PRINCÍPIOS DE CARSTOLOGIA E GEOMORFOLOGIA CÁRSTICA

Luiz Eduardo Panisset Travassos

ICMBio
INSTITUTO CHICO MENDES
MMA

REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL

Presidente
JAIR MESSIAS BOLSONARO

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE

Ministro
RICARDO SALLES

Secretário Executivo
LUIS GUSTAVO BIAGIONI

Secretário de Biodiversidade
EDUARDO SERRA NEGRA CAMERINI

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE

Presidente
HOMERO DE GIORGE CERQUEIRA

Diretor de Pesquisa, Avaliação e Monitoramento da Biodiversidade
MARCOS AURÉLIO VENANCIO

Coordenador do Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas
JOCY BRANDÃO CRUZ

ANGLO AMERICAN MINÉRIO DE FERRO BRASIL S.A.

Presidente
WILFRED BRUIJN

Diretor de Saúde, Segurança e Desenvolvimento Sustentável
ALDO APARECIDO DE SOUZA JÚNIOR

Gerente Corporativo de Meio Ambiente
TIAGO MOREIRA ALVES

© ICMBio 2019. O material contido nesta publicação não pode ser reproduzido, guardado pelo sistema "retrieval" ou transmitido de qualquer modo por qualquer outro meio, seja eletrônico, mecânico, de fotocópia, de gravação ou outros, sem mencionar a fonte.

© dos autores 2019. Os direitos autorais das fotografias contidas nesta publicação são de propriedade de seus fotógrafos.

Ministério do Meio Ambiente
Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade
Diretoria de Pesquisa, Avaliação e Monitoramento da Biodiversidade
Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas

PRINCÍPIOS DE CARSTOLOGIA E GEOMORFOLOGIA CÁRSTICA

Luiz Eduardo Panisset Travassos

Brasília – 2019

©ICMBio 2019.
©dos Autores 2019.

PRINCÍPIOS DE CARSTOLOGIA E GEOMORFOLOGIA CÁRSTICA

Coordenador do ICMBio/CECAV
JOCY BRANDÃO CRUZ

Autor
LUIZ EDUARDO PANISSET TRAVASSOS

Revisão Gramatical e Ortográfica
LUCÍLIA PANISSET TRAVASSOS

Projeto Gráfico e Diagramação
JAVIERA DE LA FUENTE CASTELLÓN (EDITORA IABS)

Coordenação Editorial
FLÁVIO SILVA RAMOS (EDITORA IABS)
www.editoraiabs.com.br

APOIO INSTITUCIONAL

PUC Minas
United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
UNESCO Chair on Karst Education
University of Nova Gorica in cooperation with
ZRC SAZU Karst Research Institute

Catalogação na Fonte
Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade

Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade.
Princípios de Carstologia e Geomorfologia Cárstica / Luiz Eduardo Panisset Travassos – Brasília: ICMBio, 2019.

242 p. ; Il. Color.
ISBN 978-65-5024-003-5

1. Espeleologia. 2. Áreas cársticas. 3. Geomorfologia cárstica. I. Luiz Eduardo Panisset Travassos. II. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade – ICMBio. III. Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas – Cecav. VI. Título.

CDU: 551.4

A reprodução total ou parcial desta obra é permitida, desde que citada a fonte.

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE
Diretoria de Pesquisa, Avaliação e Monitoramento da Biodiversidade
Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas
Rodovia BR 450, km 8,5 via Epia – Parque Nacional de Brasília
CEP: 70635-800 - Brasília/DF - Tel: 61 2028-9792
http://www.icmbio.gov.br/CECAV

SOBRE O AUTOR

Luiz Eduardo Panisset Travassos vem de uma família de professores, tradição pedagógica iniciada com seu bisavô materno. Interessando na relação entre Sociedade e Natureza, cursou a Licenciatura e o Bacharelado em Geografia na Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (1996-2000), onde concluiu a Especialização em Gestão Ambiental de Resíduos Sólidos (2005), o Mestrado em Geografia (2007) e o Doutorado em Geografia (2010). Em 2011, concluiu seu segundo Doutorado, esse em Carstologia, na Universidade de Nova Gorica, Eslovênia. Em 2015 e 2016, conclui dois estágios pós-doutorais, também na Eslovênia. Um deles foi realizado no Instituto de Pesquisas do Carste daquele país (Inštitut za Raziskovanije Krasa), onde trabalhou com o monitoramento climático da Caverna de Postojna, junto ao Dr. Franci Gabrovšek. O outro estágio pós-doutoral foi realizado com o Dr. Andrej Kranjc, no Centro de Pesquisas da Academia de Ciências e Artes da Eslovênia, trabalhando aspectos da cartografia do carste na região da Carniola ao longo da história. Desde agosto de 2010, por meio de concurso público externo, tornou-se Professor Adjunto do Programa de Pós-Graduação em Geografia da PUC Minas. Foi coordenador da Seção de História da Espeleologia da Sociedade Brasileira de Espeleologia (2007-2013) e, atualmente, é coordenador do Comitê de Carste para a América do Sul na União Internacional de Geografia e Pesquisador Associado do Instituto de Pesquisas do Carste (Eslovênia). É revisor de periódicos nacionais e internacionais, com experiência nas áreas de geografia, carstologia, meio ambiente, geoconservação e cultura. Tem interesse no papel desempenhado pela geografia do carste em conflitos regionais e internacionais, por ser o conhecimento da paisagem cárstica fator decisivo em muitos desses casos. Sua dissertação de mestrado foi premiada pela ANPEGE (Associação Nacional de Pós-Graduação e Pesquisa em Geografia) em 2009 e sua tese de doutorado recebeu menção honrosa da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) em 2011. Atualmente, o autor é Bolsista de Produtividade em Pesquisa do CNPq (PQ-2).

Foto: L. E. P. Travassos

Dedico esse trabalho à minha família
e aos meus amigos especiais.

AGRADECIMENTOS

Como havia dito em minha tese de doutorado, e tenho sempre repetido para meus alunos, acredito que, desde o início de nossas carreiras, entramos em contato com inúmeros profissionais que nos ajudam em nossas longas caminhadas, sejam elas acadêmicas, profissionais ou mesmo pessoais. Portanto, sempre precisamos da colaboração direta e indireta de diferentes instituições e de vários profissionais e amigos, aos quais devemos ser extremamente gratos, guardando-os em um lugar especial na memória.

Por esse motivo, reservo este espaço para enumerar algumas pessoas e dizer que espero continuar contando com eles ao longo da minha vida. Falo isso com a mais profunda sinceridade, pois, como diria o poeta inglês John Donne (1572-1631), "nenhum homem é uma ilha isolada".

Em relação aos meus mestres "carstológicos", agradeço ao meu orientador de Mestrado, o Prof. Dr. Heinz Charles Kohler. Seus ensinamentos a respeito do carste, sua amizade e confiança em mim foram fundamentais desde o momento em que começamos nossos contatos lá pelos idos de 2004. Foi esse Carstólogo que me colocou em contato com outra grande pessoa, um excelente cientista que veio a ser meu orientador no doutorado em Carstologia na Universidade de Nova Gorica, Eslovênia, meu mentor esloveno, Dr. Andrej Kranjc, pesquisador aposentado do Instituto de Pesquisas do Carste e membro ativo da Academia de Ciências e Artes daquele país, a quem agradeço sinceramente. Sou grato pelo seu reconhecimento de meu trabalho e pelas muitas oportunidades que me foram dadas por ele. Agradeço os conhecimentos sempre compartilhados e, acima de tudo, sua amizade. Seu auxílio e apoio foram fundamentais na conclusão de minha tese de doutorado e na minha formação como carstólogo.

Para a sua esposa, Maja Kranjc, bibliotecária aposentada do Instituto de Pesquisas do Carste, acredito que minhas palavras nunca serão suficientes para expressar minha gratidão por sua atenção, sua dedicação e seu empenho em me auxiliar sempre que precisei "garimpar" preciosas obras daquela biblioteca. Ressalto que, muitas das vezes, essa ajuda veio por sua

própria iniciativa. Por isso, e por tantas outras coisas, sou extremamente grato. Sempre que precisei de um teto, lá estava.

Aos amigos em atividade no Instituto de Pesquisas do Carste da Eslovênia, meu reconhecimento por me acolherem como membro do grupo, fato que certamente contribuiu – e ainda contribui – para o meu aprimoramento pessoal e profissional. Dentro de suas especialidades, todos contribuíram com minha formação mesmo antes de nosso primeiro contato pessoal em 2007.

Ao Dr. Arthur Palmer e sua esposa, meus sinceros agradecimentos pelas sugestões dadas quando da leitura de meus textos e por suas generosas considerações na carta de recomendação que me auxiliou a ingressar no Doutorado em Carstologia da Universidade de Nova Gorica.

Ao Prof. Dr. Martón Veress, da Universidade West Hungary (Szombathely) e ao geólogo australiano e editor do periódico "Helictite", Ken Grimes, meus agradecimentos por me enviarem algumas de suas fotografias e permitirem que as usasse neste livro.

No plano governamental, agradeço ao CECAV, especialmente à Débora Jansen, Mauro Gomes e Darcy Santos, pelos importantes momentos em que trocamos ideias e experiências, tanto no escritório quanto em campo. Também agradeço ao Instituto Estadual de Florestas (IEF-MG), que sempre autorizou minhas pesquisas, assim como as de meus orientandos, por meio da Gerência de Projetos e Pesquisas e da Diretoria de Pesquisa e Proteção à Biodiversidade. Quanto ao uso das imagens das UCs que aparecem neste livro, agradecemos as autorizações concedidas pela Diretoria de Áreas Protegidas (DIAP) e sua Gerência de Unidades de Conservação (GEUC), sob a orientação do Sr. Benito Drummond.

Além dessas diretorias, agradeço ao Diretor da Regional Centro Norte, Sr. Rinaldo José de Souza, e aos gerentes dos Parques e Monumentos Estaduais no momento em que as fotografias foram tiradas e as licenças concedidas.

Peço desculpas se deixei de citar alguém nominalmente, o que pode ter ocorrido, mas não por esquecimento, mas pela extensão da lista de colaboradores imprescindíveis ao meu trabalho

Foto: L. E. P. Travassos

APRESENTAÇÃO

De extrema beleza e complexidade, as áreas cársticas são ambientes extremamente frágeis, com um conjunto de elementos físicos e bióticos, socioeconômicos e histórico-culturais, subterrâneos ou superficiais, representados pelas cavidades naturais subterrâneas que compõem o patrimônio espeleológico nacional.

É inegável a importância do carste como aquífero. Segundo a Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (UNESCO), essas áreas representam os mais significativos e seguros mananciais de água potável para a população com estimativas de uso por aproximadamente 25% da população mundial.

Também se destacam pela riqueza de seu solo, valor econômico e turístico. Portanto, o uso e a ocupação dessas áreas requerem especial atenção, visto que tais atividade podem causar impactos significativos neste ambiente especial.

Buscando contribuir com o aprimoramento e a divulgação do conhecimento acerca desse patrimônio, Componente 1 do Programa Nacional de Conservação do Patrimônio Espeleológico (PNCPE), esta publicação traz, em seu escopo, aspectos da geomorfologia cárstica de extrema importância para o entendimento desses ambientes sistêmicos naturalmente sensíveis e complexos.

Conceitos da Carstologia são aqui apresentados e ricamente ilustrados para um fácil entendimento pelo leitor, tornando este livro uma importante contribuição na qualificação técnica das instituições responsáveis pela análise de estudos espeleológicos nos processos de licenciamento ambiental.

Ademais, corrobora com os esforços que vêm sendo realizados pelo Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, por meio do Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (ICMBio/CECAV), para o fortalecendo da gestão dos ambientes cársticos e, consequentemente, o do patrimônio espeleológico nacional, Componente 6 do PNCPE.

Jocy Brandão Cruz
Coordenador do Centro Nacional de Pesquisa
e Conservação de Cavernas (ICMBio/CECAV)

PALAVRAS INICIAIS DO AUTOR SOBRE O LIVRO

Quando o tema é a paisagem cárstica e as cavernas, observamos que ambas são comumente percebidas pelas pessoas de formas muito variadas. Fato similar acontece com a geomorfologia e até mesmo com a geografia e sua importância como ciência. Abordagens distintas são realizadas e interpretações, igualmente diferentes, ocorrem. Partindo de uma abordagem que se inicia com os leigos e vai até os cientistas, toda paisagem, em especial o carste e as cavernas, geralmente assume significados diversos de acordo com a evolução histórica e as condições culturais dos grupos sociais que apresentam, em menor ou maior grau, estreita relação com o meio.

Por essa razão é que afirmamos que a relação humana com o carste e as cavernas não é fato novo na história da humanidade. Muito menos a motivação para o seu uso como abrigos, esconderijos ou lugares sagrados. Sendo assim, as cavernas e o carste surgem no cenário mundial como importantes registros histórico-geográficos de regiões específicas e, muitas vezes, apresentam traços comuns a várias culturas.

Fruto das reflexões do autor, como geógrafo, espeleólogo e carstólogo, este livro reúne algumas ideias e, de certo modo, faz um resgate de conceitos clássicos da carstologia, juntamente com a proposição de novos, a fim de auxiliar aqueles que iniciam sua jornada nos estudos do carste. Preferindo manter os aspectos da geografia humana do carste apenas nos trabalhos anteriormente publicados, o autor destaca, aqui, conceitos da geografia física, buscando reunir os mais renomados autores mundiais no tocante à Carstologia.

Além disso, este é um momento para apresentar novas ideias, e até corrigir outras anteriores, sempre na busca de aprimoramento pessoal e profissional. Portanto, buscamos reunir os mais renomados autores mundiais relacionados à Carstologia. Aqui, aproveitamos o momento para destacar algo que, de certa forma, sempre nos incomodou desde a graduação: livros de pesquisadores conceituados das décadas de 1970, 80 e até mesmo 90 eram escritos praticamente sem citação alguma. Era comum, em muitas dessas obras, as referências serem reunidas ao final de cada capítulo ou da obra toda, na seção da "bibliografia", levando o leitor a crer que quem escrevera todo o texto teria sido aquele único autor.

Neste livro fizemos questão de ressaltar o nome dos pesquisadores por meio das citações diretas e indiretas, mesmo que, em muitos casos, a descrição dos fenômenos ou nome das feições já tenha caído em uma "espécie de senso comum científico". Acreditamos ser verdade que, geralmente, alguém já teria feito ou publicado algo antes de nós. Assim, os créditos devem ser sempre mencionados.

Por fim, destacamos que não foi possível esgotar tão rico assunto em poucas páginas, mas estamos certos de que o leitor também será capaz de se aprofundar na temática a partir das muitas referências bibliográficas reunidas ao final do trabalho, tenham sido elas efetivamente citadas ou não. Neste livro, enfatizamos também, os aspectos da geomorfologia cárstica que julgamos mais importantes para um primeiro contato com a temática, com os votos de que as informações sejam úteis como ponto de partida.

SUMÁRIO

1. PAISAGEM CÁRSTICA, GEOMORFOLOGIA E A PRESENÇA HUMANA 16

2. BREVE IDENTIFICAÇÃO DAS ÁREAS CÁRSTICAS BRASILEIRAS 28

3. A CARSTOLOGIA E OS PRINCIPAIS ASPECTOS DA GEOMORFOLOGIA CÁRSTICA 34

3.1. CARSTE: UM SISTEMA ABERTO OU FECHADO? 54

3.2. A CLASSIFICAÇÃO GERAL DOS CARBONATOS 56

3.3. CLASSIFICAÇÃO DOS CALCÁRIOS BASEADA NA ORIGEM 60

3.3.1. Calcário detrítico biogênico 60

3.3.2. Calcário Bioconstruído 60

3.3.3. Calcário de origem química 61

3.3.4. Calcário de origem química e detrítica 61

3.4. CLASSIFICAÇÃO DOS CALCÁRIOS BASEADA NA ESTRUTURA 61

3.4.1. Folk (1959) 61

3.4.2. Dunham (1962) 61

3.5. CALCÁRIOS CONTINENTAIS 62

3.5.1. Calcários lacustres 62

3.5.2. Tufas e travertinos 62

3.5.3. Crostas calcárias 62

3.6. OS DOLOMITOS 63

3.7. SOBRE AS DRENAGENS NO CARSTE E SEUS AQUÍFEROS 63

Dualidade da recarga 65

Dualidade do processos de infiltração 65

Dualidade do processos de fluxo da água subterrânea 65

Dualidade do processo de descarga 66

3.8. A GEOMORFOLOGIA CÁRSTICA SUPERFICIAL 69

3.8.1. Fatores que afetam a carstificação e zonas geográficas 70

3.8.2. Feições de superfície 74

3.8.3. As formas de recarga 75

3.8.3.1 Os vales cegos (Blind valleys) 75

3.8.3.2. Vales fechados (Pocket valleys) 77

3.8.3.3. Vales secos (Dry valleys) 77

3.8.3.4. Sumidouros (Ponor) 78

3.8.3.5. As pequenas e médias feições em superfície: os karren 83

3.8.3.5.1. Formas controladas predominantemente pela hidrodinâmica 86

3.8.3.5.2. Formas controladas predominantemente por fraturas e outras descontinuidades da rocha 93

3.8.3.5.3. As formas biocársticas 97
3.8.3.5.4. Formas complexas e poligenéticas 100
3.8.3.6. As meso e macro feições na superfície 107
3.8.3.6.1. As dolinas 107
3.8.3.6.2. As uvalas 116
3.8.3.6.3. Os poljes 121
3.8.4. As formas residuais e de descarga 126
3.8.4.1. Os Humes (Hum) 126
3.8.4.2. As Tufas 126
3.8.4.3. As nascentes, surgências e ressurgências 132
3.9. A GEOMORFOLOGIA CÁRSTICA SUBTERRÂNEA 133
3.9.1. Classificação "clássica" das cavernas 137
3.9.2. Classificação genética 137
3.9.3. Classificação geológica 138
3.9.4. Classificação de acordo com o tamanho 138
3.9.5. Classificação de acordo com características proeminentes 138
3.9.6. Cavernas epigênicas ou epigenéticas 138
3.9.7. Cavernas hipogênicas ou hipogenéticas 141
3.9.8. As cavernas no sistema cárstico e seus padrões de desenvolvimento 142
3.9.9. Cavernas como ambientes de sedimentação 147
3.9.10. Os Espeleotemas 147
3.9.10.1. Classificação dos espeleotemas 150
3.9.10.1.1. Espeleotemas formados pelo fluxo hídrico 150
3.9.10.1.2. Espelotemas formados pelo gotejamento 153
3.9.10.1.3. Espeleotemas formados pela água em capilaridade 160
3.9.10.1.4. Espeleotemas criados pela água estagnada 161

4. ESPELEOCLIMATOLOGIA E ESPELEOMETEOROLOGIA 164
4.1. ASPECTOS GERAIS DO MICROCLIMA CAVERNÍCOLA 167

5. GEODIVERSIDADE, GEOPATRIMÔNIO E GEOCONSERVAÇÃO NO CARSTE 176

6. VIVENDO NO CARSTE 194

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS 198

BIBLIOGRAFIA 203

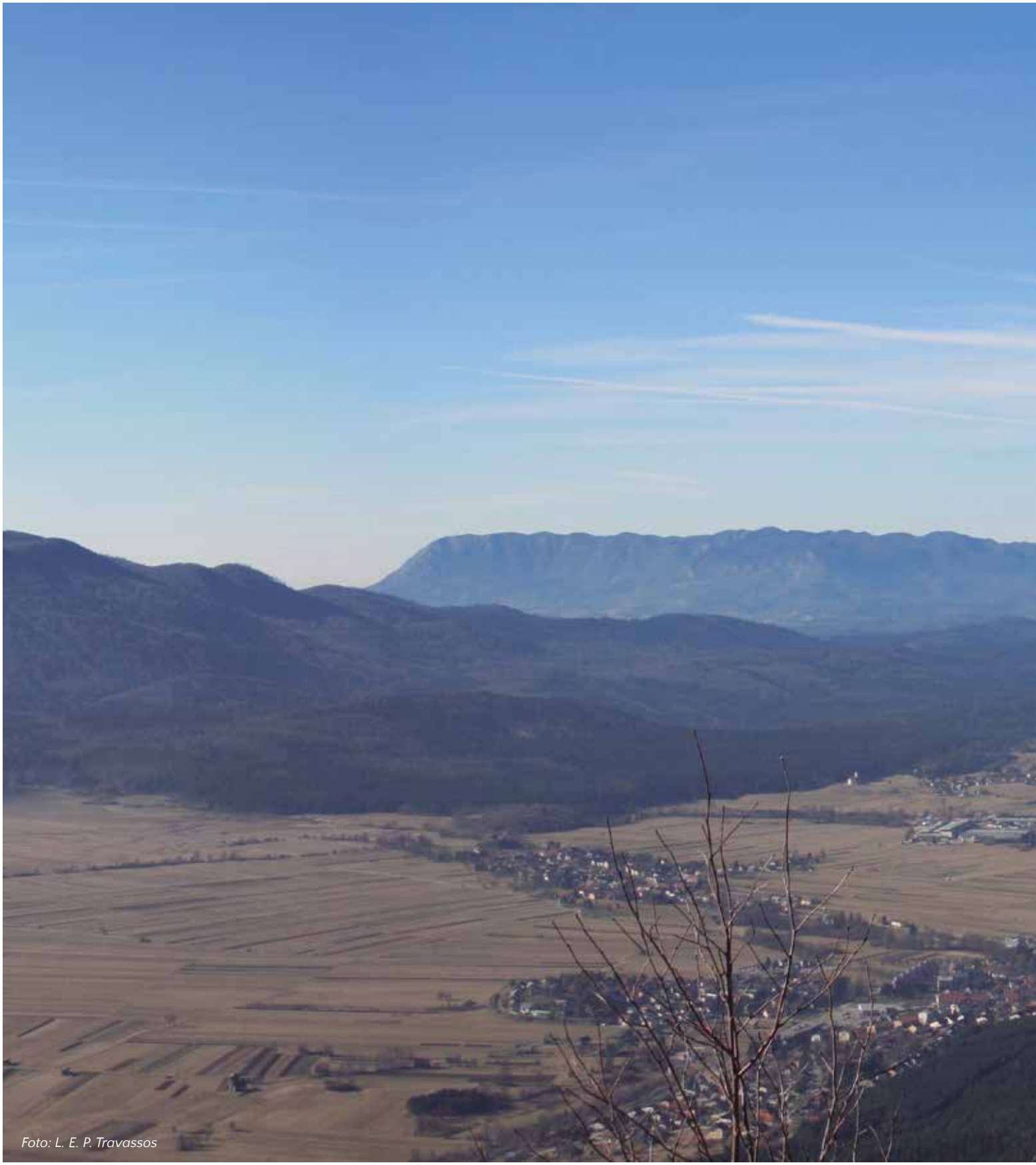


Foto: L. E. P. Travassos

PAISAGEM CÁRSTICA, GEOMORFOLOGIA E A PRESENÇA HUMANA

A paisagem cárstica e suas cavernas podem ser percebidas por várias pessoas de maneiras muito variadas. Do leigo ao cientista, especialmente as cavernas assumem significados diversos de acordo com a evolução histórica e as condições culturais das sociedades.

