no carste deve, ocorrer apenas após uma solicitação por escrito e a concessão de uma licença de pesquisa. As licenças devem ser solicitadas com bastante antecedência e é aconselhável que a equipe trabalhe em conjunto com as comunidades locais, incluindo o pagamento adequado pelos serviços. Alguns países têm regras para pesquisadores de outros países que desejam realizar pesquisas cársticas e de cavernas. O objetivo é garantir que os pesquisadores não adotem uma abordagem 'colonialista' e que o país anfitrião compartilhe o conhecimento adquirido. A UIS adotou um Código de Ética para expedições internacionais, algumas das quais incluem um componente de pesquisa específico (consulte fontes da Internet). É importante que aqueles que realizam pesquisas em países sem histórico de exploração de cavernas ajudem os povos locais a entender o propósito de seu trabalho, a fim de evitar possíveis mal-entendidos. Um caso infeliz foi uma expedição à Etiópia, onde os habitantes locais foram informados de que os espeleotemas eram "valiosos para pesquisa científica", o que levou pessoas a entrar nas cavernas e remover espeleotemas achando que poderiam ser vendidos.

Sempre que possível, funcionários da área protegida devem ser informados sobre a pesquisa e, devem ser envolvidos na coleta de dados. Isso permitirá que usem a pesquisa ao fornecer passeios a visitantes e auxiliem as equipes de pesquisa subsequentes com detalhes de estudos anteriores. Os pesquisadores devem ser incentivados a disponibilizar seus trabalhos de forma compreensível aos visitantes. Isso pode ser feito através de pôster in situ, artigo na internet ou nas mídias sociais. Em alguns casos, pode se compartilhar dados amplamente. O British Cave Science Centre (BCSC) em Poole's Cavern, local de interesse científico especial em Buxton, Inglaterra, estabeleceu um sistema de monitoramento do clima em cavernas em tempo real. Os dados são carregados no site da BCSC e podem ser baixados por qualquer pessoa gratuitamente (consulte fontes da Internet).

Recomenda-se que os formulários de solicitação de licenças de pesquisa incluam:

- Uma descrição do projeto e, para pesquisas voltadas para fora, as razões pelas quais ele precisa ser realizado na área protegida e não em outro local.
- O local onde o equipamento será instalado ou as amostras serão coletadas (e volume e frequência da coleta de amostras) com justificativa para o(s) local(is) específico(s) escolhido(s).
- Uma avaliação dos impactos potenciais e medidas que serão tomadas para minimizá-los. Um bom exemplo são as pesquisas que requerem o uso de espeleotemas, como em estudos de paleoclima/paleoambiente. Na década de 1980, quando quantidades relativamente grandes de material eram necessárias, era comum que espeleotemas inteiros fossem removidos de cavernas. Para a maioria dos estudos, isso não é mais necessário, pois apenas pequenas quantidades de material são necessárias e podem ser obtidas por extração cuidadosa de um núcleo fino. Depois que o núcleo foi extraído, um pequeno tampão pode ser inserido, permitindo que o espeleotema se recupere se houver precipitação contínua de calcita. Se disponível, deve-se dar preferência a exemplares de espeleotemas já quebrados, situação comum em cavernas que recebem visitação. Se não houver espeleotemas quebrados, uma abordagem conservadora deve ser adotada, escolhendo material oculto e de valor estético limitado.
- Detalhes sobre qualquer amostragem biológica ou microbiológica planejada. Isso é particularmente importante quando os pesquisadores estão baseados em países diferentes daquele em que a amostragem será realizada, pois alguns países não permitem esses materiais serem exportados sem burocracia adicional devido a casos frequentes de biopirataria. Por outro lado, países como a Austrália e os EUA têm leis muito rígidas em relação à importação de material biológico ou solo.

- O uso de drones e robôs para fotografia e mapeamento de cavernas por operadores de cavernas treinadas é um desenvolvimento recente que pode fornecer dados de alta qualidade para análise e interpretação científica, mas qualquer uso desses dispositivos deve ser aprovado como parte da licença de pesquisa.

Quem avalia os pedidos de permissão devem ser cientes que técnicas ou protocolos desatualizados podem resultar em danos aos recursos de cavernas e carste. Isso ocorreu durante trabalhos arqueológicos e paleontológicos quando as escavações e remoção de artefatos ou vestígios biológicos foram realizadas sem estudos contextuais (tafonômicos) in-situ, limitando as chances de obter informações cronológicas e deposicionais críticas. Se possível, uma parte representativa do depósito deve ser preservada intacta para permitir futuros trabalhos com técnicas mais avançadas. As condições ambientais estáveis que tendem a facilitar a preservação de conjuntos paleontológicos e seus contextos são as mais vulneráveis à perturbação. Essas escavações podem implicar alterações no regime energético, com os correspondentes impactos no meio subterrâneo. Arqueólogos estão cientes de materiais que podem interferir em seus métodos de datação, mas folhas de plástico em decomposição e redes de sombra desgastadas ainda podem ser encontradas em muitos locais de cavernas após a 'reabilitação' de áreas escavadas. Em contraste com a perturbação do local de superfície, vestígios ou efeitos de atividades humanas em ambientes subterrâneos de média ou baixa energia podem persistir por centenas ou mesmo milhares de anos. Os pesquisadores devem ser incentivados a aproveitar os avanços tecnológicos, principalmente oportunidades de monitoramento remoto de sites de superfície, reduzindo o número de visitas. Painéis fotovoltaicos e as pequenas turbinas eólicas permitem uma monitorização contínua sem necessidade de visitas para substituição de baterias e os dados ser carregados através de celulares ou redes de satélites.



Perfuração de um espeleotema para pesquisa paleoclimática, conduzida sob uma licença em um Sítio de Interesse Científico Especial no Reino Unido. Foto de John Gunn.

Diretrizes

- (34) *Todas as áreas protegidas com cavernas e carste devem desenvolver políticas de gerenciamento de pesquisa, que só devem ser permitidas após o recebimento e aprovação de uma solicitação.*
- (35) *Aqueles que desejam realizar pesquisas em cavernas devem ser capazes de demonstrar que estão familiarizados com ambientes de cavernas e o Código de Caving de Impacto Mínimo local, ou que estão trabalhando com cientistas de cavernas experientes que garantirão a adesão ao código.*
- (36) *Para aquelas cavernas que possuem um plano de manejo, deve haver uma seção sobre atividades de pesquisa.*

- (37) *Todos os pesquisadores que trabalham em cavernas ou em carste, dentro ou fora de áreas protegidas, são recomendados a avaliar cuidadosamente suas propostas, incluindo uma comparação de benefícios potenciais com o risco de danos ao meio ambiente ou valores culturais.*
- (38) *Deve haver ênfase em métodos mínimos de amostragem para fauna, espeleotemas e sedimentos, e pesquisadores devem comprometer a publicar resultados de forma compreensível para o público e para a mídia acadêmica. Pesquisadores devem se comprometer com remoção do equipamento e reabilitar o local (se necessário) no final.*

Agricultura e Exploração florestal

O desenvolvimento da espécie humana esteve ligado à supressão da vegetação natural, principalmente florestas, e sua substituição por terras agrícolas. Assim, a sucessão de vegetação forçada pelo homem perturbou ecossistemas naturalmente evoluídos, com uma composição florística específica e biota adaptada a longo prazo. Globalmente, as únicas áreas cársticas que não sofreram impactos da silvicultura e da agricultura estão localizadas em locais remotos ou receberam forte proteção que impediu o desmatamento. Muitos impactos no carste são diretos e localizados, como os das indústrias extrativas, com impacto variando de pequena escala a profunda. A desertificação das rochas generalizada em partes da bacia do Mediterrâneo e no sul da China, por exemplo, é consequência da erosão do solo provocada pela remoção da vegetação nativa e práticas agrícolas de acompanhamento. Foi descrito como o impacto humano mais profundo no carste. Mesmo em áreas temperadas onde o carste é amplamente coberto por solo, o maior impacto antrópico (em termos de cobertura de área) é comumente da agricultura.



Paisagem cárstica usada para pastagem, Mirador de Camba, Astúrias, Espanha. Foto de David Gillieson

A região mediterrânea, berço da civilização europeia, é exemplo para os impactos no carste temperado quente. Suas florestas primitivas de pinheiros e cedros foram substituídas por associações secundárias de arbustos como garrigue ou phrygana. Comunidades de plantas com fisionomia semelhante desenvolveram-se para o norte, nos Bálcãs e na Europa Oriental em latitudes médias, sob condições de clima mais temperado, embora moderadamente continental (o shibljak sérvio e o manto espinhoso *Crataego-Prunetea* matagal comunidades). Esses arbustos quentes e secos formam associações de plantas dominantes em muitos planaltos cársticos. Fora da Europa, houve tendências semelhantes, mas mais recentes. Em Madagascar, o desmatamento de florestas nativas para conversão em terras agrícolas foi grande ameaça para a fauna endêmica dos riachos cavernícolas devido às rápidas mudanças nas bases tróficas das cadeias alimentares, causando graves perdas de biodiversidade. Em algumas regiões cársticas do sudeste asiático, o desmatamento de florestas nativas e sua substituição por plantações de óleo de palma tem sido uma preocupação particular. Essas áreas cársticas que permanecem em uma condição natural sustentam uma rica biodiversidade em comparação com as litologias adjacentes. Essa biodiversidade foi mantida em parte pelas práticas tradicionais das comunidades locais, mas pode ser rapidamente destruída pela atividade comercial. Em contraste com seus impactos diretos na biodiversidade cárstica, os impactos indiretos da agricultura e da silvicultura no geo patrimônio cárstico são amplamente indiretos e se relacionam principalmente com mudanças na qualidade e quantidade da água.

Práticas agrícolas em terrenos cársticos

A prática da agricultura em áreas cársticas é um desafio para as comunidades rurais e suas tentativas de resolver problemas como a falta de água geralmente afetam o carste. Em algumas partes da Europa, um tipo distinto de paisagem, às vezes chamado de 'agri-carste', desenvolveu-se em resposta ao clima local e às abordagens agrícolas. As práticas agrícolas no carste, como o próprio carste, são amplamente influenciadas ou controladas pelo clima e três grandes zonas podem ser reconhecidas:

- Áreas tropicais úmidas com agricultura intensiva (arroz, cana-de-açúcar) que geralmente apresentam cenários cársticos dramáticos (por exemplo, sudeste da Ásia).
- Regiões cársticas temperadas com agricultura mista baseada principalmente em grãos (especialmente trigo e milho), vegetais e na zona temperada quente, vinhas e oliveiras. A pastorícia/pecuária também pode ter impactos importantes na qualidade e quantidade da água no carste.
- Ambientes frios, em altas latitudes ou altitudes, onde dominam a pecuária e/ou cultivos em socacos, muitas vezes de subsistência.

Nas torres e carstes cônicos do sudeste da Ásia, muitas práticas tradicionais estão relacionadas à agricultura, por exemplo, no fenglin-fengcong das províncias de Yunnan, Guizhou e Guangxi, no sudoeste da China, no carste de Bohol, Filipinas ou no cockpit de Gunung Sewu, Indonésia. Durante muito tempo, as comunidades moldaram colinas e montanhas em socacos para reduzir as encostas e reter água da chuva durante a estação chuvosa. A agricultura de arroz úmido de Bohol, nas Filipinas, é um exemplo de integração harmoniosa entre a paisagem cárstica e a prática agrícola, conseguindo alcançar a sustentabilidade em escalas centenárias. O calendário sazonal que tem sido usado há séculos pelas comunidades locais para adaptar as necessidades agrícolas locais ao viés climático parece se adequar melhor ao sistema regulador natural do carste subjacente. Infelizmente, o declínio dos sistemas de irrigação desencadeou mudanças socioambientais (substituição de cultivos de arroz úmido por um sistema agrícola baseado em milho menos valioso economicamente) com efeitos severos em áreas cársticas de planície 'úmidas'. Em contraste, a ocupação histórica do carste no sudoeste da China (um dos maiores carstes contínuos do mundo) resultou em perda da cobertura vegetal e erosão do solo devido ao uso agrícola, ao desmatamento e ao aumento do consumo de água.



Agricultura intensiva no chão de uma grande depressão no carste Wan Fenglin, Guizhou, China. Houve desmatamento significativo das torres ao fundo, embora algumas áreas de floresta permaneçam. Foto de John Gunn.

Em zonas temperadas, planaltos inclinados esburacados por dolinas formam a topografia cárstica que, em estágio mais desenvolvido, resulta em carste poligonal. Onde esta paisagem era antes coberta por vegetação florestal densa e antiga, as dolinas podem funcionar como refúgio para espécies de plantas, o que é importante para conservação no atual contexto de aquecimento global. Nessas áreas, a remoção florestal resulta em transferência de sedimentos para partes baixas das dolinas, com mudanças no regime hidrológico, como observado no King Country carste, Nova Zelândia. As dolinas são preenchidas deliberadamente na tentativa de aumentar a área do terreno plano. O carste pode ser destruído por razões semelhantes e também pode ser extraído para construção de paredes locais ou, em algumas áreas, para pedras decorativas. Cada uma dessas ações tem o potencial de desencadear mudanças severas na funcionalidade dos geo ecossistemas subterrâneos.

A agricultura é relacionada ao desmatamento histórico, erosão e subseqüentes níveis mais altos de mudanças de sedimentos, bem como mudanças nos padrões de utilização de recursos alimentares em ambos os córregos superficiais e subterrâneos. Estes agem como principais estressores nas comunidades de invertebrados de riachos de cavernas. O sedimento que entra em uma caverna, por exemplo, será depositado em áreas de menor velocidade, alterando o habitat. Entradas de sedimentos também podem interromper a hidráulica do conduto, particularmente onde se acumulam em loops freáticos. A poluição orgânica altera a estrutura da comunidade da biota e geralmente resulta na diminuição de sua distribuição e riqueza. A matéria orgânica dissolvida e os biofilmes nos seixos são fontes de energia para as comunidades ribeirinhas. Outros estressores antropogênicos geram efeitos no metabolismo de organismos subterrâneos e incluem metais e metalóides, pesticidas, fertilizantes, contaminantes emergentes e compostos orgânicos voláteis. Fontes comuns de contaminação incluem fertilizantes e esterco aplicados a lavouras, instalações de armazenamento de esterco, confinamentos, galpões de ordenha, aviários e suínos e currais. Coxon (1999) fornece exemplos de impactos agrícolas e explica o papel dos aquíferos cársticos na transmissão de agroquímicos e organismos patogênicos para as nascentes. Essas atividades não são sentidas apenas por organismos subterrâneos, mas podem impactar diretamente na saúde humana. Na área de Waitomo, na Nova Zelândia, dejetos de suínos despejados em uma dolina contaminaram uma nascente que fornecia água para uma fazenda. Na Irlanda, uma nascente cárstica que fornecia água para a cidade de Castleisland teve que ser desativada devido à poluição causada por lama e outros poluentes das fazendas. Um dos impactos mais graves da poluição agrícola no carste ocorreu em maio de 2000, quando os poços municipais de Walkerton, no Canadá, foram contaminados com bactérias patogênicas, resultando em sete mortes e doenças em mais de 2.300 pessoas.



Pavimento de calcário Sheshymore no Geoparque Mundial da UNESCO de Burren e Cliffs of Moher, Irlanda. A análise do pólen sugere que esta área tinha um solo mineral espesso e era florestada em tempos pré-históricos. O desmatamento da floresta foi seguido por uma erosão catastrófica do solo, um processo agora comumente referido como desertificação rochosa. Foto de John Gunn.

A maior parte da poluição é gerada por recarga pontual e, portanto, pode ser minimizada se 1) não for permitida a descarga direta de escoamento agrícola em áreas de recarga, como riachos, dolinas ou outras aberturas naturais, e 2) zonas tampão forem estabelecidas ao redor dessas áreas. Nenhuma aragem ou pastagem de gado deve ser permitida nas zonas tampão e uma cobertura vegetal completa deve ser mantida para filtrar sedimentos no escoamento da terra arada. É necessário um cuidado especial em áreas onde há apenas uma fina camada de solo sobre o carste, como foi o caso de Walkerton.

Mudança no uso da terra agrícola reduz concentrações de dióxido de carbono no solo, e terá impacto na taxa de dissolução no epicarste e, potencialmente, na deposição de espeleotemas. As concentrações de CO₂ no solo são mais altas em florestas nativas, por exemplo, do que em pastagens, e pastagens geralmente têm concentrações mais altas do que em terras cultivadas. Uma consequência disso é que os estudos mostraram que as concentrações de CO₂ no solo podem ser aumentadas pela conversão de terras aráveis em pastagens, o que pode ser uma boa prática para implementar em terrenos cársticos degradados. A redução da cobertura do solo pela erosão levará a uma infiltração mais rápida, particularmente após chuvas intensas, e onde isso ocorre acima de uma caverna, as águas insaturadas de recarga rápida terão o potencial de re-dissolver espeleotemas.



Terra cultivada sazonalmente em Cerkljano polje, Eslovênia. Foto de David Gillieson

Exploração florestal no Carste

Floresta é uma forma de vegetação natural bem estabelecida e evoluída a longo prazo, essencial para a regulação e função dos sistemas cársticos. Nas regiões cársticas, florestas são importante componente do ciclo biogeoquímico. Para o manejo sustentável de terrenos cársticos florestais, alguns princípios relativos à natureza das florestas e à variabilidade do dióxido de carbono (CO₂) do solo são considerados. Depois dos oceanos, o solo é o segundo maior sumidouro de carbono da Terra. A vegetação da floresta e o solo abaixo são estoques de carbono, o que significa que eles podem capturar CO₂ do ar e armazená-lo, bem como liberá-lo gradualmente. Parte desse CO₂ se dissolve na água que se infiltra no calcário, fazendo com que ele seja intemperizado e, finalmente, forme aberturas e cavernas no subsolo. Desta forma, o equilíbrio de carbono no sistema cárstico são cruciais, e um equilíbrio é alcançado dentro de cada área cárstica ou bacia entre a vegetação, o solo, a rocha e as águas subterrâneas. A alteração do uso do solo ou da vegetação irá alterar o equilíbrio, sendo as alterações climáticas outro fator, afetando a disponibilidade de água e a atividade da vegetação. Carbono adicional é levado para o solo sob a vegetação da floresta, favorecendo a maior dissolução do calcário com alguns dos íons de carbonato dissolvidos sendo depositados como crescimento de espeleotemas. Esses depósitos químicos, geralmente formados em cavernas por precipitação de calcita, requerem um maior tempo para a infiltração de água e baixas taxas de gotejamento para se desenvolver. Essas condições são geralmente encontradas em leitos rochosos fissurados, com aberturas que conduzem e distribuem a água infiltrada nas cavidades maiores. As raízes das árvores enviam mais CO₂ para o solo, promovendo o intemperismo da rocha, também imprimindo um padrão específico ao epicarste (o nível hidrológico mais alto do sistema cárstico) ao fissurar o leito rochoso durante o crescimento. A atividade da microbiota do solo é importante para regular o ciclo do carbono, pois liberam o CO₂

armazenado de volta para a atmosfera. O carbono liberado do calcário intemperizado passa para o oceano através das águas subterrâneas e rios, embora uma porção seja perdida para a atmosfera através do solo ou por desgaseificação direta das águas subterrâneas. O intemperismo do calcário é geralmente considerado um sumidouro de carbono por meio do 'intemperismo de carbonato', no entanto, não é certo que seja sempre verdade, e a eficiência do processo varia em cada área ou bacia.

Exploração florestal é um tipo de uso da terra com seus próprios problemas. Florestas primárias são classificadas como comunidades clímax, estáveis devido à sua evolução e sem perturbações. Algumas florestas ocupam terrenos cársticos em áreas montanhosas ou tropicais, mas podem estar ameaçadas pela expansão contínua do habitat humano, turismo ou extração de madeira. Essas florestas requerem proteção e não devem ser submetidas a nenhuma forma de exploração humana. As práticas envolvem a construção de estradas (acompanhada de corte de taludes), extração de madeira, cultivo de mudas e replantio de árvores, bem como várias atividades pós-extração. O desmatamento deixa a terra temporariamente ou permanentemente desprovida da proteção de uma cobertura vegetal estável, o que significa uma mudança no equilíbrio de todo o sistema natural. Mudanças rápidas ocorrem logo após o desmatamento da floresta, resultando no aumento da infiltração das chuvas, aumento da produção de nitrogênio devido à decomposição da madeira e o início da erosão. A erosão desencadeia mudanças no padrão epicarstiano e diminuição no sumidouro de CO₂, com consequências negativas para o equilíbrio do sistema cárstico.

A exploração madeireira não é a única ameaça ao ambiente cárstico. Introdução de espécies arbóreas exóticas e economicamente mais produtivas em florestais estabelecidos desenvolvidos no carste e, mudança do tipo de floresta fundamental (por exemplo, floresta conífera em vez de floresta decídua e plantações de dendezeiros no lugar da floresta tropical) pode resultar no desequilíbrio hidrológico e químico das águas cársticas, aumento da acidez do solo, corrosão acelerada do leito rochoso e degradação do espeleotema. Incêndios induzidos em florestas ou pastagens adjacentes a florestas, se não limitados à intensidade, duração e extensão dos incêndios naturais em terrenos cársticos, têm impactos negativos de longo prazo, consistindo principalmente em calcinação e fragmentação de superfícies rochosas; aumento da concentração de compostos inorgânicos dissolvidos nas águas subterrâneas; e mudanças na química das águas subterrâneas e seu regime hidrológico.



Carste florestal na Eslovênia. Foto de John Gunn.

Fundamental para atividades madeireiras ou florestais em áreas cársticas é a necessidade de avaliar cuidadosamente os valores e a sensibilidade da superfície cárstica e sua conectividade (ou abertura) com o subsolo. Antes das atividades florestais, é necessária uma metodologia para inventariar e mapear a área cárstica, avaliar sua sensibilidade à mudança (ou vulnerabilidade) e desenvolver prescrições de manejo adequadas. Deve-se considerar a análise do tipo e magnitude das atividades florestais dentro de uma bacia hidrográfica cárstica.



As atividades florestais podem ocorrer com impactos na integridade de paisagens cársticas com dolinas (dolinas cársticas). A construção de estradas e a colheita de madeira por corte raso removem a vegetação florestal naturalmente evoluída. Áreas de florestas naturais são comumente substituídas por povoamentos de mesma idade em 'florestas plantadas'. Dolinas sem buffers adequados podem ser preenchidas com detritos de corte e suas encostas internas mais íngremes desestabilizadas. Lago Bonanza, Ilha de Vancouver. Foto de Paul Griffiths.

Diretrizes

- (39) *A atividade agrícola tem o potencial de causar impactos adversos significativos nos geo ecossistemas cársticos. Os gerentes de áreas protegidas devem (a) dar atenção especial a quaisquer mudanças propostas no uso da terra e (b) fornecer orientações adequadas ao tipo de cultivo e às condições particulares do solo, a fim de minimizar os impactos na quantidade e qualidade da água.*
- (40) *Com relação ao uso da terra, a terra arável requer um manejo cuidadoso do solo para minimizar a perda erosiva e alteração das propriedades do solo, como aeração, estabilidade de agregados e teor de matéria orgânica, e para manter uma biota saudável do solo. As pastagens devem ser manejadas para manter a cobertura vegetal, dando atenção especial aos níveis de lotação. Como as dolinas fornecem pontos de recarga, elas devem ser deixadas em seu estado natural e nunca devem ser preenchidas ou usadas para descarte de lixo.*
- (41) *Sempre que possível, as zonas tampão devem ser estabelecidas em torno de áreas de recarga concentrada, como riachos que afundam, dolinas ou outras aberturas naturais, pois são condutos para o movimento de contaminantes e poluentes no ambiente cárstico subterrâneo. Em terras agrícolas, não deve ser permitida a lavoura nas zonas tampão e deve ser mantida uma cobertura vegetal completa para filtrar qualquer sedimento no escoamento da terra arada. Nas florestas, a preservação e potencialização da vegetação nativa em zonas de amortecimento é fundamental*
- (42) *No que diz respeito à quantidade de água, deve-se controlar a quantidade de água subterrânea extraída para irrigação. A captação de água da chuva deve ser empregada o máximo possível.*
- (43) *Com relação à qualidade da água, o uso de pesticidas e herbicidas deve ser desencorajado, a menos que seja absolutamente necessário controlar pragas e ervas daninhas. O uso de fertilizantes deve ser reduzido e, sempre que possível, devem ser usados fertilizantes naturais. Zonas tampão em torno de áreas de recarga concentrada devem ser respeitadas e as aplicações químicas não devem ocorrer durante os períodos em que os solos estão em ou perto da saturação e há risco de escoamento superficial de produtos químicos para o carste.*

- (44) *Antes de atividade madeireira ou florestal em áreas cársticas, é necessário procedimento para inventariar e mapear a área, avaliar sensibilidade e/ou vulnerabilidade e desenvolver prescrições de manejo adequadas. Deve-se considerar uma análise prévia do tipo e magnitude das atividades dentro de uma bacia cárstica específica, além de monitoramento para garantir como as prescrições foram implementadas e quão bem as áreas cársticas sensíveis foram protegidas.*
- (45) *As florestas naturais desenvolvidas em terrenos cársticos, incluindo árvores maduras e florestas de crescimento excessivo, não devem ser derrubadas, derrubadas ou sujeitas a qualquer impacto humano. Em vez disso, essas florestas devem ser rigorosamente protegidas por um manejo de conservação adequado, de modo que os ambientes cársticos superficiais e subterrâneos continuem a usufruir dos benefícios de seus serviços ecossistêmicos.*
- (46) *Em áreas onde a floresta nativa foi derrubada e substituída por outras espécies, os gestores devem planejar a substituição das espécies não nativas pelo tipo de floresta que melhor se adapte às condições ecológicas do local.*



A remoção da vegetação natural da floresta pelo corte raso de madeira seguido de incêndio florestal pode causar erosão significativa do solo, semelhante à 'desertificação rochosa' observada em algumas regiões Karst do Sul da China e Karst Dinaric. Essa degradação das paisagens cársticas pode alterar os insumos hidrológicos, bem como resultar na perda de habitat e declínio da biodiversidade. O fogo causa calcinação e quebra (por exemplo, lascamento) das superfícies superiores do leito rochoso do epicarste. Kinman Creek cárstico, Ilha de Vancouver. Foto de Paul Griffiths.



O corte raso de florestas evoluídas naturalmente em áreas cársticas com solos finos pode levar a uma perda severa de solo por gravidade em juntas, fissuras alargadas e outras aberturas de leito rochoso. As queimadas prescritas e/ou incêndios florestais podem piorar esses impactos da exploração madeireira. Formas de karren anteriormente cobertas de solo com sulcos profundos são descobertas. Karst do Rio Tahsish, Ilha de Vancouver. Foto de Paul Griffiths.

Indústrias extrativas

Uma nota sobre a terminologia. Os termos 'mina', 'poço' e 'pedreira' são todos usados para descrever um local de onde são extraídas pedras ou minerais. Alguns autores usam o termo 'pedreira' onde a pedra está sendo extraída e 'mina' para a extração de outros minerais, mas o uso é inconsistente. Em cada caso, a extração pode ocorrer na superfície, caso em que às vezes é prefixado pela palavra 'aberto' como em 'a céu aberto' ou 'mina a céu aberto', ou abaixo da superfície. Neste documento usamos o termo 'pedreira' para uma escavação de superfície e 'mina' para trabalhos subterrâneos.

Cavernas e áreas cársticas abrigam depósitos minerais que são usados pelo homem desde a "idade da pedra". O calcário, a rocha mais comum na qual se encontram as formas cársticas, tem sido usado por milênios como pedra de construção. No século 21 dC, tornou-se um dos materiais mais utilizados no mundo, inclusive na construção como cimento, principalmente em concreto; nas indústrias química e farmacêutica; na fabricação de papel e celulose; na agricultura como cal; na fabricação de ferro e aço; como rochas ornamentais; e em uma variedade de processos ambientais, incluindo dessulfurização de gases de combustão. A dolomita é usada como fertilizante. As rochas não carbonáticas que formam o carste também têm usos práticos. O gesso é comumente aplicado em fertilizantes e nas construções; o sal encontra muitos usos nas indústrias alimentícia e química; formações de ferro são essenciais para a fabricação de aço e ferro; e o quartzito é uma pedra ornamental comum. Portanto, não é surpreendente que as indústrias extrativas tenham o potencial de impactar o geo patrimônio e os ecossistemas de cavernas e cársticas.

Além do leito rochoso, depósitos importantes são associados ao carste. Alguns minerais que contêm zinco, chumbo e prata, mas também fluorita, barita e apatita, e outros, preenchem estruturas colapsadas ou veios dentro de sequências carbonáticas, associadas a antigas feições de dissolução denominadas 'paleocarste'. Minerais valiosos são cruzados por cavernas, como pode ser o caso de veios mineralizados, facilitando acesso ao local a ser minerado. Minerais de valor podem se concentrar em depressões cársticas ou arrastados para cavernas. no centro do Brasil, diamantes de conglomerados foram extraídos dentro de cavernas de quartzito, exigindo a construção de paredes de pedra e modificação de passagens. Em todo o mundo,

aproximadamente 60% do petróleo e 40% das reservas de gás estão hospedadas em rochas carbonáticas, associadas a estruturas de porosidade secundária, como horizontes de alta permeabilidade e cavidades isoladas (denominadas 'vugs' na literatura).

Existem alguns minerais que, apesar de não estarem inseridos nas rochas cársticas, podem ter a sua gênese devida, pelo menos em parte, a processos cársticos. É o caso da bauxita, um resíduo de intemperismo rico em alumínio comumente associado a rochas cársticas. O uso excessivo de águas subterrâneas (às vezes referido como 'mineração de água'), embora não seja específico de áreas cársticas, pode ser considerado como uma forma de atividade extrativa, especialmente se o bombeamento de água exceder a recarga. Este é frequentemente o caso em grandes esquemas de desidratação de minas.



Cone extraído e caverna parcialmente destruída, Tailândia. Foto de John Gunn.

Uma categoria de minerais associados a cavernas são os depósitos químicos ou orgânicos formados em passagens secas. Salitre é um depósito de solo rico em nitrato que ocorre em cavernas, em todo o mundo, e tem sido utilizado como ingrediente para a fabricação de pólvora, principalmente durante os séculos XVIII e XIX. O guano, o excremento rico em matéria orgânica de

pássaros e morcegos, foi extraído nas Américas, sudeste da Ásia e Austrália durante o século 19 para a produção de fertilizantes. Carlsbad Caverns foi um desses locais. Hoje, a mineração de guano por fazendeiros locais é comum nos trópicos. Está longe de ser uma atividade renovável – é totalmente destrutiva de importantes arquivos paleoambientais e altamente danosa às comunidades de invertebrados dependentes do guano. Até hoje, ninhos de pássaros, produzidos com a saliva de andorinhões, são legalmente coletados em cavernas na Malásia e na Tailândia para serem vendidos como uma iguaria gastronômica cara.

Minerais associados ao carste foram extraídos desde a pré-históricos. No calcário carbonífero perto de Llandudno, Reino Unido, minas de cobre datam de cerca de 4.000 anos e as múmias dentro de cavernas atestam os feitos dos nativos americanos, que navegaram quilômetros de passagens em cavernas em Mammoth Cave NP, EUA, para coletar gesso e pederneira usando tochas rudimentares. Da mesma forma, os indígenas australianos negociaram cerca de 1.000 m de passagem para a mina de pederneira na caverna Koonalda, Nullarbor. A mineração de calcário ou travertino para fins de construção ocorre há milênios, especialmente na região mediterrânea rica em carste. Associada à 'descoberta' européia das Américas e da Austrália, a importância econômica dos depósitos cársticos levou ao boom da indústria de fertilizantes associados ao guano e à mineração em grande escala de salitre em cavernas, que nos EUA foi importante para a produção de pólvora durante sua Guerra Civil da década de 1860. Desde a Revolução Industrial, houve um aumento na demanda por várias commodities minerais relacionadas ao carste.

O impacto ambiental das indústrias extrativas varia entre atividades, tipo de jazida e técnica de mineração, bem como fatores econômicos. As rochas carbonáticas compreendem cerca de 15% da superfície continental da Terra e, o preço de mercado é menor do que os minerais menos comuns. No entanto, há uma demanda cada vez maior por carbonatos e a pedra de alta pureza usada nas indústrias farmacêutica e química tem um preço mais alto. A extração de outros minerais hospedados por rochas cársticas também é impulsionada por fatores econômicos, com preços de commodities minerais flutuando amplamente de acordo com a demanda. Um ciclo de aumento da demanda está associado ao rápido crescimento do mercado chinês desde o final dos anos 2000 e envolve metais básicos como o ferro. Os preços de outros metais críticos também aumentaram devido ao rápido crescimento do setor de energia renovável, sendo lítio, níquel e cobalto essenciais para a fabricação de baterias de carros elétricos. Esses megaciclos econômicos alimentam a indústria global de mineração e aumentam a pressão para que a extração mineral ocorra em áreas protegidas ou próximas a elas. Este é um problema particular para os países em desenvolvimento, onde a alta demanda e, conseqüentemente, os altos preços praticados por esses metais os tornaram commodities estratégicas.

Extração de rochas carbonáticas

Alguns depósitos de calcário ou dolomita de alta pureza foram explorados em minas subterrâneas, mas a grande maioria é extraída de pedreiras a céu aberto. Nos países desenvolvidos, as primeiras pedreiras eram empreendimentos locais de pequena escala, no entanto, a maior parte da pedra é agora extraída de um pequeno número de grandes pedreiras comumente localizadas nos flancos das colinas ou nas encostas dos vales. Muitas dessas pedreiras operam há décadas e, como a permissão para novos locais é geralmente difícil de obter, há uma tendência de os operadores de locais existentes procurarem expandir ou ir mais fundo. Um problema específico para os gerentes de áreas protegidas é que os locais podem estar operando dentro ou nos limites de uma área protegida antes de ela ser designada, como é o caso do Parque Nacional de Peak District, na Inglaterra.

Países em desenvolvimento, em áreas tropicais, existem pedreiras de calcário que podem ser problemáticas em áreas de cone ou torre, onde uma pedreira pequena pode remover uma colina inteira que pode conter espécies endêmicas. Nessas situações, o desenvolvimento de uma grande pedreira fora de uma área protegida e o fechamento de pequenas pedreiras provavelmente reduzirão significativamente os impactos, principalmente se forem exigidos padrões ambientais mais elevados no local maior.

Extração de formações de ferro

Em contraste com rochas carbonáticas que surgem em grandes áreas, formações de ferro são rochas menos comuns formadas devido a eventos geológicos que ocorreram há mais de um bilhão de anos. Como a concentração de ferro se deve à lixiviação de sílica e à mobilização de ferro (mesmos processos que criam cavernas), a maioria dos corpos de minério de alto teor está associada a cavernas. Essas rochas estão em alta demanda e, no Brasil, uma parte dos afloramentos de formação ferrífera já foi lavrada, com muitas áreas remanescentes incluídas em planos de lavra futuros. Embora a maioria das minas resulte em impacto localizado devido ao pequeno tamanho, mesmo das maiores minas, existem plantas industriais associadas ao local, além de uma extensa cadeia de fornecedores que favorece o rápido desenvolvimento urbano, resultando em impactos em áreas muito maiores. Em Carajás, Amazônia brasileira, o maior depósito de ferro do mundo não foi descoberto até 1967 e está localizado em planaltos de ferro que contêm mais de 2.000 cavernas. A área originalmente tinha uma baixa densidade populacional, principalmente tribos indígenas que viviam na floresta amazônica intocada. A mineração começou alguns anos depois e em 2020 havia mais de 300.000 pessoas morando nas proximidades em novas cidades sustentadas por atividades de mineração.

Impactos da indústria extractiva

Conforme observado na introdução, pedras e minerais podem ser extraídos de pedreiras ou de minas subterrâneas. Os impactos dessas duas formas de extração tendem a ser muito diferentes, principalmente em áreas protegidas, e, portanto, são considerados separadamente a seguir.

Impactos das pedreiras

As pedreiras têm dois tipos de impacto; primeiro, impactos diretos dentro do local e, segundo, impactos indiretos na área mais ampla. O primeiro impacto no local é consequência da remoção de qualquer solo sobrejacente e depósitos superficiais para expor a rocha a ser extraída. Onde essa rocha é um carbonato, a perda de solo resulta na perda imediata da maior parte do dióxido de carbono que impulsiona o processo de dissolução à medida que é gerado na zona do solo. Após a remoção de qualquer solo e depósitos superficiais, a primeira rocha a ser removida é do epicarste, região onde ocorre a maior parte da dissolução. A remoção dessa rocha impactará diretamente na dissolução e, portanto, na quantidade de carbonato de cálcio que atinge as nascentes cuja captação inclui a pedreira. Por exemplo, na Floresta de Dean, no Reino Unido, há uma pedreira de calcário na bacia hidrográfica de nascentes que são protegidas porque depositam tufa. As nascentes são monitoradas para determinar se a extração está reduzindo a carga de carbonato da primavera e impactando na deposição de tufo.

O valor relativamente baixo da rocha carbonática significa que poucas pedreiras são desenvolvidas sob uma cobertura espessa, mas esse não é o caso quando a pedreira está extraindo um mineral mais valioso. Nesse caso, o material sem valor econômico (estéril ou rocha hospedeira do mineral de interesse) é depositado em barragens de rejeitos ou em pilhas de estéril que podem ter um impacto ambiental mais adverso do que a pedreira.

Pedreiras mais antigas localizavam-se nas encostas de colinas e vales, pois é mais fácil extrair a pedra lateralmente do que ir ao fundo. Isso resulta na modificação do relevo da superfície ou na destruição total, o que é uma preocupação em áreas de cone ou torre cárstica, onde a extração pode remover uma colina completa. Além da óbvia perda de geo patrimônio, muitas colinas em áreas tropicais são abrigos de morcegos e abrigam espécies raras, algumas das quais podem ser endêmicas de uma única torre.

À medida que expandem pedreiras, aumenta o potencial de interseção de elementos do sistema de drenagem cárstica. Se uma pedreira tiver uma permissão, não há nenhum mecanismo para evitar a destruição da caverna; no entanto, as permissões devem incluir um requisito para o registro científico da morfologia e sedimentos da caverna. Em alguns países, existe legislação que exige compensação pela destruição de cavernas. No Brasil, a destruição de qualquer caverna que não tivesse sido classificada como extremamente importante era legalmente permitida, desde que a destruição fosse compensada por um pagamento ou pela preservação permanente de outra caverna. Isso levou à criação de áreas de preservação, incluindo novos parques nacionais que protegem áreas cársticas e cavernas. No entanto, colocar um preço em cavernas não é isento de riscos como estratégia de preservação, uma vez que o preço é atrelado a índices econômicos do governo, enquanto os preços do minério variam muito. Durante os booms das commodities metálicas que prevaleceram desde os anos 2000, o custo pela destruição de cavernas pode ser considerado um preço que vale a pena pagar quando comparado aos recursos financeiros maiores necessários para abrir e operar pedreiras. Além disso, o valor das reservas bloqueadas por qualquer caverna geralmente excede o preço a ser pago pela destruição. No início de 2020, os impactos irreversíveis totais no Brasil podem chegar a até US\$1 milhão por caverna.

Quando uma pedreira, ou parte de uma pedreira, atinge um ponto em que nenhuma outra pedra será extraída, surge uma oportunidade de restauração, que é particularmente valiosa se as pedreiras estiverem dentro de uma área protegida. Uma possibilidade pode ser a construção de um novo epicarste feito de qualquer resíduo de calcário espalhado no chão da pedreira (que pode precisar ser rasgado para melhorar a infiltração) e coberto por material de solo ou calcário fino (3 mm a pó) com um melhorador orgânico. Nas margens da pedreira, a técnica de replicação do relevo procura construir relevos semelhantes aos encontrados no carste natural fora da área extraída, como contrafortes rochosos, paredes de cabeceira e seixos.

Impactos fora da pedreira referem-se a detonações e água e, ambos casos, existe o potencial da pedreira fora de área protegida ter impactos dentro da área protegida. Os impactos da detonação são complexos e relacionados tanto com projeto ou execução da detonação quanto a geologia. Existem exemplos de grutas cortadas por pedreiras onde nenhum dano à morfologia ou aos espeleotemas e outros onde cavernas a centenas de metros foram danificadas. Outra consideração são impactos do ruído e vibração na fauna cavernícola, pouco compreendida. Apesar disso, é claro que impactos podem ser minimizados por projetos modernos, no qual a quantidade de explosivo e posição no buraco de tiro são calculadas e atrasos de milissegundos usados para reduzir a vibração do ar. Outra consideração é que, o explosivo mais comum era o ANFO (nitrate de amônio e óleo combustível) misturado no furo. Isso representa risco de contaminação de DNAPL (líquido de fase não aquosa densa) de longa duração. A detonação moderna emprega ANFO pré-misturado, com explosivos de emulsão. O armazenamento de óleo combustível cria o

potencial de liberação no carste. O mal manuseio de nitrato de amônio também resulta na contaminação por nitrato das águas subterrâneas. Ambos os produtos usados para criar o ANFO são geralmente armazenados e misturados na pedreira antes do uso.



Uma face de pedreira no Karst de Lagoa Santa, Brasil mostrando pináculos do subsolo. Foto de Augusto Auler.

Impactos hidrológicos referem-se à água que entra ou sai. Tal como acontece com impactos de detonação, é essencial avaliar o contexto hidrogeológico. A água pode entrar por fluxo de superfície ou cruzando os principais fluxos de água subterrânea. Fluxos de superfície precisam de planejamento de longo prazo para gerenciar a água captada das bacias de drenagem pela expansão da pedreira que pode interromper a sua operação. Fluxo de águas subterrâneas para uma pedreira pode variar muito. Algumas pedreiras fecharam por inundações, outras se estendem por mais de 100 m abaixo da superfície original do terreno, mas recebem pouco influxo. Quando uma pedreira captura água subterrânea de uma área ampla, isso pode ser seguido pelo desenvolvimento de dolinas (desvio ou sufocamento), e estas podem estar várias centenas de metros além da área da pedreira. Todas as entradas da pedreira podem aumentar a mobilização de contaminantes dentro e transportá-los para poços e nascentes.

Impactos hidrológicos da água que sai de uma pedreira dependem se a água flui na superfície ou é bombeada. O fluxo terrestre das pedreiras contém alto nível de lodo que obstrui os recursos de recarga dos aquíferos cársticos ou altera e danifica os fluxos e habitats dos rios. Contaminantes das pedreiras são transportados em fluxos de superfície e aderem aos lodos. Tais impactos podem ser reduzidos canalizando a água para bacias de sedimentação, com capacidade para reter inundações com probabilidade de pelo menos 100 anos. Se altos níveis de contaminantes se acumularem, eles devem ser removidos e descartados em local apropriado. Impactos do aquífero ocorrem onde é necessário bombear água para fora da pedreira para baixar o lençol freático e permitir a operação da pedreira. O desaguamento aumenta o risco de desencadear desenvolvimento de dolinas, o que pode prejudicar a infraestrutura. Também tem potencial de reduzir ou interromper o fluxo de nascentes e poços cársticos. Por outro lado, o regime dos riachos que recebem água bombeada é alterado com o aumento da vazão total e magnitude dos picos de cheia.

Poeira das atividades de mineração e britagem pode aumentar a carga de sedimentos quando é permitida a entrada em feições cársticas e, portanto, interromper a hidráulica de condução e sedimentação nos riachos. O controle de poeira é um problema para pedreiras e pode resultar em poluição atmosférica generalizada de partículas finas. Depois que a vida útil de uma pedreira é atingida, há questões de longo prazo associadas ao gerenciamento da instalação para garantir que ela não resulte em impactos nas águas subterrâneas devido ao despejo ilegal de resíduos. Alguns governos exigem um plano de recuperação para pedreiras e minas. O uso da terra depois que a pedreira cessou também pode precisar ser regulado em relação ao desenvolvimento.

Existe uma presunção contra qualquer nova extração ou expansão de pedreiras em uma área protegida, por isso é importante que qualquer aplicação seja cuidadosamente considerada em termos de evidência de impactos e impactos potenciais se a pedra for extraída em outro lugar. Se uma pedreira cruzou e destruiu passagens de cavernas ou há evidências de conectividade

hidrológica rápida com nascentes, isso fornece uma boa base para se opor a uma expansão adicional. No entanto, em outras situações, o aprofundamento ou a expansão da área de uma pedreira existente pode não resultar em novos impactos nas formas cársticas e na hidrologia e pode ser preferível à abertura de um novo local. Onde o aprofundamento requer desidratação, isso levanta questões adicionais e, em todos os casos, as aplicações precisam fornecer fortes evidências de que não haverá impactos adversos em áreas protegidas e poços e nascentes que servem como importantes fontes de água humana e ecológica.

Impactos de minas

Impactos de superfície das minas subterrâneas estão confinados à área ao redor da(s) entrada(s) que levam à mina, juntamente com áreas onde o mineral é processado ou resíduos descartados. Nenhuma nova mina deve estar localizada dentro de área protegida, a menos que um caso estratégico muito forte possa ser feito e áreas de processamento e montes de resíduos estar bem fora dos limites da área protegida. No entanto, é possível extrair minério sob uma área protegida usando mina(s) com entradas fora da área. Técnicas modernas minimizam o risco de colapso e o impacto significativo virá da necessidade de remover águas das minas. Uma técnica que tem sido utilizada no passado em áreas cársticas é conduzir poços de drenagem de vales profundos para reduzir a elevação do lençol freático. Isso faz com que nascentes e riachos alimentados por nascentes percam vazão e, fiquem completamente secos, enquanto os rios alimentados pelos acessos têm vazão aumentada. As minas mais profundas modernas requerem esquemas de desidratação em grande escala, alguns envolvem taxas de bombeamento superiores a 6 m³/s. Em meios porosos, o bombeamento resulta em cone de depressão no lençol freático, mas na maioria das rochas cársticas a permeabilidade é anisotrópica e impactos do desaguamento se estendem por quilômetros, particularmente onde as minas cruzam condutos. Tal como acontece com as galerias de drenagem, os impactos comuns são perda de caudal para nascentes e cursos de água alimentados por nascentes e um aumento do caudal em rios que recebem água bombeada. Onde o leito rochoso é coberto por mais de 3 m de solo, o rebaixamento das águas subterrâneas em depósitos superficiais leva à formação de dolinas. Impactos adicionais referem-se a mudanças na química da água e a cargas de sedimentos suspensos.

Minas e pedreiras podem cruzar passagens de cavernas que podem impactar ou alterar os climas das cavernas e resultar na perda de habitat para morcegos ameaçados de extinção. Esforços para minimizar o impacto em habitats de morcegos ou espécies ameaçadas devem ser levados em consideração ao permitir uma mina. A Greer Limestone Quarry em West Virginia, EUA, por exemplo, trabalhou em estreita colaboração com espeleólogos para permitir o mapeamento da Hellhole Cave, uma caverna de 50 km localizada perto da pedreira e importante hibernáculo para espécies de morcegos criticamente ameaçadas.

Como é o caso das pedreiras, as minas têm uma vida útil limitada, geralmente não mais do que algumas décadas. Em alguns casos, o mineral está esgotado, mas geralmente as minas são abandonadas porque se tornam antieconômicas devido ao aumento dos custos de extração ou à queda nos preços de mercado. Se forem encontrados novos usos para um mineral, com consequente valorização, pode haver pressão para a reabertura de minas abandonadas há décadas. Nos países com uma longa história de exploração mineral, muitas minas e locais de mineração foram abandonados, geralmente sem nenhuma tentativa de restauração. Em alguns casos, esses locais receberam proteção em reconhecimento à sua importância histórica ou porque plantas raras se estabeleceram em terrenos perturbados e montes de lixo. Outros sites apresentam problemas ambientais como erosão do solo, drenagem ácida de minas e formação de sumidouros de colapso. O fechamento adequado de uma mina, chamado de 'desativação', costuma ser muito complexo e caro e, no passado, raramente era incorporado aos custos operacionais da mineração. Houve até tentativas de evitar quaisquer custos de desativação por meio do que foi chamado de "falência estratégica". O descomissionamento e o correto pós-fechamento de minas em áreas cársticas devem incluir monitoramento de longo prazo do movimento da superfície do solo, qualidade da água subterrânea e ecossistemas superficiais e subterrâneos.

Resumo

internacional para local. Em alguns casos, o desenvolvimento foi permitido em uma área protegida porque é considerado "de interesse nacional" e houve casos em que a proteção foi completamente removida para permitir o desenvolvimento. No entanto, no século 21, houve um aumento na adoção de práticas ESG (Ambiental, Social, Governança) no setor corporativo e um reconhecimento de que a falha na proteção de locais importantes pode prejudicar a reputação de uma empresa e, por fim, dos diretores executivos. Em 2020, a destruição de importantes sítios arqueológicos em duas cavernas de formação de ferro na Austrália levou a protestos públicos substanciais, inicialmente de indígenas australianos, mas depois globalmente após publicidade nas redes sociais. A pressão dos acionistas levou à destituição do CEO e de vários executivos seniores, seguida da renúncia do presidente e de vários diretores. Um inquérito parlamentar sobre o caso está em andamento enquanto este documento é escrito e pode resultar em mudanças na legislação de mineração, proporcionando maior proteção a esses locais.



Pedreira de calcário Dowlow no Peak District, Reino Unido. A pedreira tem uma área de cerca de 0,5 km² e em 2021 o ponto mais baixo situava-se cerca de 100 m abaixo da superfície original do terreno, mas não foram interceptadas condutas ou cavernas e não há entrada de águas subterrâneas nas faces da pedreira. Foto de Tony Marsden.

A maioria das indústrias extrativas tem uma pegada de carbono alta e insustentável. Estima-se que a indústria do cimento, por exemplo, que envolve a liberação de CO₂ em alta temperatura que foi bloqueado durante a formação e diagênese do carbonato, seja responsável por 8% das emissões globais de gases de efeito estufa. Um percentual ainda maior é atribuído à queima de combustíveis fósseis (gás e petróleo) extraídos de reservatórios de rochas carbonáticas. Enquanto o planeta luta para reduzir as emissões dentro dos limites aceitáveis de aquecimento, essas indústrias, já em uma encruzilhada ambiental, provavelmente enfrentarão tempos difíceis.

Embora a natureza frágil do carste e das cavernas dificulte sua coexistência com atividades extrativistas, é necessário buscar um equilíbrio. Houve situações em que pedreiras operam muito próximas a cavernas ou minas que se estendem sob o carste sem gerar impactos perceptíveis, e outras em que houve ruptura generalizada de sistemas hidrológicos, destruição total de geo patrimônio e perda de espécies endêmicas. É improvável que um equilíbrio perfeito entre ganhos e perdas possa ser alcançado, no entanto, com avaliação científica rigorosa, monitoramento detalhado e operação de impacto mínimo, pode ser possível.

Diretrizes

- (47) protegidas, a menos que possa ser demonstrado que não há fonte alternativa para um mineral escasso e de alto valor econômico ou estratégico.*
- (48) Qualquer proposta para uma nova mina ou pedreira em carste deve estar sujeita a uma avaliação ambiental detalhada que considere tanto as características dentro quanto os limites da área, bem como o potencial para impactos distantes via águas superficiais e subterrâneas cársticas.*
- (49) A avaliação ambiental deve descrever e avaliar o valor das formas de relevo e ecossistemas de cavernas e cársticas. Deve avaliar se existem locais alternativos para extração onde haveria impactos menos significativos. Onde não houver locais alternativos, deve haver uma zona de proteção tampão cuidadosamente projetada, sempre que possível, em torno de cavernas significativas e características cársticas, a fim de proteger a integridade do ecossistema de cavernas, bem como a continuidade dos processos hidrológicos.*
- (50) Onde não houver alternativa à destruição, as feições devem ser registradas e, quando relevante, removidas para estudo científico – ou seja, registrar e remover espeleotemas e sedimentos para estudo paleoambiental.*
- (51) Onde o desenvolvimento for permitido, deve haver um sistema de proteção ambiental bem projetado, bem como um protocolo de monitoramento para registrar as condições durante a operação e a eficácia do sistema de proteção para que alterações possam ser feitas, se necessário. Também deve haver um plano de fechamento detalhado que inclua restauração apropriada e monitoramento de longo prazo, incluindo uma caução paga antecipadamente para garantir que o financiamento para o fechamento estará disponível.*

Desenvolvimento e infraestrutura

Ao longo da história, as pessoas usaram o carste e as cavernas para diversos fins. As estruturas foram construídas para habitação, proteção, agricultura e abastecimento de água. Na Idade Média na Europa, fortificações e castelos foram construídos dentro de cavernas, como o Castelo de Predjama, na Eslovênia, para fornecer proteção e uma rota de fuga através de passagens em cavernas em caso de invasão. Indústrias de pequena escala também aproveitaram as cavernas. A fabricação de cordas ocorreu na grande entrada de Peak Cavern, Inglaterra, desde a Idade Média até os dias atuais, e embora as cordas sejam agora feitas em grande parte para venda aos turistas que visitam a caverna, havia uma vez um pequeno assentamento de fabricantes de cordas que vivem na caverna. Na Propriedade do Patrimônio Mundial Carste do Sul da China, ainda existem pequenas habitações nas entradas das cavernas. Muitas cavernas são usadas para amadurecer o queijo e o famoso queijo azul Roquefort só pode usar seu nome se for amadurecido dentro das cavernas de Combalou, na França. Cogumelos, cerveja, vinho, kimchi e vários outros produtos foram, e em muitos países ainda são, produzidos ou armazenados em cavernas. A construção de estradas às vezes se aproveita das passagens em cavernas como uma opção mais conveniente do que a construção de túneis caros. As estradas que cruzam a caverna Mas-D'Azil na França e uma seção das cavernas Jenolan na Austrália são bons exemplos. Muitas nascentes cársticas mostram algum tipo de estrutura de engenharia. Outros exemplos de infra-estrutura em cavernas e carste estão relacionados ao uso da água (ver Abastecimento de água), extração e mineração (ver [Indústrias extrativas](#)) e adaptação ao turismo (ver [cavernas turísticas](#)).



O Castelo de Predjama, na Eslovênia, foi construído na boca de uma caverna no século XIII. Foto de David Gillieson.

É natural que, à medida que a população aumenta em conjunto com a necessidade de infraestrutura, as áreas cársticas afetem e sejam afetadas por tais desenvolvimentos. O crescimento exponencial da população que ocorreu desde o século 19 está intimamente ligado ao desenvolvimento industrial e à urbanização. A população total que vive em áreas cársticas ou depende de recursos cársticos, como a água, está crescendo, sendo estimada em 1,18 bilhão em 2020. Em regiões onde o cárstico é o tipo de paisagem dominante, todo o desenvolvimento, incluindo cidades e indústrias inteiras, teve a ser construído sobre o carste. Isso resultou no aumento da pressão ambiental sobre os frágeis ecossistemas cársticos. No entanto, os avanços na compreensão da dinâmica cárstica, juntamente com uma abordagem mais sustentável, levaram a avanços importantes ao permitir que o desenvolvimento e a proteção cárstica coexistam.

O desenvolvimento e a infraestrutura em áreas cársticas podem ser de diferentes tipos e funções, resultando em diversos tipos de fragilidade e impactos. Adota-se uma classificação ampla, compreendendo:

- Infraestruturas lineares.
- Barragens e reservatórios.
- Indústrias.
- Desenvolvimentos urbanos.

Esses diferentes tipos são comumente associados e a linha divisória entre eles costuma ser tênue. Como regra geral, infelizmente não aplicada em todos os lugares, um estudo de avaliação ambiental envolvendo o local e o entorno imediato (uma zona tampão de proteção) deve ser feito antes de qualquer instalação. Nesta zona, deverá ser realizado um estudo mais aprofundado de inventariação de grutas e feições cársticas superficiais, de forma a avaliar se o projecto deve prosseguir ou procurar localizações alternativas. Mudar a localização de um determinado projeto às vezes é impossível, como é o caso de alguns reservatórios de água e barragens. No entanto, na maioria dos casos, esta ação, que pode parecer cara e radical no início, pode, no final, revelar-se uma ação sábia, pois evitará os custosos procedimentos associados à reparação ambiental ou litígio.