Embora algumas porcentagens mudem de autor para autor, as mais aceitas são as propostas por Ford e Williams (2007), que afirmam que as regiões desenvolvidas em rochas carbonáticas, totalizam cerca de 10 a 15% da superfície terrestre. Neste caso, Williams (2008) afirma que o *carste* é encontrado principalmente em rochas bem mais solúveis, como o calcário, o mármore e o dolomito, embora também possa existir nos evaporitos, mesmo que nestes seja raramente identidicado em afloramentos, exceto em regiões áridas. De Waele et al. (2009) e Frumkin (2013) destacam o fato de que alguns autores consideram que o carste também pode se desenvolver e existir em litologias diferentes dos carbonatos e evaporitos. Assim, consideram que o carste está presente em alguns outros tipos de rochas siliciclásticas ou silicatadas e, por isso, é possível dizer que a cobertura cárstica do mundo passaria dos máximos 15% para cerca de 20%. Alguns tipos de quartzito e arenitos foram identificados, por Martini (2000), como sensivelmente solúveis e podem, com o tempo, desenvolver morfologia e hidrologia cárstica típicas. No caso nacional, podemos identificar os arenitos de Ponta Grossa, no Paraná, e os quartizitos do Parque Estadual do Ibitipoca, em Minas Gerais, por exemplo.

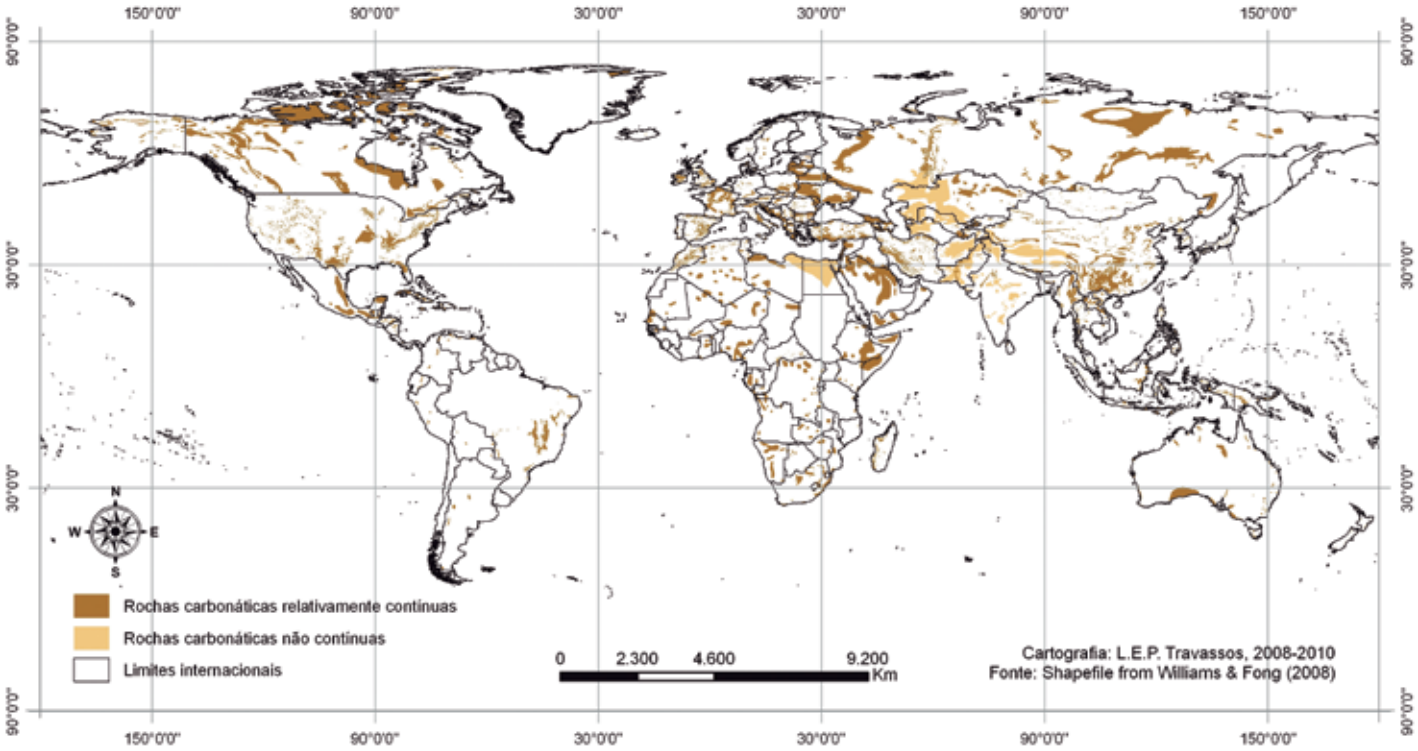


Figura 1 – *Distribuição espacial das rochas carbonáticas de acordo com Williams e Fong (2012). As áreas escuras correspondem a regiões carbonáticas relativamente contínuas. As áreas de cor mais clara correspondem a regiões abundantes em rochas carbonáticas não contínuas.*

Ainda que as porcentagens possam apresentar alguma margem de erro, destaca-se o fato de que somente cerca de 13% das rochas carbonáticas mundiais são aflorantes e que os carbonatos subsuperficiais envolvidos na circulação da água subterrânea são estimados em cerca de 14% da área mundial. Aproximadamente ¼ da população mundial vive no carste ou é diretamente afetada por sua hidrologia peculiar. Alguns autores destacam que é preciso diferenciar as áreas onde as rochas carbonáticas são relativamente puras e contínuas daquelas relativamente impuras e descontínuas, conforme distribuição espacial na figura 1 (FORD; WILLIAMS, 2007; WILLIAMS, 2008; DEWAELE et al., 2009; FRUMKIN, 2013). Por essa razão, Veni (1999) afirma que os estudos em geomorfologia cárstica estão se tornando cada vez mais importantes nos estudos de impactos ambientais. Entretanto, devemos destacar que a seriedade com que tais estudos são realizados depende muito do país ou da região do mundo, bem como do grau de especialização e conhecimento sobre a temática por parte dos pesquisadores ou equipes.

É possível considerar que todas as rochas são solúveis em algum grau e, por isso, feições de dissolução de micro escala podem ser encontradas em "rochas insolúveis", como o quartzito e o basalto. Entretanto, embora tenham feições cársticas (pois são formadas pela dissolução parcial da rocha), a paisagem da qual fazem parte pode não ser cárstica, pois é formada por rochas relativamente insolúveis e dominada por feições produzidas por outros processos naturais que não necessariamente a dissolução (WILLIAMS, 2008). Para White e White (2013), o carste é o tipo de paisagem na qual a dissolução química predomina sobre os processos mecânicos e, em uma rápida estimativa, os autores afirmam que as rochas que apresentam mais de 15-20% de componentes insolúveis raramente desenvolvem feições cársticas. Portanto, dificilmente seriam um carste real.

Entretanto, alguns autores têm chamado a atenção para o fato de rochas, como o arenito e alguns tipos de quartzito, desenvolverem carste. De maneira reducionista, podemos, portanto, estabelecer que o carste ocorre, em teoria, em qualquer litologia. Todavia, para evitar confusão, erros conceituais ou até mesmo traduções equivocadas por parte daqueles que iniciam nos estudos do carste, concordamos com Andreychouk et al. (2009) na utilização dos termos *carste tradicional* ou *carste não-tradicional* para diferenciar o carste em carbonatos (*tradicional*) daqueles desenvolvidos em outras litologias (*não-tradicional*).

Além disso, lembramos que somente a presença de uma cavidade natural subterrânea não é suficiente para caracterizar uma área como sendo um sistema cárstico, pois é necessária a realização de estudos profundos e detalhados, para que seja possível estabelecer as relações evolutivas entre a superfície e o subterrâneo. Isso ocorre, entre outros fatores, devido ao que Frumkin (2013) destaca. Segundo esse autor, compreender os conceitos do carste e sua geomorfologia tem sido sempre um desafio para os pesquisadores, tanto os clássicos quanto os modernos, visto que muito dos sistemas cársticos se localizam sob a superfície. Dessa forma, a observação direta dos processos é muito dificultada, salvo nas pequenas parcelas penetráveis composta pelas cavernas. De qualquer forma, conforme destaca Jennings (1985, p.2), "não devemos deixar que debates terminológicos tirem nosso foco de questões realmente importantes", como, na opinião do autor desse livro, do aumento da compreensão dos sistemas cársticos e sua maior popularização.

Lembrando da possibilidade de existência de outros tipos de *carste*, é importante destacar que o avanço tecnológico tem permitido perfurações geotécnicas cada vez mais profundas, favorecendo o surgimento de novas informações que se tornam disponíveis para a Ciência, aumentando, assim, a necessidade de reconsideração ou elaboração de novos conceitos, conforme mencionado por Andreychouk et al. (2009). Mesmo assim, acreditamos que não devemos nos esquecer das raízes e origens da geomorfologia e da carstologia.

Ainda de acordo com Andreychouk et al. (2009), tais "novos carstes" são controlados por um número limitado de parâmetros da litosfera e hidrosfera, como a temperatura, a composição e o estado físico, por exemplo. Entretanto, ainda assim, os autores afirmam que o carste pode ser definido como processos de interação entre as rochas solúveis e águas diversas que, como resultado, apresentam feições características, que se desenvolvem na superfície e no subterrâneo. Observamos, portanto, uma relação direta de causa e efeito, com ênfase no papel principal desempenhado pela dissolução.

Além disso, o carste é um sistema de processos e fenômenos (dissolução, transporte e deposição de matéria) que se desenvolvem e ocorrem no subterrâneo e na crosta, como o resultado da interação de águas naturais com rochas que são solúveis em uma dada situação ou momento (ANDREYCHOUK, 1991 *apud* ANDREYCHOUK et al., 2009). É importante destacar o fato de sua formação ter início em uma "dada situação ou momento". Sendo assim, como podemos generalizar o uso do termo sem levarmos em consideração os muitos fatores existentes?

É preciso destacar que não é somente a dissolução que atua neste sistema, que é ora *aberto* (quando todas as fases físicas – sólido, líquido e gasoso – estão livres para reagirem entre si e ao mesmo tempo), ora *fechado* (quando somente duas fases interagem entre si, e ao mesmo tempo, em determinado lugar). Grandes valores de CO_2 aumentam o poder de dissolução da água acidificada. Entretanto, existem outros fatores que influenciam de forma mais ou menos direta a solubilidade dos carbonatos pela água. Tais fatores são temperatura, pressão, outros ácidos, efeito do íon comum, força iônica, ligações iônicas, mistura de soluções e elementos traço, todos amplamente estudados e facilmente encontrados na literatura para melhor compreensão.

Conforme demonstrado na Figura 1, é possível observar quão distribuído é o carste carbonático pelo mundo. Assim sendo, não é de se estranhar o fato de que estas regiões tenham sido utilizadas pelo homem primitivo desde os seus primórdios. Pela própria característica do relevo, eram lugares ideais para serem utilizados como abrigo e fontes de recursos naturais. Em algumas regiões cársticas, estabeleceram-se os primeiros assentamentos humanos. Por todo o mundo é possível observar que populações inteiras são abastecidas por mananciais cársticos e, em várias culturas, as cavernas ainda são utilizadas como locais para a prática de rituais religiosos, como manifestações culturais, além de outras formas de uso, conforme destacado por Travassos (2007d). Lembrando da importância da região do "Crescente Fértil", na antiga Mesopotâmia, é preciso ressaltar que os rios Tigres e Eufrates, responsáveis pela fertilidade daquela área, possuem suas nascentes por causa do carste das montanhas Zagros e Tauros, situadas mais ao norte da região.

O termo *carste*, como conhecemos, no Brasil, em português, originou-se da forma germânica *karst*, que foi popularizada pelo trabalho do geógrafo sérvio, Jovan Cvijić (Figura 2). O *Das*

Figura 2- *Jovan Cvijić (Fotografia de Milan Jovanović, 1911)*

karstphänomen (1893) foi resultado do estudo da região do Planalto de *Kras*, localizado em porções do território italiano e esloveno. Além disso, seus estudos contribuíram para o conhecimento do Carste Dinárico, que se estende em direção ao sul da Eslovênia, da Croácia, da Bósnia e Herzegovina, da Sérvia, de Montenegro, do Kosovo, da Albânia e da Macedônia. A partir de então, o termo alemão (*karst*) passou a ser utilizado como padrão mundial, designando os complexos processos de dissolução da rocha, bem como os igualmente intricados sistemas subterrâneos derivados da interação entre os processos naturais que ocorrem na superfície e no subterrâneo.

Para Kranjc (2001), a origem pré-indoeuropeia do termo *kras* possui a raiz *kar/gar* ou *kara/gara*, significando *rocha* e *rochoso*, respectivamente. Destaca-se que o termo *kras* é amplamente utilizado na Eslovênia para designar regiões rochosas ou não favoráveis à agropecuária, sendo também comum para identificar algumas regiões do Carste Dinárico, que é caracterizado, especialmente, por dolinas e campos de lapiás (*karrenfeld* ou *karren fields*).

É possível perceber que esse tipo peculiar de paisagem é comumente caracterizado por possuir depressões fechadas, drenagem subterrânea e cavernas que são formadas, principalmente pela dissolução da rocha matriz. Ford e Williams (2007) destacam que o carste ocorre em regiões com hidrologia e formas específicas que surgem em função da combinação das rochas com *alta* solubilidade e com porosidade secundária bem desenvolvida (e.g. juntas, fraturas e planos de acamamento).

Ainda assim, Frumkim (2013) destaca que antigos e novos trabalhos têm demonstrado que muitos "tipos de carste" apresentam uma rede de drenagem superficial bem desenvolvida que, combinados com algumas poucas variáveis, são paisagens nas quais a dissolução é o fator dominante sobre os aspectos do intemperismo mecânico. Não se deve, no entanto, deixar de perceber que, em rochas solúveis, compactas e impermeáveis, a dissolução não produz muitas feições características. Propriedades específicas da rocha, como as fraturas, irão facilitar e promover o desenvolvimento dos sistemas cársticos.

Se pensarmos na nobre raíz do nascimento da geografia na Antiguidade grega, podemos dizer que algum estudo deste tipo de relevo já existia. Trabalhos de filósofos gregos e romanos foram destacados por Travassos (2007d) e Clendenon (2009a; 2009b), identificando inúmeras descrições do carste carbonático na Grécia. Também naquele país, com grande parte do seu território

composto por rochas calcárias, as cavernas eram parte significativa da Mitologia. No Monte Ida (Creta), por exemplo, existem cavernas que eram consideradas sagradas por Minuanos e Helenos. Em uma delas, de acordo com a tradição oral, Zeus teria nascido. Seu filho, Hermes, também teria nascido em uma caverna no Monte Cilene. Além disso, os Oráculos eram consultados nos

Figura 3 – *Nascentes do rio Timavo, Trieste, Itália (Foto: L.E..P. Travassos).*

subterrâneos e as cavernas eram tidas também como os portais do inferno.

Breves descrições do Carste Clássico (região do Planalto de Kras, na Eslovênia e na Itália) já

apareciam em obras do século IV a.C., bem como em trabalhos de Estrabão, Plínio e Políbio, por exemplo. Em uma descrição clara de um sumidouro e uma ressurgência, Posidônio de Apameia (135-50 a.C.) afirma que o rio Timavus sumia entre as montanhas, fluindo em um abismo, e somente reaparecia a uma distância de 130 estádios, ou seja, muitos quilômetros depois, indo em direção ao mar (KRANJC, 1997; KRANJC, 2006; TRAVASSOS; KOHLER; KRANJC, 2006). Na Eneida de Virgílio, as nascentes do rio Timavo (Figura 3) também são mencionadas e Kranjc (2010) afirma que eram chamadas de "Mãe do Mar".

Kranjc (2006; 2010) destaca que o geógrafo romano Estrabão (63 a.C-21 d.C.), além de também mencionar o rio Timavo, como Lugeon Lacus, foi provavelmente o primeiro a mencionar o Lago de Cerknica (na Eslovênia). Em relação ao comportamento das águas cársticas, que ora estão em superfície ora estão no subterrâneo, Clendenon (2009a) lembra que Aristóteles talvez tenha sido o primeiro a deduzir e descrever corretamente esse tipo comportamento na obra Meteorologia em 350 a.C.

O conhecimento produzido durante a Idade Média em relação ao carste é ainda pouco conhecido e os fenômenos naturais desse geosistema são mencionados em diversas fontes, sem a noção, contudo, do que seria o carste propriamente dito. Durante a Idade Média há a multiplicação de relatos fantasiosos, embora, em certos casos, seja possível identificar algumas tentativas de teorização. Em 1535, Berthold Buchner publica, na Alemanha, o primeiro livro dedicado totalmente a uma cavidade natural subterrânea e, em 1590, foi publicada a primeira teoria espeleogenética relacionada às cavernas vulcânicas do Monte Etna (na Itália), por Antonio Filodei de Homodeis. Nota-se que esta última, não se relaciona ao carste, como o conhecemos, mas, sim, às cavidades naturais

Figura 4 – *Visão panorâmica parcial do clássico polje de Cerknica, Eslovênia, talvez a planície cárstica mais conhecida do mundo (Foto: L. E. P. Travassos).*

subterrâneas. Em 1648, na obra Museum Metallicum, Ulisses Aldrovandi empreende esforços significativos para descrever tudo ou quase tudo que pudesse ser encontrado no mundo subterrâneo e reúne fragmentos de espeleotemas encontrados em cavernas próximas a Dubrovnik (Croácia) e Bolonha (Itália), quando fez suas pesquisas em 1582. A digitalização da obra foi realizada pela Universidade de Bolonha e suas cerca de 992 páginas podem ser acessadas na página AMS Historica – Collezzione digitale di opere storiche.

Ainda durante a Idade Média, ao longo do século XVI, nota-se o crescimento do interesse pelo carste como sistema complexo e, por essa razão, da-se o início de uma Carstologia ainda embrionária (KRANJC, 2010). Para Travassos, Kohler e Kranjc (2006), a *Tábula de Peutinger* já mostrava indícios de assentamentos humanos na região do "Carste Clássico". Os mesmos autores afirmam que uma espécie de turismo cultural teria surgido na região do Planalto de *Kras*, ainda que de forma primitiva, na *Sveta Jama* (Caverna Sagrada), em 280 d.C, e na *Landarska Jama* (Caverna de Landar), por volta de 888 d.C. Inúmeros viajantes passaram a ser atraídos pelas belezas naturais da *Postojska Jama* (Caverna de Postojna), em 1213 d.C., e da *Vilenica Jama* (Caverna Vilenica), em 1633, dando ainda mais publicidade à paisagem cárstica.

Kranjc (2010) destaca os trabalhos de Benedikt Kuripećić (1531), que descreve, em seu diário, os fenômenos observados durante sua viagem pelos Balkans, bem como as observações do diplomata G. Wernher (1551), que publica uma descrição do *polje* de Cerknica (Lago de Cerknica). A importância do lago é tamanha que os mapas de Lazius, Ortelius e Mercator

exageram seu tamanho. Outro importante trabalho foi realizado pelo Jesuíta Athanasius Kircher (1665) e recebeu o nome de *Mundus Suterraneus*. Na obra, as grandes nascentes cársticas são descritas pela presença de um grande reservatório (*hydrophillatia*), que explicaria o comportamento do Lago de Cerknica, por exemplo. Grauber (1781) também se interessou pela sazonalidade do polje de Cerknica (Figura 4).

Percebe-se, então, que, durante a época dos gregos e romanos e na Idade Média, o estudo da geomorfologia cárstica ainda se encontrava em uma fase pré-científica (KRANJC, 2010), e a quantidade de trabalhos sobre o assunto somente aumentou no final do século XVII e início do século XVIII. Isso ocorreu principalmente devido ao fato da região do Planalto de *Kras* ter se tornado ainda mais popular pelas descrições de viajantes, geógrafos, topógrafos e outros estudiosos. Essa popularização também ocorreu, em grande parte, pelo fato de Trieste (atualmente território italiano) ter se transformado, em 1719, em um porto de livre comércio, sendo aberto às nações amigas (KRANJC,1997; 2006a; TRAVASSOS; Kohler; KRANJC, 2006).