Infraestruturas lineares

As infraestruturas lineares compreendem estradas, ferrovias, linhas de transmissão elétrica, canais de água e outras estruturas que geralmente são estreitas e de comprimento significativo. Essenciais para o transporte de pessoas, mercadorias, água e energia, sua densidade está diretamente associada à riqueza econômica e ao tamanho da população.

Devido ao terreno acidentado característico das áreas cársticas, a construção de tais estruturas pode ser um desafio. O tunelamento é uma alternativa comum para cruzar maciços cársticos e pode resultar na interceptação de cavernas desconhecidas e levar à entrada de água. Outra consideração é a estabilidade das cavernas próximas e como elas se relacionam com a vibração durante a construção e operação. O colapso parcial ou mesmo total de cavernas devido à vibração do tráfego pode ocorrer, mas é raro e depende da geologia local e da profundidade da caverna - há exemplos de estradas que cruzam acima de cavernas ou correm dentro delas sem danos morfológicos perceptíveis. Considerações geotécnicas semelhantes se aplicam ao uso de cavernas como pontes naturais. Em tais situações, um estudo caso a caso deve ser feito para garantir que não ocorram danos nas cavernas e na estrada. Geralmente, há algum grau de flexibilidade no planejamento de estruturas lineares e um desvio de zonas cársticas mais frágeis deve ser adotado, se possível, em um estágio inicial.

O escoamento de estradas e ferrovias é frequentemente contaminado e tende a ser direcionado para drenos e, finalmente, pontos de afundamento em terrenos cársticos, com potencial para contaminar nascentes e o abastecimento de água. Isso pode ser muito sério se um acidente resultar em derramamento de produtos químicos perigosos. Os compostos químicos se comportam de maneiras complexas, dependendo de sua densidade e composição. A limpeza de solos cársticos e cavernas contaminadas costuma ser complexa e cara. Devido à característica anisotrópica dos aquíferos cársticos e às taxas de infiltração geralmente rápidas, é possível que parte da pluma de contaminação se desloque rapidamente pelos condutos, emergindo em altas concentrações horas ou dias após a entrada, enquanto o restante é armazenado no epicarste e canais menores de modo que ainda esteja emergindo em concentrações mais baixas dezenas ou centenas de dias após a entrada.



Imagens aéreas (superiores) e LIDAR (inferiores) de dolinas adjacentes a uma grande rodovia perto de Divaca, na Eslovênia. Reproduzido do Atlas do Meio Ambiente, Agência Ambiental da República da Eslovênia (EARS).

O carste também pode afetar estruturas lineares, especialmente através do desenvolvimento de dolinas ou colapso em cavernas rasas. Estudos geofísicos podem ajudar na localização de vazios e cavernas a serem evitados, embora buracos de colapso de cobertura induzidos por vazamento de água de dutos ou perda ao longo de canais de drenagem construídos possam se formar após esses estudos. Há menor risco de impactos de linhas de transmissão elétrica, devido ao grande espaçamento entre as torres (pilões), embora existam casos de formação de dolinas próximas aos pilares. Desde de 2010, tem havido um crescimento acentuado no mercado de energia renovável e particularmente na geração de eletricidade por meio de turbinas eólicas. Embora não sejam estritamente lineares, as torres eólicas são comumente distribuídas em fileiras paralelas e considerações semelhantes se aplicam. Essas estruturas pesadas têm algum grau de flexibilidade locacional e devem ser mantidas longe de cavernas. Turbinas eólicas também podem matar morcegos, geralmente não por impacto direto com as pás, mas por barotrauma, uma queda repentina na pressão do ar que colapsa os pulmões dos morcegos. As turbinas eólicas devem ser localizadas e operadas em consulta com biólogos de morcegos para minimizar os danos às espécies de morcegos na área.



O desvio de uma estrada secundária em torno de dolinas, como mostrado acima, é uma estratégia simples e eficaz, no entanto, as estradas principais devem ser o mais retas possível. Esta foto mostra uma dolina na rota de uma autoestrada pela Eslovênia. A dolina foi escavada e a saída selada antes do preenchimento cuidadoso com agregado para reduzir o risco de colapso. Foto de John Gunn.



A rota da mesma autoestrada na Eslovênia passa pelo que era originalmente uma caverna sem teto cheia de sedimentos. A cooperação entre os construtores e o Karst Institute em Postojna garantiu que a caverna fosse cuidadosamente documentada antes de ser preenchida com agregado e selada para reduzir o risco de colapso. Foto de John Gunn.

Barragens e reservatórios

A água flui no subsolo em áreas cársticas. Embora fossas, dolinas e nascentes sejam características típicas, geralmente há drenagem limitada na superfície. Ao longo da história tem sido fundamental encontrar formas de acesso e retenção de água para consumo pessoal ou agricultura. Isso exigiu soluções de engenharia, como perfurar poços ou colocar dispositivos de bombeamento dentro de cavernas. Uma alternativa é a construção de barragens ou reservatórios, com o objetivo de manter a água acima do solo e permitir controle e distribuição do fluxo. Rochas cársticas são alvos naturais para a construção de barragens onde representam áreas de baixa elevação na paisagem devido à alta solubilidade. Além disso, vales profundos, às vezes resultantes do colapso de cavernas, são formas de relevo em muitas áreas cársticas e fornecem locais atraentes para barragens. Desde a antiguidade, milhares de barragens e reservatórios foram construídos no carste, principalmente na Europa e na China.



Represa hidrelétrica construída em terreno cárstico, Laos. Foto de Terry Bolger.

A maioria das barragens e reservatórios no carste apresentam algum grau de vazamento, o que é aceito, mesmo quando é aplicado um rejunte extenso e caro (ou seja, preenchimento de vazios com concreto ou outro material impermeável). Isso se deve ao fato de que as técnicas geofísicas tendem a perder resolução à medida que a profundidade aumenta, e a tecnologia atual não pode determinar o tamanho e a localização das possíveis rotas de vazamento representadas por condutos e cavernas. Além disso, qualquer barragem ou reservatório gera uma superfície de água a uma cota superior à existente anteriormente, aumentando assim o 'gradiente hidráulico'. Esse gradiente aumentado levará a um aumento da velocidade do fluxo das águas subterrâneas, que opera em um modo turbulento, removendo sedimentos que antes obstruíram as passagens existentes. Outra desvantagem potencial é que esse gradiente recém-criado aumentará as taxas de dissolução, permitindo o alargamento dos condutos durante a vida útil da barragem, especialmente em áreas evaporíticas onde a rocha é mais solúvel do que no carste. Portanto, não é surpreendente que os vazamentos tendam a aumentar com o tempo. Além disso, vazamentos através de fissuras de cavernas a jusante do reservatório e o peso da coluna d'água podem induzir o desenvolvimento de dolinas, que podem levar a uma zona de vazamento recém-criada, bem como resultar em choques sísmicos de pequena escala no entorno. Problemas ambientais adicionais estão relacionados com ligações hidráulicas a outras bacias hidrográficas e impedimentos à circulação da fauna aquática, incluindo a poluição das águas. Uma vez que uma barragem tenha sido considerada antieconômica ou muito prejudicial ao meio ambiente, é possível removê-la, embora este seja um empreendimento caro e tecnicamente desafiador, não sem seus riscos. Pode ser menos dispendioso do que o rejuntamento contínuo, manutenção ou outra reabilitação de barragens.

Em algumas áreas cársticas, são construídas barragens para aumentar o armazenamento de água nos aquíferos. O projeto mais eficaz e menos problemático coloca a barragem a montante da área cárstica, permitindo que a sedimentação ocorra onde não obstrui os condutos e a água é liberada em taxas que permitem que todo o fluxo seja absorvido pelo aquífero. No entanto, esse design nem sempre é possível. O projeto alternativo coloca a barragem dentro ou a jusante do carste, represando a água diretamente sobre ele. Este método resulta em maior sedimentação de cavernas, e maiores impactos em ecossistemas de cavernas não evoluídos para essas condições hidrológicas. Além disso, um derramamento de poluentes entrará diretamente no aquífero, enquanto no projeto da barragem a montante há mais oportunidade de capturar e remover os poluentes antes que entrem nas águas subterrâneas. Nenhum dos dois projetos deve ser usado em aquíferos cársticos de armazenamento de águas subterrâneas rasas, onde a água adicional fluirá rapidamente através e para fora do aquífero. Algum sucesso foi observado no aumento do volume de águas subterrâneas em aquíferos artesianos grandes e profundos, como o Aquífero Edwards no Texas.

Indústrias

Indústrias são de vários tamanhos, propósitos e formas. Plantas de processamento associadas a matérias-primas derivadas do carste, como cimento ou minerais incorporados ao carste, geralmente estão localizadas perto da mina, o que geralmente significa que são construídas sobre o carste. Algumas características dessas indústrias são 1) alta demanda de água para processamento e resfriamento de minerais; 2) necessidade de combustíveis fósseis; e 3) áreas de disposição, que às vezes são maiores do que o local da usina, especialmente em áreas onde as impurezas ou estéril são significativas. Essas características significam que algumas indústrias cobram muito do ambiente cárstico e exigem controle cuidadoso das liberações líquidas e atmosféricas. Bombeamento excessivo de águas subterrâneas pode levar à subsidência da terra e ao colapso do sumidouro. A poluição do ar envolve gases de efeito estufa e também partículas que podem danificar cavernas e características cársticas.

Indústrias não associadas à extração mineral são localizadas próximas aos consumidores ou rotas de transporte. É provável que modificação nos códigos de construção ou zoneamento seja necessária devido às vulnerabilidades do caráter. Esquemas de Drenagem Sustentável (SUDS) exigem que desenvolvedores forneçam sumidouros ou lagoas de infiltração para evitar sobrecarregar a drenagem pluvial. Em áreas cársticas, elas desencadeiam o colapso de sumidouros e alteram a quantidade e qualidade das águas subterrâneas. Comum a muitas indústrias é a pegada de carbono, que leva a impactos muito além do carste.

Desenvolvimento Urbano

Conforme discutido em [A natureza especial de ambientes cársticos](#), a recarga entra no carste através de juntas, dolinas e sumidouros, embora a maior parte seja difusa, especialmente onde há cobertura de solo e vegetação. Áreas urbanas sobre terrenos cársticos representam exemplo de alteração dessas condições, ampliando problemas relacionados a outros tipos de desenvolvimento. As cidades alteram profundamente o padrão de infiltração, introduzindo grandes áreas de materiais impermeáveis como telhados, pavimentos e estradas. Essas mudanças levarão a um escoamento concentrado que é turvo e contaminado com sedimentos, óleo, graxa, chumbo e outros produtos químicos. Assim, existe a necessidade de uma maneira de canalizar a drenagem urbana para fora do carste, ou para o leito rochoso e, melhorar a qualidade da água antes de entrar no carste. Poços de drenagem de águas pluviais são críticos nas cidades, como Bowling Green, Kentucky. Bowling Green foi construído em planície cárstica ondulada e é uma das cidades que possuem um sistema de cavernas por baixo, aumentando o potencial de poluição para atingir o aquífero. A falta de regulamentos de zoneamento iniciais permitiu a construção em dolinas que são propensas a inundações durante eventos de chuva. O preenchimento de outras dolinas diminuiu sua capacidade de drenagem e diminuiu o armazenamento de água de enchente. Um sistema de drenagem natural ineficiente leva a inundações em áreas urbanas com grandes extensões de materiais impermeáveis – um problema comum em alguns ambientes cársticos. A disposição de lixo e esgoto é outra questão em áreas cársticas, especialmente em países menos desenvolvidos. Algumas cidades carecem de sistema séptico coletivo, sendo os esgotos lançados diretamente em valas ou córregos, despejados em fossas caseiras ou em fraturas ou dolinas do carste. Esses sistemas não filtram nem atenuam a dispersão de contaminantes e representam uma grande ameaça aos aquíferos e aos ecossistemas de cavernas. Além disso, a cobertura impermeável pode alterar o hidrograma local e criar um escoamento mais rápido, aumentando a altura dos estágios em cavernas e sumidouros e encurtando a duração da resposta da tempestade, resultando em menos água disponível durante a seca.

O escoamento de águas pluviais de áreas urbanas pode ser tóxico, com óleo, graxa, bactérias e outras fontes pontuais e não pontuais de poluição. Os níveis de bactérias em áreas urbanas também podem ser muito altos devido à exfiltração de sistemas de esgoto séptico, dejetos de animais e vida selvagem urbana, resultando em grave degradação das águas subterrâneas.

No que diz respeito aos resíduos sólidos, áreas denominadas 'aterros' são sujeitas a condições rígidas de planejamento. Essas áreas devem estar localizadas, se possível, fora do carste, sobre rochas impermeáveis, e revestidas com barreiras impermeáveis, a fim de evitar vazamentos. Infelizmente, em países menos desenvolvidos isso raramente ocorre, levando à contaminação do

solo e das águas subterrâneas. A poluição atmosférica causada por veículos, residências e indústrias é outro tipo de impacto ambiental amplificado nas cidades e pode levar à chuva ácida e à dispersão de particulados.



Lixo transportado por um córrego de caverna no Karst de Lagoa Santa, Brasil. Foto de Luciana Alt.

Materiais perigosos (HazMat) são comumente usados e transportados através do carste, cujas liberações resultam em impactos significativos em cavernas, carste e recursos hídricos subterrâneos. A detecção, monitoramento e remediação de incidentes HazMat é muito difícil devido aos seguintes problemas:

- Os solos geralmente fornecem pouca ou nenhuma atenuação de contaminantes.
- Velocidades rápidas das águas subterrâneas (>1 km/dia) no carste podem transmitir contaminação por longas distâncias antes que possam ser contidas e limpas.
- Os caminhos de fluxo são mal definidos, portanto, as relações entre injeção e descarga geralmente não são conhecidas.
- Os sistemas de monitoramento são difíceis e caros de instalar, amostrar e manter.
- Os sistemas de monitoramento podem não ser representativos da concentração ou extensão da contaminação devido à natureza anisotrópica do fluxo de águas subterrâneas no carste, nem representativos da concentração ou extensão da contaminação.
- Número limitado e disponibilidade de especialistas em hidrogeologia cárstica.
- Os métodos de correção podem ser difíceis de instalar e operar e podem ter eficácia limitada.

As liberações de materiais perigosos podem ter origem em acidentes industriais; liberações intencionais; pelo descarte indevido de resíduos pós-consumo (herbicidas e pesticidas) em dolinas, córregos ou fossas sépticas; através da liberação de vazamento de tanques de armazenamento subterrâneo; através de fossas sépticas e sistemas de esgoto; e linhas de transmissão de petróleo e gás. A gasolina e outros combustíveis juntamente com solventes (de limpeza a seco) são materiais comuns que são liberados no meio ambiente. Além de contaminar as águas subterrâneas, alguns dos vapores podem ser tóxicos ou explosivos se acumulados e podem resultar em ambientes explosivos em cavernas, sistemas de esgoto e até casas e prédios públicos.

A resposta de emergência a incidentes de HazMat no carste é difícil e procedimentos devem primeiro incluir a proteção da segurança pública seguida pela proteção da superfície e subsolo. A reparação deve incluir contenção e remoção de qualquer resíduo. Materiais perigosos nunca devem ser despejados na superfície, pois podem resultar na contaminação de suprimentos da água, envenenamento da biota de cavernas, coleta de vapores explosivos em cavernas e edifícios e degradação da qualidade

da água em nascentes, impactando ecossistemas dependentes de nascentes e usuários a jusante. Investigação do impacto de liberação de materiais perigosos deve ser realizada por profissional experiente em ambientes cársticos.

Bombeamento excessivo de águas subterrâneas é comum em áreas urbanas. A extração combinada de poços públicos ou privados pode ter o mesmo efeito que um grande esquema de extração, como é o caso de minas e indústrias. A subsidência em ambientes urbanos é comum em áreas do mundo onde a água subterrânea é utilizada e na Flórida, EUA, é incluída nos pacotes de seguro residencial. Dolinas podem ocorrer devido a vazamentos em tubulações de água ou esgoto, levando ao movimento do solo em fraturas ou à formação de vazios seguidos de colapso. Bombeamento excessivo também pode resultar na diminuição ou perda total do fluxo da nascente, recurso importante para usuários a jusante, bem como espécies dependentes da nascente.



Aterro construído de forma inadequada no Carste de Lagoa Santa, Brasil. Foto de Luciana Alt.

A inundações de sumidouros devido ao manejo inadequado do escoamento de águas pluviais pode criar problemas no carste. A construção de residências e comércios em sumidouros, aliada à maior cobertura impermeável associada à urbanização, pode resultar em inundações rápidas e de longo prazo. A regulamentação imprópria das práticas de uso da terra pode resultar no entupimento dos 'drenos' dos sumidouros com sedimentos, vegetação e lixo, e aumentar a altura e a duração das inundações.

Onde cidades ocorrem na borda do carste, o crescimento urbano é direcionado para áreas não cársticas, onde o desenvolvimento geralmente pode ocorrer com facilidade, menos custoso e menos impactos ambientais. A educação pública pode ajudar nesses esforços. Em Austin e San Antonio, Texas, residentes preocupados com seus aquíferos votaram para aumentar ligeiramente seus impostos para arrecadar centenas de milhões de dólares em 20 a 30 anos para comprar áreas cársticas que são reservadas para proteção de aquíferos e espécies ameaçadas de extinção, e em alguns casos como parques.

Como a maior parte da população mundial agora vive em áreas urbanas, as cidades se tornaram elementos-chave na agenda da sustentabilidade. Várias iniciativas amigas do clima e projetos NBS (Nature Based Solutions) visam mitigar os impactos listados anteriormente, a fim de alcançar um ambiente neutro em carbono (ou, idealmente, negativo). Essa grande mudança recente deve resultar em ganhos para o ambiente cárstico.

Desenvolvimento e infraestrutura em áreas protegidas

Áreas protegidas podem ter vários níveis de proteção, algumas até permitindo a existência de indústrias ou áreas urbanas, desde que alguns requisitos sejam atendidos, enquanto outras são áreas selvagens intocadas. A maioria das áreas protegidas mais populares no carste possui instalações como centros de visitantes, restaurantes e acomodações para funcionários, cientistas e turistas. Os impactos listados anteriormente também se aplicam a essas estruturas e devem, idealmente, estar localizados longe dos recursos cársticos mais frágeis. No Parque Nacional Gunung Mulu, Sarawak, todas as instalações estão a poucos quilômetros das cavernas. No entanto, edifícios próximos ou diretamente acima de cavernas e sumidouros existem em muitas áreas protegidas. Deve-se ter cuidado, pois houve inúmeros casos de impactos ambientais dessas estruturas, incluindo um caso de conexão direta entre uma latrina e um córrego da caverna que foi comprovado por um experimento de rastreamento de água.

Estruturas dentro das cavernas são normalmente reduzidas ao mínimo. No entanto, algumas áreas protegidas populares têm restaurantes subterrâneos (incluindo o Parque Nacional Carlsbad e o Parque Nacional Mammoth Cave, ambos nos EUA), lojas de souvenirs, banheiros, anfiteatros para shows subterrâneos, elevadores e trilhos para trens e funiculares. Todas essas estruturas envolvem algum tipo de impacto ambiental e devem ser instaladas somente após uma avaliação ambiental abrangente. O plano

de gestão da área protegida deve deixar claro se estes são justificados como um meio de proporcionar conforto (ou isolamento das condições naturais) e segurança dos visitantes.

Conclusões

O carste e os humanos coexistem desde que os primeiros homínídeos surgiram e uma associação simbiótica envolvendo uso e impacto ocorreu desde então. Muito poucas cavernas ou áreas cársticas estão totalmente livres de algum tipo de modificação humana, no entanto, durante o século 21, tem havido uma tendência crescente de alcançar um equilíbrio entre preservação e impacto. Alcançar a sustentabilidade em áreas cársticas altamente povoadas é uma tarefa difícil, mas, cada vez mais, os projetos de infraestrutura verde estão possibilitando um movimento em direção a um uso mais equilibrado dos serviços ambientais.

Diretrizes

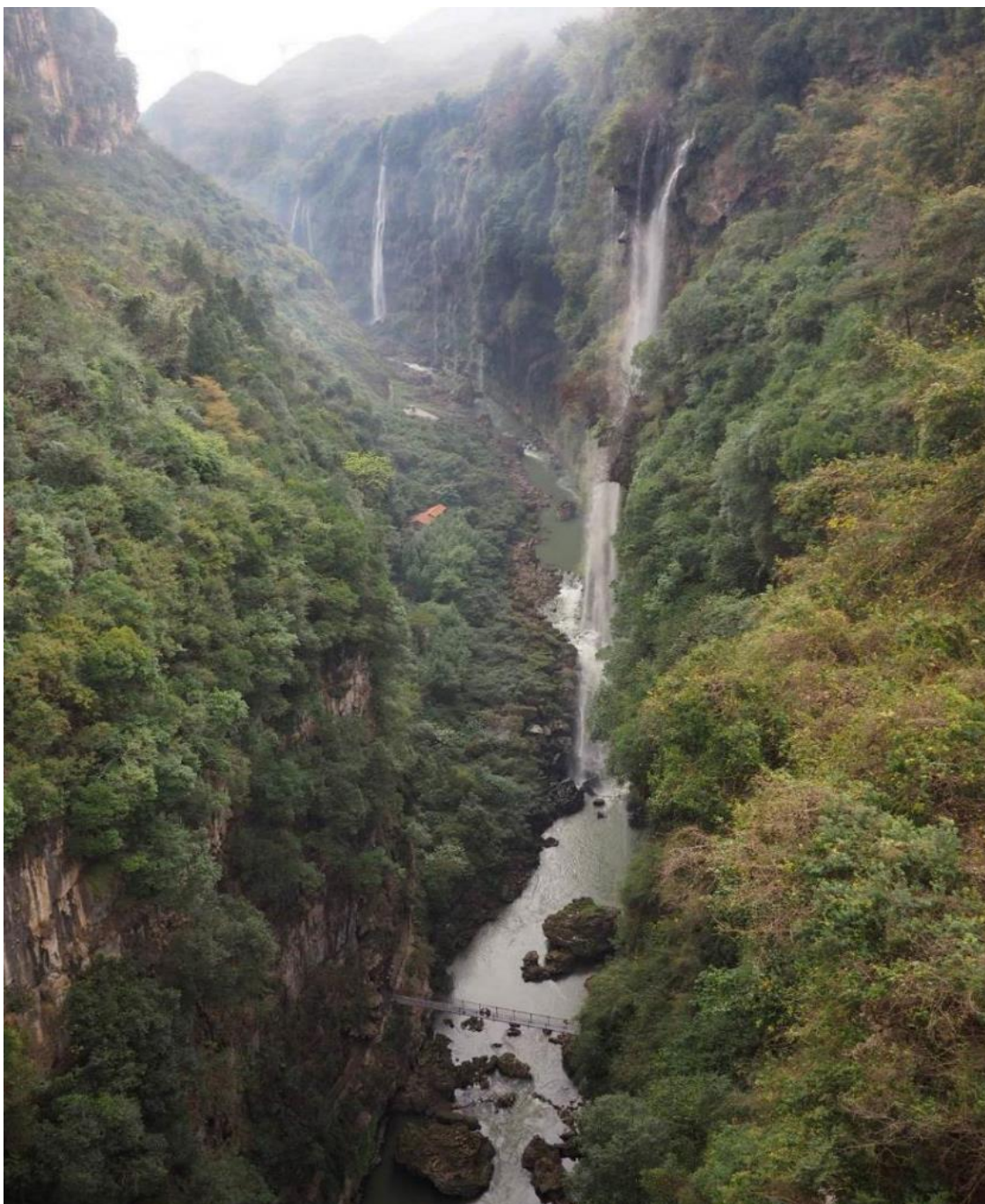
- (52) *Todos os estudos de viabilidade para projetos de construção em áreas cársticas devem incluir um exame cuidadoso do local planejado, uma avaliação ambiental detalhada e o tamanho de uma zona tampão de proteção. Onde for possível mover um projeto ou desenvolvimento urbano para longe de uma área cárstica, esta pode ser uma decisão econômica e ambientalmente positiva.*
- (53) *Protocolos devem ser desenvolvidos e aplicados para lidar com o descarte de resíduos atmosféricos, líquidos e sólidos gerados durante e após a construção. Estes devem estender-se a toda a zona crítica cárstica, que inclui a atmosfera, o solo, o epicarste e a zona superior dos aquíferos cársticos.*
- (54) *Os códigos de construção para carste devem ser aplicados da mesma forma que para áreas propensas a terremotos ou inundações. O zoneamento urbano em regiões cársticas deve levar em consideração as especificidades e fragilidades inerentes ao ambiente cárstico.*
- (55) *Uma forte estrutura de planejamento legislativo baseada na ciência deve ser implementada nos níveis local, regional e nacional.*
- (56) *Iniciativas educativas devem ser colocadas em prática, especialmente em países menos desenvolvidos, a fim de informar proprietários de terras ou moradores da cidade sobre a fragilidade dos terrenos cársticos.*
- (57) *Em áreas protegidas, a infraestrutura deve ser reduzida ao mínimo e, se possível, localizada longe de cavernas e características cársticas.*
- (58) *Um plano de gestão de área protegida adequado deve pesar cuidadosamente os prós e contras de construir estruturas dentro da área, visando a proteção do meio ambiente e dos visitantes, em vez de proporcionar conforto desnecessário. Projetos de infraestrutura em grande escala em cavernas, a menos que sejam indispensáveis, devem ser desencorajados.*
- (59) *Materiais perigosos devem ser manuseados com muito cuidado e devidamente regulamentados para minimizar as liberações. Os socorristas de incidentes HazMat devem ser treinados em métodos de resposta específicos para o carste.*
- (60) *Materiais perigosos, sejam eles gasolina ou outros combustíveis, solventes, esgoto ou outros resíduos perigosos, nunca devem ser descartados no subsolo. A investigação e remediação de águas subterrâneas é extremamente difícil e cara. Tanto quanto possível, os materiais perigosos devem ser contidos e removidos da superfície. Investigações mais detalhadas do potencial impacto ambiental devem ser realizadas por profissionais experientes do carste.*

Abastecimento de água

O acesso à água tem desempenhado um papel importante na forma como os seres humanos evoluíram ao longo do tempo. Os gregos, minóicos (Creta), romanos e muitas outras sociedades aprenderam a lidar com os recursos hídricos cársticos, com muitas cidades se beneficiando por estarem localizadas perto de nascentes cársticas, seja como fonte de água potável ou para recreação, como as nascentes termais em Siracusa na Sicília, Itália, Nimes, França e Bath, Reino Unido. Nas Américas, a cultura maia evoluiu em grande parte em um terreno cárstico no qual a água só podia ser acessada através de dolinas colapsadas conhecidas localmente como cenotes. Uma das principais características dos terrenos cársticos é que, devido à natureza solúvel da rocha, a drenagem superficial é rara e a água tende a escoar para o subsolo, por vezes acessível através de grutas ou, na maioria das vezes, apenas em nascentes. Por outro lado, se presente, o solo fértil (conhecido como terra rossa no Mediterrâneo) é adequado para a agricultura. A agricultura e o crescimento das cidades levaram ao uso generalizado de nascentes como fontes confiáveis de água potável em muitas partes do mundo. As nascentes cársticas têm sido exploradas desde pelo menos o século 19 dC para indústrias tradicionais de bebidas, como o uísque bourbon nos EUA e as cervejas trapistas na Bélgica.

Com base no World Karst Aquifer Map (WOKAM), estima-se que 15,2% da superfície continental livre de gelo global é caracterizada pela presença de rochas carbonáticas carstificáveis. Em 2020, havia cerca de 1,2 bilhão de pessoas (16,5% da população global) vivendo em áreas cársticas e cerca de 700 milhões de pessoas consumiam água. É provável que essa proporção aumente, representando ameaças ao uso sustentável dos aquíferos. As soluções de engenharia são comumente necessárias para explorar os suprimentos de água, incluindo poços e reservatórios. Antes de 1986, mais de 17.000 barragens

foram construídas no carste em todo o mundo (excluindo a China), muitas sofreram vazamentos significativos ou nunca foram preenchidas. Essas falhas iniciais de engenharia levaram à crença de que a engenharia no carste deveria "esperar o inesperado". Além do aumento da população, é provável que os efeitos das mudanças climáticas exacerbem a dependência dos humanos da água cárstica, especialmente em algumas das áreas mais densamente povoadas da Ásia, Oriente Médio, Europa e Américas.



Nascentes cársticas empoleiradas no desfiladeiro de Malinghe, província de Guizhou, China. Foto de John Gunn.

Em terrenos cársticos, a infiltração ocorre rapidamente através de dolinas ou juntas no leito rochoso, embora em áreas com solo impermeável espesso – formado em depósitos superficiais como loess ou cinzas vulcânicas – lagos possam se formar durante eventos de chuva. Ao contrário de outras rochas, o fluxo das águas subterrâneas pode ser muito rápido, ocorrendo através de condutos. A profundidade do lençol freático varia dependendo da região e em algumas regiões não há superfície contínua como seria o caso de rochas permeáveis. Em áreas costeiras planas, como na Flórida ou em Yucatán, as águas subterrâneas podem

estar apenas alguns metros abaixo do solo, tornando o acesso fácil. No entanto, em áreas cársticas montanhosas, existem várias centenas de metros de zona vadosa que impedem o fácil acesso às águas subterrâneas e exigem soluções engenhosas.

Superexploração das águas cársticas ocorre em muitas áreas, levando a níveis de água mais baixos. Isso tem consequências para os ecossistemas aquáticos cársticos, pois nascentes e rios das cavernas podem secar. O rebaixamento foi observado em áreas cársticas, devido a poços para abastecimento. O bombeamento de águas cársticas pode ser pontual, como no caso de minas que requerem grandes esquemas de desidratação para operar, o rebaixamento do lençol freático ocorre através do volume combinado de água bombeada de vários poços, seja para consumo urbano ou irrigação. Cavernas abaixo do lençol freático são mantidas estáveis devido ao suporte exercido pela água. O colapso pode ser acionado se esse suporte for removido devido ao bombeamento. Um impacto associado ao nível de água rebaixado ocorre quando o contato entre o solo e leito rochoso cárstico (conhecido como epicarste) é exposto acima do lençol freático. Isso leva à entrada gravitacional do solo em juntas alargadas, gerando vazios instáveis. O colapso desses vazios é responsável pelos sumidouros de dropout frequentes em áreas cársticas sujeitas a desidratação intensa. O bombeamento excessivo de recursos de água em desertos, ilhas ou áreas costeiras cársticas também pode resultar na intrusão de água salgada. Poços de água abandonados ou construídos de forma inadequada também podem ser um canal para a contaminação da superfície entrar no subsolo e resultar na contaminação das águas subterrâneas.

Inundações ocorrem em áreas cársticas, comumente associadas à urbanização. Superfícies impermeáveis que cobrem o solo na maioria das cidades significam que a infiltração natural é reduzida, concentrando-se em estruturas de escoamento que drenam para o lençol freático. O volume de água de escoamento está além do limite desses sistemas, resultando em inundações generalizadas, como ocorre nas áreas cársticas urbanizadas de Kentucky. É provável que as inundações aumentem devido a eventos úmidos extremos associados às mudanças climáticas, representando desafios para as áreas cársticas, pois tanto as estruturas de escoamento feitas pelo homem quanto os condutos de cavernas podem não ser capazes de lidar com volumes maiores de água. Os sumidouros também podem inundar, não pela água que flui, mas pela água que sobe de baixo, onde grandes volumes são desviados para sumidouros mais altos e transferidos para elevações mais baixas por meio de cavernas.

Com exceção de áreas cársticas com depósitos superficiais espessos, a recarga e fluxo de água ao longo dos condutos são comumente mais rápidas do que na maioria dos sistemas de águas subterrâneas. Assim, as águas subterrâneas cársticas têm filtração natural limitada, o que significa que qualquer contaminação de fontes agrícolas, como nitratos ou derramamentos acidentais, pode atingir o lençol freático e se espalhar por longas distâncias através de condutos. Isso torna a contaminação da água cárstica muito complexa para mitigar. A contaminação pode afetar o ecossistema associado aos aquíferos cársticos, ameaçando a vida nas cavernas. Fossas sépticas inadequadas, ou mesmo a ausência de qualquer sistema adequado para descarte de dejetos humanos, são comuns em muitas áreas cársticas em todo o mundo, aumentando o potencial de contaminação por patógenos. Vários produtos químicos e todo tipo de lixo podem chegar aos aquíferos. Em algumas áreas, a visão comum de que 'o que não está à vista está fora da mente' levou as pessoas a despejar o material descartado em dolinas e cavernas. Alguns rios de cavernas em áreas urbanas foram fortemente poluídos, sendo pouco mais do que esgotos 'naturais' e esforços de limpeza foram necessários, como em Hidden River Cave em Horse Cave e Lost River Cave em Bowling Green, ambos em Kentucky.

Desmatamento para agricultura e pastagens ou secas exacerbadas pelas mudanças climáticas podem remover a cobertura vegetal protetora e desencadear a erosão do solo. Isso pode causar o entupimento de fundos de dolina, levando a inundações. Um impacto adicional é o assoreamento das drenagens superficiais e das cavernas, às vezes bloqueando passagens e causando sedimentação no interior das cavernas. As áreas de captação de cavernas são frequentemente manejadas de forma inadequada, resultando em impactos no ciclo hidrológico. Mudanças no uso da terra acima das cavernas podem desencadear a infiltração do solo nas rotas de percolação, afetando a cor e a integridade dos espeleotemas. Isso é especialmente crítico para cavernas turísticas, nas quais a sedimentação terrígena pode alterar a cor de espeleotemas cavernícolas predominantemente brancos.

Alguns impactos ambientais mencionados anteriormente ocorrem devido a episódios de curta duração, como o derramamento acidental de produtos químicos. Mas outras, como a contaminação devido à urbanização ou indústrias, ou o bombeamento excessivo, podem ocorrer na escala de anos ou décadas. Outro impacto está associado às mudanças climáticas, que podem afetar o balanço hídrico das áreas cársticas de maneiras opostas, exacerbando a escassez por meio de secas ou aumentando o potencial de inundações devido a eventos de precipitação recorde. Ambas as situações são frequentes em todo o mundo. As regiões carsificadas do México, Caribe e sul da Flórida, estão sujeitas a uma maior frequência de furacões, enquanto as áreas propensas à seca estão testemunhando uma diminuição na descarga de drenagem da caverna. Os efeitos das mudanças climáticas muitas vezes ocorrem sobrepostos a outros fatores, o que serve para ampliar seus impactos. O aumento dos níveis oceânicos devido às mudanças climáticas têm o potencial de impactar os aquíferos cársticos, pois os condutos fornecem caminhos para a água do mar fluir, aumentando assim a salinidade das águas subterrâneas.

Além disso, algumas áreas cársticas se estendem além das fronteiras internacionais, como as dos Balcãs e outras partes da Europa e sudeste da Ásia. A gestão dos recursos cársticos pode exigir cooperação internacional para evitar conflitos sobre a gestão dos recursos em geral e dos recursos hídricos subterrâneos em particular.



Água da inundação descarregada da Caverna Marble Arch, Fermanagh, Reino Unido, no Geoparque Global da UNESCO Cuilcagh Lakelands transfronteiriço. Foto de John Gunn.

Diretrizes

- (61) *Definir buffers de proteção para fontes de água cárstica, como nascentes, poços e cavernas. Nessas áreas protegidas, devem ser estabelecidos protocolos de práticas agrícolas, com uso adequado de fertilizantes e bombeamento controlado de água. Vários esquemas para a implementação de zonas de proteção em nascentes foram propostos, mas só foram amplamente aplicados na Europa e nos EUA.*
- (62) *As iniciativas educativas devem promover a conscientização de proprietários de terras e cidadãos comuns em relação às especificidades dos ambientes cársticos, a fim de evitar o descarte inadequado de resíduos sólidos, sanitários e perigosos.*
- (63) *Um sistema de monitoramento robusto deve ser estabelecido nas principais nascentes e poços selecionados em sistemas de águas subterrâneas suscetíveis e altamente utilizados no carste. O monitoramento remoto de longo prazo e alta resolução é agora uma possibilidade em muitas nascentes e deve ser implementado mais amplamente.*
- (64) *Os países devem tratar a água cárstica como um recurso frágil e finito, implementando leis para controlar e disciplinar a extração de água, bem como permitir financiamento adequado para reação rápida em caso de contaminação. Em particular, devem ser postas em prática as recomendações relativas ao desenho e implementação adequados de fossas sépticas e à localização de aterros sanitários.*
- (65) *Como pouco se sabe sobre o comportamento de muitos contaminantes em ambientes cársticos, fundos adequados devem ser disponibilizados para avançar na compreensão científica desse assunto.*

Gerenciando o carste em áreas protegidas

Desenvolvimento de monitoramento e mitigação eficazes

Princípios de monitoramento

O monitoramento é ferramenta essencial na gestão e proteção de cavernas e recursos cársticos, especialmente em áreas naturais protegidas. Indicadores de monitoramento e medições são selecionados para fornecer informações sobre o estado atual das cavernas e dos recursos cársticos que podem ser comparados a uma 'linha de base' das condições que existiam quando o manejo começou e, antes da ocorrência de quaisquer mudanças induzidas pelo homem. Alternativamente, para locais como cavernas turísticas onde há uma longa história de desenvolvimento, pode ser possível usar uma caverna subdesenvolvida próxima como 'linha de base'. Além disso, muitas cavernas turísticas foram fechadas por períodos variados durante a pandemia de Covid-19 de 2020–2021 e, onde o monitoramento continuou usando sensores automatizados, os dados fornecem uma aproximação das condições naturais. O monitoramento revela mudanças na condição dos recursos, tanto nos impactos quanto nas melhorias e, na eficácia das ações de gestão. Os resultados podem ser usados para informar a gestão e mitigar impactos (gestão adaptativa).

Idealmente, um programa de monitoramento de cavernas e carste deve ser abrangente e incluir recursos abióticos, como água, ar e solo, e características geológicas e geomorfológicas juntamente com recursos bióticos, como fauna, flora, habitats e ecossistemas. No entanto, as agências de gestão de áreas protegidas frequentemente têm financiamento insuficiente para apoiar um programa de avaliação tão abrangente. Assim, os esforços de monitoramento devem ser concentrados priorizando os recursos naturais com base em seu valor ou importância, sua vulnerabilidade ou fragilidade e a gravidade das ameaças ou impactos reais ou previstos (naturais ou da atividade humana). Para cavernas, é importante ter um inventário das principais feições, geolocalizadas em um mapa da caverna (se houver), para auxiliar na identificação dos locais de monitoramento. Isso pode se tornar uma tarefa mais fácil por meio de técnicas baseadas em GIS. O monitoramento de cavernas deve incluir a área ao redor da caverna, pois impactos vindos de fora podem afetar a dinâmica do sistema de cavernas.

Uma vez que os recursos a serem monitorados foram priorizados, os indicadores apropriados precisam ser selecionados. Os critérios incluem se é relevante e cientificamente credível, viável, tem um baixo impacto mensurável e é rentável. Os indicadores podem precisar ser apoiados pela legislação ambiental relevante no caso de processos judiciais. Os indicadores e métodos de monitoramento devem ser selecionados de modo que possam ser facilmente compreendidos e executados por pessoal treinado, sempre que possível, a fim de minimizar a necessidade de conhecimento externo ou especializado. Em geral, é melhor monitorar um indicador que seja simples e barato de medir em muitos locais do que um tão complexo e caro que só possa ser obtido em um ou dois locais. Medir a evaporação de muitas placas de Petri abertas em uma caverna, por exemplo, pode fornecer uma imagem melhor dos problemas de dessecação do que um único hidrotermógrafo em um local.

O monitoramento requer consideração de replicação, frequência e custo. O monitoramento frequente de um indicador-chave é preferível ao monitoramento ocasional de muitos indicadores. O monitoramento de indicadores-chave ou deve ser realizado com a frequência necessária para avaliar a eficácia da gestão na minimização dos impactos. No entanto, o monitoramento de alta frequência em áreas frágeis deve ser evitado, a menos que seja extremamente necessário, pois pode gerar impactos próprios. O monitoramento automatizado, se viável, deve ser priorizado. Devem ser desenvolvidos protocolos para monitorar cada indicador.

Algumas práticas recomendadas de monitoramento

Qualidade e quantidade de água

Os sumidouros, dolinas que fornecem recarga pontual (entrada) e nascentes e poços (saída) devem ser usados como estações de monitoramento de qualidade e quantidade de água em áreas cársticas. Se os recursos permitirem, o monitoramento contínuo e baseado em eventos deve ser realizado. Registradores de dados baratos estão disponíveis para medir continuamente os principais parâmetros, incluindo profundidade da água (que pode ser convertida em descarga se uma curva de classificação for estabelecida), temperatura, oxigênio dissolvido, condutância elétrica (substituto para o total de sólidos dissolvidos) e turbidez (substituto para sólidos em suspensão). Outros parâmetros, como nutrientes, metais, hidrocarbonetos, poluentes orgânicos e bactérias, são mais adequados para monitoramento baseado em eventos, pois requerem laboratórios especializados e são caros para medir. As concentrações são mais altas durante os períodos de baixo fluxo e isso pode representar uma ameaça para os organismos aquáticos, mas é durante as tempestades e inundações que a maior carga (concentração multiplicada pela descarga) da maioria dos poluentes e sedimentos é transportada. Uma avaliação geral da condição dos riachos das cavernas pode ser

obtida pelo monitoramento biológico, como qualidade da água, número de espécies sensíveis com baixa tolerância à poluição, como os macroinvertebrados aquáticos (insetos, vermes, caracóis, crustáceos) ou algumas espécies de peixes.

Condição da vegetação

Manter a condição da vegetação nativa deve ser uma prioridade para áreas protegidas do carste. Monitoramento da vegetação é necessário para acompanhar o progresso em direção às metas de manejo. As duas principais abordagens são avaliações baseadas no local e métodos de sensoriamento remoto. Métodos locais para medição e contabilidade de carbono podem ser empregados em um grande número de locais, e os guardas florestais e os proprietários treinados para executá-los. O sensoriamento remoto é empregado para monitorar a condição da vegetação devido à vantagem de oferecer métodos em larga escala, automatizados e repetíveis. É adequado para detectar mudanças na vegetação. Uma série de métricas da ecologia têm medidas de proxy detectadas remotamente, como índice de borda vermelha de diferença normalizada (NDRE), que fornece medida da atividade fotossintética. A invasão de arbustos pode ser estimada usando medidas persistentes de cobertura verde.

Atmosfera de caverna

Monitoramento climático e atmosférico em cavernas turísticas é realizado usando estações meteorológicas automáticas com sensores eletrônicos e registradores de dados. As estações de monitoramento devem estar localizadas em locais importantes ou sensíveis. Os indicadores a serem medidos incluem: pressão barométrica, temperatura, umidade, CO₂, fluxo de ar e evaporação. A medição da concentração de radônio é comumente exigida como parte dos regimes de saúde e segurança em cavernas turísticas. O objetivo dessas medições deve ser manter as condições atmosféricas o mais próximo possível dos valores naturais da linha de base ou permitir uma rápida recuperação das condições aos valores da linha de base após a visitação.

Fauna da caverna

Onde existe fauna cavernícola significativa, especialmente espécies raras ou endêmicas, a presença e abundância devem ser monitoradas. Espécies indicadoras para monitoramento podem ser troglóbios ou estigobiontes, que são espécies endêmicas e talvez as mais vulneráveis. No entanto, espécies 'chave', como morcegos, andorinhões e grilos das cavernas, devem ser consideradas como espécies indicadoras devido à sua importância em trazer alimentos para a caverna dos quais outros organismos dependem. As espécies-chave selecionadas como indicadores devem ser abundantes e bem distribuídas na(s) caverna(s). Certos troglóbiontes, como Collembola, são indicadores úteis de desequilíbrios de nutrientes em cavernas.

Espeleotemas e sedimentos

Espeleotemas e sedimentos são impactados diretamente pelos visitantes de cavernas selvagens e em cavernas turísticas podem ser impactados pelo crescimento da lampenflora. O fotomonitoramento é uma forma de registrar a condição e revelar os impactos. Espeleotemas e sedimentos devem ser selecionados para fotomonitoramento com base em valor científico ou estético ou em local vulnerável, como próximo à trilha da caverna. O fotomonitoramento envolve fotografar espeleotemas ou sedimentos selecionados de uma posição fixa e com câmera fixa e configurações de luz, para que as fotos possam ser replicadas com precisão e comparadas ao longo do tempo para avaliar os impactos. O fotomonitoramento deve ser realizado com uma frequência adequada ao número de visitantes e seu impacto potencial. Intervalo de um ano pode ser apropriado para muitas cavernas turísticas. Novas técnicas, como varredura a laser (LIDAR), são promissoras para monitoramento. O LIDAR cria imagem tridimensional e isso pode ser usado como linha de base para detectar alterações e e outras mudanças antrópicas no ambiente da caverna. A mesma abordagem também pode ser aplicada na superfície usando o LIDAR aéreo.

Mudanças climáticas e eventos extremos

Os efeitos da mudança climática já são manifestos e se tornarão profundos em muitas áreas cársticas. A crescente ocorrência e natureza de eventos extremos, como inundações, secas e incêndios florestais, apresentam a tendência de mudança climática mais desafiadora. O monitoramento de parâmetros meteorológicos e hidrológicos, como temperatura do ar, pluviosidade, temperatura da água doce, descarga de rios e nascentes, nível de lagos e elevação dos lençóis freáticos, são prioridades para detectar e responder às mudanças climáticas. Aumentos graduais e de longo prazo na temperatura do ar e eventos extremos de temperatura (ondas de calor) são comumente retardados e amortecidos em ambientes de cavernas. Em contraste, o impacto de eventos hidrológicos extremos, como inundações e secas, são rapidamente transmitidos da superfície para ambientes subterrâneos (cavernas) em sistemas hidrológicos cársticos. O monitoramento desses parâmetros fornece uma base para o desenvolvimento de sistemas de alerta precoce para eventos extremos, como inundações e incêndios florestais. Além disso, podem ser identificados indicadores biológicos e ecológicos de mudanças climáticas. Os exemplos incluem uma mudança no tempo de eventos fenológicos, como brotação de folhas e floração em plantas, bem como mudanças no tempo e no alcance das migrações em espécies animais, como pássaros e morcegos.

Mitigação

Onde o monitoramento revela ameaças ou impactos em cavernas ou recursos cársticos, ações de gerenciamento devem ser tomadas para mitigar danos adicionais. Para ameaças ou impactos da visitação humana, existem estratégias para conseguir isso, incluindo limitar o acesso a áreas sensíveis (zonação), reduzir o número e a frequência de visitantes, marcar rotas preferenciais através de cavernas selvagens, desenvolver passarelas com grades de proteção e exigir guias para acompanhar os visitantes .

Onde ocorreram danos aos recursos da caverna, uma boa gestão exige que os recursos danificados sejam restaurados na medida do possível. Há uma variedade de métodos para a restauração de passagens de cavernas e espeleotemas e para remoção de graffiti, fiapos e poeira e lampenflora (ver cavernas de demonstração).

Freqüentemente, atividades de superfície, como extração de pedreiras, são traduzidas em impactos subterrâneos. A reabilitação da superfície cárstica após extração pode ser cara e demorada. As principais questões incluem restaurar a integridade da drenagem subterrânea, a qualidade da água e a biologia da caverna. Um objetivo secundário deve ser manter um alto grau de porosidade interconectada na pedreira para recarga efetiva e simular a drenagem cárstica original e sua cobertura vegetal.



Pedreira de calcário reabilitada após vinte anos, Tasmanian Wilderness World Heritage Property. Durante a reabilitação, a pedreira foi subdividida em várias pequenas bacias de drenagem fechadas, cada uma com um sumidouro cárstico ou zona de infiltração como foco. Cada pia foi protegida por uma estrutura de filtro, e as áreas sob leques de argila tiveram estruturas adicionais instaladas para limitar o movimento de sedimentos após a chuva. Em seguida, será realizada a hidromassagem e a revegetação cuidadosa. Foto de David Gillieson.

Alguns princípios básicos para a reabilitação cárstica são:

- Manter ou restaurar sistemas e processos naturais se possível. Se for necessária uma intervenção, as soluções baseadas na natureza que funcionam em sintonia com os processos naturais são ambientalmente mais sustentáveis e eficazes do que as soluções de engenharia que procuram controlar ou interromper os processos naturais. Manter ou restaurar os regimes naturais de fluxo de rios, córregos e nascentes é fundamental para sistemas cársticos. É crucial restaurar o fluxo de água de percolação e recarga de águas subterrâneas onde o solo ou sedimentos no carste foram compactados.
- Remova todas as fontes de poluição, da superfície e subsolo. Isso pode envolver a regulamentação do uso da terra e atividades a montante de cavernas ou áreas cársticas, escavação e remoção de sedimentos contaminados, descarga de água ou sedimentos contaminados de cavernas ou biorremediação usando microrganismos ou plantas. Este processo é caro e, uma parte do custo terá de ser suportada por agências governamentais responsáveis pela gestão ambiental.
- Controle a erosão ativa do solo e evite a entrada de sedimentos no sistema cárstico subterrâneo. Isso pode envolver revegetação, estabilização de encostas íngremes ou construção de bancos de contorno.

- Limitar o uso intenso de águas subterrâneas (às vezes para fins agrícolas) em áreas a montante, pois isso reduz o lençol freático e pode diminuir a descarga de rios subterrâneos, afetando a fauna aquática das cavernas.
- Incentive um ecossistema de solo ativo. Invertebrados como minhocas, formigas e cupins são eficazes na decomposição de material orgânico, bioturbando o regolito e melhorando a textura do solo e o estado nutricional.
- Estabeleça uma cobertura vegetal estável, preferencialmente de plantas perenes nativas. A vegetação permanente é eficaz no controle da erosão do solo, aumenta a atividade biológica do solo e é esteticamente agradável. No entanto, esteja ciente de que a vegetação também afeta as concentrações de dióxido de carbono no solo e usa água, reduzindo assim a recarga. Assim, pode haver impactos inadvertidos no crescimento do espeleotema.
- Monitore mudanças acima e abaixo do solo. O sucesso é medido por amostragem de águas cársticas. A amostragem baseada em eventos considerando a o aumento da transferência de sedimentos e solutos durante tempestades.
- Deixe o site sozinho, a menos que as coisas dêem errado. Há uma grande tentação de interferir na reabilitação quando os processos são lentos. A revegetação deve ser avaliada somente após um mínimo de dois anos, quando o estabelecimento e crescimento suficientes tiverem ocorrido. Para muitas áreas cársticas, especialmente onde os processos biológicos são limitados pelo clima, o prazo para a reabilitação pode ser medido em décadas.

Diretrizes

- (66) *Monitoramento é uma ferramenta essencial na gestão e proteção de cavernas e recursos cársticos em áreas protegidas. Os resultados do monitoramento contínuo podem ser usados para informar a gestão e mitigar os impactos.*
- (67) *Os esforços de monitoramento devem ser focados na priorização dos recursos naturais com base em seu valor ou importância, sua vulnerabilidade ou fragilidade e a gravidade das ameaças ou impactos reais ou previstos.*
- (68) *A poluição das águas subterrâneas apresenta problemas especiais no carste e deve sempre ser minimizada e monitorada. Esse monitoramento deve ser baseado em eventos e não em intervalos meramente regulares, pois as concentrações de solutos e poluentes químicos são geralmente mais altas durante os períodos de baixo fluxo, no entanto, é durante as tempestades e inundações que a maior carga de poluentes é transportada pelo sistema cárstico.*
- (69) *Evite monitoramento de alta frequência em áreas frágeis, a menos que seja extremamente necessário, pois isso pode gerar impactos próprios. O monitoramento automatizado, se viável, deve ser priorizado.*
- (70) *Embora reconhecendo a natureza não renovável de muitos recursos cársticos, particularmente dentro de cavernas, uma boa gestão exige que os recursos danificados sejam restaurados na medida do possível.*
- (71) *Na medida do possível, os sistemas e processos naturais nas áreas cársticas devem ser mantidos ou restaurados. Se for necessária intervenção, privilegia-se a utilização de soluções baseadas na natureza, especialmente aquelas que trabalham em sintonia com os processos naturais e são mais sustentáveis do que as soluções de engenharia.*

Planejamento de gestão para áreas protegidas cársticas

O planejamento do manejo de área protegida constitui exercício fundamental no seu manejo, ajudando a definir e alcançar uma condição ideal e garantindo que os recursos financeiros, humanos e outros sejam utilizados ao abordar as questões prioritárias de manejo. O desenvolvimento de um plano de manejo marca um marco importante no processo de planejamento e capacitação, envolvendo os vários órgãos governamentais e partes interessadas com responsabilidades e interesses na área protegida e seu entorno imediato. Os planos de manejo devem ser documentos sucintos que identifiquem as principais características ou valores da área protegida, estabelecendo claramente os objetivos de manejo a serem alcançados e indicando as ações a serem implementadas que garantirão a proteção dos valores de conservação da área protegida.

Para que o manejo do sistema cárstico seja adequado e eficaz, o planejamento deve levar em conta a natureza especial do cárstico em comparação com outros tipos de paisagem e ecossistemas. Isso é discutido mais detalhadamente em A natureza especial dos ambientes cársticos e sistemas de cavernas, com vários pontos-chave descritos abaixo:

- A integridade cárstica depende da manutenção do sistema hidrológico natural. Assim, a necessidade de gerenciamento total da bacia é vital para as paisagens cársticas. As questões-chave na gestão de todas as áreas cársticas são a proteção de dolinas ou áreas fraturadas que fornecem recarga pontual e gerenciamento da qualidade da água de córregos alogênicos que drenam para o carste. Um mapa hidrogeológico é uma ferramenta valiosa para o gerenciamento de áreas protegidas cársticas, destacando as áreas de captação críticas para o gerenciamento e proteção.

- Os ecossistemas cársticos são frágeis – as condições ambientais de superfície podem ser extremas (áridas, calcárias) e nas áreas onde não há depósitos alôgenos superficiais, os solos são tipicamente rasos, rochosos e facilmente erodidos. O ecossistema subterrâneo é particularmente delicado, sendo principalmente dependente de fluxos de energia transmitidos da superfície pela água, cuja qualidade é extremamente importante para a sobrevivência.
- Karst é extraordinariamente complexo porque compreende características e valores de superfície e subterrâneos e integra processos de superfície e subterrâneos, tanto físicos quanto biológicos. Devido ao alto grau de interconectividade dos ecossistemas cársticos, impactos diretos em um único elemento do ecossistema cárstico podem ter sérias consequências indiretas para outros elementos ou para todo o ecossistema cárstico. Assim, uma abordagem holística é necessária para a proteção dos recursos naturais e da biodiversidade no karste.

A maioria dos exercícios de planejamento gerencial funciona por meio de etapas que estruturam o processo e fornecem abordagem lógica. Como o grau de proteção e manejo exigido varia entre diferentes categorias de áreas protegidas, a estrutura do plano de manejo pode ser flexível para atender a diversas necessidades. Áreas protegidas de propriedade privada podem não envolver terceiros no planejamento, por exemplo, ou podem não exigir um plano de manejo. Se o tempo ou os recursos não permitirem o desenvolvimento de um plano de manejo completo, um documento simples e abreviado é melhor do que nada. Um plano de gestão simples será mais fácil, rápido e barato de implementar. O detalhe e complexidade podem evoluir gradualmente à medida que o plano de gestão é atualizado ao longo do tempo e à medida que recursos se tornam disponíveis.