A importância da região do Planalto de *Kras* para a Carstologia é ressaltada quando, cada vez mais, diversos pesquisadores pioneiros começam a se dedicar ao estudo da região. São eles J.V. Valvasor (1689), Nagel (1748), B. Hacquet (1778-1789) e F. J. H. Hohenwart (1830). Na obra de Franc Jožef Hanibal Hohenwart (1830), pela primeira vez aparece o termo "*karstes*" (KRANJC,1997; 2006a; TRAVASSOS; KOHLER; KRANJC, 2006) e, a partir de então, observa-se o início da primeira fase da pesquisa em geomorfologia cárstica (KRANJC, 2010).

Como será detalhado em capítulo específico, Viena era um importante centro de pesquisas e todas as terras sob domínio do Império Austro-Húngaro deveriam ser conhecidas. Hohenwart (1830) escreve um prefácio para um guia de visitas à Caverna de Postojna e afirma, no texto, que o carste não era somente um planalto, mas sim, um tipo de relevo que se estendia da planície do Friuli à ilha grega de Cefalônia.

Geógrafos e geólogos do século XIX passaram a utilizar o termo karst com mais frequência e o trabalho de Jovan Cvijić (1893) forneceu a base científica ao estudo do Carste Clássico, seguido por Kraus (1894) e Martel (1894), por exemplo (KRANJC, 1997; KRANJC, 2006; TRAVASSOS; KOHLER; KRANJC, 2006), até o fim da Primeira Guerra Mundial (1914-1918) e a derrota do Império Austro-Húngaro. Após esse período, as pesquisas em carstologia e geomorfologia cárstica diminuem bastante e passam por um período de estagnação mantendo-se, nas palavras de Sweeting (1981), bastante descritivas até 1950. Roglić (1974) e Kranjc (2010) afirmam que os seguidores de respeitados pesquisadores eram poucos e não haviam produzido contribuições muito significativas, sendo essa "primeira fase" de pesquisas em geomorfologia cárstica, rica em ideias, mas pobre em análises reais.

Na década de 1930, temos o início da "segunda fase" das pesquisas carstológicas na região do Carste Clássico, que vai até a sua trágica interrupção devido ao início da Segunda Guerra Mundial.

Felizmente, após a Segunda Guerra Mundial, as pesquisas são reativadas e o desenvolvimento científico geral, pelo qual vários campos científicos passam, acaba por beneficiar a Carstologia. Desde então, constantes intercâmbios internacionais ocorrem e as observações e dados levantados em campo se multiplicaram, favorecendo o aprimoramento de alguns modelos existentes ou a criação de outros. Para Sweeting (1981), as novas descobertas no campo da química analítica melhoraram os estudos da geormorfolgia cárstica. Bögli (1960) dedicou-se às diferentes fases químicas na dissolução em profundidade, fato que acabou culminando nas suas teorias sobre a corrosão de mistura. Em escala mundial, Corbel (1959a.; 1959b) tentou compreender a dissolução nos calcários. Para ele, uma vez que o CO_2 é menos solúvel em altas temperaturas, a dissolução dos calcários deveria ser maior em regiões mais frias. Entretanto, Sweeting (1981) lembra que o autor havia se esquecido de levar em consideração o papel da vegetação e do CO_2 biogênico na evolução do carste.

Além disso, mais recentemente, pesquisas têm levado em consideração o fato de que o carste e as cavernas também se apresentam como parte importante do ciclo global do carbono (ZHAO; WU, 2011; JIANG, 2012; JIANHUA, 2012; WANG, 2012; PU, 2014), o que é outra razão pela qual tem aumentado o interesse nas pesquisas relacionadas à ventilação subterrânea e ao transporte de CO_2 ao longo dos sistemas cársticos (GREGORIĆ, et al., 2013; GABROVŠEK et al., 2014; COVINGTON et al., 2011; 2013; MANDIĆ, 2013).

O papel do CO_2 no carste é tão importante que, em 2013, ocorreu um simpósio internacional e multidisciplinar sobre o tema, o Symposium on Carbon and Boundaries in Karst. Os trabalhalhos que mais se destacaram saíram impressos na Acta Carsologica, importante publicação internacional eslovena sobre carste, presente desde 1955. Em linhas gerais, White (2013) destacou, em número especial, que uma carga efetiva de carbono pode ser calculada a partir da alcalinidade e do pH medidos nas águas cársticas.

A quantidade de carbono independe do grau de saturação da água e não depende de a água estar em equilíbrio com a rocha carbonática. Chegou-se a essa conclusão com base em um banco de dados substancial de nascentes cársticas, que foi organizado ao longo de cerca de 40 anos de estudos e tem sido utilizada para verificar a geração, o transporte e o armazenamento de CO_2 diversas bacias hidrográficas que alimentam nascentes cársticas. A quantidade de carbono na água que sai das bacias de drenagem depende da taxa de geração de CO_2 nos solos das bacias e da partição entre o CO_2 dissolvido na água de infiltração e o CO_2 perdido por difusão para a atmosfera. Para qualquer bacia de drenagem, também existe influência e contribuição da cobertura vegetal, do tipo de solo e da fração de água fornecida pela recarga dos sumidouros. As perdas de CO_2 para a atmosfera ocorrem pela deposição de temas em cavernas cheias de ar, por desgaseificação de CO_2 a partir das nascentes, e pela deposição de tufas. Existem ciclos sazonais de geração de CO_2 e, no geral, parece que os aquíferos cársticos são uma rede de sequestro de CO_2 atmosférico, embora apresentem alguns "vazamentos". A Figura 5 resume o exposto e nos fornece uma melhor compreensão dos processos envolvidos no carste carbonático, que são conhecidos até hoje.

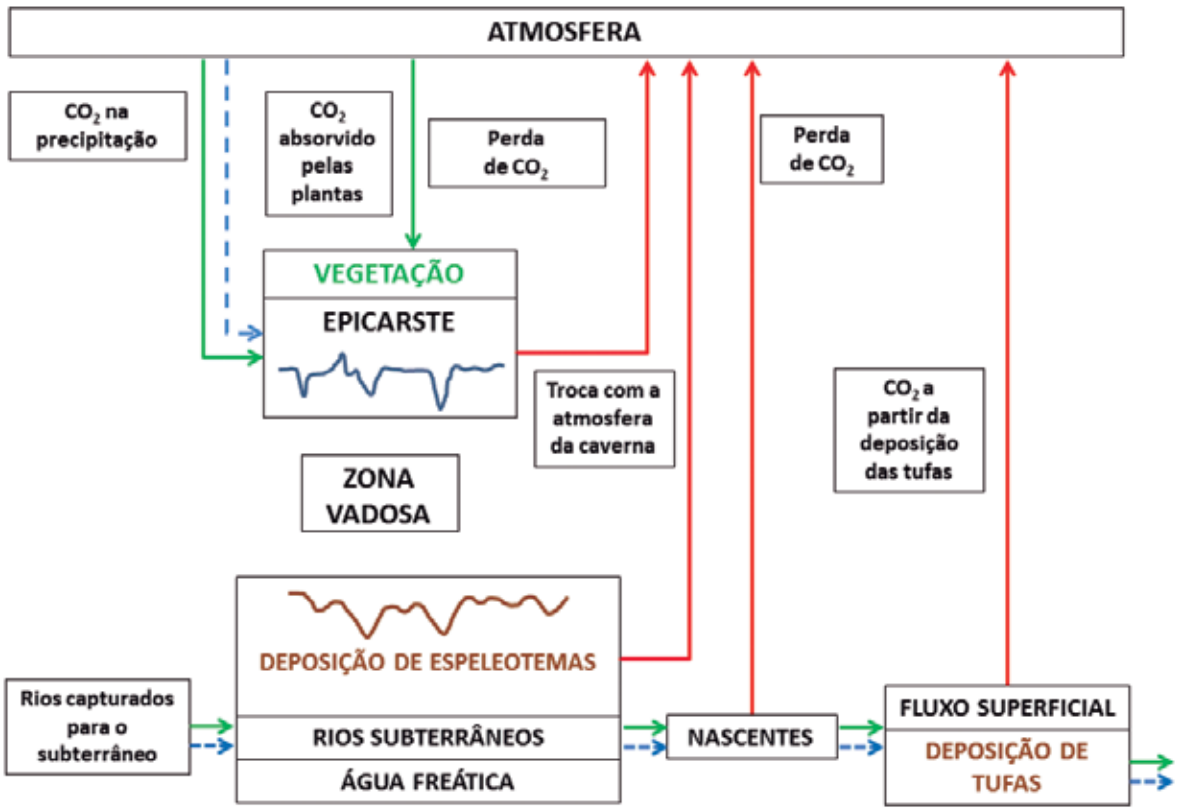


Figura 5 – *Fluxograma do movimento de dióxido de carbono ao longo de um aquífero cárstico. As linhas verdes representam o fluxo de CO_2 para dentro do sistema cárstico e as linhas vermelhas representam a perda de CO_2 de volta para a atmosfera. As linhas verdes, juntamente com as linhas azuis tracejadas e paralelas, são os caminhos pelos quais o carbono é transportado na solução (Adaptado de White, 2013, p.178).*

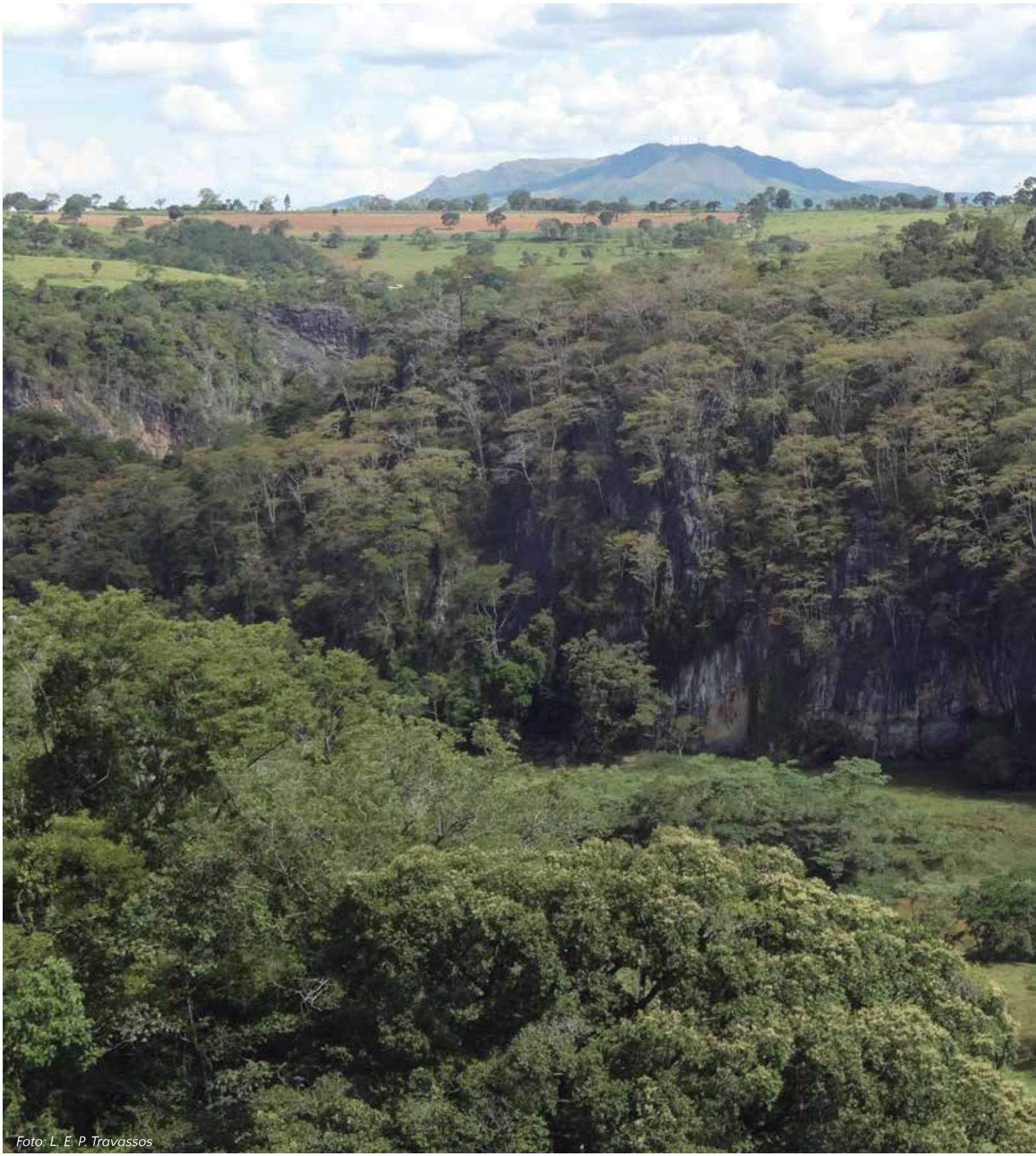


Foto: L. E. P. Travassos

BREVE IDENTIFICAÇÃO DAS ÁREAS CÁRSTICAS BRASILEIRAS

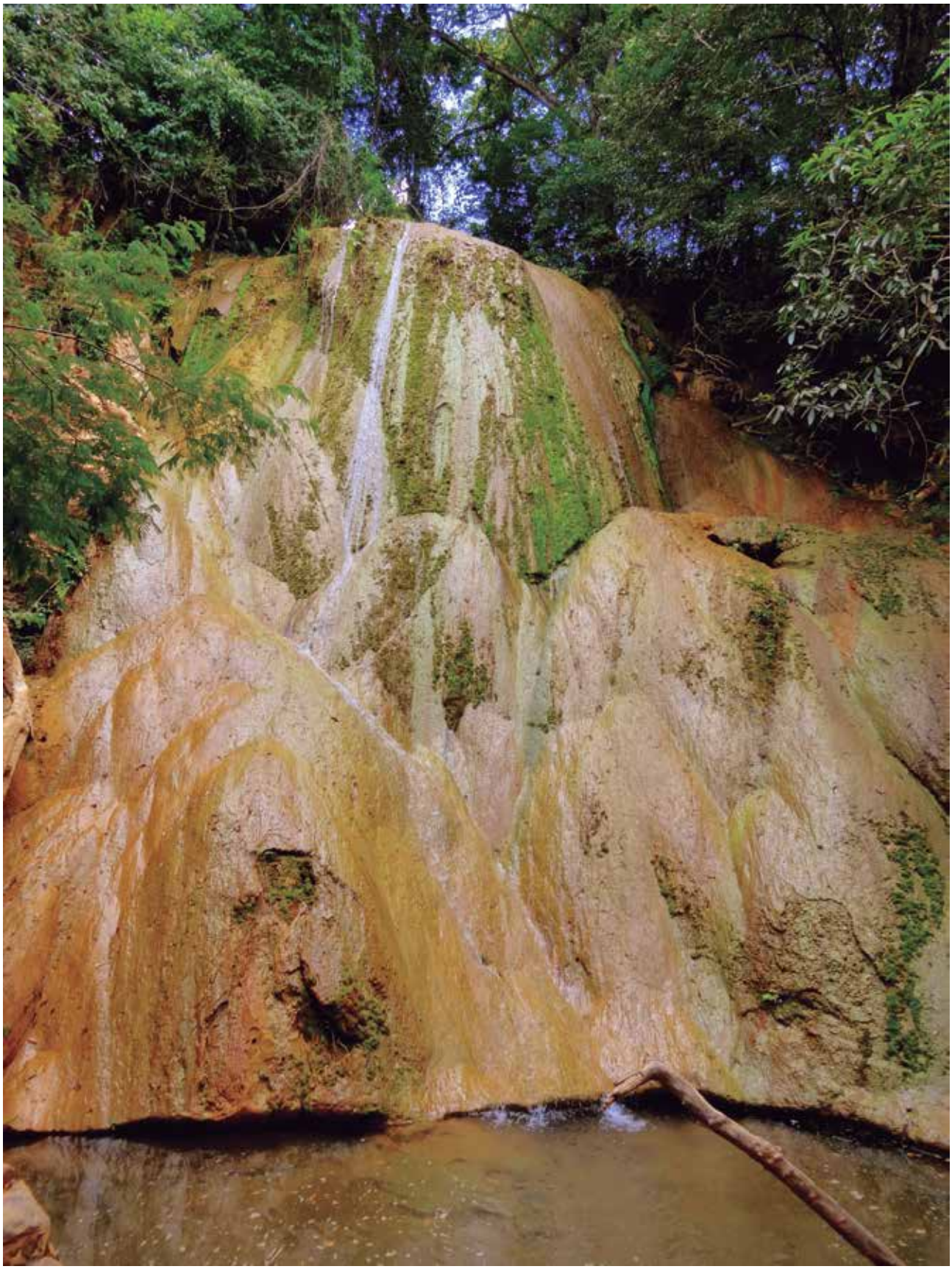


Foto: L.E.P. Travassos

Com exceção das bacias sedimentares terciárias do Pantanal Mato-grossense, da Amazônia e de trechos do litoral, o território brasileiro se desenvolve sobre estruturas geológicas muito antigas. Suas idades variam do Paleozoico ao Mesozoico, para bacias meta-sedimentares, e do Pré-Cambriano (Arqueano/Proterozoico), para os terrenos cristalinos da Plataforma Sul-Americana. Entre esses, destacam-se as áreas cratônicas, os cinturões de dobramentos antigos e as bacias sedimentares, conforme destacado em Schobbenhaus e Brito Neves (2003), citado por Travassos (2007d).

Em relação aos terrenos carbonáticos brasileiros, Sallum Filho e Karmann (2012) destacam que, embora seja possível encontrar cavernas em rochas siliciclásticas e em formações ferríferas, a maioria do carste e as maiores cavernas estão em carbonatos. Ainda para esses autores, a deposição das rochas carbonáticas no país ocorreu no Proterozoico, predominantemente no Neoproterozoico, consolidando-se em áreas cratônicas e faixas de dobramentos associadas.

Assim, Timo (2014) nos lembra que a primeira classificação do carste carbonático brasileiro foi proposta em 1979, por Karmann e Sánchez, quando descreveram os principais tipos de rochas carstificáveis existentes no território nacional. A partir de então, foram definidas cinco províncias espeleológicas, a saber: 1) *Vale do Ribeira (SP)*, 2) *Bambuí (BA, GO e MG)*, 3) *Serra da Bodoquena (MS)*, 4) *Alto Rio Paraguai (MT)* e 5) *Chapada de Ibiapaba (CE)*. Além dessas, à época, os autores identificaram outras nove regiões com presença de fenômenos cársticos incipientes, porém somente em rochas carbonáticas. Em 1986, com o avanço das pesquisas sobre a temática, foram incluídas as províncias areníticas da *Serra Geral (PR)* e do *Alto Urubu (AM)*, bem como a província carbonática baiana de Rio Pardo (KARMANN; SÁNCHEZ, 1986).

Da área continental brasileira, de cerca de 8,5 milhões de km², Karmann (1994) estimou que de 5 a 7% seriam constituídos por terrenos cársticos, aflorantes ou não. Entretanto, Auler (2002) propôs que cerca 2,2 % do território brasileiro apresenta carbonatos aflorantes e, mais recentemente, Karmann e Sallun Filho (2007) afirmam que o total é de 2,8%. De maneira geral, tais áreas devem ser consideradas as principais unidades geológicas favoráveis ao desenvolvimento de feições cársticas tradicionais. As unidades mais expressivas localizam-se no Cráton São Francisco, na região de Minas Gerais, Goiás e Bahia, sobre litologias carbonáticas e dolomíticas (TRAVASSOS, 2010; TIMO, 2014). Ao observarmos a Figura 6 é possível perceber uma grande área, mais ou menos central, em que estão as rochas do Grupo Bambuí, distribuídas entre os Estados de Minas Gerais, Goiás e Bahia. Devido ao fato desses

carbonatos terem sido depositados em uma região cratônica, encontram-se bem mais horizontalizados. O carste está localizado essencialmente no setor ocidental, conforme proposto por Souza et al. (2003), citados por Hasui (2012), com destaque para as Formações Sete Lagoas, Serra de Santa Helena e Lagoa do Jacaré.

Ainda sobre as propostas relacionadas ao carste nacional, Timo (2014) afirma que Auler, Rubbioli e Brandi (2001) atualizaram as classificações indicadas por Karmann e Sánchez (1979; 1986) e caracterizaram, geologicamente, a distribuição de 14 áreas cársticas no Brasil, com base no mapa geológico elaborado por Schobbenhaus et al. (1981), que foi mencionado por Hardt (2004). No trabalho de Schobbenhaus et al. (1981), os autores adotaram a terminologia "região cárstica" para designar áreas com potencialidade de ocorrência de cavernas (JANSEN; CAVALCANTI; LAMBLÉM, 2012), independentemente da litologia na qual as cavidades estivessem.

Ainda de acordo com Jansen, Cavalcanti e Lamblém (2012), analistas ambientais do CECAV iniciaram, em 2005, o desenvolvimento de uma metodologia para mapear áreas do território brasileiro favoráveis à ocorrência de cavernas, o que resultou na elaboração do "Mapa de Potencialidade de Ocorrência de Cavernas", publicado pela primeira vez em 2009. As pesquisas para a delimitação do Patrimônio Espeleológico Brasileiro continuaram avançando e, em 2009, os mesmos analistas refinaram e ampliaram a classificação proposta por Auler, Rubbioli e Brandi (2001), caracterizando outras cinco regiões cársticas não carbonáticas (TIMO, 2014; CECAV, 2011).