Etapas do planejamento do manejo da área protegida (adaptado de Thomas e Middleton, 2003)

1. *Fase de pré-planejamento: define o que o processo de planejamento alcançará, como será realizado, o cronograma e considerações orçamentárias e quem estará envolvido. Aconselha-se uma abordagem interdisciplinar e inclusiva para reunir especialistas e partes interessadas, incluindo comunidades locais, para discutir a gestão futura da área protegida.*
2. *Coleta de dados, pesquisa de antecedentes e trabalho de campo inicial: O planejamento deve ser informado por dados confiáveis. Primeiro passo, colete informações básicas, pois dados históricos e conhecimento local são inestimáveis. Depois, realizar inventários de campo, levantamentos e pesquisas, se necessário, para verificar informações existentes e adquirir informação adicional necessária. Documente as informações coletadas na forma de uma descrição da área.*

Para áreas protegidas cársticas, as informações coletadas são fornecidas nas seguintes seções: [Alguns valores cársticos e cavernas](#), [natureza especial dos ambientes cársticos e sistemas de cavernas](#), [Caving recreativo e de aventura](#), [Pesquisa científica](#), [Agricultura e silvicultura](#), [Abastecimento de água e Envolvimento dos povos indígenas na gestão cárstica](#).

3. *Avaliação das informações coletadas: Esta etapa identifica as características e valores excepcionais que devem ser protegidos e preservados para manter a importância da área protegida. Como uma ênfase crescente é colocada na inclusão da população local e outras partes interessadas no processo, é importante ter um mecanismo através do qual os valores naturais, culturais e socioeconômicos que eles possuem para a área possam ser identificados e descritos. O desenvolvimento da 'declaração de significância' explica a importância da área protegida para a sociedade e a coloca a dentro de seu contexto em nível regional, nacional e internacional. As principais características, valores excepcionais e declaração de importância fornecem uma estrutura importante sobre a qual o plano de manejo deve se basear.*

Para áreas protegidas cársticas, orientações sobre como identificar as principais características e valores excepcionais são fornecidas nas seguintes seções: [Alguns valores cársticos e cavernas](#), [A natureza especial dos ambientes cársticos e sistemas de cavernas](#), [Caving recreativo e de aventura](#), [Pesquisa científica](#), [Agricultura e silvicultura](#), [Abastecimento de água e Envolvimento dos povos indígenas na gestão cárstica](#).

4. *Identificação de constrangimentos, ameaças e oportunidades – Antes de definir os objetivos específicos de gestão da área protegida, devem ser identificados os constrangimentos à sua gestão, bem como quaisquer ameaças importantes aos valores da área. Algumas restrições são uma função do ambiente natural, como a natureza frágil e vulnerável dos ecossistemas cársticos. As ameaças à área protegida podem ser induzidas pelo homem ou naturais e podem se originar dentro da área protegida ou além de seus limites. Oportunidades para mudanças positivas, remediação ou restauração da área protegida também devem ser identificadas.*

Para áreas protegidas cársticas, orientações sobre a identificação de restrições, ameaças e oportunidades são fornecidas nos capítulos: [Alguns valores do cárstico e das cavernas](#), [A natureza especial dos ambientes cársticos e sistemas de cavernas](#), [Caving recreativo e de aventura](#), [Pesquisa científica](#), [Agricultura e silvicultura](#), [Abastecimento de água](#), e [Desenvolvimento de monitoramento e mitigação efetivos](#).

5. *Desenvolver uma visão e objetivos de gestão – O processo de planejamento de gestão deve desenvolver e articular uma declaração de visão que descreva a condição, estado ou aparência ideal da área protegida no futuro. Na sequência da visão de gestão, os objetivos são declarações de intenções mais específicas, estabelecendo as condições que a gestão pretende alcançar. Os objetivos devem estar relacionados às principais características da área protegida, definindo como*

elas serão conservadas, e a outras áreas importantes de governança e gestão, como acordos de gestão colaborativa, treinamento e conscientização sobre conservação.

Para áreas protegidas cársticas, orientações sobre visão e objetivos de manejo são fornecidas nos capítulos: [Alguns valores de cársticos e cavernas](#), [A natureza especial dos ambientes cársticos e sistemas de cavernas](#), [Escalas de manejo em áreas cársticas](#), [Espeleologia recreativa e aventura](#), [Cavernas turísticas](#), [Agricultura e silvicultura](#), [Abastecimento de água](#), [Desenvolvimento de monitoramento e mitigação eficazes](#) e [Envolvimento dos povos indígenas na gestão cárstica](#).

6. *Identificar e avaliar as opções de manejo, incluindo o zoneamento – Com os objetivos de manejo definidos, o próximo passo é descobrir como os objetivos serão alcançados. Como muitas vezes há várias maneiras de fazer isso, a gama de opções para ações de manejo deve ser identificada e as apropriadas escolhidas. O zoneamento é uma ferramenta amplamente utilizada para atender aos objetivos de manejo. As zonas identificam áreas onde várias estratégias de manejo e uso atenderão melhor aos objetivos da área protegida. O zoneamento pode ser usado para fornecer proteção para habitats e locais críticos, como sumidouros, cavernas e nascentes. Classificar as cavernas em uma área protegida cárstica para diferentes níveis de proteção e uso é uma forma eficaz de zoneamento.*

Para áreas protegidas cársticas, orientações sobre opções de manejo são fornecidas nos capítulos: [Alguns valores de cársticos e cavernas](#), [A natureza especial dos ambientes cársticos e sistemas de cavernas](#), [Escalas de manejo em áreas cársticas](#), [Caving recreativo e de aventura](#), [Cavernas turísticas](#), [Agricultura e silvicultura](#), [Abastecimento de água](#), [Desenvolvimento de monitoramento e mitigação eficazes](#) e [Envolvimento dos povos indígenas na gestão cárstica](#).

7. *Preparação de um rascunho do plano de manejo – A integração de todos os elementos de planejamento acima em um único documento resultará em um rascunho do plano de manejo. Embora não haja um formato padronizado para os planos de manejo, eles tendem a conter certos elementos padronizados. Eles começam com uma introdução à área protegida e uma discussão sobre sua importância e os fatores que a afetam, conduzem o leitor através da formulação de uma visão para sua gestão futura e terminam com ações de gestão delineando como essa visão será alcançada e como os gestores e outros avaliarão a eficácia do plano no final de sua vida.*

Um Formato básico do plano de manejo de áreas protegidas está no capítulo: [Elementos básicos de plano de manejo](#).

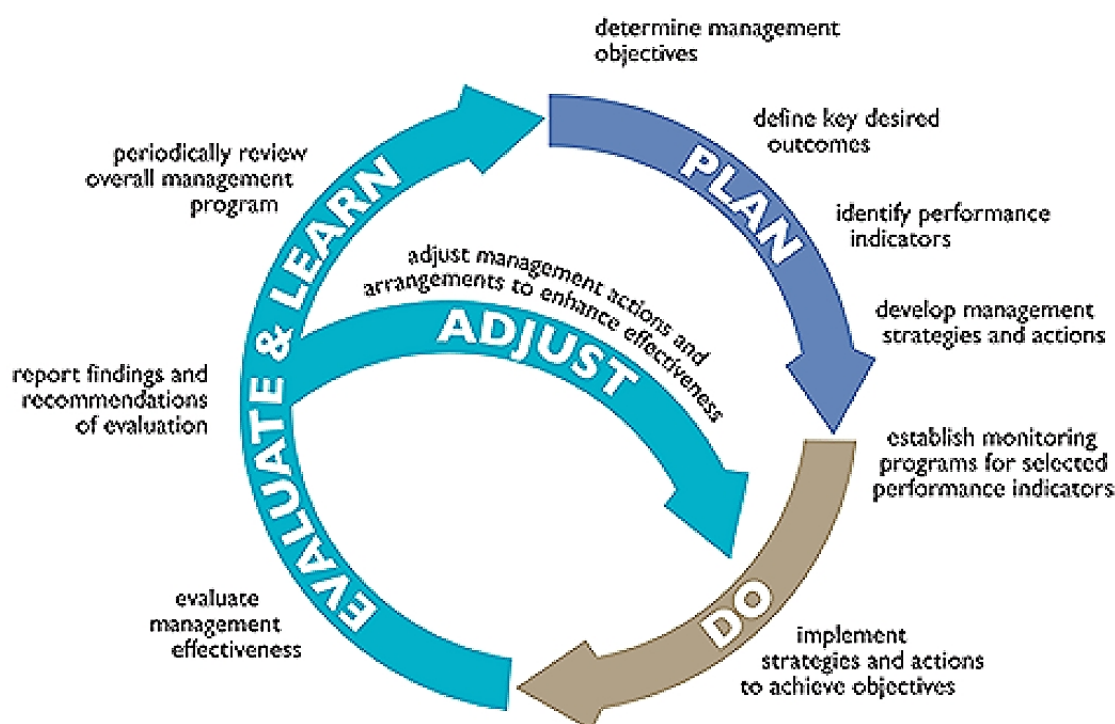
8. *Consulta pública sobre a minuta do plano de manejo – A oportunidade para as partes interessadas e o público em geral revisar a minuta do plano de manejo e fornecer comentários é uma etapa vital no processo de planejamento da gestão. Essas pessoas incluem comunidades locais, funcionários do governo local, representantes de ONGs, interesses comerciais, grupos de usuários, indivíduos interessados e o pessoal da própria área protegida. Esses grupos terão um senso de propriedade e um maior comprometimento com os objetivos e ações da gestão se tiverem a oportunidade de se envolver no processo de planejamento. Os níveis de participação podem variar entre os vários grupos, desde ser informado e fornecer feedback até o envolvimento ativo na gestão colaborativa da área protegida.*

Para áreas protegidas cársticas, orientações sobre consulta pública e envolvimento da comunidade são fornecidas no capítulo: [Envolvimento de povos indígenas na gestão cárstica](#)

9. *Revisão da minuta e produção do plano de manejo final – Esta etapa envolve a revisão da minuta do plano de manejo, levando em consideração os comentários recebidos das partes interessadas e do público. Todos os comentários escritos recebidos e aqueles registrados em reuniões públicas devem ser considerados. Pode ser útil preparar um relatório das consultas para acompanhar o plano final, que detalhou como os comentários recebidos foram levados em consideração e por que alguns comentários não foram utilizados. Isso ajudará as partes interessadas e o público a entender a versão final do plano e apreciar como as ações de gestão incluídas foram selecionadas.*
10. *Aprovação do plano de manejo – É uma etapa processual que envolve a submissão do plano definitivo para aprovação do órgão competente. Os procedimentos variam de país para país, mas, na maioria dos casos, haverá um processo formal de adoção ou aprovação para dar autoridade ao plano.*
11. *Implementação do plano de manejo – O plano de manejo estabelece as ações a serem implementadas para atingir os objetivos e alcançar a visão para a área protegida. Em muitos casos, o plano de manejo fornece a base para preparar planos operacionais anuais para a área protegida. Onde houver um sistema de gestão colaborativo, o plano de gestão deve especificar as funções e responsabilidades das várias partes interessadas na implementação das ações de gestão.*
12. *Monitoramento e avaliação – Com a implementação em andamento, o monitoramento e a revisão fornecerão o feedback para a gestão. Os objetivos desta etapa são 1) identificar se o plano de manejo está sendo implementado de forma eficaz e se os objetivos estão sendo alcançados, 2) aprender com a observação dos impactos do manejo e 3) adaptar as ações de manejo de acordo. Onde a implementação encontra problemas, o monitoramento e a revisão podem ser usados para redistribuir recursos e esforços para melhorar a implementação.*

Para áreas protegidas cársticas, orientações sobre monitoramento e revisão são fornecidas em [Desenvolvendo monitoramento e mitigação efetivos](#).

13. *Decisão de revisar e atualizar o plano de manejo – A etapa final no processo de planejamento é decidir se deve revisar ou atualizar o plano de manejo. É importante garantir que o feedback do monitoramento e avaliação seja usado para orientar o desenvolvimento do plano atualizado. Recomenda-se que os planos de manejo sejam atualizados pelo menos a cada dez anos. Em muitos casos, o plano de manejo será limitado no tempo pela legislação, normalmente por cinco ou dez anos. Idealmente, a decisão de atualizar um plano de manejo é feita com tempo suficiente para permitir que o novo plano esteja em vigor antes que o antigo expire.*



Esquema do processo de gestão usado na Tasmanian Wilderness World Heritage Property, Austrália.

Elementos básicos de um plano de manejo

Resumo executivo – Resume os elementos importantes do plano de manejo de forma que os leitores possam se familiarizar rapidamente com o plano sem ter que ler todos os detalhes de suporte. Isso é útil para administradores de alto nível que podem não ter tempo para ler o documento inteiro.

Introdução – Esta declara o propósito e escopo do plano, e a base na qual a área protegida foi designada, seu estado atual e a autoridade para o desenvolvimento do plano. Pode conter algumas informações básicas resumidas sobre a área protegida, como sua localização, tamanho, recursos primários e valores.

Descrição da área protegida – Resume informações descritivas relevantes sobre os recursos dentro e ao redor da área protegida, incluindo:

- Histórico – informações sobre o site e seu uso e gerenciamento anteriores.
- Biológicas – comunidades, habitats, flora e fauna.
- Físicos – clima, hidrologia, geologia, geomorfologia e solos.
- Cultural e Estética – características paisagísticas, arqueológicas e associações culturais.
- Sócio-econômico – dados demográficos das comunidades locais e seu uso atual dos recursos naturais dentro da área protegida.

Avaliação da área protegida – Identificar as principais características e valores excepcionais que devem ser protegidos e preservados para manter a importância da área protegida:

- Exemplos notáveis de valores naturais, culturais, científicos e recreativos, incluindo cavernas significativas e outras características cársticas.
- Flora e fauna raras e endêmicas, tanto superficiais como subterrâneas.
- Sítios arqueológicos, históricos ou culturais, tanto de superfície como subterrâneos.
- Áreas e recursos vitais para as comunidades locais, tanto econômica quanto culturalmente.
- Áreas essenciais para proteger a integridade da área protegida como um todo, como sumidouros, nascentes e bacias hidrográficas a montante da área protegida.

Análise de constrangimentos, ameaças e oportunidades – Uma análise dos constrangimentos, ameaças e oportunidades que afetam a área protegida e a sua conservação e gestão. Quaisquer impactos atuais ou anteriores sobre os principais recursos e valores da área devem ser declarados, juntamente com quaisquer outras considerações de gerenciamento.

- Restrições – como a gestão das áreas de captação a montante do limite da área protegida.
- Ameaças – como a caça ou coleta ilegal de animais e plantas raros ou endêmicos, quebra ou roubo de espeleotemas ou minerais rupestres, pilhagem ou perturbação de sítios arqueológicos ou culturais, impactos das mudanças climáticas e eventos extremos, como inundações e incêndios florestais.
- Oportunidades – como a remoção de fontes de poluição ou a restauração de habitats degradados e processos naturais.

Visão e objetivos – A articulação de uma declaração de visão que descreve o estado ou condição ideal da área protegida no futuro. Isso é seguido por um conjunto de objetivos, que são declarações específicas delineando o que deve ser alcançado pela administração no cronograma do plano. Os objetivos devem estar relacionados às principais características da área protegida, definindo como elas serão conservadas, e a outras áreas importantes de governança e gestão, como acordos de gestão colaborativa, treinamento e conscientização sobre conservação.

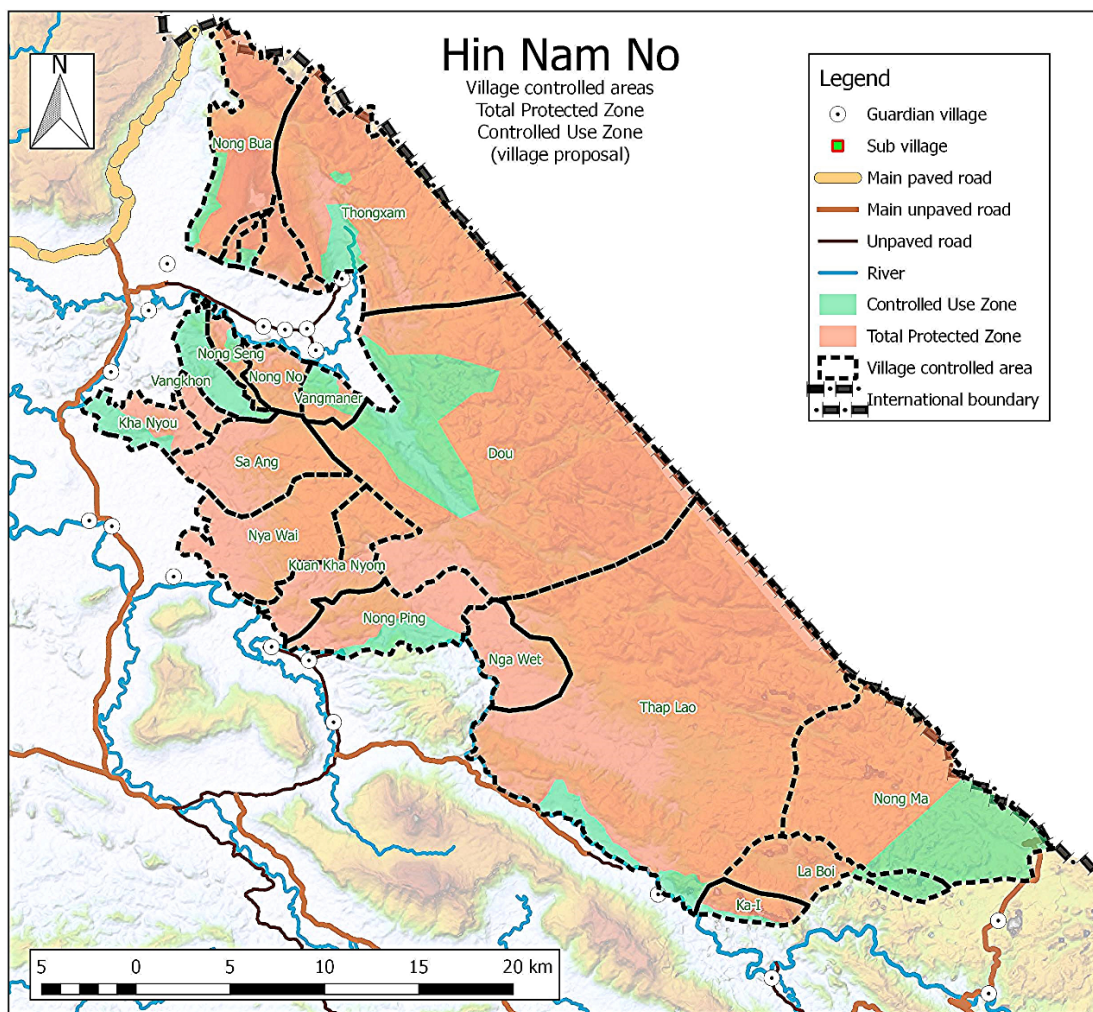
Plano de zoneamento – Um plano com mapas pode ser elaborado para ilustrar limites, classificação e manejo, bem como atividades permitidas para cada zona. Muitas áreas têm uma zona totalmente protegida para a conservação da natureza, zonas de uso dos visitantes, como cavernas e mirantes panorâmicos, e uma zona de uso controlado para colheita sustentável de recursos naturais pelas comunidades locais. O zoneamento pode ser usado para fornecer proteção para habitats e locais críticos, como sumidouros, cavernas e nascentes, e para a recuperação e restauração de áreas degradadas. Classificar cavernas em área protegida cárstica para diferentes níveis de proteção e uso demonstra uma forma de zoneamento. O zoneamento pode ser usado dentro de cavernas, com diferentes passagens, diferentes níveis de proteção e acesso, dependendo da vulnerabilidade e perigos.

Ações de gestão – As ações específicas a serem realizadas para atingir os objetivos, com as atividades prioritárias identificadas, e os papéis e responsabilidades dos diversos stakeholders. Os detalhes podem ser fornecidos em um plano operacional anual separado. Planos de gestão separados podem ser desenvolvidos para algumas ações ou locais, como para cavernas turísticas ou de aventura, ou para gerenciar mudanças climáticas e seus impactos. Esses planos de apoio podem ter os mesmos elementos básicos deste exemplo. As ações de gerenciamento podem incluir:

- Biodiversidade e gestão da geodiversidade.
- Gestão de captação.
- Gestão cultural.
- Restauração de recursos degradados.
- Gestão de visitantes e infra-estrutura associada.
- Conscientização sobre conservação e divulgação nas escolas.
- Monitoramento.
- Pesquisa científica.
- Exploração e levantamento de cavernas.

- Patrulhamento e aplicação da lei.
- Sistemas de alerta precoce, resposta a desastres e resgate.
- Desenvolvimento de subsistência da aldeia.
- Treinamento e administração.

Monitoramento e revisão – Esta seção descreve como a implementação do plano de manejo será monitorada e quando e como uma revisão do plano será realizada. Deve incluir os indicadores contra os quais o desempenho da área protegida será medido. Os esforços de monitoramento devem ser focados na priorização dos recursos naturais com base em seu valor ou importância, sua vulnerabilidade ou fragilidade e a gravidade das ameaças ou impactos reais ou previstos.



Zoneamento para fins de gestão no carste, Parque Nacional Hin Nam No, Laos. Mapa de Ronny Dobbelsteijn.

Envolvimento dos povos indígenas na gestão do carste

Historicamente, as áreas protegidas estabelecidas e administradas por órgãos estatais têm sido o principal mecanismo para conservar os recursos cársticos do mundo. No entanto, a experiência tem mostrado que conflitos comumente surgem entre aqueles que vivem dentro ou perto da área protegida e as agências encarregadas de administrar essas áreas. Onde a maior parte ou a totalidade da terra na área protegida pertence ao estado ou órgãos públicos, é possível um maior grau de controle sobre o uso da terra, mas onde a terra é de propriedade privada, isso pode ser mais difícil. No mundo desenvolvido, as comunidades locais são comumente envolvidas no processo de tomada de decisão, como por meio de representantes eleitos localmente nos conselhos administrativos ou por meio de consultas locais sobre questões contenciosas. A esse respeito, há pouca diferença

entre áreas protegidas que contêm carste e cavernas e áreas protegidas por outros valores. No entanto, durante o século 21, houve uma preocupação crescente com a gestão de áreas onde há um número significativo de povos indígenas.

O envolvimento dos povos indígenas na gestão do Patrimônio Mundial é uma prioridade crescente. Desde 2005, as Diretrizes Operacionais do Patrimônio Mundial da UNESCO (parágrafo 40) promovem uma "abordagem de parceria para nomeação, gestão e monitoramento". Essas diretrizes foram revisadas e ampliadas em 2017, com o envolvimento ativo dos povos indígenas na gestão do Patrimônio Mundial visto como essencial e levando a melhores práticas de gestão. Em 2015, o Comitê do Patrimônio Mundial estabeleceu um Fórum Internacional de Povos Indígenas sobre o Patrimônio Mundial. O objetivo deste fórum é elevar o papel das comunidades indígenas na "identificação, conservação e gestão de bens do Patrimônio Mundial" e é realizado todos os anos, coincidindo com a reunião do Comitê do Patrimônio Mundial. Em 2018, a UNESCO endossou sua Política de Engajamento com Povos Indígenas 201EX/6. Este importante documento inclui o papel dos povos indígenas na conservação do patrimônio natural e cultural e se aplica a todas as atividades apoiadas pela UNESCO – não apenas ao Patrimônio Mundial. O planejamento de manejo deve, portanto, levar em conta os sistemas de governança tradicionais ou locais usados pelos povos indígenas. Pode haver título de terra existente sob o direito consuetudinário que persiste há séculos. Isso pode não ser formalmente reconhecido ou mesmo desejado pelo governo nacional, mas ainda há uma obrigação de administrar com isso claramente em mente.

Neste capítulo, fornecemos quatro exemplos de gestão de áreas protegidas em carste que envolveram os povos indígenas no planejamento e gestão desde o início. Muito se aprendeu com isso, e muito ainda precisa ser aprendido à medida que os relacionamentos se desenvolvem e amadurecem.

Parque Nacional Hin Nam No – Laos: governança colaborativa em ação



Guias da aldeia com um barco inflável usado para passeios em cavernas, Hin Nam No National Park, Laos. Foto de Terry Bolger.

Hin Nam No é uma área cárstica protegida no centro de Laos, para a qual está sendo preparada uma nomeação como Patrimônio Natural da Humanidade. A área contém carste poligonal e totaliza 94.000 ha. A maior caverna fluvial do mundo, Xe Bang Fai, é uma característica da região e é cada vez mais visitada por turistas aventureiros. Devido aos recursos financeiros e humanos limitados, no entanto, há falta de capacidade e informação para gerir e monitorizar eficazmente a área protegida. Em resposta,

um sistema de gestão colaborativa (co-gestão) foi estabelecido para Hin Nam No, no qual as comunidades locais desempenham um papel ativo e têm mais poderes e responsabilidades na gestão dos recursos naturais dos quais dependem. Assim, há um objetivo comum de conservação da biodiversidade e da geodiversidade, bem como redução da pobreza em Hin Nam No.

Existem 18 aldeias 'guardiãs' ao redor de Hin Nam No, compreendendo cerca de 8.000 pessoas de sete grupos étnicos. O desenvolvimento de uma gestão colaborativa bem-sucedida requer que tanto as aldeias guardiãs quanto as agências governamentais assumam papéis e responsabilidades apropriados e claramente definidos para a conservação e proteção.

Cinco 'blocos de construção' do modelo de governança colaborativa no Parque Hin Nam No são identificados e implementados:

- 1- *Avaliação da governação através de consulta participativa – uma avaliação de base da governação foi implementada a nível de aldeia, distrito e província. A intenção era documentar o estado atual da governação e gestão do Parque Nacional Hin Nam No. Os resultados da avaliação subsequentemente levaram às intervenções acordadas necessárias e tornaram-se parte do plano de co-gestão Hin Nam No.*
2. *Estabelecimento de uma estrutura de gestão e governação colaborativa – É preciso haver uma base legal e política (nível nacional) para estabelecer um sistema de gestão colaborativa. A Hin Nam Nenhum comitê de gestão colaborativa foi estabelecido. As principais partes interessadas e titulares de direitos do comitê são as aldeias guardiãs (com direitos consuetudinários) e autoridades de gestão de áreas protegidas, com partes interessadas secundárias de agências governamentais (distritais) envolvidas, como aplicação da lei, agricultura e turismo.*



Funcionários da Área Protegida e guias de aldeia no Parque Nacional Hin Nam No, Laos. Foto de Terry Bolger.

3. *Zoneamento participativo da terra com base no conhecimento tradicional e nos direitos consuetudinários – o Parque Nacional Hin Nam No foi dividido em áreas para patrulhamento por cada aldeia guardiã, com base nas trilhas usadas e nos direitos consuetudinários das aldeias. As áreas também foram zoneadas como zonas de uso controlado (CUZ) para a colheita sustentável de recursos naturais por aldeias guardiãs, com base em áreas tradicionalmente utilizadas para esse fim. Os CUZs compreendem 14% da área do Parque Nacional Hin Nam No. Os 86% restantes da área de Hin Nam No são divididos em Zona Totalmente Protegida para a conservação da natureza.*

4. *Acordos de gestão colaborativa – desenvolvidos entre o comitê de co-gestão de Hin Nam No e cada aldeia guardiã, os acordos de co-gestão estabelecem as regras para o uso dos recursos naturais do CUZ, incluindo acordos de repartição de benefícios em relação ao patrulhamento, aplicação da lei e turismo.*
5. *Envolve os moradores locais nas atividades de gestão da área protegida – cerca de 120 guardas-florestais das 18 aldeias guardiãs são pagos para fazer viagens regulares à área protegida com a equipe do Parque Nacional Hin Nam No para registrar avistamentos e ameaças da vida selvagem e se envolver no patrulhamento para aplicação da lei . Os guardas-florestais da aldeia ajudam nas missões de exploração e pesquisa no Parque Nacional Hin Nam No, onde seu conhecimento local sobre o carste, cavernas, florestas e trilhas é inestimável. Existem cerca de 35 guias de ecoturismo de aldeia em várias das aldeias guardiãs com atividades turísticas. Eles guiam passeios para a caverna Xe Bang Fai e várias outras cavernas, e conduzem caminhadas na espetacular paisagem cárstica do Parque Nacional Hin Nam No.*

Os blocos de construção 3, 4 e 5 (acima) são componentes fortes do sistema de governança colaborativa – construindo sobre o sistema tradicional de gestão de recursos existente, em vez de criar um novo sistema de gestão que prejudica as abordagens tradicionais tradicionais, gerando conflitos inadvertidamente. Esta homogeneidade com os sistemas de gestão consuetudinários encoraja a participação das aldeias, o que é vital em locais com baixa capacidade e orçamentos do governo.

Houve uma melhoria de 16% na eficácia da gestão desde que a cogestão do Parque Nacional Hin Nam No foi iniciada em 2014, com grandes melhorias na capacidade técnica e habilidade de gestão. Mais trabalho no aumento da capacidade, implementação de planos de gestão e gestão adaptativa e financiamento sustentável serão necessários para sustentar este sistema de co-gestão e, assim, proteger e conservar os recursos cársticos do Parque Nacional Hin Nam No.



Visitantes em uma trilha e ponte suspensa que faz parte de um circuito cárstico na área protegida de Phou Pha Marn, Laos. Foto de Terry Bolger.

Haida Gwaii, British Columbia, Canadá – Povo Haida: seis princípios éticos

A exploração florestal é uma das atividades de uso da terra mais difundidas no carste na Colúmbia Britânica (BC) e é um exemplo de por que continua a haver necessidade de uma melhor compreensão do carste. As cavernas foram o foco principal na proteção de áreas cársticas florestais até o final da década de 1990, quando o Ministério de Florestas de BC anunciou pela primeira vez uma abordagem mais baseada em sistemas para o gerenciamento cárstico. Agora é amplamente aceito que qualquer uso da terra ou atividades de desenvolvimento de recursos que ocorram no carste ou próximo a ele requerem a consideração dos impactos ambientais nos sistemas cársticos, os efeitos nos aquíferos cársticos e suas bacias hidrográficas e o potencial para riscos

geográficos relacionados ao cárstico. Um projeto inovador envolveu proprietários tradicionais em Haida Gwaii. Essas ilhas continentais, com o Gwaii Haanas NP, ficam na costa noroeste da Colúmbia Britânica, ao norte da Ilha de Vancouver. Existe uma extensa floresta de coníferas carste nas ilhas e cavernas com importantes valores científicos e culturais. As atividades florestais têm ocorrido com impactos na integridade dos recursos cársticos e cavernícolas. O povo Haida Gwaii ocupa essas terras marítimas desde tempos imemoriais e construiu relações de trabalho com agências governamentais nos níveis provincial e nacional. Há uma visão de uso da terra claramente enunciada, desenvolvida pelo Conselho de Anciãos de Haida Gwaii. Isso se aplica não apenas às áreas cársticas, mas a todo o Haida Gwaii, incluindo o domínio marinho.

As seis éticas e valores Haida sobre os quais esta visão é construída estão listados abaixo em Haida, depois em inglês:

1. *Yahguudang ou Yakguudang - "Respeito". O respeito, uns pelos outros e por todos os seres vivos, está enraizado em nossa cultura. Pegamos apenas o que precisamos, agradecemos e reconhecemos aqueles que se comportam de acordo.*
2. *Giid tll'juus - "O mundo é tão afiado quanto o fio de uma faca". O equilíbrio é necessário em nossas interações com o mundo natural. Se não formos cuidadosos em tudo o que fazemos, podemos facilmente chegar a um ponto sem volta. Nossas práticas e as dos outros devem ser sustentáveis.*
3. *Gina waadluxan gud ad kwaagiida - "Tudo depende de tudo". Este princípio é comparável a uma abordagem integrada de gestão.*
4. *Isda ad diigii isda - "Dar e receber". Dar e receber (reciprocidade) é uma prática respeitada em nossa cultura, essencial em nossas interações uns com os outros e com o mundo natural. Damos continuamente graças ao mundo natural pelas dádivas que recebemos.*
5. *Gina k'aadang.nga gii uu tl' k'anguudang – "Buscar conselhos sábios" Nossos anciãos nos ensinam sobre as formas tradicionais e como trabalhar em harmonia. Assim como a floresta, as raízes do nosso povo estão entrelaçadas. Juntos, consideramos novas ideias e informações de acordo com nossa cultura, valores e leis.*
6. *'Laa guu ga kanhllns - "Responsabilidade". Assumimos a responsabilidade transmitida (a nós) pelos nossos antepassados de gerir e cuidar do mar e da terra. Garantiremos que nossa herança seja transmitida às gerações futuras.*

Seis princípios e valores éticos estão incorporados na definição de trabalho do manejo baseado no ecossistema Haida:

"O respeito é a base da gestão baseada no ecossistema. Ele reconhece que a terra, o mar, o ar e todos os seres vivos, incluindo a comunidade humana, estão interconectados e que temos a responsabilidade de sustentar e restaurar o equilíbrio e a harmonia."

Gwaii Haanas Gina 'Waadluxan KilGuhlGa Plano de Gestão de Pessoas da Terra-Mar, 2018.

Há ressonância entre princípios de Haida Gwaii e as melhores práticas de gestão científica, conforme descrito na tabela abaixo.

Comparação de Haida e princípios científicos para gestão baseada em ecossistemas. Do Conselho da Nação Haida, 2007. Visão de uso da terra Haida – Haida Gwaii yah'guudang (respeitando Haida Gwaii).

Princípio Haida	Princípio Científico Paralelo	Possíveis Aplicações
Respeito	Abordagem preventiva	Responsável pelo bem-estar das espécies; evitar práticas de pesca inúteis, como capturas acessórias.
Equilíbrio	Uso sustentável a longo prazo	Assegurar uma pesca sustentável; considerar informações ecológicas e socioeconômicas.
Interconectividade (tudo depende de todo o resto)	Gestão Integrada	Link para decisões de planejamento de uso da terra; considerar compatibilidade de atividades marítimas e o impacto cumulativo dos desenvolvimentos.
Dar e receber (reciprocidade)	Partilha equitativa	Aprece o valor inerente de todos os seres vivos no planejamento; desenvolver abordagens justas e equitativas para compartilhar recursos limitados.
Buscando conselhos sábios	Gerenciamento adaptável Melhor informação	Utilizar o conhecimento tradicional; melhorar a compreensão por meio de pesquisa, educação e monitoramento.
Responsabilidade	Inclusivo e participativo	Respeito pelo título e direitos Haida; assegurar uma capacidade de execução suficiente.

Gunung Mulu WHA, Sarawak - Povos Penan e Berawan: conscientização pela educação e treinamento



Um guarda florestal local na entrada rio acima de Deer Cave, Mulu, foto de John Gunn.

O carste Gunung Mulu, no norte de Sarawak, abriga as cavernas mais longas do sudeste da Ásia. Mulu está localizada a cerca de 100 km a leste de Miri, uma cidade costeira. A pequena cidade de Mulu é servida por serviços aéreos diários e também por barcos pelos rios Baram e Tutoh. Gunung Mulu NP tem uma área de 90.000 ha e a maioria dos visitantes se concentra no carste mais ao sul, acessível a partir da sede do parque adjacente à cidade. Mais de 90% do parque permanece não visitado e está em bom estado. Gunung Mulu NP foi objeto de uma expedição da Royal Geographical Society em 1978 e a sociedade escreveu um plano de manejo para o parque em 1982. Isso foi seguido por um novo plano de manejo cobrindo o período de 1992–1995, e avaliações subsequentes levaram ao World Nomeação patrimonial. O parque foi inscrito na Lista do Patrimônio Mundial em novembro de 2000 e, posteriormente, tornou-se um dos parques nacionais mais emblemáticos do sudeste da Ásia e um modelo de desenvolvimento sustentável que foi imitado em outros lugares. A empresa de estâncias turísticas Borsarmulu Sdn. Bhd. foi incumbido de elaborar um plano de gestão estratégica e firmar um acordo formal com o governo para administrar e desenvolver Mulu como um parque exemplar e vitrine para Sarawak e a Malásia. A partir de 2001, o interesse turístico cresceu rapidamente, assim como o perfil do turismo internacional. Com ela veio a responsabilidade de passar o conhecimento de Mulu aos visitantes, “para compreender verdadeiramente a importância”, como diz o slogan do Gunung Mulu NP.

Um dos requisitos para o status de Patrimônio Mundial é a necessidade de fornecer informações cientificamente precisas aos visitantes e facilitar a pesquisa. Juntamente a isso, a necessidade de capacitar a comunidade local e fornecer oportunidades de emprego nesta área remota. De acordo com os princípios do Patrimônio Mundial e o plano de gestão, a população local deve ser treinada como guias e intérpretes. Os povos locais já têm um sentido para a floresta e habilidades incríveis, mas prevalecem as desvantagens da língua e a falta de educação, no que diz respeito às ciências. A administração do Gunung Mulu NP instituiu um esquema para treinar novos guias e atualizar os guias existentes. Este curso é apresentado em módulos que abrangem as vertentes cárstica e cavernosa, bem como a floresta, áreas protegidas e portarias associadas, biodiversidade e geodiversidade. Há uma seção especial que trata do atendimento aos clientes e apresenta um passeio tanto em uma caverna turística quanto em um cenário de aventura. Um curso básico de primeiros socorros normalmente faz parte do treinamento.

O Gunung Mulu NP precisa da comunidade local e a comunidade precisa do parque. Com base nessa suposição, Mulu pode ser considerado um sucesso, mas exige muito trabalho. Em 2021, Mulu empregavam 97% de sua força de trabalho localmente. Esses desafios são enfrentados desde cedo na escola local, Batu Bungan Primary, onde o oficial educacional, nomeado por Mulu, tem o privilégio de trabalhar com as crianças locais. Para Gunung Mulu NP, a escola é o terreno comum onde todos os moradores de diferentes etnias compartilham um objetivo comum – as crianças. Gunung Mulu NP considera isso uma maneira muito prática de aumentar a conscientização e o interesse das futuras gerações de guias e outros funcionários do parque.

Gunung Mulu NP se presta a experiências guiadas suaves e mais extremas. O Parque é atendido por 70 guias cadastrados. Apenas vinte desses guias são empregados diretamente. Os restantes números são guias de agências ou operadoras de turismo, bem como um complemento de guias freelance. Isso significa que uma boa parte dos guias que operam em Gunung Mulu NP não está na folha de pagamento do parque e não está sob a jurisdição de Borsarmulu, o que muitas vezes torna as operações desafiadoras. Esses guias autônomos podem participar de sessões adicionais de treinamento de guias e fazê-lo ocasionalmente.



Guias locais levando os visitantes a Sungei Lansat, Parque Nacional Gunung Mulu. Foto de John Gunn.

Reserva de Conservação YUS, Papua Nova Guiné: Utilização sustentável de recursos

Área de Conservação Yopno-Uruwa-Som (YUS CA) está localizada na cordilheira de Saruwaged, província de Morobe, em Papua Nova Guiné. Essas altas montanhas (mais de 3.500 m) contém extensas áreas cársticas desenvolvidas em calcários e argilitos intercalados. Existem cavernas, denominadas makna nas línguas Yupna e Nungan da área. As cavernas têm significado ritual, além de serem usadas como abrigos noturnos e locais onde os morcegos são caçados. As comunidades rurais levam um estilo de vida principalmente de subsistência, contando com seus recursos naturais e solo fértil, como fizeram seus ancestrais. No entanto, os líderes da comunidade YUS notaram desafios que as gerações anteriores não experimentaram: recursos importantes estão escassos.

“Nossos caçadores tinham que percorrer distâncias maiores para encontrar animais na floresta. Às vezes tínhamos que caçar em áreas pertencentes a outros clãs sem o consentimento deles, porque não conseguimos encontrar o suficiente em nossas terras tradicionais para alimentar nossas famílias”

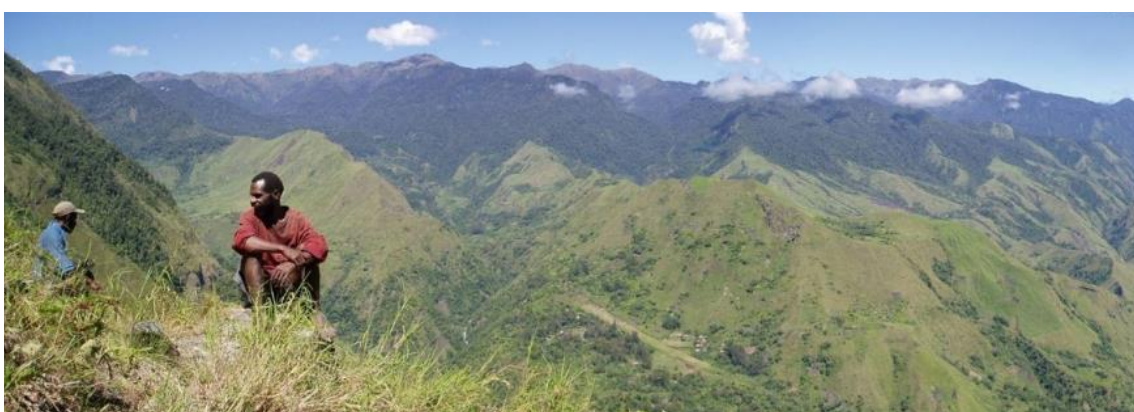
Matthew Tombe, vila Isan, YUS.

Mais de 90% das terras da PNG pertencem a povos indígenas, portanto, o apoio da comunidade local é vital para a proteção da paisagem do YUS. Por mais de uma década, o Programa de Conservação Tree Kangaroo tem trabalhado com aldeias para gerenciar de forma sustentável esta paisagem e os recursos dos quais as pessoas e a vida selvagem dependem. Para facilitar isso, Karau Kuna desenvolveu Planos Comunitários de Uso da Terra (LUP) com 50 aldeias para garantir um consenso sobre o uso de recursos que leve em consideração o bem-estar das pessoas e suas prioridades de conservação.

O YUS CA, publicado em 2009, cobre 76.000 ha de terra e é composto por terras que foram prometidas por proprietários locais e clãs na área para a conservação da biodiversidade. A área de conservação fazia parte de áreas de caça tradicionais de cinco grupos linguísticos. A terra prometida ainda está sob posse consuetudinária, mas a extração de madeira e a caça estão tecnicamente ilegal sob a Lei de Conservação da PNG (1978). A floresta primária é o ecossistema dominante na paisagem do YUS, cobrindo 70% da área de conservação. As florestas são dominantes no nível do mar até 3.100 m e as pastagens alpinas são encontradas mais acima. As florestas são habitat crítico para o canguru-árvore de Matschie, uma espécie ameaçada de extinção, e outros marsupiais, bem como aves-do-paráíso. Essas florestas tropicais são um importante depósito de carbono. Outros tipos

de cobertura do solo em YUS incluem pastagens antropogênicas queimadas, florestas secundárias e uma mistura de agricultura itinerante e mais intensiva, plantações de café sombreadas, plantações de cacau e parcelas agroflorestais de pequena escala.

O Projeto YUS busca conservar o carbono florestal, a biodiversidade endêmica e os serviços ecossistêmicos, além de beneficiar as comunidades rurais locais, fornecendo fluxos de renda de atividades sustentáveis com baixo impacto nos modos de vida tradicionais. Integrar modelos que tenham múltiplos objetivos é um grande desafio no planejamento do uso da terra. No início, oficinas foram realizadas em todos os territórios dos clãs para envolver proprietários de terras e descobrir as aspirações para o YUS CA. O zoneamento da YUS CA em reserva de conservação estrita, uso múltiplo e zonas de produção de aldeia foi realizado por clãs locais e, em seguida, mapeado pela população local usando GPS e imagens de satélite. Em cada território do clã, a população local ganhou trabalho de meio período como guardas-florestais e oficiais de educação. Plantações de café foram estabelecidas, com treinamento em silvicultura fornecido por um comerciante de café Fair Trade baseado nos EUA. Esta empresa também lida com o processamento e comercialização do café YUS como uma marca distintiva de 'árvore canguru'. Parcelas agroflorestais foram estabelecidas em pastagens para aumentar os recursos madeireiros disponíveis para os aldeões. Outras iniciativas melhoraram o acesso à escola e forneceram cuidados de saúde na região, questões identificadas nas oficinas.



Vale Uruwa na Área de Conservação Yopno-Uruwa-Som, do acampamento Wasaunon. A pastagem alpina no carste fica acima da floresta montana superior, com um limite inferior irregular para as áreas desmatadas ao redor das aldeias. Foto de David Gillieson.

Uma iniciativa importante, financiada pelo banco de desenvolvimento alemão KfW Bankengruppe, avaliou os estoques de carbono usando a metodologia REDD+ ([consulte fontes da Internet](#)) nos diferentes tipos de cobertura da terra em YUS. Essas avaliações complementam o mapeamento da vegetação usando sensoriamento remoto e levantamentos de campo para a região. Este projeto forneceu estoques de carbono representativos por amostragem de florestas primárias em uma ampla faixa ambiental. A equipe do projeto também mediu os estoques de carbono em florestas secundárias, plantações de café sombreadas, jardins em pousio e pastagens antropogênicas para informar o futuro manejo do uso da terra para aumentar o sequestro de carbono.

Como a metodologia REDD+ enfatiza a inclusão da população local no desenvolvimento, gestão e monitoramento dos projetos de compensação de carbono, a equipe elaborou um módulo de treinamento destinado a incluir a população local em todas as avaliações de carbono como trabalho remunerado. A coleta de dados de biomassa acima do solo e o monitoramento dos estoques de carbono florestal pela população local podem servir para construir inventários de carbono de linha de base para carbono e monitorar carbono florestal em projetos REDD+ existentes, bem como fornecer meios de subsistência para pessoas que abandonam a exploração florestal. Paisagens de meios de subsistência, como pousios de jardim, sistemas agroflorestais ou plantações podem sequestrar e armazenar quantidades significativas de carbono com uma boa gestão da terra. A integração da metodologia e das ferramentas da Spatial Monitoring and Reporting Tool (SMART) aumenta a capacidade do Comitê de Gestão da Área de Conservação do YUS de receber e analisar dados coletados pelos guardas florestais do YUS durante patrulhas mensais, desenvolver respostas de gerenciamento baseadas em dados para mitigar ameaças e desafios de conservação, bem como destacar tendências positivas na presença de espécies-chave.



Aldeões da Área de Conservação Yopno-Uruwa-Som e equipe de mapeamento do projeto fazendo inventário de carbono acima do solo. Foto de David Gillieson.

Diretrizes

- (72) *Para qualquer área protegida em que existam povos indígenas, é preciso haver uma base legal e política para estabelecer um sistema de gestão colaborativo, com um comitê gestor local. As principais partes interessadas e titulares de direitos do comitê são os residentes locais e as autoridades de gestão da área protegida, com as partes interessadas secundárias sendo as agências governamentais relevantes.*
- (73) *Para as áreas protegidas cársticas nas quais existem povos indígenas, é necessário que haja um zoneamento participativo da terra com base no conhecimento tradicional e nos direitos consuetudinários. Idealmente, isso deve incluir zonas de uso controlado, onde algumas atividades econômicas são praticadas, em zonas totalmente protegidas, onde a conservação da natureza é o objetivo principal.*
- (74) *Os gestores de parques onde existam povos indígenas devem desenvolver acordos de cogestão com as comunidades locais, redigidos em linguagem adequada, de forma que cada comunidade tenha uma área claramente definida para sua gestão e atividades econômicas.*
- (75) *Os gestores de parques onde existam povos indígenas devem envolver a população local nas atividades de manejo da área protegida. As atividades dos guardas florestais e os guias turísticos em cavernas e caminhadas cársticas oferecem oportunidades de emprego significativas e podem ajudar a capacitar a comunidade local. Programas para educar guardas-florestais e guias no idioma que provavelmente serão usados pela maioria dos visitantes e em história natural são essenciais.*
- (76) *Um requisito fundamental para o gerenciamento de melhores práticas é a necessidade de fornecer informações corretas e cientificamente precisas aos visitantes e facilitar pesquisas relevantes e de baixo impacto.*

Conclusões

O carste e cavernas são lugares muito especiais, mas muitas vezes são altamente dependentes de influências mais amplas sobre as quais o controle muito limitado está disponível para os administradores de terra, água e recursos ecológicos, bem como administradores de áreas protegidas. Poucas áreas cársticas são gerenciadas exclusivamente para a conservação da natureza e muitas áreas protegidas exibem suas cavernas e cenários cársticos para turismo e recreação, desempenhando um papel importante no incentivo à educação pública sobre os sistemas cársticos e sua sensibilidade à perturbação. Algumas jurisdições também permitem outras atividades com finalidade social ou econômica, ou essas atividades podem ocorrer naquele local por precedente histórico. Esta situação requer consideração cuidadosa, para garantir que todas as atividades dentro e ao redor da área cárstica protegida sejam geridas de forma compatível com um objetivo abrangente de conservação da natureza. As autoridades administrativas devem identificar as áreas cársticas não incluídas nas áreas protegidas e considerar a salvaguarda dos valores dessas áreas por meio de controles de planejamento, programas de educação pública, acordos de patrimônio ou acordos de uso da terra.

A mudança climática ocorreu naturalmente ao longo dos prazos geológicos dentro dos quais os sistemas cársticos evoluíram. No entanto, a intervenção humana está alterando rapidamente o clima de maneiras que podem afetar radicalmente os processos cársticos naturais. As prescrições de gestão devem ser flexíveis, reconhecer esta realidade e trabalhar para maximizar a resiliência do sistema. Os efeitos de eventos de alta magnitude e baixa frequência, como inundações, tsunamis, incêndios e terremotos, devem ser abordados em estratégias de gestão em escalas regionais, locais e específicas do local. Esses eventos estão se tornando mais frequentes e superando a capacidade da sociedade de lidar com seus impactos.

Fatores locais determinarão as pressões e oportunidades específicas que surgem em cada área cárstica. Assim, essas diretrizes buscam destacar opções sem serem excessivamente prescritivas, o que seria impraticável em escala global. Nós necessariamente nos concentramos em questões que diferenciam o carste de outros estilos de terreno, em oposição a aspectos mais genéricos de gerenciamento que se aplicam a todas as áreas, cársticas ou não. Deve-se enfatizar que essas diretrizes devem sempre ser aplicadas dentro de um contexto local. Isso incluirá o reconhecimento da biodiversidade e geodiversidade local, além da sensibilidade em relação a fatores socioeconômicos e políticos.

Houve uma mudança marcante globalmente na filosofia subjacente da gestão de recursos naturais. Os regimes de gestão anteriores sobre proteção eram excludentes e restritivos, com pouca consideração pela opinião pública. Agora estamos nos movendo rapidamente para regimes de gestão mais esclarecidos, onde as boas relações com aqueles que vivem em áreas vulneráveis e valiosas são consideradas críticas, e essas áreas são administradas usando princípios de gestão adaptativa. O desafio para os gerentes de cavernas e cársticos será abraçar os novos paradigmas enquanto conserva recursos essencialmente não renováveis.

Espera-se que este relato e as diretrizes forneçam aos gerentes e planejadores auxílios úteis para melhorar a conscientização da comunidade sobre os sistemas cársticos e de cavernas e, portanto, aumentar as oportunidades para garantir a aceitação local e o envolvimento na proteção e gestão aprimoradas. As diretrizes também devem auxiliar na preparação de estratégias ou planos de manejo mais específicos nos níveis nacional, regional ou local. Em geral, as agências gestoras devem buscar desenvolver seus conhecimentos e capacidade de gestão cárstica.

Leitura adicional

- Crofts, R., Gordon, J.E., Brilha, J., *et al.* (2020). *Guidelines for geoconservation in protected and conserved areas*, Best Practice Protected Area Guidelines Series No. 31. IUCN, Gland, Switzerland. Available at <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2020.PAG.31.en>
- Culver, D.C. and Pipan, T. (2009). *The biology of caves and other subterranean habitats*. Oxford University Press, Oxford.
- Drew D., and Hötzl, H. (1999). *Karst hydrogeology and human activities: Impacts, Consequences and Implications*. IAH International Contributions to Hydrogeology 20. Routledge.
- Ford, D., and Williams, P., (2007). *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. Wiley, Chichester.
- Gillieson, D.S. (2021). *Caves: Processes, Development and Management*. 2nd Edition. Wiley-Blackwell, Oxford.
- Gunn, J. (ed.). (2004). *The Encyclopedia of Caves and Karst Science*. Taylor and Francis – Routledge, New York.
See especially entries on Recreational Caving, Restoration of Caves, and Tourism and Caves: History.
- Hildreth-Werker, V. and Werker, J.C. (eds.). (2006). *Cave Conservation and Restoration*. National Speleological Society, Huntsville, AL, USA. Available at <https://protect-au.mimecast.com/s/u6sYC71ZQzSARY91Zc8-Dg4?domain=digital.lib.usf.edu>
- International Show Caves Association (ISCA), 2014. *Recommended international guidelines for the development and management of show caves*. ISCA. Available at <https://www.i-s-c-a.org/documents>
- Kresic, N. (2013). *Water in Karst*. McGraw Hill, New York.
- Palmer, A.N. (2007). *Cave Geology*. Cave Books, Dayton, Ohio.
- Thomas, L. and Middleton, J. (2003). *Guidelines for management planning of protected areas*. IUCN, Gland, Switzerland and Cambridge, UK. Available at <https://www.ucipfg.com/Repositorio/MGTS/MGTS11/U5/thomas-middleton-2003-guidelines.pdf>
- Van Beynen, P. (ed.) (2011). *Karst Management*. Springer, New York.
- Veni, G. and DuChene, H. (eds.) (2001). *Living with karst: a fragile foundation*. Environmental Awareness Series no. 4, American Geological Institute. Available at <https://store.americangeosciences.org/living-with-karst.html>
- Watson, J., Hamilton-Smith, E., Gillieson, D., and Kiernan, K. (1997). *Guidelines for Cave and Karst Protection*. IUCN, Gland, Switzerland. Available at <http://data.iucn.org/dbtw-wpd/edocs/1997-026.pdf>
- White, W.B., Culver, D.C., and Pipan, T. (eds.) (2019). *Encyclopedia of Caves*, 3rd edition. Academic Press.
- Williams, P.W. (2008). *World Heritage Caves and Karst*. IUCN, Gland, Switzerland. Available at <https://portals.iucn.org/library/efiles/documents/2008-037.pdf>
- Worboys, G.L., Lockwood, M., Kothari, A., Feary, S. and Pulsford, I. (eds.) (2015). *Protected Area Governance and Management*. ANU Press, Canberra, Australia. Available at <https://press.anu.edu.au/publications/protected-area-governance-and-management>

Recursos da Internet

Australian Speleological Federation Minimal Impact Caving Codes in 1995, with the latest version (2010) available at <https://www.caves.org.au/administration/codes-and-standards>

British Cave Science Centre (free data source), available at <https://www.cave-science.org.uk/>

British Caving Association Minimal Impact Caving Guidelines, available at <https://british-caving.org.uk/our-work/cave-conservation/>

Canyoning code of conduct, available at www.icopro.org/pages/icopro-canyoneer-charter-104.html

Cave gates advice, available at <https://digital.lib.usf.edu//content/SF/S0/05/10/33/00001/K26-00584-147-166.pdf>

Climbers Pact, available at www.accessfund.org/learn/the-climbers-pact

Guide on digging to find new caves in protected areas (UK), available at <https://thedca.org.uk/images/dca/publications/leaflets/Cave-Digging.pdf>

Guidelines for applying protected area management categories, available at <https://portals.iucn.org/library/node/30018>

Information on training for cave instructors (UK), available at <https://british-caving.org.uk/our-work/training/>

International Union of Speleology (UIS) has a 'Code of Ethics for Cave Exploration, and Science in Foreign Countries', available at <https://uis-speleo.org/wp-content/uploads/2020/03/Code-of-Ethics-of-the-UIS-English-Language.pdf>

IUCN Protected Area categories, available at <https://www.iucn.org/theme/protected-areas/about/protected-area-categories>

Karst Management Handbook for British Columbia, available at <https://www.for.gov.bc.ca/hfp/publications/00189/karst-mgmt-handbook-web.pdf>

Karst Inventory Standards and Vulnerability Assessment Procedures for British Columbia, available at https://www2.gov.bc.ca/assets/gov/environment/natural-resource-stewardship/nr-laws-policy/risc/karst_risc.pdf

Minimal Impact Cave Rescue Code, available at <https://www.caves.org.au/administration/codes-and-standards/send/8-codes-and-standards/9-micrc2020>