Dessa forma, Travassos (2010) e Timo (2014) destacam que o atual "Mapa das Regiões Cársticas do Brasil" (Figura 6), elaborado pelo CECAV (2011) apresenta 19 regiões cársticas, a saber: 1) *Formação Caatinga* (BA), 2) *Formação Carajás* (PA), 3) *Formação Salinas* (MG), 4) *Formação Vazante* (MG), 5) *Grupo Açungui* (PR e SP), 6) *Grupo Apodi* (CE e RN), 7) *Grupo Araras* (MT), 8) *Grupo Bambuí* (BA, DF, GO, MG e TO), 9) *Grupo Brusque* (SC), 10) *Grupo Corumbá* (MS), 11) *Grupo Paranoá* (DF, GO, MG e TO), 12) *Grupo Rio Pardo* (BA), 13) *Grupo Ubajara* (CE), 14) *Grupo Una* (BA), 15) *Grupo Vargem Grande* (PI), 16) *Grupo Xambioá* (PA e TO), 17) *Região Cárstica de São João Del Rei* (MG), 18) *Região Cárstica Quadrilátero Ferrífero* (MG) e 19) *Supergrupo Canudos* (BA e SE).

Sobre o mapa destacado, é necessário lembrar que inclui litologias que não são exclusivamente carbonáticas. Assim sendo, percebe-se que os autores ampliam o conceito de província espeleológica (áreas passíveis de desenvolvimento de cavidades naturais subterrâneas) para áreas cársticas, incluindo outras rochas além dos carbonatos.

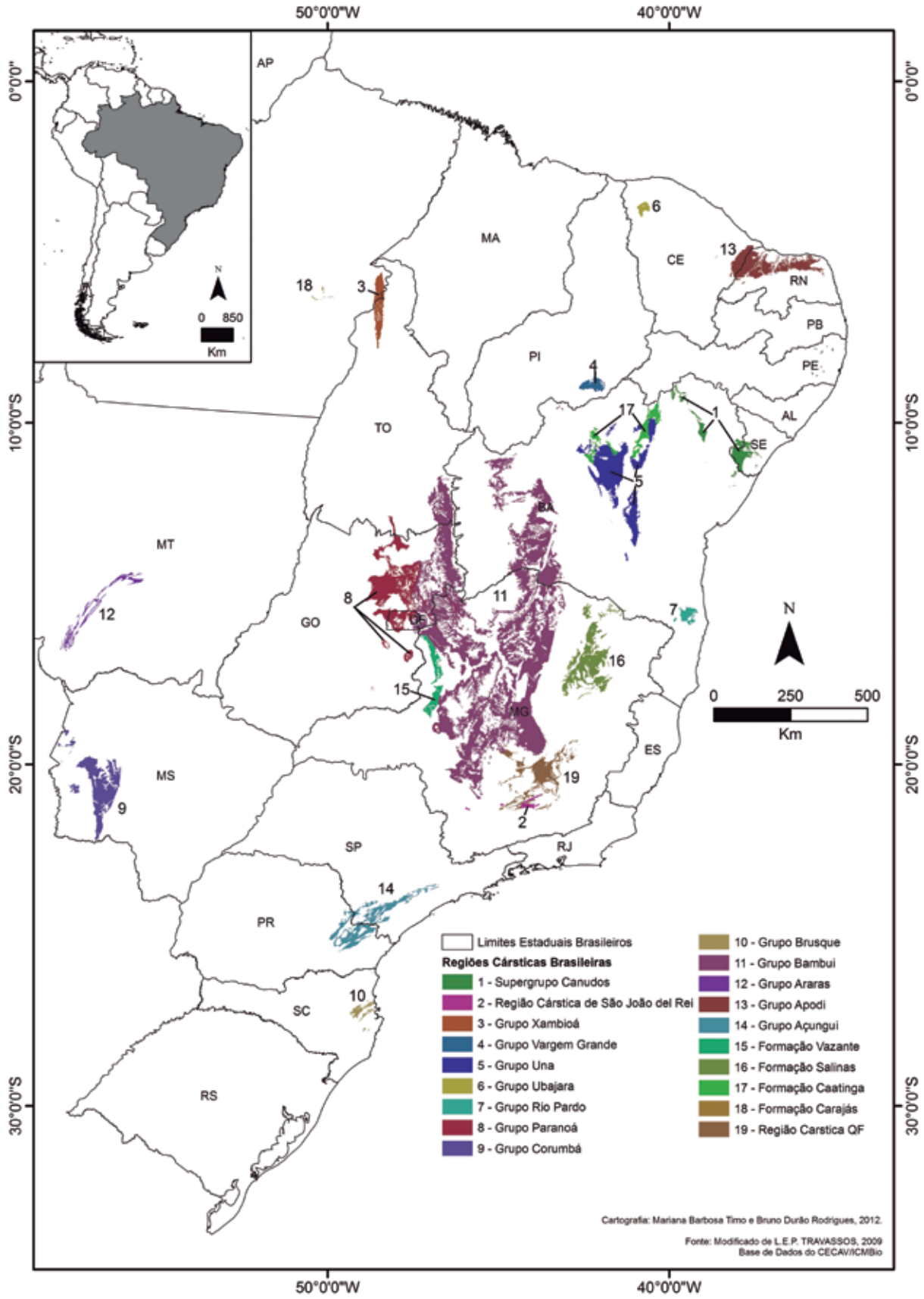


Figura 6 – *Províncias Espeleológicas Brasileiras. (Fonte: TIMO, 2014, p. 17. Elaborado pela autora a partir da Base de Dados CECAV, 2011).*

Foto: L. E. P. Travassos

A CARSTOLOGIA E OS PRINCIPAIS ASPECTOS DA GEOMORFOLOGIA CÁRSTICA

Dá-se o nome de *Carstologia* à ciência que estuda a paisagem cárstica ou os geoecossistemas cársticos. Assim como os diversos campos das Ciências Naturais e das Ciências da Terra, o conhecimento interdisciplinar é necessário na formação de um bom carstólogo. Para Sweeting (1981), a geomorfologia cárstica é o estudo das formas em regiões calcárias, bem como daquelas paisagens similares em outras rochas solúveis.

Ainda pouco conhecida no Brasil, a Carstologia ocupa lugar de destaque nas Escolas Acadêmicas da Europa e dos Estados Unidos, bem como vem se desenvolvendo na Ásia e Oceania. Tal fato ocorre principalmente devido ao fato de que, no Brasil, a paisagem cárstica começou a ser estudada primeiramente sob o ponto de vista da Espeleologia, ou seja, da ciência que estuda especificamente as cavernas. É comum percebermos que muitas pessoas, que hoje se interessam pelos estudos de geomorfologia cárstica, tiveram o início de sua formação nos subterrâneos, para só depois buscarem melhor compreender as formas de superfície.

Ainda mais nova é a ideia de que devemos considerar, além dos fatores abióticos e bióticos, a forma pela qual as sociedades imprimem sua cultura na paisagem. As formas ou feições cársticas superficiais, subsuperficiais e subterrâneas relacionam-se entre si e, juntas, são responsáveis pelo conjunto da paisagem natural que normalmente impressiona o ser humano. Assim, a Carstologia apresenta estreita relação com a geomorfologia para a compreesão de como os agentes endógenos e exógenos moldaram, moldam e continuarão a moldar os diferentes tipos de carste por todo o mundo.

É preciso apresentar a razão histórica que faz as duas ciências andarem lado a lado: no século XIX, a região do Carste Clássico era parte do Império Áustro-Húngaro, época em que foi o palco dos estudos de Jovan Cvijić (1893). Na verdade, Sweeting (1972) destaca que o uso do termo *karst* já era normal entre os austríacos (ainda que regionalmente) desde, pelo menos, 1840, quando ocorreram as primeiras pesquisas sistemáticas nas regiões da Ístria e da Carniola. Assim sendo, conceituados geomorfólogos da "Escola de Viena", realizavam constantes intercâmbios com acadêmicos franceses, anglo-saxões e norte-americanos. É possível identificar a presença dos conhecidos nomes de Albrecht Penck e Walter Penck, por exemplo. Ressalta-se o nome, do primeiro, por ter sido discípulo direto de Jovan Cvijić, bem como pelo fato de que pouco se sabia sobre o carste nos países de

DAS

KARSTPHÄNOMEN.

VERSUCH

EINER

MORPHOLOGISCHEN MONOGRAPHIE

VON

DR JOVAN CVIJIĆ

PROFESSOR DER GEOGRAPHIE AN DER HOCHSCHULE ZU BELGRAD

GEOGRAPHISCHE ABHANDLUNGEN.

HERAUSGEGEBEN VON

PROF. DR. ALBRECHT PENCK IN WIEN.

BAND V. – HEFT 3.

WIEN.

ED. HÖLZEL.

Figura 7 – *Capa do trabalho de Jovan Cvijić.*

língua inglesa, até que, em 1899, William Morris Davis (conceituado geomorfólogo norte-americano) visita o Carste Dinárico na Bósnia e Herzegovina, acompanhado por A. Penck e seus alunos. Juntos, publicam trabalhos sobre os *poljes* da Herzegovina e da região da Dalmácia, em 1900 (Penck) e 1901 (Davis), propondo modelos para a compreensão de suas gêneses.

Outro importante nome da geomorfologia, que contribui para o estudo da paisagem cárstica, foi A. Grund, aluno de Albrecht Penck. Aspectos da água subterrânea são mencionados por ele em 1903 e em 1910, destacando o relevo cárstico das Montanhas Dináricas e a gênese de suas feições, em especial os *poljes* ou planícies cársticas. Penck completa suas teorias em relação à evolução do carste em 1914, quando é interrompido pela eclosão da Primeira Guerra Mundial. Sweeting (1981) lembra que suas ideias mais revolucionárias para o estudo da evolução do modelado cárstico foram publicadas em 1914, mas sua morte em serviço durante a guerra, não permitiu a atenção que seu trabalho merecia. Baseado em Davis, Grund propôs um ciclo de erosão do carste, conforme as fases *inicial*, *juvenil*, *madura* e *antiga*. Foi Grund que teve o mérito de, pela primeira vez, trabalhar a Teoria do Ciclo Geográfico no carste afirmando que a denudação tendia ao peneplano, determinada pelo nível de base. Somente anos mais tarde, Sanders (1921) propõe uma nova classificação, também em outros quatro estágios: 1) *estágio de desenvolvimento inicial*, 2) *maturidade*, 3) *maturidade tardia* e 4) *idade antiga*.

Assim como a Geomorfologia, Roglić (1974; 1981) nos lembra que a investigação da paisagem cárstica é ainda muito nova, se comparada com outros ramos da ciência. O termo *geomorfologia* foi mencionado incialmente por Naumann (1858) e o primeiro livro texto sobre o assunto foi escrito por Penck em 1894. Por isso, não é de se estranhar que a carstologia ainda seja pouco conhecida no Brasil.

O carste talvez só tenha começado mesmo a ser divulgado amplamente a partir das palestras de Cvijić na França, país para onde se mudou durante a Primeira Guerra Mundial, passando a lecionar sobre o tema na Universidade de Sorbonne. Sweeting (1981) lembra que, em 1918, ele termina seu trabalho mais completo, que sintetizava suas ideias sobre a evolução do relevo cárstico, mas que foi perdido pela editora. Somente 33 anos após sua morte, em 1960, foi possível ter acesso à essa obra.

Assim sendo, compreendemos que, desde os primeiros estudos, é possível perceber a Carstologia como um campo interdisciplinar de estudos, que lida com o carste e seus processos. De acordo com Panoš (1995), é considerada um sistema integrado de campos independentes do conhecimento científico, que estuda regiões desenvolvidas sobre rochas solúveis, sob a ótica dos aspectos abióticos, bióticos e socioeconômicos, de forma integrada, e não somente o estudo de uma única feição (e.g. cavernas). Ainda de acordo com Panoš (1995), o termo *espeleologia* (estudo das cavernas), foi introduzido no campo das ciências pelo pesquisador francês Edouard Alfred Martel, em fins do século XIX. Naquela época, o termo foi utilizado para se referir às atividades amadoras e profissionais no subterrâneo e, com o desenvolvimento da ciência, passou a ser utilizado de forma mais científica, apresentando várias ramificações (Figura 8), conforme demonstrado por Forti (2009). Sobre a Espeleologia, Mattes (2015) afirma que seu desenvolvimento e legitimação como uma disciplina acadêmico-científica ocorre em fins do século XIX e durante o século XX, com a criação da primeira cátedra e Instituto de Espeleologia, em Viena, em 1929.

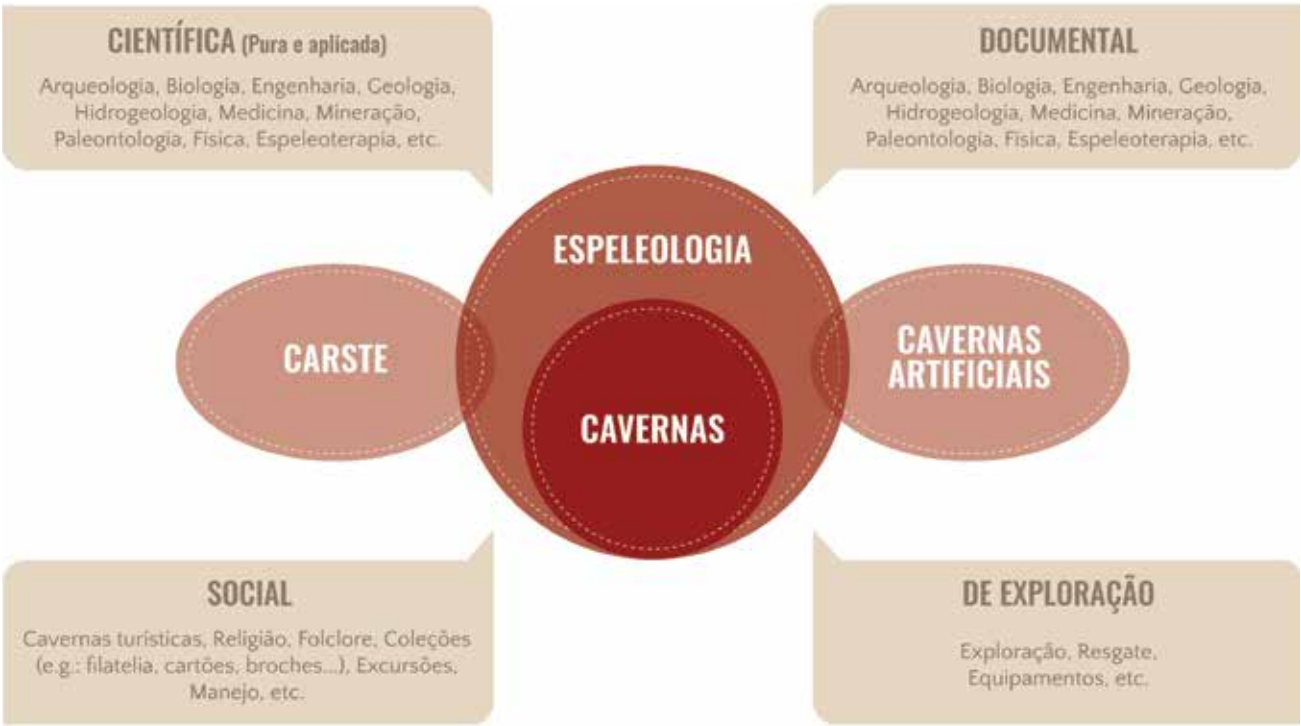


Figura 8 – *Ambientes nos quais é possível o desenvolvimento das atividades espeleológicas e a subdivisão das atividades nas suas quatro vertentes principais (Adaptado de Forti, 2009).*

Sendo assim, consideramos a *Carstologia* como sendo um campo do conhecimento dedicado à integração dos estudos desenvolvidos no carste e a *Espeleologia* como sendo um campo de estudo que se limita mais aos subterrâneos e seus processos, embora seja possível perceber a estreita relação existente entre essas áreas, pois podemos considerar as cavernas como mais um componente da complexa paisagem cárstica.

Para iniciar os estudos do carste, é preciso resgatar um termo cunhado, em 1970, por Maruashvili (1970), citado por Andreychouk et al. (2009): CARSTOSFERA. Para o autor, essa é a camada da crosta espacialmente descontínua, que perfaz as rochas carstificáveis. Para Maximovich (1979), a *carstofera* é a parte da litosfera onde ocorre o carste. Para ele, o conceito também pode ser expandido para as rochas metamórficas e magmáticas. Entretanto, Maruashvili e Tintilozov (1981; 1982) afirmam que a *carstosfera* é a camada de rochas sedimentares solúveis que experienciam intensa ação química da água. Já Andreychouk et al. (2009) afirmam que, sob condições físico-químicas apropriadas, qualquer tipo de rocha pode ser *carstificável*, expandindo significativamente a definição inicial da carstosfera. Dessa forma, o termo passa a designar uma cobertura descontínua, que compreende a porção superior da crosta terrestre (até 12 a 15 km de profundidade), onde processos cársticos foram ativos no passado, são ativos no presente ou podem tornar-se novamente ativos no futuro.

Percebe-se, portanto, que os processos cársticos irão ocorrer na presença de rochas solúveis, na presença de água na forma líquida e na presença de certas condições estruturais e texturais (e.g. porosidade secundária, fissuras, fraturas, planos de acamamento etc.), bem como na capacidade

da rocha em transmitir água, o que é expressa por sua permeabilidade. Sob a ótica deste livro, com o conhecimento científico disponível até sua publicação, são consideradas rochas carstificáveis os carbonatos, os evaporitos, os arenitos e somente alguns tipos de quartzitos.

Ao se estudar o carste, é preciso compreender vários conceitos importantes, dentre eles, quais são seus tipos básicos. Cvijić (1926), citado por Milanović (2005), propõe, pela primeira vez, a existência de três tipos básicos, que seriam o *holocarste*, o *merocarste* e um tipo de *transição*. O primeiro seria um carste considerado "completo", que se desenvolve em áreas compostas totalmente de carbonatos mais puros, sendo caracterizado pela presença de fenômenos superficiais e subterrâneos variados. Já o segundo tipo, é identificado como um carste "incompleto", pois apresenta muitas propriedades e características de regiões não cársticas. Isso ocorre devido ao fato de as rochas carbonáticas mais impuras serem menos suscetíveis aos processos de carstificação. Dessa forma, os fenômenos cársticos são pouco frequentes e existe a presença de cobertura pedológica arável. Vegetação e afloramentos rochosos são praticamente ausentes. Também recebem o nome de carste encoberto e exemplos podem ser vistos na Bélgica, no norte da França, na Noruega etc. Por fim, Cvijić (1926) destaca um tipo de transição que ocorre em áreas onde o grau de carstificação está entre os dois tipos iniciais: são áreas que normalmente apresentam calcários isolados por sedimentos impermeáveis e menos solúveis. O endocarste é bem desenvolvido, mas extensas planícies cársticas são ausentes ou escassas, como em regiões do norte da África, da Austrália, dos Estados Unidos, da porção central dos Bálcãs etc.

Do ponto de vista hidrológico, Milanović (2005) destaca que, no passado, o carste também foi classificado como sendo de *plataforma* e *geosinclinal*. O primeiro seria uma paisagem cárstica mais horizontalizado e, o segundo, seria aquele tipo que se desenvolveu em estruturas dobradas e falhadas. Herak (1976), citado por Milanović (2005), propõe uma outra classificação, com abordagem tecto-no-genética, na qual é possível identificar o carste *epirogenético* e *orogenético*. Sobre o primeiro, a literatura tem mostrado que se desenvolve nos carbonatos ou em outras rochas sedimentares solúveis criadas a partir da deposição de sedimentos em mares epicontinentais ou em regiões pantanosas. Apresentam-se, portanto, com camadas de sedimentos horizontalizados ou subhorizontalizados. Milanović (2005) destaca que, quando as dobras existem, essas são regulares e as falhas apresentam extensão regional. Já o *carste orogenético* se desenvolve nos carbonatos ou em outras rochas sedimentares que sofreram fortes movimentos tectônicos (orogenia) e apresenta frequentes falhas de empurrão, como formas estruturais extremas. A espessura das rochas e sua posição em uma sequência geosinclinal determinam a variedade das feições. No caso brasileiro, temos o exemplo de um *carste epirogenético*, uma vez que os carbonatos encontrados no país são, em sua maioria, mais horizontalizados ou subhorizontalizados.

Além desses tipos, Ford e Williams (2007) destacam alguns outros conceitos importantes e que podem ocorrer tanto no carste epirogenético quanto no orogenético. Assim, o conceito de *paleocarste* faz referência às regiões que hoje estão enterradas por sedimentos e podem se transformar, posteriormente, em rocha consolidada. São consideradas regiões inertes e hidrologicamente separadas do sistema contemporâneo e são frequentemente encontradas sob cobertura de

rochas clásticas. Para Osborne (2013), o paleocarste deve ser percebido como uma evidência dos processos cársticos do passado, que atualmente faz parte dos registros geológicos. Explicando de outra forma: se uma feição cárstica é preenchida ou soterrada, de tal forma que o preenchimento e a rocha se comportam como uma única unidade, temos, então, um paleocarste que não é necessariamente antigo. Para o autor, existem casos de apenas 1.000 anos. Na verdade, é possível identificar exemplos de preservação extrema e um deles é a existência de *cavernas sem-teto* ou *unroofed caves* (Figura 9), que ocorreram em função do rebaixamento gradual da superfície pelos processos de intemperismo e erosão. De acordo com Mihevc, Slabe e Šebela (1998) e Knez et al. (2016), as cavernas sem teto são importantes feições cársticas que compõem a superfície cárstica e parte do epicarste, fornecendo importantes evidências do desenvolvimento do sistema.

Assim, podemos afirmar que o paleocarste é um tipo de carste antigo e maduro, que se desenvolveu ao longo do tempo geológico e se tornou inativo. Por esse motivo, Benson e Yuhr (2016) afirmam que o paleocarste se desconectou dos processos atuais de carstificação e, como resultado, existe pouca ou nenhuma dissolução ocorrendo. Entretanto, subsidências ou colapsos podem ocorrer se existirem grandes cavernas. James e Choquette (1988), Palmer e

Figura 9 *–Exemplo de uma caverna sem teto descoberta em função da construção de uma rodovia europeia na Eslovênia (Foto: L.E.P. Travassos).*

Palmer (1989), Bosak et al. (1989) e Benson e Yuhr (2016) afirmam que um paleocarste pode sofrer com alterações tecnônicas que o elevam ou rebaixam, bem como favorecem mudanças no nível do mar. Enquanto, esse, geralmente se apresenta encoberto, pode ser exposto à superfície pela erosão ou em cortes de estradas e pode ser reativado naturalmente ou por ação antrópica.

Outro termo utilizado com frequência na carstologia é o conceito de *carste exumado*, que surge quando o paleocarste é desenterrado e reintegrado ao sistema contemporâneo, tornando-o novamente ativo. O que vemos é a retomada do desenvolvimento do sistema que foi interrompido por, pelo menos, dezenas de milhares de anos. Em contraste, surge o termo *carste relíquia* (ou *relict karst*), que sobrevive no sistema atual, embora tenha sido removido da situação prévia de sua criação. Para exemplificar, dizemos que um terraço de um rio representa as várzeas ou planícies de alagamento do passado e que, atualmente, encontram-se afastadas ou remotas em relação ao rio que as formou. Assim, o *carste relíquia* foi sujeito a uma grande mudança do nível de base e morros residuais, podendo, hoje, serem vistos afastados ou acima do nível de base atual. Níveis superiores no interior de algumas cavernas e algumas cavernas, propriamente ditas, são outros exemplos disso e, talvez, os mais numerosos (Figura 10).

Figura 10 – *Exemplo de níveis "relíquia" em um afloramento carbonático em Minas Gerais (Foto: L.E.P. Travassos).*

Quando a dissolução ocorre, preferencialmente em camadas de rochas mais solúveis que estão abaixo das camadas de rochas menos solúveis, tem-se o que se convencionou chamar de *carste subjacente* (JENNINGS, 1965) ou *carste interestratal (interstratal karst)*, de acordo com Quinlan (1972). Quando as formas cársticas são desenvolvidas abaixo das camadas de sedimentos permeáveis, como o solo, os depósitos periglaciais e as argilas residuais, temos o *criptocarste*. Nesse caso, acreditamos, simplesmente, que estamos diante da camada intermediária existente entre o exocarste e o endocarste e que é conhecida como *epicarste* (Figura 11). Ao percebermos que a água proveniente de terrenos impermeáveis adjacentes cria uma grande densidade de formas ou formas significativas no contato geológico das camadas, temos o exemplo de um *carste de contato*, conforme demonstrado na figura 12.

É importante destacar Jennings (1985), que afirma que nem sempre é fácil realizar a distinção clara entre componentes ativos, relíquias, subjacentes, encobertos e exumados, por exemplo. Ford e Williams (2007) e Benson e Yuhr (2016) destacam o *pseudocarste* como sendo aquele que abriga feições similares ao carste em carbonatos, mas que foram primordialmente desenvolvidas por processos físicos. Nesse caso, a dissolução, bem como a corrosão, é subordinada a tais processos. Percebemos que são comuns os processos mecânicos de lixiviação da matéria (*piping*) e algumas formas de dissolução, como os *karren*, podem surgir em afloramentos de quartzito, granito e basalto. Ainda assim, são geralmente pequenas, se comparadas às feições análogas no que chamamos de *carste tradicional*. Para Eberhard e Sharples (2013), a prática de se referir a certos tipos de morfologias similares ao carste pode

Figura 11 – *Aspecto geral do epicarste no Parque Estadual do Sumidouro, Minas Gerais. Na foto, é possível perceber a zona de contato entre o material de cobertura e a rocha (Foto: L.E.P. Travassos).*

Figura 12 – *Carste de contato na região de Monjolos, Minas Gerais. À direita da foto, têm-se as rochas cristalinas da Serra do Espinhado em contato com os carbonatos da Formação Lagoa do Jacaré, representados pelo polje ao centro da imagem (Foto: L.E.P. Travassos).*

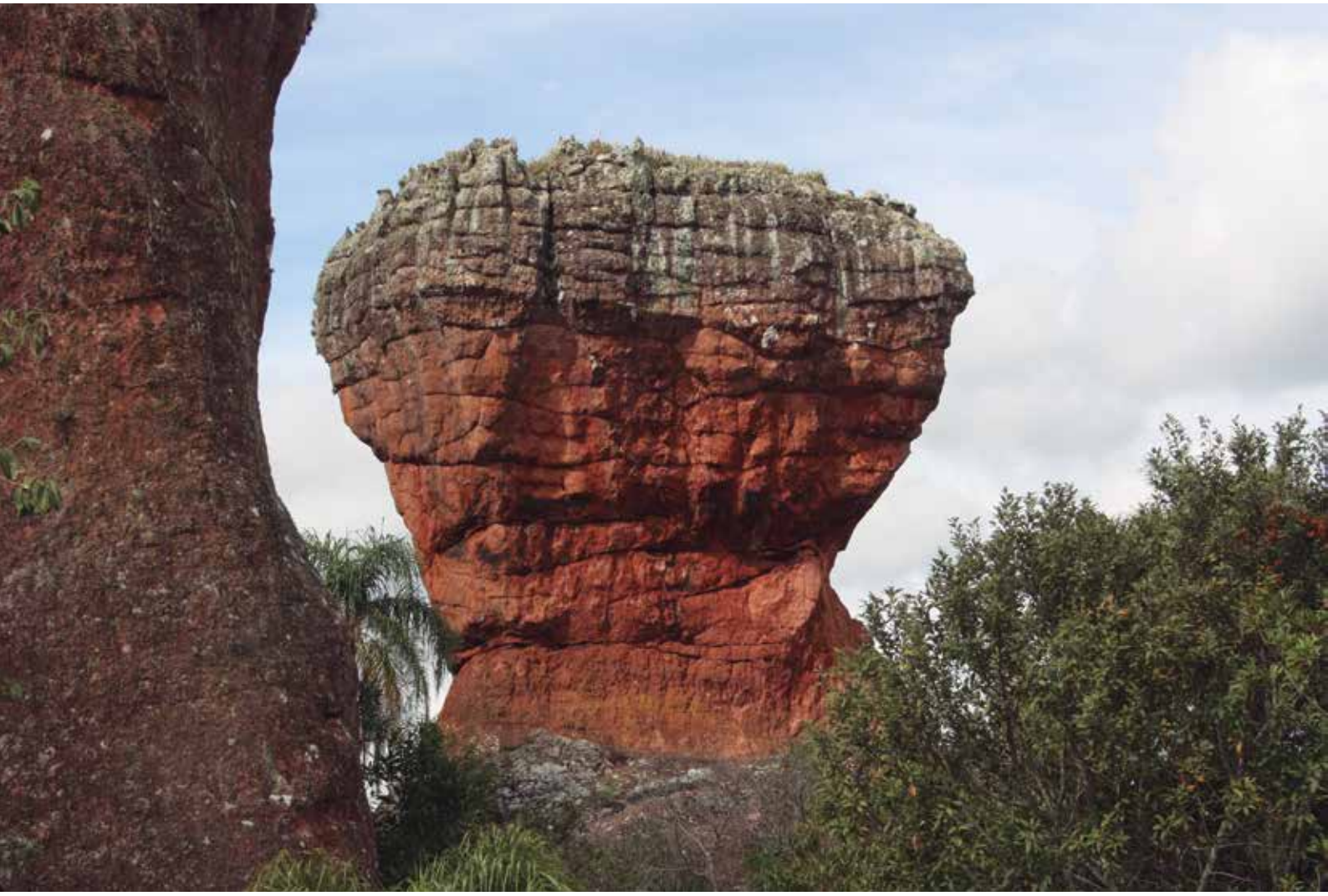


Figura 13 – *Feições de dissolução em rocha clástica terrígena, como os arenitos de Ponta Grossa, Paraná (Foto: L.E.P. Travassos).*

ser vista como algo problemático por diversos autores, além de muitos já terem proposto o abandono do termo. Gilli (2015) destaca o termo *paracarste (parakarst)*, utilizado para designar uma paisagem com feições que se desenvolvem como resultado da dissolução em rochas não carbonáticas e que podem apresentar feições similares às encontradas nos carbonatos.

Assim sendo, conforme mencionado no início deste livro, Andreychouk et al. (2009) identificam esse tipo de paisagem como sendo um carste não tradicional. Acreditamos que alguma diferenciação ainda deva ser feita, pois nomear uma paisagem simplesmente como carste, independentemente da litologia, pode causar confusão ou erros conceituais por parte daqueles que iniciam os estudos.

Destacamos, porém, que não se trata de realizar um juízo de valor, se um carste é "melhor ou pior" que outro, mas sim, deixar claro as diferenças existentes entre eles. Os próprios autores (ANDREYCHOUK et al., 2009) enfatizam que a expressão está em desenvolvimento e não carrega nenhuma conotação genética ou classificatória. Sobre o carste em silicatos, Andreychouk et al. (2009) afirmam que é aquele desenvolvido em rochas compostas parcialmente ou completamente por silicatos e que, embora apresentem formas similares ao carste tradicional, a carência de modelos teóricos e mais pesquisas sobre o assunto impedem a

afirmação de que o carste pode ocorrer efetivamente em tais rochas. Entretanto, reconhecem a existência das feições em quartzitos e arenitos (Figura 13), por exemplo. No Brasil, alguns autores, como Hardt e Ferreira Pinto (2009), Melo et al. (2011), Morais e Rocha (2011) e Fabri et al. (2014), entre outros, têm trabalhado para comprovar o uso do termo carste para os arenitos; Carmo et al. (2011), Campello et al. (2012) e Pereira et al. (2013), para as rochas como as formações ferríferas.

Para se ter uma ideia da solubilidade dos minerais na água, a literatura nos mostra que, na presença de pequenas quantidades de CO_2 dissolvidas na água (P_{CO_2} = 0,001 bar) e à temperaturas de cerca de 25°C, vários minerais são mais ou menos solúveis. Assim, tem-se a calcita (60mg/L), a dolomita (50 mg/L), o quartzo (12 mg/L), a gipsita (2.400 mg/L) e a halita (360.000 mg/L). Quando a P_{CO_2} é muito maior (0,1 bar), na mesma temperatura, a solubilidade dos carbonatos aumenta significativamente: a calcita passa de 60mg/L para 400mg/L e a dolomita de 50mg/L para 300 mg/L, sendo inegável que o carste se desenvolve mais em rochas compostas por estes minerais.

Aqui, propomos o resgate de termos cunhados por Maksimovich (1975), e citados por Andreychouk et al. (2009), para litologias diferentes dos carbonatos, pelo menos para que fiquem claras a escala e a velocidade dos processos. O autor utiliza o termo *bradicarste* (*bradus* = lento, fraco) para o carste em quartzito ferruginoso e rochas siliciclásticas em geral. Assim, em relação ao tempo de carstificação, teríamos o *bradicarste,* para rochas siliciclásticas, o *carste,* para as rochas carbonáticas e o *taquicarste* (*tachus* = rápido), para gesso e halita.

Ainda é importante destacar que, em clima tropical, as feições cársticas do *carste em silicatos* recebem auxílio de matéria orgânica para sua gênese, pois guano, húmus e restos de animais acidificam ainda mais a água da chuva. Além disso, a água alcalina (pH > 10) torna-se bastante agressiva aos silicatos. Ressalta-se que tais condições de alcalinidade são mais comuns em águas profundas, que seriam responsáveis pela formação de carste *hipogênico* ou "de origem profunda".

É muito comum, nos textos sobre Geomorfologia Cárstica ou Espeleologia, a divisão do carste em dois compartimentos principais: o *exocarste* (conjunto de feições superficiais) e o *endocarste* (conjunto das feições do subterrâneo). Entretanto, não devemos confundir os termos utilizados pela Carstologia, na qual temos o conceito de *endocarste* e de *carste endogênico (endogenic karst)*. Băcăuanu et al. (1974), citados por Andreychouk et al. (2009), utilizam o termo *endocarste* para descrever qualquer feição cárstica subterrânea, enquanto o *carste endogênico* pode se referir a: 1) carste formado por processos endógenos (MECHRSPRÄCHIGES, 1973); 2) carste desenvolvido a partir do fluxo de águas hidrotermais (IVANOV, 1983); e 3) carste formado devido à circulação de soluções pós-magmáticas (DUBLYANSKY; KROPACHEV, 1981). Já Kutyrev et al. (1989), também citados por Andreychouk et al. (2009), utilizam o termo *endocarste* como sinônimo para o *carste hidrotermal*.

Então, temos a divisão do endocarste em *carste epigênico (epigenic karst)*, no qual a dissolução subterrânea é realizada por águas meteóricas circulantes e o *hipocarste (hypokarst)*, no qual a dissolução é realizada por águas profundas ascendentes. Esse tipo era considerado como sendo o *carste hidrotermal* e, atualmente, é o que convencionou-se charmar de *carste hipogênico,* de acordo com os conceitos mais modernos. O primeiro conceito é originário da segunda metade do século XIX (NOGGERATH,

1845; DESNOYERS, 1845) e início do século XX (VAN-HISE, 1904). Os autores teorizaram que soluções hidrotermais se originam como águas meteóricas comuns que se aquecem quando de sua circulação em regiões profundas da crosta terrestre, fato que foi considerado por Andreychouk et al. (2009) como sendo um *insight* visionário, amplamente comprovado, décadas depois, pela hidrogeologia.

Os primeiros estudos detalhados que elucidaram o carste hidrotermal (LOCKE, 1926; GRIGORIEV, 1928) ocorreram em regiões de minérios ricos em Pb-Zn, na década de 1920. Entretanto, somente nas decadas de 1930-40, os carstólogos passaram a atentar para tais processos. Sendo assim, de maneira geral, o *carste hidrotermal* é definido como um processo de dissolução e possível preenchimento subsequente de cavidades naturais existentes na rocha, pela ação das águas termais (DUBLYANSKY, 1990; 2005 *apud* ANDREYCHOUK et al., 2009). É, ainda de acordo com Kutyrev et al. (1989), citados por Andreychouk et al. (2009), o resultado da dissolução e transporte de material dissolvido pela água e por gases de origem profunda que entram o maciço por baixo ou lateralmente.

Já o *carste hipogênico*, conceito mais moderno e amplamente trabalhado por Ford e Williams (1989; 2007), Worthington e Ford (1995), Palmer (1991; 2000), Klimchouk e Ford (2000), Ford (2006) e Klimchouk (2000b; 2000c; 2007), diz respeito à formação de cavernas pela água que recarrega a formação solúvel por baixo, movimentada pela pressão hidrostática ou outras fontes de energia, independentemente da recarga oriunda da superfície na atualidade. Tem-se, portanto, um fenômeno que ocorre "de baixo para cima". Aliado a esse conceito, há aquele de *espeleogênese hipogênica*, que foi amplamente trabalhado por Klimchouk (2007) e leva em consideração os mecanismos físico-químicos que criam a agressividade da água (e.g. presença de ácido sulfúrico ou temperaturas elevadas) para a formação de cavernas.

Sobre a temperatura das águas no processo de carstificação, Dublyansky (2013) afirma que, para água ser considerada "termal", deve apresentar, na fonte, uma temperatura significativamente mais quente do que a média da temperatura do ar regional. Assim sendo, Ford (1995) estabeleceu um limite formal de 20°C para distinguir um carste "termal" de um carste "normal". Entretanto Dublyansky (2013) destaca que tal limite pode ser bem aceito em regiões temperadas, mas não nas tropicais ou de climas quentes, cujas médias anuais podem passar muito dos 20°C. Por fim, ao concluir suas considerações sobre os processos de carstificação pelas águas geotermais, o mesmo autor afirma que existe apenas um número limitado de indicadores que permitem a identificação inequívoca da origem termal do carste e das cavernas. Esses incluem: 1) a presença de águas termais no carste e/ou caverna, 2) a presença de minerais hidrotermais depositados nas paredes da caverna, e 3) a presença de alterações isotópicas nas paredes da caverna.

Dessa forma, Dublyansky (2013) afirma que a morfologia das cavernas que foram formadas pela ação das águas termais pode exibir uma série de feições características como: a) as feições que indicam movimento muito lento da água, b) aquelas que indicam movimento de convecção livre da água, e c) aquelas feições que indicam o alargamento subaéreo, como os processos de convecção do ar e os mecanismos de condensação-corrosão. Além de tais evidências, o autor destaca a ausência de feições e depósitos que indicam um ambiente de água corrente, falta de associação entre as formas clássicas do

exocarste e, claro, a associação espacial da caverna com a atividade hidrotermal ativa ou extinta (DUBLYANSKY, 2013).

Além dos termos mencionados, é preciso lembrar que as primeiras classificações do carste baseavam-se na morfologia das feições de determinada área. Por essa razão, White e White (2013) lembram que o foco era o produto final, ou seja, as formas de relevo (Figura 14). Portanto, é possível a distinção dos *pavimentos cársticos, carste de dolinas, carste cônico ou em cones, carste em torres* e *carste em polje*, entre outros.

É importante distinguir e compreender as diferenças entre o carste em cones e o carste em torres, pois muitas vezes são tratados de maneira equivocada. Waltham (2008) afirma que os geomorfólogos chineses distinguem o tipo de carste do país não pela forma de suas colinas ou afloramentos, mas pela presença ou não de planícies entre eles. Assim sendo, em campo, percebe-se que, no carste em cone (*Fengcong* - 'agrupamento de picos'), não são comuns cones isolados, mas sim, seus agrupamentos, que são separados por depressões fechadas ou dolinas profundas. Individualmente, tais cones apresentam elevações que variam dos 30 aos 500 metros (Figura 15).

Já no tipo de paisagem conhecida como carste em torre (*Fenglin* - 'floresta de picos'), a paisagem é marcada por torres calcárias, planícies e cavernas que podem estar localizadas no alto das torres de rocha, ora como templos e mosteiros, ora como locais mais simples. Sweeting (1990), Yuan (1991) e Waltham (2008) destacam que o carste em torre é uma paisagem onde colinas ou torres isoladas aparecem em meio a uma grande planície cárstica. Waltham (2008) ainda afirma que essa paisagem é quase totalmente restrita ao carste do Sudeste Asiático, estendendo-se de forma mais ou menos contínua de Guangxi (China) até o nordeste do Vietnã e, mais descontinuamente, no resto do Vietnã, Tailândia, Burma e Indonésia. Destaca-se que as grandes planícies entre as torres são geralmente ocupadas por campos cultivados, vilas ou cidades (Figura 16).

Figura 14 – *Fluxograma dos processos envolvidos no desenvolvimento da paisagem cárstica. (Adaptado de White e White, 2013, p.15)*

Figura 15 – *Aspectos gerais do carste em cone, conhecido como Fengcong, ao longo do rio Li, em Guangxi, China. Observa-se que as torres não apresentam grandes planícies entre elas (Foto: L.E.P. Travassos).*

Figura 16 – *A cidade de Guilin, na China, desenvolve-se em meio a um carste do tipo Fenglin. Na imagem, é possível perceber um templo no topo do Solitary Beauty Peak, sítio onde se localizava o palácio do Príncipe Jingjiang, durante a Dinastia Ming, 1368-1644 (Foto: L.E.P. Travassos).*

White e White (2013) afirmam que, embora o clima e suas variações ao longo do tempo sejam certamente importantes, as tentativas de estabelecimento de uma relação direta e única entre as formas cársticas e os regimes climáticos se provaram elusivas. Por esse motivo, ainda no sentido de buscar classificações da paisagem cárstica, White e White (2013) ressaltam a possibilidade de classificar o carste de acordo com o tipo de rocha em três categorias: 1) *carste carbonático* (e.g. calcário e dolomito), 2) *carste em evaporitos* (e.g. gesso e sal) e 3) *carste em silicatos* (e.g. quartzitos, granitos e outras rochas ígneas e metamórficas). Percebe-se, portanto, que a paisagem cárstica pode não ser somente um produto exclusivo dos processos cársticos que operam em um determinado substrato geológico, mas também produto de processos que operam simultaneamente no mesmo embasamento e influenciados por diversos fatores, inclusive o climático.

São exemplos disso o *fluviocarste* (ROGLIĆ, 1960), o *carste alpino*, o *glaciocarste* e o *carste costeiro*. No primeiro tipo, processos fluviais "competem" com os processos cársticos para esculpir a paisagem (Figura 17); o segundo termo carrega consigo a conotação de ser um ambiente de alta montanha, onde climas extremos favorecem várias condições de elaboração da paisagem e tais paisagens tendem a ser altamente fraturadas em função das tensões causadas por dobramentos (Figura 18 e 19); o terceiro tipo, o *glaciocarste*, é o das áreas que sofreram com sucessivos avanços e recuos das glaciações do Pleistoceno, removendo o solo e o regolito e deixando a superfície carbonática exposta. Destaca-se que muitos pavimentos calcários existem devido a esses processos, mas não são os exemplos encontrados no Brasil.