National Speleological Society (USA) has Minimum-Impact Caving Guidelines that are regularly updated, most recently in February 2021 to take into account the Covid pandemic, available at <https://caves.org/conservation/cavingcode.shtml>

New Zealand Department of Conservation has a 'Caving care code', available at <https://www.doc.govt.nz/parks-and-recreation/things-to-do/caving/caving-care-code/>

REDD+ Webb Platform, available at <https://redd.unfccc.int/>

Tasmanian Cave Access Policy, available at www.dpipwe.tas.gov.au/Documents/PWS%20Cave%20Access%20Policy.pdf

United States Fish and Wildlife Service, White-nose Syndrome Response Team, available at <https://www.whitenosesyndrome.org>

United States Environmental Protection Agency, A Lexicon of Cave and Karst Terminology with Special Reference to Environmental Karst Hydrology, available at <https://ofmpub.epa.gov/eims/eimscomm.getfile?p-download-id=36359>

Referências Científicas

- Auler, A.S., and Piló, L.B. (2015). Caves and mining in Brazil: the dilemma of cave preservation within a mining context. In *Hydrogeological and Environmental Investigations in Karst Systems*. (eds. B. Andreo, F. Carrasco, J.J. Durán, P. Jiménez, P. LaMoreaux). Springer, Berlin, 487–496.
- Auler, A.S., Souza, T.A.R., Se, D.C. and Soares, G.A. (2018). A review and statistical assessment of the criteria for determining cave significance, In *Advances in Karst Research: Theory, Fieldwork and Applications* (eds. M. Parise, F. Gabrovsek, G. Kaufmann, and N. Ravbar). Special Publications 466(1). Geological Society, London, 443–460.
- Bátori, Z., Csiky, J., Farkas, T., *et al.* (2014). The conservation value of karst dolines for vascular plants in woodland habitats of Hungary: refugia and climate change. *Int J Speleol* 43, 15–26. <https://doi.org/10.5038/1827-806X.43.1.2>
- British Columbia Ministry of Forests, (2003). *Karst management handbook for British Columbia*. British Columbia Ministry of Forests, Research Branch, Victoria, British Columbia, 81. <http://www.for.gov.bc.ca/hfp/publications/00189/Karst-Mgmt-Handbook-web.pdf>
- Benstead, J.P., and Pringle, C.M., (2004). Deforestation alters the resource base and biomass of endemic stream insects in eastern Madagascar. *Freshw Biol* 49, 490–501. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2004.01203.x>
- Burri, E., Castiglioni, B., and Sauro, U. (1999). Agriculture, landscape and human impact in some karst areas of Italy. *Int J Speleol* 28 B, 33–54.
- Cigna, A. A., (2011). The Problem of Lampenflora in Show Caves. *Journal of the Australasian Cave and Karst Management Association*, 82, 16–19.
- Council of the Haida Nation, (2007). Haida Gwaii Strategic Land Use Agreement. Council of the Haida Nation. <http://www.haidanation.ca/Pages/Agreements/pdfs/Haida%20Gwaii%20Strategic%20Land%20838Use%20Agreement.pdf>
- Council of the Haida Nation, (2018). *Gwaii Haanas Gina 'Waadluxan KilGuhlGa Land-Sea-People Management Plan*, Archipelago Management Board Gwaii Haanas National Park Reserve, Parks Canada, British Columbia.
- Coxon, C. (1999). Agriculturally induced impacts. In *Karst hydrogeology and human activities: Impacts, Consequences and Implications* (eds. D. Drew and H. Hötzl). IAH International Contributions to Hydrogeology 20. Routledge, 37–63.
- Daly, D., Dassargues, A., Drew, D., *et al.*, (2002). Main concepts of the European approach for karst groundwater vulnerability assessment and mapping. *Journal of Hydrogeology*, 10, 340–345.
- de Koning, M., Parr, J.W.K., Sengchanthavong, S., and Phommasane, S. (2016). Collaborative governance improves management effectiveness of Hin Nam No National Protected Area in central Laos. *Parks* 22(2), 27–40.
- Doerfliger, N., Jeannin, P.Y., and Zwahlen, F. (1999). Water vulnerability assessment in karst environments: a new method of defining protection areas using a multi-attribute approach and GIS tools (EPIK method). *Environmental Geology* 39, 165–176.
- Forti, P., (2015). *The scientific and socio-economic importance of karst and caves and their vulnerability*. Brief for GSDR 2015.
- Frappier, A.B. (2008). A stepwise screening system to select storm-sensitive stalagmites: taking a targeted approach to speleothem sampling methodology. *Quatern Int* 187(1), 25–39.
- Gerstner, H., McArthur, E., and Clark, B. (2018). Feeding the furnace of information, *Proceedings 22nd Australasian Cave and Karst Management Conference, Margaret River WA May 2018*, 6-10. <http://www.ackma.org/Proceedings/proceed/22/22contents.html>
- Gill, D., (1999). Nomination of the Gunung Mulu National Park, Sarawak, Malaysia for World Heritage Listing. *Report to UNESCO World Heritage Committee*. Sarawak Forestry Department, Kuching.
- Gillieson, D., (2011). *Cave Management*. In *Karst Management* (ed. P. E. van Beynen). Springer, New York.
- Gillieson, D., and Clark, B., (2010). Mulu: The World's Most Spectacular Tropical Karst. In *Geomorphological Landscapes of the World* (ed. P. Migon), Springer, pp311–320.
- Gillieson, D., Silverman, J., Hopkinson, R., Quenzer, M., and Kuna, K., (2011). *Vegetation mapping for the YUS conservation landscape*. Report for Conservation International and KfW Bank, James Cook University, Cairns, 35.

- Goldcheider, N., Chen, Z., Auler, A.S., *et al.* (2020) Global distribution of carbonate rocks and karst water resources. *Hydrogeology Journal* 28, 1661–1677.
- Goldscheider, N. (2012). A holistic approach to groundwater protection and ecosystem services in karst terrains. *AQUA mundi* Am06046, 117–124.
<https://groundwaterportal.net/sites/default/files/Holistic%20approach%20-%20groundwater%20ecosystems-%20karst%20terrains.pdf>
- Griffiths, P., and Ramsey, C. (2005). Best management practices for palaeontological and archaeological cave resources. *Journal of the Australasian Cave and Karst Management Association*, 58, 27–31.
- Griffiths, P.A., and Ramsey, C.L., (2009). *Assessment of Forest Karst Resources of Haida Gwaii: A Strategic Overview*. Gwaii Forest Society, Project SFM08–2008.
- Gunn, J. (2021). Karst groundwater in UNESCO protected areas: a global overview. *Hydrogeology Journal*, 29(1), 297–314.
- Gunn, J., Bailey, D., and Handley, J. (1997). *The reclamation of limestone quarries using Landform Replication*. Department of the Environment, Transport and the Regions, HMSO, London.
- Gunn J., and Trudgill, S.T. (1982). Carbon dioxide production and concentrations in the soil atmosphere: A case study from New Zealand volcanic ash soils. *Catena*, 9, 81–94.
- Gutiérrez, F., Parise, M., De Waele, J., and Jourde, H. (2014). A review of natural and human-induced geohazards and impacts in karst. *Earth-Sciences Reviews* 138, 61–88.
- Hamilton-Smith, E., McBeath, R., and Vavryn, D., (1997). Best Practice in Visitor Management. *Proceedings of the 12th ACKMA Conference, 1997 Waitomo, New Zealand*. 85–96.
- Hardwick, P., and Gunn, J. (1993). The impact of agriculture on limestone caves. *Catena supplement*, 25, 235–249.
- Hellstrom, J., Sniderman, K., Drysdale, R., *et al.* (2020). Speleothem growth intervals reflect New Zealand montane vegetation response to temperature change over the last glacial cycle. *Sci Rep* 10, 1–10.
<https://doi.org/10.1038/s41598-020-58317-8>
- Iván, V., and Mádl-Szőnyi, J. (2017). State of the art of karst vulnerability assessment: overview, evaluation and outlook. *Environmental Earth Sciences*, 76. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6422-2>
- Jones, A., Angileri, V., Bampa, F., *et al.* (2013). *CAPRESE-SOIL: Carbon Preservation and Sequestration in agricultural soils, Options and implications for agricultural production*. Final report – EUR 26516. <https://doi.org/10.2788/77068>
- Kieft, T.L., Havlena, Z., and Veni, G. (2021). *An Investigation of Lighting and Chemical Methods to Prevent and Remediate Lampenflora, Carlsbad Cavern, New Mexico*. National Cave and Karst Research Institute Report of Investigation 14, Carlsbad, New Mexico.
- Liu, Z., Dreybrodt, W., and Liu, H. (2011). Atmospheric CO₂ sink: Silicate weathering or carbonate weathering? *Appl Geochemistry* 26, S292–S294. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2011.03.085>
- Manidis Roberts Consultants. (2000). *Gunung Mulu National Park Integrated Development and Management Plan*. Final Report. Sydney, Manidis Roberts Consultants.
- Martin-Sanchez, P.M., Miller, A.Z., and Saiz-Jimenez, C. (2015). Lascaux Cave: An Example of Fragile Ecological Balance in Subterranean Environments. In (*Microbial Life of Cave Systems* (ed. A.S. Engel), Berlin, München, Boston: De Gruyter, 279–302. <https://doi.org/10.1515/9783110339888-015>
- MacGregor, C.L.V., Hellstrom, J.C., Woodhead, J.D., Drysdale, R.N., and Eberhard, R.S. (2022). Low impact of sampling speleothems – reconciling scientific study with cave conservation. *International Journal of Speleology*, 51(1), 1–11.
<https://doi.org/10.5038/1827-806X.51.1.2406>
- McNie, P.M. and Death, R.G. (2017). The effect of agriculture on cave-stream invertebrate communities. *Mar Freshw Res* 68, 1999–2007. <https://doi.org/10.1071/MF16112>
- Milanovic, P. (2021). Dams and reservoirs in karst? Keep away or accept the challenges. *Hydrogeology Journal*.
<https://doi.org/10.1007/s10040-020-02273-0>
- Milanović, S., and Vasić L. (2021). Review: Methodological approaches and research techniques for addressing construction and remediation problems in karst reservoirs. *Hydrogeology Journal* 29, 101–122.

- National Resources Conservation Centre. (2010). *Conservation Practice Standard*. <https://nracs.usda.gov>
- Olarinoye, T., Gleeson, T., Marx, V. *et al.* (2020) Global karst springs hydrograph dataset for research and management of the world's fastest-flowing groundwater. *Sci Data* 7, 59. <https://doi.org/10.1038/s41597-019-0346-5>
- Reed, E. H. (2009). Decomposition and disarticulation of kangaroo carcasses in caves at Naracoorte, South Australia. *Journal of Taphonomy*, 7, 265–283.
- Simon, K.S., Benfield, E.F., Macko, S.A., (2003). Food web structure and the role of epilithic biofilms in cave streams. *Ecology* 84, 2395–2406. <https://doi.org/10.1890/02-334>
- Spötl, C., and Matthey, D. (2012). Scientific drilling of speleothems—a technical note. *Int J Speleol* 41(1), 29–34
- Stevanovic, Z. (2019) Karst waters in potable water supply: a global scale overview. *Environmental Earth Science* 78, 662. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8670-9>
- Tattersall, I., and Schwartz, J. H. (2001). *Extinct Humans*, Boulder, CO, Westview Press.
- Tercafs, R. (2001). *The protection of the subterranean environment. Conservation principles and management tools*, P.S. Publishers.
- Thomas, L., and Middleton, J. (2003). *Guidelines for management planning of protected areas*. IUCN, Gland, Switzerland and Cambridge, UK.
- Titus, T., Phillips-Lander, C.M., Boston, P.J., Judson Wynne, J., and Kerber, L. (2020). Planetary Cave Exploration Progresses. <https://eos.org/science-updates/planetary-cave-exploration-progresses>
- Truebe, S. (2015). *Cultivating a climate of cave conservation awareness: a synthesis of current speleothem sampling methods and best practice recommendations*. CLIMAS Climate and Society Fellowship Report. <https://climas.arizona.edu/sites/default/files/pdf2014truebefellowsreport.pdf>
- UNESCO (2018). *UNESCO policy on engaging with Indigenous peoples*, UNESCO, Paris. <https://en.unesco.org/indigenous-peoples/policy>
- United States Environmental Protection Agency (2002). *A Lexicon of Cave and Karst Terminology with Special Reference to Environmental Karst Hydrology*. <https://karstwaters.org/wp-content/uploads/2015/04/lexicon-cave-karst.pdf>
- Urich, P.B. (1989). Tropical karst management and agricultural development: example from Bohol, Philippines. *Geogr Ann Ser B* 71B, 95–108. <https://doi.org/10.1080/04353684.1989.11879589>
- Urich, P.B. (1996). Deforestation and declining irrigation in Southeast Asia: A Philippine case. *Int J Water Resour Dev* 12, 49–64. <https://doi.org/10.1080/713672197>
- Urich, P.B. (2002). Land use in karst terrain: review of impacts of primary activities on temperate karst ecosystems. Science for Conservation 198 (Report). New Zealand Department of Conservation, Wellington.
- van Beynen, P., and Townsend, K. (2005) A disturbance index for karst environments. *Environmental Management* 36, 101–116.
- Veni, G. (1999). A geomorphological strategy for conducting environmental impact assessments in karst areas. *Geomorphology* 31, 151–180. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(99\)00077-X](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(99)00077-X)
- Venter, M., Dwyer, J., Dieleman, W., *et al.* (2017). Large trees and natural disturbances drive forest biomass on a 3000m elevation gradient in Papua New Guinea, *Global Change Biology*, 23, 4873–4883. <https://doi.org/10.1111/gcb.13741>
- Wang, K., Zhang, C., Chen, H., *et al.* (2019). Karst landscapes of China: patterns, ecosystem processes and services. *Landsc Ecol* 23, 4873–4883. <https://doi.org/10.1007/s10980-019-00912-w>
- Watson, J., Hamilton-Smith, E., Gillieson, D., and Kiernan, K. (1997). *Guidelines for Cave and Karst Protection*. IUCN, Gland, Switzerland.
- Williams, P.W. (1993). Environmental change and human impacts on karst terrains: An introduction. *Catena supplement*, 25, 1–20.
- Wood, P.J., Gunn, J., and Rundle, S.D. (2008). Response of benthic cave invertebrates to organic pollution events. *Aquat. Conserv. Mar Freshw Ecosyst* 18, 909–922. <https://doi.org/10.1002/aqc.933>

Apêndice 1: Carste e Cavernas em Rochas Não Carbonáticas

A paisagem cárstica compreende uma série de relevos especiais, incluindo cavernas, que resultam dos processos de dissolução. Classicamente, o carste foi estudado e entendido como ocorrendo em rochas carbonáticas, como calcário, dolomita e mármore. Essas rochas são solúveis em água ácida e geram a maioria das cavernas e paisagens cársticas conhecidas. No entanto, processos de dissolução também podem operar em vários outros tipos de rocha, se as condições adequadas for presentes. Por exemplo, as rochas evaporíticas (gesso e sal) são mais solúveis do que os carbonatos e, também podem desenvolver relevo cárstico e cavernas. Várias rochas que contêm sílica, como quartzitos e arenitos, também podem desenvolver paisagens cársticas. Embora menos solúvel, a dissolução em rochas ricas em sílica opera em conjunto com outros processos não químicos. O clima pode desempenhar papel importante na ocorrência de cavernas de dissolução nessas rochas. O gesso e o sal são solúveis que tendem a ser desgastados pelo tempo em climas úmidos. As formas de relevo cársticas em rochas evaporíticas tendem a estar presentes em ambientes secos. A sílica solúvel em climas quentes e as cavernas mais representativas dessas rochas ocorrem nos trópicos.

Outras cavernas são inteiramente criadas por processos mecânicos (erosivos), com envolvimento limitado de agentes químicos. É o caso das grutas marinhas ou litorais geradas pelo impacto das ondas ou das grutas em zonas áridas criadas pelo vento. Uma outra categoria de cavernas inclui aquelas criadas em conjunto com a rocha em que se desenvolvem, como tubos de lava, ou por processos tectônicos (cavernas em fenda). Em resumo, existem muitas maneiras de gerar cavernas e carste e elas não estão restritas a rochas carbonáticas. Portanto, é essencial manter uma visão holística ao interpretar o carste e as cavernas.

Cavernas e carste em gesso

O gesso é mais solúvel do que o calcário e, há um potencial para a formação de extensas cavernas. No entanto, como rocha, o gesso é menos comum na superfície do que carbonatos e, a distribuição mundial de cavernas de gesso e carste é mais limitada. Em geral, devido à sua alta solubilidade, o gesso tende a ser melhor preservado em climas secos. O Parque Nacional Wood Buffalo, Canadá, é propriedade do Patrimônio Mundial que contém carste de gesso internacionalmente significativo em um clima boreal seco. As cavernas de gesso geralmente ocorrem em estratos de gesso intercalados com outras rochas e, portanto, têm afloramentos limitados ou inexistentes, uma situação conhecida como 'carste interestratal'. Algumas das cavernas mais longas do mundo, como as cavernas labirínticas da Ucrânia Ocidental, desenvolveram-se em camadas relativamente finas de gesso.

Poucas cavernas de gesso foram adaptadas ao turismo, sendo as mais conhecidas as cavernas de Sorbas, na Espanha. As cavernas de gesso e o carste são, mais frágeis do que os carbonatos. A dureza da rocha é baixa, o que implica que pode ser facilmente danificada. Os espeleotemas tendem a ser menos comuns e são igualmente frágeis. Como essas cavernas ocorrem em zonas áridas, há disponibilidade limitada de drenagem, resultando em um ambiente de baixa energia que limita a regeneração dos impactos. A baixa estabilidade mecânica da rocha de gesso resulta em passagens de caverna pequenas. As cavernas de gesso mais longas compreendem extensos labirintos contendo pequenas passagens, como a caverna Optymistychna de 257 km de comprimento na Ucrânia. O colapso de cavernas dentro de camadas interestratais de gesso geralmente resulta em sumidouros na superfície. O rápido desenvolvimento de passagens no gesso também pode levar a problemas de engenharia.

Cavernas e carste no sal

O sal é uma rocha altamente solúvel, muito mais do que o gesso e o calcário e, portanto, tende a se desgastar rapidamente. As cavernas de sal e o carste persistem apenas em ambientes muito áridos. O hiperárido Deserto de Atacama no Chile, a área desértica do Monte Sedom em Israel e Qeshm no Irã representam os principais exemplos. Muitas das considerações apresentadas para as cavernas de gesso também podem ser aplicadas ao sal, embora as cavernas tendem a ser muito menores, sendo a mais longa, Malham Cave, em Israel, com aproximadamente 10 km de comprimento. A rocha é bastante mole, não consegue suportar grandes aberturas sem desabar e devido ao clima seco carece de drenagem ativa. Superfícies de sal tendem a ser abrasivas, embora friáveis. Espeleotemas de sal estão frequentemente presentes, mas são muito suscetíveis a danos. Estar localizada em ambientes inóspitos e geralmente remotos e pouco povoados contribui para a proteção dessas cavernas.

No Irã, algumas das cavernas de sal da Ilha Qeshm, que é um Geoparque Global da UNESCO, estão abertas ao turismo, assim como as localizadas perto de San Pedro de Atacama, no Chile, embora nenhum plano de adaptação ou manejo tenha sido implementado neste último caso. As extensas cavernas do Monte Sedom foram abertas para o turismo de aventura e atraem centenas de visitantes todos os anos.



Cristais de sal em uma caverna, Monte Sedom, Israel. Foto de Rainer Straub.



Olhando para um poço profundo formado em halita, Coronel Cave, Monte Sedom, Israel. Foto de Rainer Straub.

.Cavernas e carste em rochas ricas em sílica

Rochas ricas em sílica, como arenito, quartzito ou algumas rochas ígneas, como granitos, podem estar sujeitas à dissolução. Nessas rochas, ao contrário dos carbonatos, a solubilidade aumenta com a temperatura e, a dissolução tende a ser favorecida em climas tropicais quentes. Devido às menores taxas de dissolução, é necessário que haja longos prazos disponíveis para que o processo ocorra. Paisagens antigas que evoluíram sob condições tectônicas mais estáveis possuem as condições adequadas para a manifestação desse tipo de caverna. Cavernas dissolucionais em rochas ricas em sílica são comuns em muitas áreas da América do Sul (principalmente no Brasil e Venezuela), África, Austrália e Ásia (Índia e Tailândia). Na América do Sul, como os quartzitos são antigos (meados do Proterozóico) e quimicamente resistentes, eles tendem a formar cristas de alta elevação.



Caverna Aroe Jari, uma caverna de arenito no Parque Nacional da Chapada dos Guimarães, Brasil. Foto de Csaba Egri.

Várias cavernas de quartzito e arenito de quilômetros de extensão foram mapeadas e estudadas, a maior localizada no Parque Nacional Canaima, Patrimônio Mundial, no sudeste da Venezuela. No Brasil, essas cavernas ocorrem em diversas áreas montanhosas da porção leste do país, bem como nas áreas de várzea da bacia amazônica. Essas cavernas representam um novo campo de estudo e muitas áreas ainda precisam ser pesquisadas para encontrar cavernas. Existem extensos cársticos e cavernas de arenito nos arenitos proterozóicos do norte da Austrália, sendo os mais conhecidos o Parque Nacional Purnululu (uma propriedade do Patrimônio Mundial), o Kimberley's da Austrália Ocidental e o Parque Nacional Kakadu no Território do Norte.

Quartzitos e arenitos são rochas que apresentam grãos de quartzo entrelaçados com ou sem matriz siliciosa. Podem ocorrer conglomerados constituídos por fragmentos de rochas cimentadas por matriz rica em sílica. A alteração química dessas rochas desagrega os grãos, um processo conhecido como arenização. Como resultado, o leito rochoso dessas cavernas tende a ser muito friável. No Parque Estadual do Ibitipoca, no sudeste do Brasil, sabe-se que a passagem de turistas por locais mais estreitos na Gruta das Bromélias, com 2,7 km de extensão, alterou permanentemente o perfil das passagens. O colapso do teto da passagem, também causado por turistas tocando partes instáveis da caverna, levou ao fechamento para turistas. A natureza muito frágil das paredes parece ser um incentivo para esculpir inscrições nas cavernas. Várias cavernas de arenito mostram graffiti abrasivo.

Cavernas em rochas ricas em sílica podem abrigar uma fauna troglóbia diversificada; existem duas espécies de bagres adaptadas a cavernas no Parque Nacional da Chapada Diamantina, no nordeste do Brasil. Essas cavernas são desprovidas de espeleotemas cênicos comuns em rochas carbonáticas. No entanto, muitas cavernas na América do Sul recebem regularmente turistas, embora nenhuma tenha sido, devidamente adaptada ao turismo com iluminação artificial e percursos planejados. Planos de manejo de cavernas foram aprovados para algumas cavernas, como a Caverna Salitre em Diamantina, no sudeste do Brasil, e esses

documentos tendem a reconhecer a natureza frágil das cavernas e limitar a visitação a porções maiores e mais acessíveis. Quartzito e arenito, sendo rochas comuns, têm valor econômico limitado. Além disso, devido ao solo arenoso pobre associado a esta paisagem e à frequente localização em altitude, a ocupação humana é geralmente escassa. Isso limita a visitação humana e tende a favorecer a preservação das cavernas. Devido às belas paisagens, à presença de cachoeiras e à facilidade de apropriação, muitas dessas áreas foram convertidas em unidades de conservação nos âmbitos nacional, estadual e municipal.



Câmara de mil pilares no Auyan tepui, uma caverna de quartzito no Patrimônio Mundial do Parque Nacional Canaima, Venezuela. Foto de Vittorio Grobu.

Cavernas em formações de ferro

As cavernas da Formação Ferrífera foram registradas pela primeira vez na literatura na década de 1960, mas ganharam destaque desde 2014 após a notável expansão das minas devido ao aumento da demanda mundial. Atualmente, milhares de cavernas foram identificadas em formações ferríferas, principalmente no Brasil, mas também na Austrália e na África. Embora de dimensões reduzidas, raramente ultrapassando os 100 m, albergam uma notável fauna cavernícola que habita não só a própria gruta como também a porosidade intersticial da rocha. Centenas de novas espécies troglóbias foram registradas recentemente.

A rocha de ferro original e não intemperizada, conhecida como Formação de Ferro Banded, compreende camadas alternadas de sílica e ferro. O ferro é mais resistente quimicamente do que a sílica, então a sílica é lixiviada primeiro, resultando em minério de ferro de alto teor. A gênese das cavernas envolve processos químicos, mas também uma complexa interação de mecanismos geomicrobiológicos onde bactérias redutoras de ferro transformam Fe insolúvel (III) em Fe solúvel (II). Como essas cavernas são associadas a corpos de ferro de alto teor, elas enfrentam pressão econômica da mineração, pois não há alternativas de localização para extração de ferro. Várias áreas de formação ferrífera com cavernas foram mineradas legalmente no Brasil, levando a compensações ambientais substanciais, como novos parques nacionais, financiamento de pesquisas e publicações. No entanto, devido à limitada ocorrência mundial desse tipo de rocha e ao fato de a maior parte das áreas ferríferas já terem sido incorporadas aos planos de lavra, a compensação é aplicada em cavernas em outras rochas, deixando desequilíbrio nas UC's.

Na Austrália, a destruição de um sítio arqueológico associado a uma caverna de formação de ferro levou a fortes protestos públicos. O local de Juukan Gorge continha materiais de ocupação humana datados de 46.000 anos atrás, mas foi totalmente destruído pela mineração. Houve uma reação muito forte dos Proprietários Tradicionais, Puutu Kunti Kurrama e Pinikura povos, bem como grupos ambientais. Um inquérito parlamentar subsequente destacou a inadequação das leis estaduais e federais de proteção ao patrimônio. Atualmente existem outros locais na região sob ameaça de atividades de mineração aprovadas sob esta legislação.



Caverna de formação ferrífera, Serra do Espinhaço Meridional, Brasil. Foto de Luciana Alt e Vitor Moura.



Caverna de formação ferrífera com canga (conglomerado rico em ferro) no teto e formação ferrífera bandada (BIF) nas paredes. Serra do Espinhaço Meridional, Brasil. Foto de Luciana Alt e Vitor Moura.

Grutas ferríferas são desprovidas de espeleotemas cénicos e a sua configuração interior, composta por passagens estreitas, não as torna candidatas atrativas para o turismo. Por causa disso, eles foram amplamente ignorados pelos espeleólogos recreativos, embora sua importância tenha sido destacada por meio de trabalhos de consultoria ambiental. Apenas algumas dessas cavernas são visitadas regularmente e nenhuma possui planos de manejo e infraestrutura adequados. Alguns foram preservados

permanentemente no Brasil, juntamente com um buffer de proteção. Muitas dessas cavernas, no entanto, estão localizadas em locais de mineração, portanto, manter sua integridade é um desafio. Como pouco se sabe sobre essas cavernas, especialmente a mobilidade e o alcance da fauna cavernícola dentro da rocha porosa, é incerto como proteger efetivamente seus ecossistemas.

Cavernas não cársticas

Muitas cavernas não apresentam o predomínio de processos químicos em sua gênese, mas sim, são formadas por vários outros agentes e mecanismos geológicos. Devido à ausência (ou papel menor) de processos de dissolução, essas cavernas geralmente não pertencem a uma paisagem cárstica clássica. Características cársticas típicas, como dolinas e karren, tendem a estar ausentes. Tais paisagens às vezes são incluídas na definição um tanto duvidosa de 'pseudocarste'. No entanto, essas cavernas não cársticas podem ter valores científicos e estéticos notáveis.