Figura 17 – *Cânion do São Francisco, esculpido pelas águas do rio no carbonato, entre os municípios de Piumhí e Doresópolis, Minas Gerais (Foto: L.E.P. Travassos).*

Figura 18 – *Aspectos da paisagem cárstica da Parque Nacional de Triglav, Eslovênia (Foto: L.E.P. Travassos).*

O carste costeiro, assim como o carste alpino, se refere a um tipo de ambiente e, por isso, os processos envolvem desde a ação das ondas até os movimentos das marés. Sobre o carste costeiro ou litorâneo, Mylroie e Mylroie (2013) afirmam que costas rochosas podem abrigar cavernas produzidas tanto por processos mecânicos, quanto de dissolução. Em costas carbonáticas, comuns mundialmente, ambos os processos são ativos e, portanto, apresentam um complexo sistema cárstico.

Figura 19 – *Aspectos da paisagem de um carste alpino da Bavária, Berchtesgaden, Alemanha (Fotos: L.E.P. Travassos).*

No carste, além de alguns processos mecânicos, é necessária a presença de água quimicamente agressiva para dissolver a rocha. Em alguns casos, sabemos que a fonte da agressividade pode ser oriunda de ácidos *epigênicos* (externos) ou *hipogênicos* (internos). O primeiro tipo tem origem na atmosfera e nosolo; o segundo, em camadas profundas da litosfera. Palmer (2009) destaca que cerca de 80-85% das cavernas são formadas pela dissolução da água acidificada na superfície (ou próximo a ela) e o restante tem origem hipogênica, cujos processos ainda estão sendo exaustivamente estudados.

Aqui, aproveitamos para chamar atenção para os tipos de definições que levam em consideração o carste a partir de uma *abordagem fisionômica*, como um *ambiente geológico*, como a *totalidade de um fenômeno* (formas), como *um processo*, como *uma unidade dos processos* e formas e como um *sistema* (KLIMCHOUK, 2015). De todas as abordagens, acreditamos que o carste como um sistema complexo seja a melhor forma de abordagem para qualquer estudo para melhor compreensão da sua evolução e dos seus estágios, embora existam outras formas de interpretação (Figura 20).

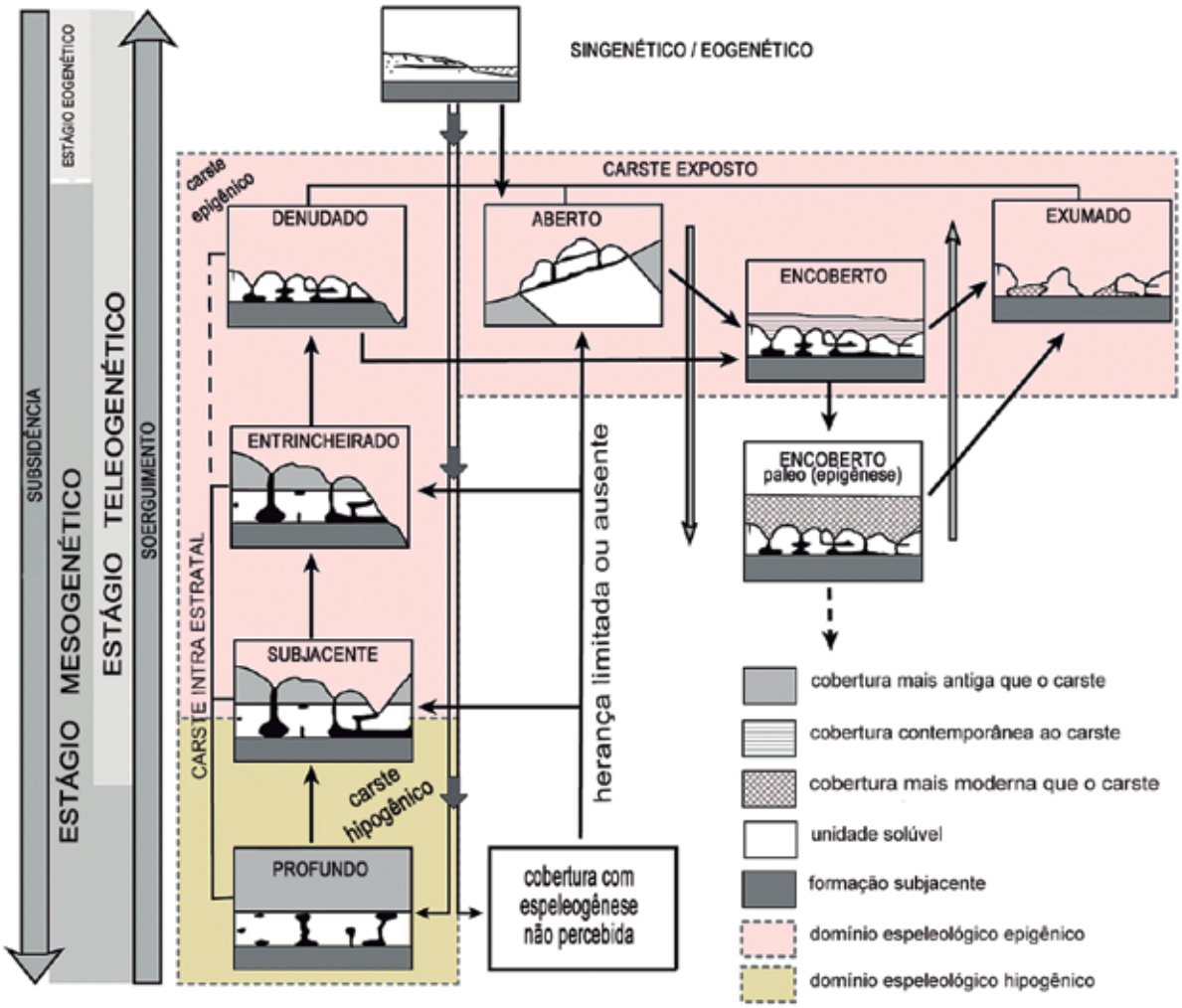


Figura 20 – *Tipos evolutivos de carste e ambientes espeleológicos, de acordo com Kilmchouk (2015, p. 303). As cores de fundo indicam os domínios de gênese epigênica e hipogênica.*

3.1 CARSTE: UM SISTEMA ABERTO OU FECHADO?

Por muito tempo, se pensou nas cavernas como sistemas quase sem ligação com a superfície. O mesmo ocorria com a paisagem cárstica, pois, no passado, ela era pouco comprrendida pela maioria dos viajantes europeus que passavam pelo Carste Dinárico, por exemplo. De acordo com Tuan (1980; 1983), *topofilia* é a relação ou conexão afetiva entre as pessoas e o lugar. Em uma região hostil do ponto de vista físico, é de se esperar o surgimento de um sentimento oposto a esse, a *topofobia*. Shaw e Čuk (2015, p.13) apontam uma passagem do engenheiro de minas e professor de tecnologia em Viena, Benedikt Franz Johann von Hermann (1755-1815), quando viajou de Viena à Trieste, passando por Postojna (Eslovênia) em 1780:

> O carste é um retrato vivo da desolação, transcendendo toda imaginação. Uma área (...) delimitada puramente por rochas cársticas nuas, nada contém além de milhões de pedras que sobraram após o recuo das enchentes (...) onde quer que se olhe há desolação, somente aqui e acolá o esforço de um pobre camponês roçou uma pequena parcela de terra, cercada por um baluarte de rochas para plantar trigo ou centeio. O violento vento norte soprou ao longo de toda a estrada tão extraordinariamente feroz que a nossa carruagem estava em perigo de ser arrastada da estrada a cada momento.

Outro viajante que fez uma descrição igualmente "topofóbica" do carste foi Richard Francis Burton (1821-1890). Sua experiência com o carste é resumida da seguinte maneira: "(...) um estranho passando em um trem diria que, quando Deus Todo Poderoso terminou de criar a Terra, Ele jogou todas as rochas supérfluas aqui" (BURTON, 1893, p.26).

Dessa forma, não é de se estranhar que muitos pensassem o carste como sendo um sistema fechado, desconectado dos demais ao seu redor. Entende-se como um sistema um conjunto de elementos interdependentes que, juntos, formam um todo organizado, podendo ser classificado como *aberto* ou *fechado*.

Para DeWaele (2008), um sistema é definido como aberto quando todas as fases físicas (e.g. sólida, líquida e gasosa) estão livres para reagirem entre si e ao mesmo tempo. Em um sistema aberto ideal, tais condições persistem até o momento em que o equilíbrio termodinâmico é alcançado (e.g. uma represa de travertino, em uma caverna, em contato com a atmosfera da caverna). Ao contrário, em um sistema fechado, somente duas fases interagem entre si e, ao mesmo tempo, em determinado lugar (e.g. uma gota de água, água saturada em fissuras).

Em resumo, dependendo da escala de análise, é possível considerar o carste como sendo um sistema aberto e um sistema fechado. Como um *sistema aberto,* observamos as moléculas de CO_2 reagindo com a água (H_2O) e se transformando em ácido carbônico (H_2CO_3). A reação libera íons de bicarbonato (HCO_3) e prótons de hidrogênio (H^+) que são consumidos por meio

de reação química com o carbonato de cálcio ($CaCO_3$) criando moléculas de bicarbonato (HCO_3^-) em solução. Novas moléculas de CO_2 podem passar do ar para a solução aquosa para sustentar todo o processo, até o equilíbrio termodinâmico ser atingido (Figura 21).

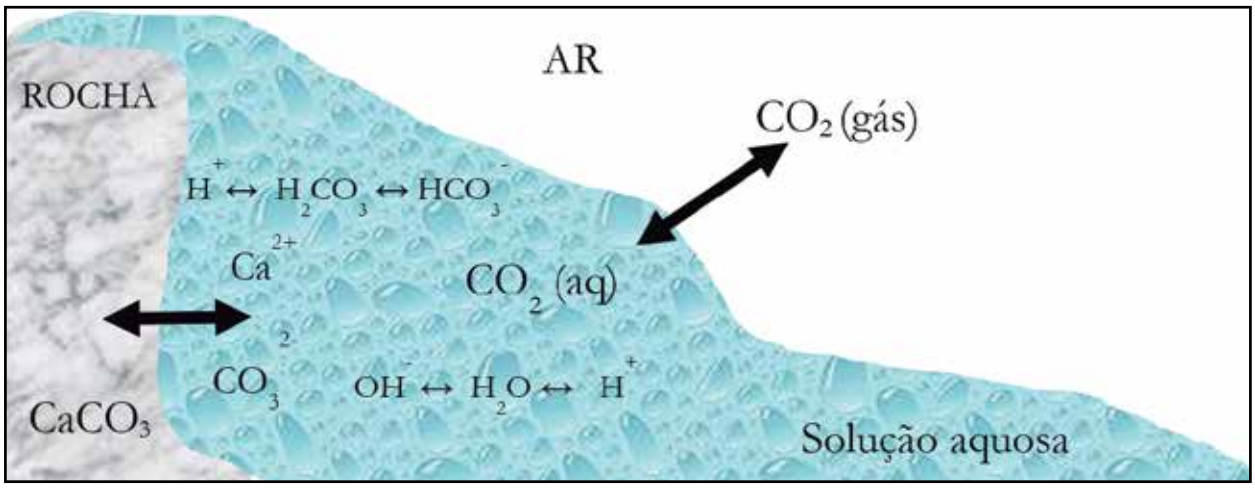


Figura 21 – *Esquema de como é um sistema aberto no carste (Modificado de DeWaele, 2008).*

Já em relação ao carste como *sistema fechado*, percebemos dois tipos: 1) sistema fechado *ar-água* e 2) sistema fechado *rocha-água*. DeWaele (2008) afirma que, no primeiro, as duas fases interagem, até que a solução se torne saturada de CO_2 e seus produtos derivados, (H_2CO_3) e ions de bicarbonato HCO_3^-. Dessa forma, o equilíbrio termodinâmico é atingido e as concentrações das substâncias não se alteram mais (Figura 22). No segundo tipo, um sistema fechado *rocha-água* (e.g. capilaridade), as duas fases interagem até que a solução consuma todo o CO_2, bem como o H_2CO_3 e o ion bicarbonato (HCO_3^-), por meio da reação com o $CaCO_3$. Diferentemente do sistema aberto, no qual o CO_2 consumido é continuamente substituído por novo CO_2 originário do ar, somente 40 % do total de calcita serão dissolvidos nesse tipo de sistema (Figura 23).

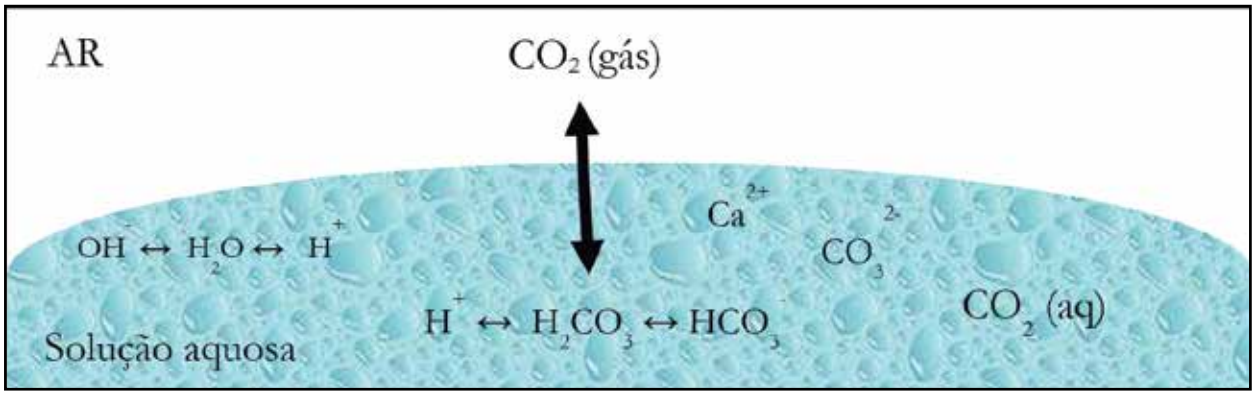


Figura 22 – *Esquema de um sistema fechado "ar-água" (Modificado de DeWaele, 2008).*

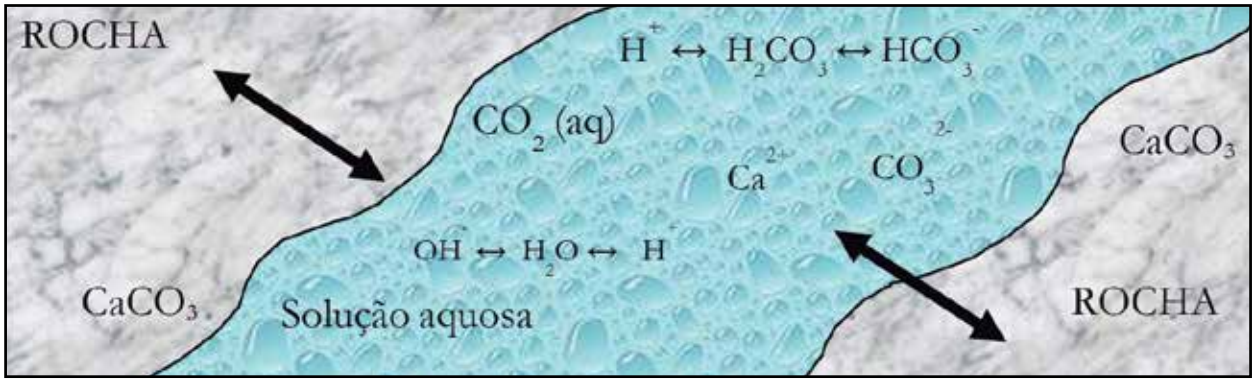


Figura 23 – *Esquema de um sistema fechado "rocha-água" (Modificado de DeWaele, 2008).*

3.2 A CLASSIFICAÇÃO GERAL DOS CARBONATOS

Realizadas as diferenciações entre alguns tipos de carste, nos concentraremos agora, em apontar a formação de algumas feições comuns, porém não exclusivas dos carbonatos. É possível que o leitor que tenha alguma experiência de campo possa relacioná-las a outras litologias. Entretanto, devido à antiguidade dos estudos do carste tradicional, iremos nos ater aos calcários e dolomitos por meio do diagrama da Figura 24.

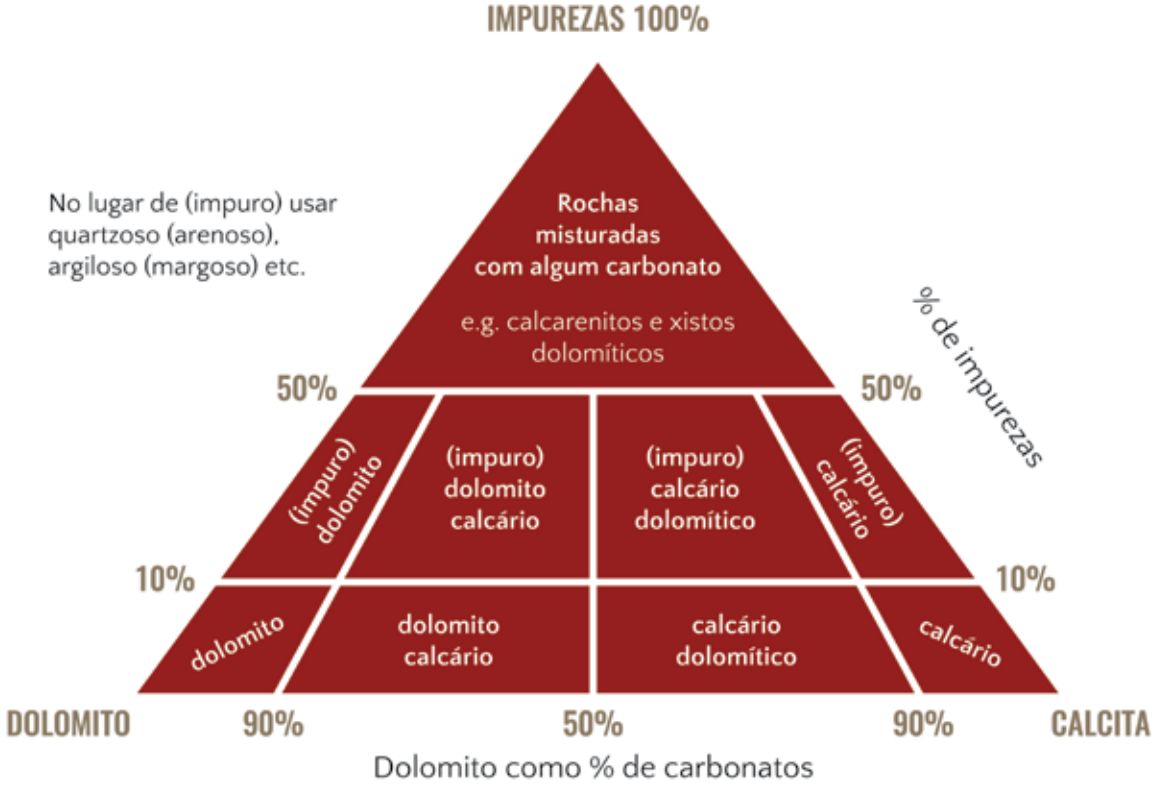


Figura 24 – *Classificação das rochas carbonáticas, realizada por Leighton e Pendexter (1962) e reproduzida por muitos autores, entre eles, Ford e Williams (2007).*

Para Salomon (2006), é interessante a classificação de Folk (1959), que se baseia na proporção relativa e na natureza dos grãos carbonáticos, bem como no cimento de ligação (Figura 25). Esses grãos podem ser fragmentos de rochas (*intraclastos*), partículas sem estrutura (*pellets*) ou fragmentos de fósseis (*bioclasto*). A matriz que liga tais grãos pode ser cristalina (*esparita*) ou microcristalina (*micrito*). Na prática, para identificar a rocha carbonática de uma paisagem cárstica, os carstólogos podem utilizar a classificação de Leighton e Pendexter (1962) em conjunto com a classificação Dunham (1962). As sequências sedimentares, em especial os calcários, são caracterizadas pela presença de várias fissuras, fraturas e juntas de estratificação. Esta característica básica é importante, pois a composição da rocha, bem como sua textura, permitirão o fluxo preferencial da água para a carstificação (Figura 26).

PRINCIPAIS GRÃOS CARBONÁTICOS	MATRIZ EM GRÃOS > 4 µ	MATRIZ EM GRÃOS < 4 µ
Bioclastos (esqueletos calcários)	Bioesparito	Biomicrito
Oólitos, Ooide (<2mm)	Ooesparito	Oomicrito
Peloides, pelotas fecais (<2mm)	Pelesparito	Pelmicrito
Intraclastos (clastos variados)	Intraesparito	Intramicrito
Calcário formado *in situ*	Biolitito (calcário construído)	Dismicrito (calcário perfurado)

Figura 25 – *Classificação simplificada de Folk (1956) e adaptado de Salomon (2006, p.24)*

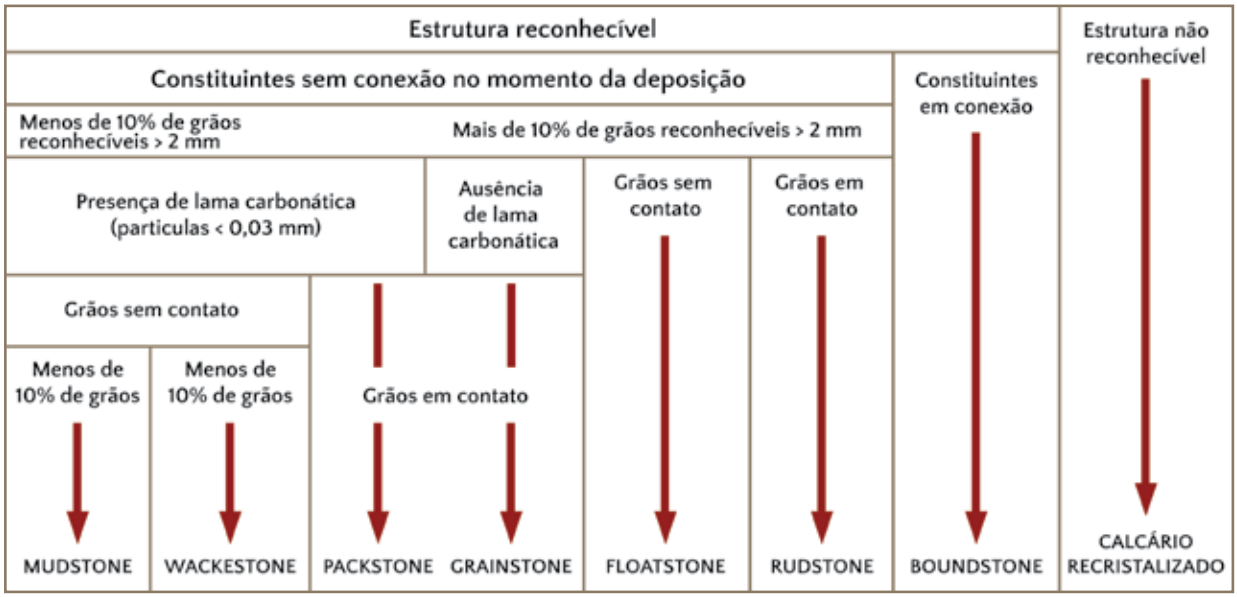


Figura 26 – *Classificação dos calcários de acordo com a disposição dos materiais constituintes. (Fonte: DUNHAM, 1962 apud SALOMON, 2006, p.25)*

É possível perceber que a porosidade primária das rochas carbonáticas é muito variável e a maneira pela qual os carbonatos foram depositados será fator de grande importância para o desenvolvimento do carste no futuro. Assim, a compactação dos sedimentos sob cargas pesadas leva à diminuição da porosidade e da permeabilidade da rocha, especialmente em calcários com grãos finos. A porosidade é geralmente maior em rochas mais jovens e pode chegar a mais de 20%. Em rochas mais antigas, a porosidade primária é geralmente inferior a 1% e, raramente, maior do que 2%, pois a rocha é mais cristalizada. Mesmo com valores que parecem baixos, ainda é mais do que suficiente para armazenar grandes quantidades de água em pequenas rachaduras ou dutos naturais. Devido à solubilidade do calcário, estes dutos tornam-se maiores com o tempo, formando redes de canais subterrâneos (SALOMON, 2006).

Sweeting (1972) destaca que uma característica importante dos calcários é o fato de se apresentarem como rochas normalmente muito fissuradas, cuja proximidade dos cristais de calcita faz com que sejam rochas de baixa porosidade e permeabilidade. Sendo assim, as fissuras e fraturas são os locais por onde a água passa com mais facilidade. Também deve ser dado destaque ao papel dos planos de acamamento e diaclases, igualmente fundamentais no desenvolvimento das feições cársticas.

White e White (2013) destacam que a solubilidade dos minerais carbonáticos em água pura é muito baixa (cerca de 7 mg/l-1) , mas que aumenta rapidamente na presença de CO_2 dissolvido e outros ácidos. Por essa razão, a classificação climática mencionada anteriormente não pode ser considerada tão correta quanto as demais.

Os carbonatos têm sido exaustivamente estudados e os processos químicos que ocorrem no carste apresentam-se muito mais complexos do que sabemos por meio das equações simplificadas:

- $CaCO_3 + CO_2 + H_2O \leftrightarrow Ca^{2+} + 2HCO_3^-$ (Calcários)

- $CaMg(CO_3)_2 + 2CO_2 + 2H_2O \leftrightarrow Ca^{2+} + Mg^{2+} + 4HCO_3^-$ (Dolomitos)

Na verdade, para a dissolução da calcita, temos as seguintes reações químicas:

$$\left.\begin{array}{l} CO_2\,(gas) \leftrightarrow CO_2\,(aq) \\ \boxed{CO_2\,(aq) + H_2O \leftrightarrow H_2CO_3} \\ H_2CO_3 \leftrightarrow H^+ + HCO^-_3 \\ HCO^-_3 \leftrightarrow H^+ + CO^{2-}_3 \\ H_2O \leftrightarrow H^+ + OH^- \\ CaCO_3 \leftrightarrow Ca^{2+} + CO_3^{2-} \end{array}\right\} \quad \begin{array}{c} CaCO^3 + CO_2 + H_2O \\ \updownarrow \\ Ca^{2+} + 2HCO_3^- \end{array}$$

Todas essas reações são influenciadas pela pressão parcial de CO_2 , temperatura ou pH. Além disso, a reação mais lenta está destacada e é ela que vai influenciar todas as outras reações.

Milanović (2005) indica que os calcários são as rochas carbonáticas mais representativas do mundo e que raramente são compostas somente por calcita ($CaCO_3$), contendo também porcentagens de argila, magnésio, sílica, areias e outras impurezas. Dependendo da quantidade de tais impurezas, os calcários são classificados como *xistosos, betuminosos, dolomíticos, areníticos* etc. Obviamente, sua solubilidade nos processos de carstificação aumenta de acordo com sua pureza, sendo classificados de acordo com o tamanho de grão predominante (e.g. *calcilutito, calcarenito e calcirrudito*), de acordo com a textura predominante (e.g. *grainstone, packstone, wackestone, mudstone* e *boundsotne*), podendo, ainda, ser identificados como acumulações *in situ*, como calcário recifal, que apresenta colônias de corais no maciço (Figura 27 e 28).

Figura 27 – *Detalhes da acumulação de um calcário recifal na Lagoa Qal'na, Parque Nacional de El-Gemal, Egito (Foto: L.E.P. Travassos).*

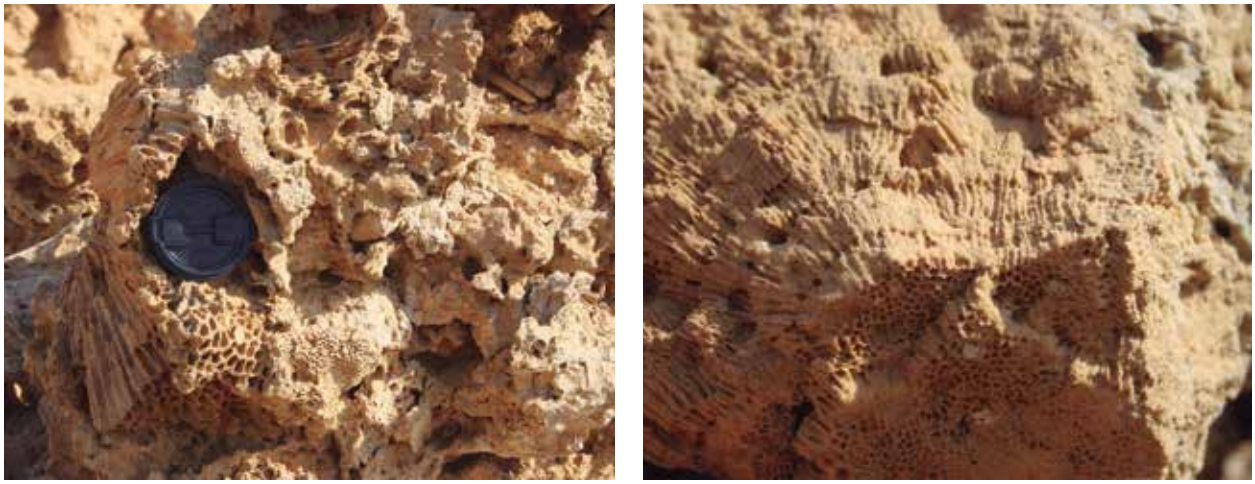


Figura 28 – *Detalhes da acumulação de calcário recifal na Lagoa Qal'na, Parque Nacional de El-Gemal, Egito (Fotos: L.E.P. Travassos).*

3.3 CLASSIFICAÇÃO DOS CALCÁRIOS BASEADA NA ORIGEM

O calcário é uma rocha sedimentar composta por altas porcentagens de calcita e aragonita, que são diferentes formas de cristais de carbonato de cálcio ($CaCO_3$). Conforme demonstrado nas páginas anteriores, a maioria dos calcários foi composta por fragmentos de organismos marinhos e esse tipo de rocha apresenta alta solubilidade. Apenas uma porcentagem quantitativamente menos importante é formada por precipitação inorgânica do $CaCO_3$ a partir da água do mar ou por acumulação mecânica em diferentes ambientes, como por exemplo, as brechas e conglomerados. Gilli (2015) destaca que calcários que contenham mais de 65% de $CaCO_3$ efervescem quando em contato com o ácido clorídrico (HCl 10%). Além disso, muitos autores propuseram formas de classificação, pois a natureza e espessura dos depósitos carbonáticos podem ser altamente variáveis. Uma compilação realizada por Gilli (2015), é apresentada a seguir:

3.3.1. Calcário detrítico biogênico

Os grãos identificáveis são bioclastos, conchas e esqueletos de organismos marinhos que, uma vez mortos, acumulam-se no fundo dos oceanos. As partículas menores são rapidamente dissolvidas assim que atingem a profundidade de compensação dos carbonatos. Esses tipos de calcários são identificados com base no tipo de fragmentos que os compõe:

- **Lumaquela *(lumachels)*:** contém um acúmulo significativo de conchas bivalves ou de gastrópodes.
- **Calcário nummulite *(nummulitic limestone)*:** composto por conchas de foraminíferos, comuns no Terciário.
- **Calcário crinoidal *(crinoidal limestone)*:** composto por detritos ou restos de crinoides.
- **Calcário litográfico *(lithographic limestone)*:** tipo de calcário composto por grãos muito finos e, por isso, no passado, foram utilizados como placas para impressão.

3.3.2. Calcário Bioconstruído

Esse tipo de calcário foi formado por organismos que se estruturam em forma de colônias como os corais, exemplificados nas Figuras 23 e 24. A rocha pode se apresentar altamente porosa se a construção foi recente. Corais são formados em regiões mais rasas, visto que necessitam de luz solar para suas relações simbióticas com outras espécies e a formação dos recifes de coral depende da variação no nível do mar. Logo que são expostos, a carstificação tem início, característica que os tornam perfeitos para a pesquisa de um carste juvenil. Certos tipos de coral formam calcário em grandes profundidades, mas pouco se sabe a respeito deles.

3.3.3. Calcário de origem química

Esse tipo de calcário é formado como resultado da precipitação do $CaCO_3$ em uma solução supersaturada. É principalmente encontrado em massas continentais.

3.3.4. Calcário de origem química e detrítica

Este tipo de calcário se forma pela precipitação química concêntrica em torno de um núcleo (areia ou bioclast), que é periodicamente levantado em suspensão por correntes. Quando muitos destes grãos se acumulam, o resultado é uma rocha carbonática com uma aparência granulada, composta de muitas pequenas esferas, denominada calcário oolítico ou pisolítico.

3.4 CLASSIFICAÇÃO DOS CALCÁRIOS BASEADA NA ESTRUTURA

Existem dois esquemas de classificação principais: o primeiro foi estabelecido por Folk (1959), dando ênfase na composição dos grãos e do material intersticial das rochas; o segundo, proposto por Dunham (1962), se concentra nas texturas de deposição.

3.4.1. Folk (1959)

Resumindo a sua classificação, existem três componentes básicos: os grãos, matriz e cimento. Os grãos são categorizados da seguinte forma:

- **Intraclastos:** fragmentos angulares de rochas;
- **Ooide:** estruturas esféricas (oólitos ou pisólitos);
- **Bioclástos:** fósseis ou detritos orgânicos;
- **Peloides:** estruturas ovais (pelotas fecais, pacotes de algas etc.)

Já a matriz, que mantem juntos os grãos, é classificada em:

- **Micrito:** base microcristalina;
- **Esparita:** cristais.

Segundo essa classificação, as rochas são nomeadas de acordo com a matriz, precedida pelo prefixo que designa os grãos (e.g. Oosparito, biomicrito etc.)

3.4.2. Dunham (1962)

Essencialmente, o autor leva em consideração as proporções relativas dos grãos e das matrizes que compõe os calcários. Ele dividiu essas rochas em quatro categorias principais, como se fossem agrupadas em "famílias" de rochas. Seus esforços concentram-se na questão dos grãos estarem ou não em contato mútuo, originalmente, ou de a rocha ser

caracterizada pela presença de outros materiais constituintes. Ao contrário da proposta de Folk (1959), Dunham lida com a porosidade original da rocha. Assim, temos:

- ***Calcário cristalino*:** estrutura sedimentar não visível;
- ***Mudstone*:** primariamente composto de micrito, com menos de 10% de fragmentos;
- ***Wackestone*:** pelo menos 10% dos fragmentos flutuando no micrito;
- ***Packstone*:** espaços preenchidos por micrito;
- ***Grainstone*:** espaços preenchidos por esparita;
- ***Boundstone*:** permanecem as estruturas orgânicas originais.

3.5 CALCÁRIOS CONTINENTAIS

A maior parte dos depósitos calcários se formou em ambientes marinhos. Ocasionalmente, entretanto, a deposição pode ocorrer nos continentes, como é o caso de depósitos lacustres, tufas, travertinos e crostas calcárias:

3.5.1. Calcários lacustres

Em regiões onde as rochas carbonáticas são abundantes, lagos podem servir como ambiente de deposição para lama carbonática formada pela precipitação do $CaCO_3$ causada pelo consumo de CO_2 pelas algas durante a fotossíntese. De acordo com Vatan (1967), citado por Gilli (2015), esse processo pode ser visto nos Lagos de Annecy e Bourget, na França.

3.5.2. Tufas e travertinos

De forma resumida, são depósitos químicos à jusante das nascentes ou que podem ocorrer em cursos d'água rasos. O processo ocorre quando a água rica em carbonato perde CO_2 para a atmosfera, favorecendo a precipitação do carbonato de cálcio. Podem se apresentar na forma de espessos depósitos acumulados em camadas sucessivas. Vários exemplos, bem como os processos de formação detalhados são vistos em Duarte e Vasconcelos (1980a; 1980b), Pentecost (1995), Boggiani e Coimbra (1994; 1995), Ford e Pedley (1996), Boggiani et al. (1998; 1999; 2002; 2011), Auler e Smart (2001), Wang et al. (2004), Corrêa (2006), Viles e Pentecost (2007), Sallun Filho et al. (2009a; 2009b), Jones and Renaut (2010), Corrêa et al. (2011), Almeida et al. (2011), Sallun Filho et al. (2012), Capezzuoli et al.(2014) e Travassos e Oliveira (2016).

3.5.3. Crostas calcárias

Nas regiões áridas, a precipitação ou ação capilar pode mobilizar os carbonatos e favorecer sua deposição dentro de certos horizontes do solo ou na parte superior do nível de base hídrico, criando crostas de espessuras variáveis que, então, podem ser secundariamente afetadas pela carstificação. No Brasil, tais exemplos são mais comuns no Nordeste do país e recebem o nome de caliche.

3.6 OS DOLOMITOS

Os dolomitos são rochas carbonáticas compostas pelo mineral denominado dolomita, quase tão abundantes quanto os calcários. Sua formação sempre foi (e continua sendo) foco de interesse científico. Blatt (1992)afirma que os dolomitos podem se formar em diversos ambientes e em diferentes profundidades e temperaturas nas mesmas condições tectônicas e fisiográficas que as do calcário. Entretanto, Onac (2000) afirma que a sua gênese não é bem conhecida, mesmo que existam inúmeros trabalhos de campo e laboratório sobre isso.

As pesquisas indicam que esse tipo de rocha é formada pela substituição dos calcários e que sua composição química pode ser expressa pela fórmula $CaMg(CO_3)_2$, cuja composição é de cerca de 30% de CaO, 22% de MgO e 48% de CO_2 (TUCKER, 2014). O processo de dolomitização pode ser primário (quando as rochas carbonáticas são formadas em um ambiente de evaporação) ou secundário (durante a diagênese, devido à circulação de fluidos ricos em magnésio). Como o volume dos cristais de dolomita é 13% menor do que o da calcita, o processo de dolomitização é acompanhado por um aumento da porosidade das rochas, perdendo os traços de estratificação primitiva (FORD; WILLIAMS, 2007; TUCKER, 2014).

Por fim, destacamos o papel fundamental da composição das rochas para a carstificação. Além disso, é preciso lembrar o papel desempenhado por seus tipos de porosidades, bem como pela temperatura e presença de CO_2. Em relação à porosidade, Milanović (2005) aponta o fato de ela ser primária (*singenética*) e secundária: a primeira acontece ao mesmo tempo em que ocorre a deposição dos sedimentos e, por isso, são pouco comuns nos carbonatos; a segunda, porosidade secundária, consiste nas juntas, fraturas e cavernas, elementos muito comuns no carste e que favorecem a circulação hídrica. Ao relacionar a circulação da água, a temperatura e o CO_2 para a formação do carste, Castany (1963) estabeleceu que 1 litro de água a 0°C dissolve cerca de quatro a cinco vezes mais calcário que a mesma quantidade a 30°C e seis vezes mais do que a água a 40°C, como nos trabalhos de Corbel (1959a.; 1959b). Somado a esses fatores está o auxílio do tectonismo à carstificação de algumas regiões.

Sobre a relação entre os processos tectônicos e o carste, Shanov e Kostov (2015) lembram que os processos já eram mencionados em livros de Édouard-Alfred Martele Jovan Cvijić, entre outros. No caso de Cvijić, este discutia o tectonismo como pré-requisito para a carstificação em pelo menos cerca de 47 de seus trabalhos dedicados à geomorfologia cárstica e hidrologia.

3.7 SOBRE AS DRENAGENS NO CARSTE E SEUS AQUÍFEROS

Acreditamos ser extremamente complicado escrever sobre a drenagem no carste sem o conhecimento prévio das feições cársticas. Entretanto, considera-se que é ainda mais complicado tentar explicar a gênese das feições, sem que se tenha uma noção prévia básica de como é o caminho da água no carste (JENNINGS, 1985). É relativamente fácil, no entanto, perceber,

em campo, que as formas na superfície e no subterrâneo são o resultado do complexo movimento da água em uma região cárstica. Nesse tipo de paisagem, normalmente, observa-se uma relação direta entre a água subterrânea e a superficial por meio das depressões fechadas e fraturas.

Podemos dizer que todas as paisagens cársticas que vemos hoje dependeram da água para se formar. Essa dependência se deu em maior ou menor grau, mas todas – em algum momento de sua formação – precisaram das redes de drenagem que se desenvolveram sobre e sob a superfície. Assim sendo, dedicamos algumas linhas para fornecer noções básicas sobre as drenagens no carste, responsáveis pela formação de seus aquíferos subterrâneos, por exemplo.

A água da chuva que atinge uma superfície cárstica pode ser rapidamente capturada para um sistema subterrâneo ou pode ser acumulada em razão da existência de camadas impermeáveis de rocha ou sedimentos sobre o carste. Dessa forma, rios superficiais *autóctones* são formados, mas são geralmente capturados para o endocarste em algum ponto de recarga ao longo do seu curso. Esses são os cursos d'água que tiveram sua origem diretamente nos carbonatos ou nas camadas acima dos carbonatos e que são comuns nesse tipo de paisagem. Ainda mais comum é o comportamento intermitente da água nessas regiões. Por causa do preenchimento ou esvaziamento do subterrâneo, tais rios podem apresentar uma drástica redução da vazão na superfície, embora ainda existam no subterrâneo. Rios que tiveram sua origem em regiões fronteiriças ao carste são denominados *alóctones* e, ao cruzarem os limites litológicos que definem o carste, podem apresentar propriedades físico-químicas e comportamentos similares, embora os possuam de forma diferente em seu alto curso, próximo às nascentes. Com o passar do tempo, os rios alóctones podem adquirir propriedades de águas cársticas, pois refletem a dissolução dos carbonatos ao longo de sua passagem pela massa ou pelo maciço carbonático e continuam seu curso como rios cársticos.

Ambos os tipos de drenagem, ao serem capturados para o subterrâneo, dão origem às feições conhecidas como sumidouros (*ponor*), ressurgências, surgências (nascentes), *estavelles* etc. e são partes importantes no sistema de recarga e descarga dos aquíferos. Tais termos serão explicados mais adiante, na seção dedicada às feições cársticas.

De acordo com a definição padrão da literatura, um aquífero é uma rocha capaz de armazenar e transmitir grandes quantidades de água. Assim, para definirmos um aquífero, essas duas características são necessárias. Dentro da rocha, os espaços (e.g. poros, fraturas e condutos) propiciam perfeitos locais de armazenamento hídrico e a comunicação entre os espaços favorece a transmissão da água por meio de uma vasta e complexa rede de condutos (WHITE, 1988; 2005). Por muitos anos, os pesquisadores falaram em apenas dois tipos de porosidade, mas descobriu-se que, em aquíferos mais bem desenvolvidos, é possível identificar até três tipos de porosidade, a saber: 1) porosidade *matriz* ou *granular* da própria rocha, 2) porosidade em razão de *fraturas* e *fissuras* na rocha e 3) porosidade em função dos *condutos* formados pelo alargamento das fraturas, fissuras ou planos de acamamento.