Algumas cavernas podem ser formadas sincronizadamente com a rocha onde estão inseridas. É o caso dos tubos lávicos, nos quais a lava que desce após uma erupção tem seus limites externos em contato com a atmosfera ou o porão, que se solidifica primeiro, enquanto a parte interna permanece fundida. Uma vez esgotado o suprimento de lava, resta um longo tubo seguindo a encosta. Essas cavernas são comuns em áreas vulcânicas ativas em todo o mundo e várias foram adaptadas ao turismo. Em Lanzarote, Ilhas Canárias, Espanha, o Jameos de Água é um desses tubos abertos ao turismo de massa. Os tubos de lava têm valor geológico e biológico intrínseco e, embora muitas dessas cavernas sejam geologicamente jovens (geralmente com uma idade máxima de algumas centenas de milhares de anos), elas foram colonizadas e exibem uma rica fauna adaptada às cavernas. Existem cavernas de lava em onze Geoparques Globais da UNESCO e em quatro Propriedades do Patrimônio Mundial da UNESCO: Galápagos, Equador; Rapa Nui, Chile; a Ilha Vulcânica de Jeju, Coreia do Sul; e Parque Nacional dos Vulcões do Havaí, EUA.



Camadas de lava na caverna Kazumura, Havaí, EUA. Esta caverna complexa com muitas entradas está localizada no flanco do vulcão Kilauea e é atualmente o tubo de lava mais longo (65,5 km) e mais profundo (1100 m) do mundo. Foto de Philippe Crochet.

As cavernas também podem ocorrer em tufa, que às vezes é chamada de travertino - embora esse termo seja melhor reservado para depósitos de água termal. Tufa e travertino são ambas rochas formadas pela precipitação de carbonato de cálcio, mais comumente ou imediatamente a jusante das nascentes. Em comum com as cavernas de lava, as cavernas em tufo são formadas primárias ao mesmo tempo em que a rocha é depositada. A maioria tem apenas alguns metros de comprimento e largura, embora alguns sejam mais longos. Na Europa, existem pelo menos sete cavernas turísticas em tufo, sendo a mais longa a Caverna de Olga em Honau, na Alemanha (170 m).

Cavernas abertas por tectonismo, representando juntas alargadas, ocorrem no mundo todo. Essas cavernas são chamadas de cavernas de fendas ou fissuras. Eles são comuns em climas frios e áreas tectonicamente ativas onde a dissolução é um processo menor, como no planalto tibetano e Groenlândia. Estas grutas podem ser de interesse biológico e conter espeleotemas antigos. A caverna de quartzito mais profunda do mundo, a Caverna do Centenário, no sudeste do Brasil, compreende juntas profundas abertas à superfície no topo de um planalto, estreitando-se a dimensões intranponíveis a uma profundidade de 484 m.

Cavernas criadas por processos erosivos são abundantes no mundo todo e ocorrem em diversos tipos de rochas. Numerosas grutas marinhas são geradas pela ação erosiva das ondas. Excelentes exemplos ocorrem na Califórnia, EUA, e no oeste de Waitakere Ranges, Nova Zelândia. Um local conhecido é a Caverna de Fingal, na Escócia, visitada por turistas durante séculos e que inspirou uma das sinfonias de Mendelssohn. O vento pode gerar cavernas, especialmente em rochas 'moles' como o arenito em ambientes desérticos. Cavidades rasas arredondadas de vários tamanhos como tafoni são encontradas em granitos, arenitos e em algumas rochas metamórficas. Eles parecem ser gerados por uma combinação de processos mecânicos, tectônicos e químicos. A ação escavadora de animais, incluindo tatus extintos, criou cavernas com mais de 1 km, como observado na bacia amazônica brasileira. A erosão de afloramentos por rios sinuosos pode resultar em cavernas, assim como o fluxo de água dentro de rochas ou solo não consolidado, que geram cavernas de vida curta e pequenas. Eles são conhecidos como tubos e tendem a ser bastante comuns em zonas áridas. Bons exemplos estão associados à topografia de 'Badlands' no oeste americano.



Cavernas marinhas no Parque Nacional Gennargentu, na costa leste da Sardenha, Itália. Foto de Csaba Egri.

Um grupo de cavernas se desenvolve no gelo. Cavernas glaciais se formam por derretimento e podem ser fechadas pelo gelo ou localizadas no contato com o porão. O derretimento é mais rápido no verão, quando essas cavernas tendem a apresentar altas taxas de desenvolvimento. O calor para derreter o gelo pode vir do atrito entre a água e o gelo ou ser devido a fontes externas, como água aquecida por processos vulcânicos. As cavernas de gelo podem evoluir rapidamente sob o clima em rápida mudança, o que está acontecendo devido a impactos antropogênicos. Muitas cavernas glaciais com as geleiras nas quais estão localizadas, enfrentam um futuro incerto. Cavernas glaciais tornaram-se foco para o turismo de aventura na Islândia.

O arranjo caótico de blocos caídos encontrados na base das montanhas (ou associados a geleiras) pode conter cavernas de talus. É outro exemplo de origem da caverna sendo sincronizada com o depósito em que se encontra. Muitos tipos de rocha podem gerar cavernas de talus, mas são mais comuns em rochas ígneas sujeitas a esfoliação. As cavernas Talus em New Hampshire, EUA, são atrações turísticas populares. Na Austrália, as cavernas de Black Mountain, perto de Cooktown, no norte de Queensland, são extensas e abrigam populações de morcegos. Onde ocorreu intemperismo, cavernas rochosas podem se formar. Estas diferem das cavernas de talus pois são geradas pelo intemperismo subsuperficial, com núcleos ou pedregulhos cercados por grus ou

resíduos de intemperismo. A remoção do resíduo de intemperismo (regolito) entre rochas pelo afundamento de riachos pode produzir extensas cavernas com espeleotemas de sílica amorfa e biota interessante. Na Austrália, existem cavernas de granito em Labertouche, Victoria, e Wyberba, Queensland. A Galícia, no norte da Espanha, exibe cavernas rochosas de mais de 1 km.

Em geral, as cavernas em rochas não carbonáticas tendem a ser menos estudadas, embora possam ser igualmente importantes em termos geológicos e biológicos. Por estarem frequentemente localizados em áreas remotas, geralmente menores e sem o elaborado valor estético proporcionado por grandes câmaras, rios subterrâneos e principalmente espeleotemas, são muito menos visitados e menos expostos ao vandalismo. Os tubos de lava são uma exceção a isso, pois estão bem documentados globalmente, são regionalmente importantes para o turismo e possuem uma extensa literatura científica dedicada a eles.

Bibliografia

- Auler, A.S., Parker, C.W., Barton, H.A., and Soares, G.A. (2019). Iron Formation caves: Genesis and ecology. In *Encyclopedia of Caves* (eds. W. B. White, D. C. Culver, D. C., and T. Pipan). Academic Press: 559–566.
- Frumkin, A. (1994). Morphology and development of salt caves. *National Speleological Society Bulletin* 56: 82–95.
- Kempe, S. (2019). Volcanic rock caves. In *Encyclopedia of Caves* (eds. W. B. White, D. C. Culver, D. C., and T. Pipan). Academic Press: 1118–1127.
- Klimchouk, A. (2019). Gypsum caves. In *Encyclopedia of Caves* (eds. W. B. White, D. C. Culver, D. C., and T. Pipan). Academic Press: 485–495.
- Palmer, A.N. (2007). *Cave Geology*. Dayton, Ohio: Cave Books.
- Persoio, A. and Lauritzen, S.E. (2018). *Ice Caves*. Amsterdam: Elsevier.
- Wray, R.A.L., and Sauro, F. (2017). An updated global review of solutional weathering processes and forms in quartz sandstone and quartzites. *Earth Science Reviews* 171: 520–557.

Apêndice 2: Diretrizes completas

Alguns valores de carste e cavernas

- (1) *O planejamento eficaz para as regiões cársticas exige uma avaliação completa de todos os seus valores econômicos, científicos e humanos, dentro do contexto cultural e político local.*
- (2) *Os gerentes devem reconhecer que em bacias cársticas, as ações de superfície resultam em impactos diretos ou indiretos no subsolo ou mais a jusante*
- (3) *Uma boa compreensão das características das cavernas e seus valores únicos é essencial para o melhor gerenciamento de qualquer área cárstica.*

A natureza especial dos ambientes cársticos e sistemas de cavernas

- (4) *A salvaguarda dos processos naturais, especialmente do sistema hidrológico, é fundamental para a proteção e gestão das paisagens cársticas.*
- (5) *Preeminente entre processos cársticos é a cascata de dióxido de carbono (CO₂) de baixas concentrações na atmosfera através de concentrações aumentadas na atmosfera do solo para concentrações reduzidas em passagens de cavernas. Concentrações elevadas de dióxido de carbono no solo são resultado da respiração das raízes das plantas, da atividade microbiana e fauna saudável de invertebrados. Esta cascata deve ser mantida para os processos de solução cárstica.*
- (6) *Necessidade de gerenciamento da captação é mais vital para as paisagens cársticas do que para outras litologias.*
- (7) *Existem agora relativamente poucas paisagens cársticas intocadas e as que restam devem ser preservadas e mantidas com alta prioridade. Em outros lugares, o foco deve estar na correção de quaisquer impactos negativos das práticas de gestão passadas e presentes.*

Escalas de gestão em áreas cársticas

- (8) *É improvável que uma única prescrição de manejo aplicada a um sistema hidrológico cárstico complexo (ou sistema integrado complexo de cavernas) proteja os processos geomorfológicos e ecológicos em andamento em diferentes partes do sistema. O planejamento deve, portanto, levar em consideração os fatores de escala no sistema cárstico.*
- (9) *A biologia das cavernas é dependente de fontes de alimentos trazidas do ambiente de superfície. O acesso de alimentos e energia de fontes externas é crítico para a sobrevivência de populações de organismos, e a frequência e magnitude das entradas de energia no ecossistema da caverna são essenciais para a manutenção das populações de organismos.*
- (10) *Um sistema hidrológico cárstico individual (ou sistema de cavernas) pode conter vários componentes ou tipos de passagem, desde passagens de fluxo ativas até inativas, de nível superior, bem como passagens de relíquias mal conectadas. Cada um exigirá uma prescrição de gerenciamento diferente.*
- (11) *Dentro de uma área cárstica, algumas seções são sensíveis aos contaminantes das águas, enquanto outras áreas podem ser menos. É necessário um planejamento abrangente do uso da terra para proteger os recursos hídricos subterrâneos.*

Caving recreativo e de aventura

- (12) *Um inventário de cavernas é desejável como base para o gerenciamento. As características de interesse particular em cada caverna devem ser identificadas em um mapa.*
- (13) *Uma avaliação de risco é desejável e deve abranger grupos de cavernas ou seções dentro de uma caverna, conforme apropriado para o local. A avaliação deve abranger tanto o risco para os exploradores humanos quanto o risco que os exploradores humanos representam para a caverna. A vulnerabilidade de cada tipo de feição deve ser avaliada para facilitar a identificação de cavernas, ou zonas dentro de cavernas que são adequadas para usos específicos.*
- (14) *A gestão dos impactos da espeleologia é abordada por meio de um processo de planejamento estratégico com o envolvimento das partes interessadas. Uma abordagem adequada provavelmente exigirá uma combinação de iniciativas, das quais a política de acesso sempre desempenha um papel fundamental.*
- (15) *Qualquer instrutor que ofereça espeleologia de aventura deve ser capaz de fornecer evidências de que recebeu treinamento adequado em aspectos de segurança e conservação de cavernas.*
- (16) *Espera-se que todos os espeleólogos estejam familiarizados e sigam um código de espeleologia de impacto mínimo (MICC). Onde nenhum MICC nacional ou regional se aplica a uma área protegida, um código específico deve ser elaborado com base nos códigos publicados.*

- (17) *Escavação, exploração original e pesquisa em cavernas dentro de áreas protegidas devem ser controladas por meio de acordos específicos ou pela exigência de licenças.*
- (18) *Recomenda-se aos gerentes de áreas protegidas que elaborem um plano que possa ser implementado caso ocorra um acidente de espeleologia na área. O plano deve ser elaborado com a participação do órgão de espeleologia regional ou nacional e dos órgãos estaduais responsáveis por situações de acidentes e emergências, devendo incluir orientações para minimizar o impacto do resgate na caverna e na superfície.*
- (19) *É totalmente inapropriado permitir qualquer forma de transporte motorizado para cavernas selvagens e cavernas selvagens nunca devem ser usadas para corridas ou outros tipos de eventos esportivos.*

Cavernas Turísticas

- (20) *As grutas turísticas existentes devem ser geridas de acordo com os mais altos padrões possíveis e devem trabalhar no sentido da conformidade com as Diretrizes Recomendadas da ISCA, bem como com as diretrizes fornecidas aqui.*
- (21) *Um estudo completo deve ser conduzido para determinar a sustentabilidade ambiental e econômica antes de transformar uma caverna em uma caverna turística.*
- (22) *A segurança deve ser a prioridade número um para cada caverna turística.*
- (23) *Determinar a capacidade de carga do visitante de uma caverna turística específica é o equilíbrio entre fornecer uma experiência de passeio de caverna segura, informativa e agradável para os visitantes e minimizar o impacto no ambiente da caverna, ao mesmo tempo em que atinge os objetivos econômicos. Todos os três – experiência do visitante, impacto ambiental e objetivos econômicos – devem ser considerados.*
- (24) *É necessário ter uma planta do local que descreva o detalhe da superfície e o detalhe do subsolo de uma caverna para analisar o impacto potencial que as obras de superfície podem ter em uma caverna.*
- (25) *A infraestrutura adequada na entrada de uma caverna turística é essencial para a manutenção do ambiente natural da caverna.*
- (26) *Em todos os novos empreendimentos, seja em cavernas turísticas existentes ou em novos locais, as necessidades de infraestrutura devem ser cuidadosamente avaliadas, projetadas e instaladas, levando em consideração as melhores práticas atuais.*
- (27) *A rede de iluminação elétrica de uma gruta deve preferencialmente ser dividida em zonas, permitindo assim que apenas as partes da gruta atualmente ocupadas por visitantes sejam efetivamente iluminadas. O uso da luz deve ser minimizado para iluminar apenas alguns recursos e criar uma atmosfera que melhore a experiência do visitante.*
- (28) *O gerenciamento eficaz de cavernas turísticas é sustentado pelo monitoramento para permitir o gerenciamento adaptativo do local. No mínimo, o monitoramento básico da caverna, fauna, clima e concentrações de dióxido de carbono deve ser realizado de acordo com um cronograma de monitoramento.*
- (29) *Os gerentes de cavernas turísticas devem ser competentes tanto na gestão dos negócios da caverna turística quanto na proteção ambiental.*
- (30) *Os guias em qualquer gruta turística desempenham um papel muito importante como ligação entre a gruta e o visitante. É essencial que os guias sejam devidamente treinados nos valores de cada gruta e na sua interpretação para os visitantes.*
- (31) *Todas as cavernas turísticas devem desenvolver informações interpretativas de alta qualidade para ajudar o público a entender e apreciar melhor o ambiente da caverna.*

Atividades de aventura e turismo em superfícies cársticas

- (32) *Habitats cársticos de superfície acidentada e remota podem ter valores de biodiversidade e geodiversidade não reconhecidos que devem ser pesquisados e avaliados como parte do processo de tomada de decisão sobre permitir ou não atividades de aventura e turismo neles, sob quais condições e onde.*
- (33) *A infraestrutura necessária para apoiar as atividades cársticas de superfície deve ser projetada e instalada de forma que tenha pouco impacto sobre o cárstico, tanto visualmente quanto em termos de integridade e, se necessário, possa ser facilmente removida no futuro, devolvendo o cárstico quase ao seu estado natural.*

Pesquisa científica

- (34) *Todas as áreas protegidas com cavernas e carste devem desenvolver políticas de gerenciamento de pesquisa, que só devem ser permitidas após o recebimento e aprovação de uma solicitação.*
- (35) *Aqueles que desejam realizar pesquisas em cavernas devem ser capazes de demonstrar que estão familiarizados com ambientes de cavernas e o Código de Caving de Impacto Mínimo local, ou que estão trabalhando com cientistas de cavernas experientes que garantirão a adesão ao código.*
- (36) *Para aquelas cavernas que possuem um plano de manejo, deve haver uma seção sobre atividades de pesquisa.*
- (37) *Todos os pesquisadores que trabalham em cavernas ou em carste, dentro ou fora de áreas protegidas, são recomendados a avaliar cuidadosamente suas propostas, incluindo uma comparação de benefícios potenciais com o risco de danos ao meio ambiente ou valores culturais.*
- (38) *Deve haver ênfase em métodos mínimos de amostragem para fauna, espeleotemas e sedimentos, e os pesquisadores devem se comprometer a publicar os resultados de forma que seja de fácil compreensão tanto para o público quanto para a mídia acadêmica. Os pesquisadores devem se comprometer com a remoção do equipamento e reabilitação do local (se necessário) na conclusão do projeto.*

Agricultura e Exploração florestal

- (39) *A atividade agrícola tem o potencial de causar impactos adversos significativos nos geo ecossistemas cársticos. Os gerentes de áreas protegidas devem (a) dar atenção especial a quaisquer mudanças propostas no uso da terra e (b) fornecer orientações adequadas ao tipo de cultivo e às condições particulares do solo, a fim de minimizar os impactos na quantidade e qualidade da água.*
- (40) *Com relação ao uso da terra, a terra arável requer um manejo cuidadoso do solo para minimizar a perda erosiva e alteração das propriedades do solo, como aeração, estabilidade de agregados e teor de matéria orgânica, e para manter uma biota saudável do solo. As pastagens devem ser manejadas para manter a cobertura vegetal, dando atenção especial aos níveis de lotação. Como as dolinas fornecem pontos de recarga, elas devem ser deixadas em seu estado natural e nunca devem ser preenchidas ou usadas para descarte de lixo.*
- (41) *Sempre que possível, as zonas tampão devem ser estabelecidas em torno de áreas de recarga concentrada, como riachos que afundam, dolinas ou outras aberturas naturais, pois são condutos para o movimento de contaminantes e poluentes no ambiente cárstico subterrâneo. Em terras agrícolas, não deve ser permitida a lavoura nas zonas tampão e deve ser mantida uma cobertura vegetal completa para filtrar qualquer sedimento no escoamento da terra arada. Nas florestas, a preservação e potencialização da vegetação nativa em zonas de amortecimento é fundamental*
- (42) *No que diz respeito à quantidade de água, deve-se controlar a quantidade de água subterrânea extraída para irrigação. A captação de água da chuva deve ser empregada o máximo possível.*
- (43) *Com relação à qualidade da água, o uso de pesticidas e herbicidas deve ser desencorajado, a menos que seja absolutamente necessário controlar pragas e ervas daninhas. O uso de fertilizantes deve ser reduzido e, sempre que possível, devem ser usados fertilizantes naturais. Zonas tampão em torno de áreas de recarga concentrada devem ser respeitadas e as aplicações químicas não devem ocorrer durante os períodos em que os solos estão em ou perto da saturação e há risco de escoamento superficial de produtos químicos para o carste.*
- (44) *Antes de qualquer atividade madeireira ou florestal em áreas cársticas, é necessário um procedimento para inventariar e mapear a área, avaliar sua sensibilidade e/ou vulnerabilidade e desenvolver prescrições de manejo adequadas. Deve-se considerar uma análise prévia do tipo e magnitude das atividades florestais dentro de uma bacia cárstica específica, além de monitoramento de acompanhamento para garantir como as prescrições foram implementadas e quão bem as áreas cársticas sensíveis foram protegidas.*
- (45) *As florestas naturais desenvolvidas em terrenos cársticos, incluindo árvores maduras e florestas de crescimento excessivo, não devem ser derrubadas, derrubadas ou sujeitas a qualquer impacto humano. Em vez disso, essas florestas devem ser rigorosamente protegidas por um manejo de conservação adequado, de modo que os ambientes cársticos superficiais e subterrâneos continuem a usufruir dos benefícios de seus serviços ecossistêmicos.*
- (46) *Em áreas onde a floresta nativa foi derrubada e substituída por outras espécies, os gestores devem planejar a substituição das espécies não nativas pelo tipo de floresta que melhor se adapte às condições ecológicas do local.*

Indústrias extrativas

- (47) *Deve haver uma presunção contra novas minas ou pedreiras em áreas cársticas protegidas, a menos que possa ser demonstrado que não há fonte alternativa para um mineral escasso e de alto valor econômico ou estratégico.*
- (48) *Qualquer proposta para uma nova mina ou pedreira em carste deve estar sujeita a uma avaliação ambiental detalhada que considere tanto as características dentro quanto os limites da área, bem como o potencial para impactos distantes via águas superficiais e subterrâneas cársticas.*
- (49) *A avaliação ambiental deve descrever e avaliar o valor das formas de relevo e ecossistemas de cavernas e cársticas. Deve avaliar se existem locais alternativos para extração onde haveria impactos menos significativos. Onde não há locais alternativos, deve haver uma zona tampão cuidadosamente projetada, sempre que possível, em torno de cavernas significativas e características cársticas, a fim de proteger a integridade do ecossistema da caverna, bem como a continuidade dos processos hidrológicos.*
- (50) *Onde não houver alternativa à destruição, as feições devem ser registradas e, quando relevante, removidas para estudo científico – ou seja, registrar e remover espeleotemas e sedimentos para estudo paleoambiental.*
- (51) *Onde o desenvolvimento for permitido, deve haver um sistema de proteção bem projetado, bem como um protocolo de monitoramento para registrar as condições durante a operação e a eficácia do sistema de proteção para que alterações possam ser feitas. Também deve haver plano de fechamento detalhado que inclua restauração e monitoramento de longo prazo, incluindo uma caução paga para garantir que o financiamento para o fechamento estará disponível.*

Desenvolvimento e infraestrutura

- (52) *Todos os estudos de viabilidade para construção em áreas cársticas devem incluir um exame do local planejado, uma avaliação ambiental detalhada e tamanho da zona tampão de proteção. Se possível mover projeto ou desenvolvimento urbano para longe de uma área cárstica, esta pode ser uma decisão econômica e ambientalmente positiva.*
- (53) *Protocolos devem ser desenvolvidos e aplicados para lidar com o descarte de resíduos atmosféricos, líquidos e sólidos gerados durante e após a construção. Estas devem estender-se a toda a zona crítica cárstica, que inclui a atmosfera, o solo, o epicarste e a zona superior dos aquíferos cársticos.*
- (54) *Códigos de construção para carste são aplicados da mesma forma que áreas propensas a terremotos ou inundações. O zoneamento urbano carste deve levar em consideração especificidades e fragilidades inerentes ao ambiente cárstico.*
- (55) *Forte estrutura de planejamento baseada na ciência deve ser implementada em níveis local, regional e nacional.*
- (56) *Iniciativas educativas devem ser colocadas em prática, especialmente em países menos desenvolvidos, a fim de informar proprietários de terras ou moradores da cidade sobre a fragilidade dos terrenos cársticos.*
- (57) *Em áreas protegidas, a infraestrutura deve ser reduzida ao mínimo e, se possível, localizada longe de cavernas e características cársticas.*
- (58) *Um plano de gestão de área protegida adequado deve pesar os prós e contras de construir estruturas dentro da área, visando a proteção do meio ambiente e dos visitantes, em vez de proporcionar conforto desnecessário. Projetos de infraestrutura em grande escala em cavernas, a menos que sejam indispensáveis, devem ser desencorajados.*
- (59) *Materiais perigosos devem ser manuseados com muito cuidado e devidamente regulamentados para minimizar as liberações. Os socorristas de incidentes HazMat devem ser treinados em métodos de resposta específicos para o carste.*
- (60) *Materiais perigosos, sejam eles gasolina ou outros combustíveis, solventes, esgoto ou outros resíduos perigosos, nunca devem ser descartados no subsolo. A investigação e remediação de águas subterrâneas é extremamente difícil e cara. Tanto quanto possível, os materiais perigosos devem ser contidos e removidos da superfície. Investigações mais detalhadas do potencial impacto ambiental devem ser realizadas por profissionais experientes do carste.*

Abastecimento de água

- (61) *Definir buffers de proteção para fontes de água cárstica, como nascentes, poços e cavernas. Nessas áreas protegidas, devem ser estabelecidos protocolos de práticas agrícolas, com uso adequado de fertilizantes e bombeamento controlado de água. Vários esquemas para a implementação de zonas de proteção em nascentes foram propostos, mas só foram amplamente aplicados na Europa e nos EUA.*
- (62) *As iniciativas educativas devem promover a conscientização de proprietários de terras e cidadãos comuns em relação às especificidades dos ambientes cársticos, a fim de evitar o descarte inadequado de resíduos sólidos, sanitários e perigosos.*

- (63) *Um sistema de monitoramento robusto deve ser estabelecido nas principais nascentes e poços selecionados em sistemas de águas subterrâneas suscetíveis e altamente utilizados no carste. O monitoramento remoto de longo prazo e alta resolução é agora uma possibilidade em muitas nascentes e deve ser implementado mais amplamente.*
- (64) *Os países devem tratar a água como recurso frágil e finito, implementando leis para controlar e disciplinar a extração de água, bem como permitir financiamento para reação rápida em caso de contaminação. Em particular, devem ser postas em prática recomendações relativas a implementação adequada de fossas sépticas e localização de aterros sanitários.*
- (65) *Como pouco se sabe sobre o comportamento de muitos contaminantes em ambientes cársticos, fundos adequados devem ser disponibilizados para avançar na compreensão científica desse assunto.*

Desenvolvimento de monitoramento e mitigação eficazes

- (66) *Monitoramento é uma ferramenta essencial na gestão e proteção de cavernas e recursos cársticos, especialmente em áreas protegidas. Os resultados do monitoramento podem ser usados para informar a gestão e mitigar os impactos.*
- (67) *Os esforços de monitoramento devem ser focados na priorização dos recursos naturais com base em seu valor ou importância, sua vulnerabilidade ou fragilidade e a gravidade das ameaças ou impactos reais ou previstos.*
- (68) *A poluição das águas subterrâneas apresenta problemas especiais no carste e deve sempre ser minimizada e monitorada. Esse monitoramento deve ser baseado em eventos e não em intervalos meramente regulares, pois as concentrações de solutos e poluentes químicos são geralmente mais altas durante os períodos de baixo fluxo, no entanto, é durante as tempestades e inundações que a maior carga de poluentes é transportada pelo sistema cárstico.*
- (69) *Evite monitoramento de alta frequência em áreas frágeis, a menos que seja extremamente necessário, pois isso pode gerar impactos próprios. O monitoramento automatizado, se viável, deve ser priorizado.*
- (70) *Embora reconhecendo a natureza não renovável de muitos recursos cársticos, particularmente dentro de cavernas, uma boa gestão exige que os recursos danificados sejam restaurados na medida do possível.*
- (71) *Na medida do possível, os sistemas e processos naturais nas áreas cársticas devem ser mantidos ou restaurados. Se for necessária intervenção, privilegia-se a utilização de soluções naturais, especialmente aquelas que trabalham em sintonia com os processos naturais e são ambientalmente mais sustentáveis do que as soluções de engenharia.*

Envolvimento dos povos indígenas na gestão do carste

- (72) *Para qualquer área protegida em que existam povos indígenas, é preciso haver uma base legal e política para estabelecer um sistema de gestão colaborativo, com um comitê gestor local. As principais partes interessadas e titulares de direitos do comitê são os residentes locais e as autoridades de gestão da área protegida, com as partes interessadas secundárias sendo as agências governamentais relevantes.*
- (73) *Áreas protegidas nas quais existem povos indígenas, é necessário que haja zoneamento participativo da terra com base no conhecimento tradicional e nos direitos consuetudinários. Isso deve incluir zonas de uso controlado, onde atividades econômicas são praticadas, e zonas totalmente protegidas, onde a conservação da natureza é o objetivo principal.*
- (74) *Os gestores de parques onde existam povos indígenas devem desenvolver acordos de cogestão com as comunidades locais, redigidos em linguagem adequada, de forma que cada comunidade tenha uma área claramente definida para sua gestão e atividades econômicas.*
- (75) *Gestores de parques onde existam povos indígenas devem envolver a população local nas atividades de manejo. As atividades dos guardas florestais e os guias turísticos em cavernas e caminhadas cársticas oferecem oportunidades de emprego significativas e podem ajudar a capacitar a comunidade local. Programas para educar guardas-florestais e guias no idioma que provavelmente será usado pela maioria dos visitantes e em história natural são essenciais.*
- (76) *Um requisito fundamental para o gerenciamento de melhores práticas é a necessidade de fornecer informações corretas e cientificamente precisas aos visitantes e facilitar pesquisas relevantes e de baixo impacto.*