Assim, os aquíferos cársticos podem abrigar uma imensa quantidade de água subterrânea, apresentando-se como recursos naturais estratégicos de importância considerável. São geralmente caracterizados por uma baixa capacidade de depuração (remediação natural e neutralização

de poluentes e contaminantes) e, por isso, são muito vulneráveis à poluição. São únicos e possuem suas próprias características estruturais e altamente heterogêneas. Por essa razão, Stevanović (2015) afirma que, de acordo com sua descarga, aquíferos cársticos podem ser de alta, média e média a baixa produtividade, levando-se em consideração seu uso pelo ser humano.

De forma simplificada, os aquíferos cársticos podem ser considerados uma rede de condutos de alta permeabilidade, cercada por um imenso volume de rochas de baixa permeabilidade, por onde a água só é capaz de passar por uma rede de fraturas, planos de acamamento e condutos. Jennings (1985) afirma que, neste tipo de paisagem, normalmente observamos a rápida infiltração da água nos afloramentos ou na rocha, algum fluxo superficial quando a água encontra camadas impermeáveis e, obviamente, um fluxo subterrâneo. Assim, a água, ao se infiltrar, se move verticalmente ou subverticalmente em direção ao nível de base. Nesse caminho, Ford e Williams (1989), Worthington (1991), Király (2002), Goldscheider, Drew e Worthington (2007) e Ravbar (2007) destacam características que mostram a **dualidade do carste** no que diz respeito à recarga do aquífero, propriedades do fluxo subterrâneo e descarga da água:

Dualidade da recarga:

a) ***Recarga autóctone:*** ocorre com águas da própria área cárstica, que entram no sistema por meio de numerosas fissuras;

b) ***Recarga alóctone:*** ocorre quando as águas são oriundas de áreas adjacentes ao carste.

O aumento dos dois tipos de recarga resulta tanto no aumento do nível da água subterrânea, quanto no aumento da descarga em surgências ou nascentes.

Dualidade do processos de infiltração:

a) ***Infiltração*** difusa pelo solo e zona não saturada;
b) ***Infiltração*** concentrada de cursos d'água que são capturados por sumidouros (*ponors*).

A recarga *alóctone* é normalmente pontual, enquanto a recarga *autóctone* é normalmente difusa. Entretanto, a infiltração difusa da água, que normalmente ocorre em fissuras de pouca permeabilidade pode ser aumentada pela drenagem rápida e concentrada, que ocorre no epicarste ou no próprio aquífero.

Dualidade do processos de fluxo da água subterrânea:

a) ***Baixa velocidade*** de fluxo nos volumes fraturados com grande capacidade de armazenamento de água;
b) ***Alta velocidade*** de fluxo na rede de canais e condutos.

Dualidade do processo de descarga:

a) Vazão ***difusa*** dos volumes de baixa permeabilidade;

b) Descarga ***concentrada*** da rede de canais ou condutos nas surgências ou nascentes.

Devido às principais características do fluxo de água e dos processos de armazenamento, os sistemas aquíferos cársticos são divididos em três subsistemas, conforme Ford e Williams (1989; 2007):

1) ***Zona não saturada (zona vadosa):*** parte mais superior e seca do aquífero, onde ocorre a rápida drenagem ao longo de uma rede vertical de fissuras que interage com a percolação lenta ocorrida em volumes de baixa permeabilidade. Acima dessa zona vadosa, tem-se a cobertura pedológica, o subsolo e o epicarste.

2) ***Epicarste:*** parte superior da zona não saturada, que apresenta diferentes espessuras (alguns metros, dezenas ou até mesmo centenas de metros). É uma zona altamente permeável e carstificada abaixo da superfície. Em função de sua origem pelos processos de intemperismo, é estruturalmente diferente da parte mais inferior da zona vadosa. Apresenta fraturamento maior e mais uniforme com alta condutividade hidráulica. Essa porção do aquífero atrasa o escoamento superficial, absorvendo e armazenando temporariamente a água da chuva. Além disso, drena rapidamente a água em direção a condutos verticais mais largos, aumentando a infiltração concentrada (MANGIN, 1975; WILLIAMS, 1983; KLIMCHOUCK, 2000; RAVBAR, 2007).

3) ***Zona Saturada (zona freática):*** porção mais profunda do aquífero, onde prevalece o fluxo por uma rede de condutos diretamente conectada às nascentes ou surgências.

Para Ford e Williams (2007), Stevanović (2015) e Stevanović e Petar Milanović (2015), determinar a estrutura e as propriedades dos aquíferos cársticos representa uma série de problemas práticos devido à sua heterogeneidade e à escassez de informações sobre tais sistemas. Portanto, é essencial para a estimativa, planejamento e manejo dos recursos hídricos, a capacidade de responder a algumas questões. Estas se traduzem na origem e na quantidade de água que pode ser utilizada, bem como nos parâmetros físicos que caracterizam o aquífero. Entretanto, ainda assim é difícil a generalização a respeito dos aquíferos cársticos, devido à vasta gama de contextos geológicos, armazenamento e condições de fluxo. Mesmo que de difícil compreensão, esforços importantes vêm sendo feitos para aprimorar as informações disponíveis.

Assim, Petrić (2002) afirma que todo o empenho realizado para minimizar os impactos antrópicos nos aquíferos cársticos somente serão efetivos se forem levadas em conta suas propriedades específicas e particulares. A estrutura heterogênea e o funcionamento complexo de cada um tornam sua caracterização extremamente difícil e, em alguns casos, fatores como pouca população e agricultura menos intensiva podem contribuir para uma certa proteção das águas.

Segundo Chow, Maidment e Mays (1988) e Petrić (2002), os aquíferos cársticos representam uma formação geológica com porosidade secundária bem desenvolvida e, por isso, com boa permeabilidade, sendo circundados por outras variáveis que recebem água e mais contribuições oriundas de outros sistemas. Sua estrutura incorpora fluxos preferenciais por onde a água flui até ser capturada e novamente aflorar em algum momento de sua evolução.

Com o exposto, é possível concluir que as relações entre os diversos parâmetros são complexas, podendo ser representadas por meio do "modelo conceitual dos aquíferos" descrito na Figura 29.

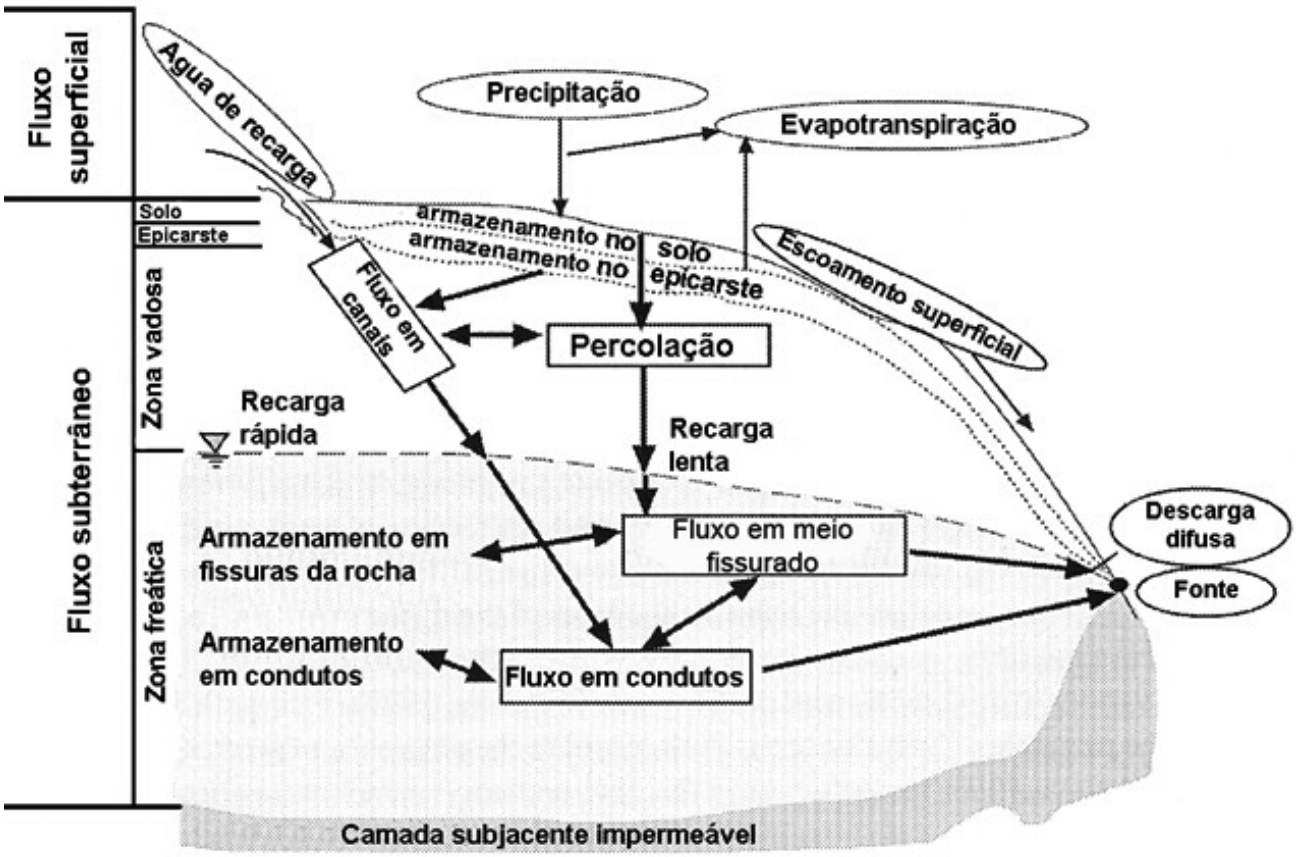


Figura 29 – *Modelo conceitual do fluxo da água em um aquífero cárstico. Adaptado de Petrić (2002) e Ford e Williams (2007).*

Sua interpretação é feita através da identificação didática de dois subsistemas independentes: o fluxo superficial e o fluxo subterrâneo. No entanto, tais subsistemas apresentam-se inter-relacionados, agindo como um todo no aquífero. Cada subsistema apresenta variáveis que, para melhor compreensão, podem ser estudadas separadamente sem que esqueçamos de suas relações de dependência. Destaca-se que a interpretação do modelo conceitual já foi feita por diversos autores e aqui nos baseamos, principalmente, em Petrić (2002).

- ***Fluxo superficial:*** inclui dois componentes principais de recarga e um terceiro não tão destacado. O primeiro componente são os cursos d'água que se originam em áreas não carbonáticas vizinhas. Quando em contato com o carbonato, podem ser capturados como pontos de recarga do aquífero. O segundo, é a precipitação difusa ao longo de toda região cárstica e que permite a formação do escoamento superficial pelo excesso de água que não consegue percolar completamente pelo solo. Já o terceiro componente é identificado na literatura como a evapotranspiração. Tal variável configura o processo pelo qual a água, próxima à superfície, se torna vapor d'água e retorna ao sistema em forma de precipitação.

- ***Fluxo subterrâneo:*** Engloba a *zona vadosa* (não saturada) e a *zona freática* (saturada). Nesse subsistema o solo é a porção superior da zona não saturada onde a água precipitada pode, dependendo da profundidade e das propriedades hidrológicas, ser armazenada temporariamente ou simplesmente percolar em direção ao epicarste. Tal variável desempenha importante papel como regulador temporal da distribuição da recarga. Em períodos chuvosos, a água pode ser rapidamente transferida para a rede de condutos subjacentes, enquanto a outra parte pode ser armazenada na base do epicarste e, posteriormente, recarregar lentamente o aquífero por meio de zonas menos permeáveis.

Zhou (2007) afirma que a presença do epicarste é um fenômeno único e restrito ao carste e geralmente separado do nível de base hídrico por rochas relativamente menos permeáveis. Assim, quando o volume de água de recarga o atinge, e começa a exceder a capacidade de drenagem da zona, um gradiente hidráulico pode se desenvolver com uma drenagem subcutânea agindo como o menor ponto de recarga, similar a um poço artesiano. Fluxos laterais e transporte a drenos subcutâneos podem exceder várias centenas de metros e permitir altas taxas de fluxo. Quando tais canais de drenagem excedem a capacidade de carga, descargas podem ocorrer.

As múltiplas porosidades de um aquífero cárstico geralmente levam a uma flutuação dinâmica no nível de base, também conhecida como

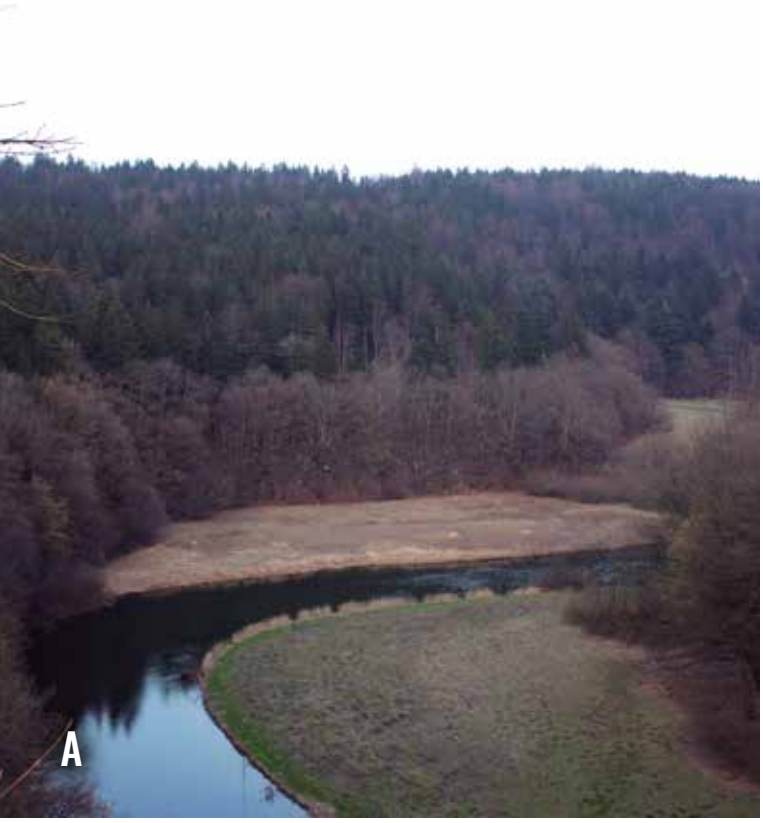
zona de transição. Após a saturação das zonas, ocorre a elevação do nível de base e, consequentemente, o aumento do fluxo nos cursos d'água. Zhou (2007) afirma que a conexão hidráulica da água superficial ao aquífero é evidenciada não somente pelas recargas, mas também, pelas descargas. Surgências e ressurgências são reconhecidas como pontos de descarga do aquífero e podem fornecer água para os cursos superficiais. Se o canal do rio superficial não é adequado para receber a quantidade de água descarregada, enchentes podem ocorrer. Assim, ainda para Zhou (2007), é sempre necessária uma análise do balanço hídrico da bacia de drenagem subterrânea ao se estudar um aquífero. Diferente de uma bacia de drenagem superficial, que pode ser facilmente delimitada por divisores de água, uma bacia subterrânea requer a identificação de seus limites, utilizando-se técnicas específicas com o uso de trançadores, análises hidrogeológicas e monitoramento de longo prazo. Isso é, portanto, uma pesquisa complexa.

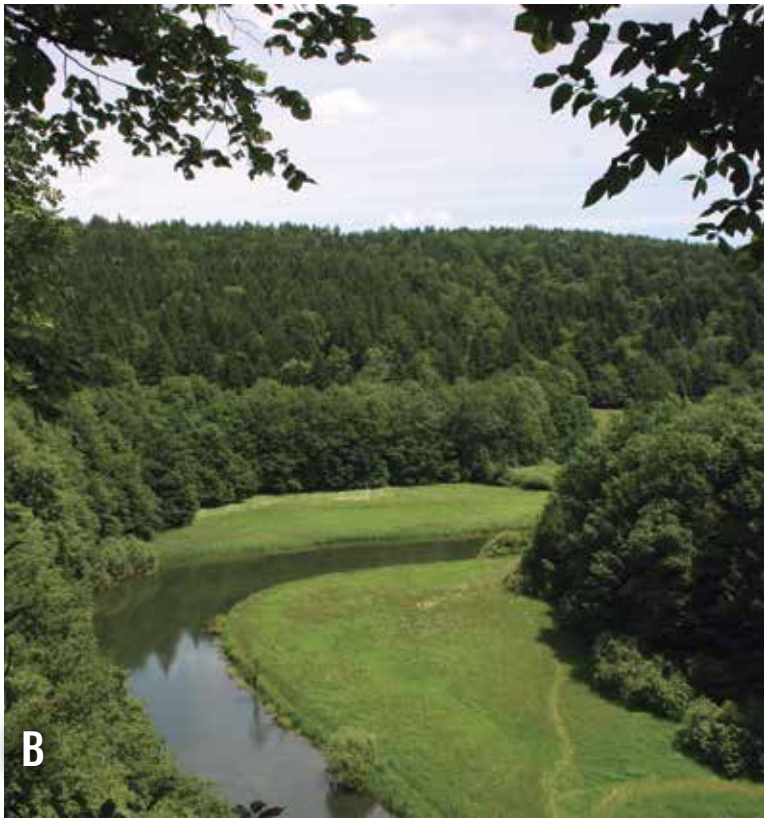
Na verdade, para o público em geral, mais do que compreender no detalhe todos os componentes de um aquífero, é necessária a compreensão do conceito de vulnerabilidade intrínseca da água subterrânea. Esse conceito se baseia na afirmação de que as propriedades físicas do ambiente proporcionam certo grau de proteção natural contra a atividade humana, mas sempre levando em consideração as condicionantes geológicas, hidrológicas e hidrogeológicas da área em questão. Assim, a sensibilidade dos aquíferos cársticos à poluição é muito alta. A proteção fornecida pela camada que existe entre a superfície (ponto de liberação do contaminante) e a água subterrânea é de grande importância na análise da capacidade de depuração intrínseca do carste. Nesse tipo de relevo é comum a variação da cobertura de solo ou até mesmo a sua ausência, fato que favorece o transporte dos poluentes e a contaminação do aquífero (KOVAČIČ, 2003; RAVBAR, 2007).

Por fim, como base na explicação do modelo conceitual dos aquíferos, como demonstrado na Figura 30, é possível perceber que a água do carste pode ser armazenada tanto pelas águas de infiltração (forma difusa) quanto pela concentração em pontos de recarga como cursos d'água, depressões fechadas e *ponors*. As camadas que recobrem a água subterrânea (e.g. cobertura pedológica, subsolo e rochas não carbonáticas) propiciam certa proteção, mas por causa de sua ausência frequente, muitos contaminantes podem ser carreados diretamente ao aquífero. Nesse caso, os condutos podem servir como dispersores de poluição, sem os processos normais de atenuação dos contaminantes, sendo quase impossíveis os processos de remediação. Dessa forma, é necessário um cuidadoso planejamento quando da ocupação de áreas cársticas (KOVAČIČ, 2003; RAVBAR, 2004; 2007; TRAVASSOS, 2007).

3.8 A GEOMORFOLOGIA CÁRSTICA SUPERFICIAL

Conforme mencionado no início do livro, as feições superficiais são predominantemente formadas pelos processos de dissolução da rocha pela água naturalmente acidulada e, em menor escala, com o auxílio dos processos físicos. DeWaele, Plan e Audra (2009) destacam que o grau de dissolução dependerá de uma série de fatores, entre eles, a quantidade





de água disponível, bem como sua recarga, seja ela difusa, autóctone, alóctone ou o conjunto delas. Além disso, para que a água seja eficiente no processo, também devemos levar em consideração a litologia, a estrutura das rochas envolvidas, o clima (e.g. temperatura e precipitação) e a vegetação. Gunn (2013) nos lembra o fato de que, em muitas litologias, a erosão (remoção de material) e a denudação (rebaixamento da superfície) são processos diretamente relacionados, porém não na paisagem cárstica. No caso específico do carste, a maior parte da erosão ocorre em subsuperfície e somente contribui para a denudação ao longo do tempo geológico. Para o autor, a dissolução é o agente dominante, tanto para a denudação quanto para a erosão, embora o intemperismo mecânico, que ocorre em função de clastos trazidos de águas alóctones, possa contribuir para o alargamento de condutos de cavernas.

3.8.1. Fatores que afetam a carstificação e zonas geográficas

Compreender a evolução das propriedades da água que percola por uma estrutura carbonáticas é indispensável para compreender os processos cársticos. Desde sua formação na atmosfera, até sua saída do sistema por meio de uma nascente, Gilli (2015) afirma que uma única gota de água interage com diferentes ambientes. Temos, portanto, sua interação com a atmosfera, o solo, a biosfera, rocha e a água no aquífero e em outros reservatórios. Com base nas interações identificadas, Gilli (2015) elaborou um quadro que demonstra alguns fatores que favorecem e inibem o processo de dissolução no carste, como função da temperatura e pressão parcial de CO_2. A partir das informações da Figura 31, é possível deduzir as áreas geográficas favoráveis para o desenvolvimento do carste. Dessa forma, acreditamos que é necessário que o leitor se familiarize com isto:

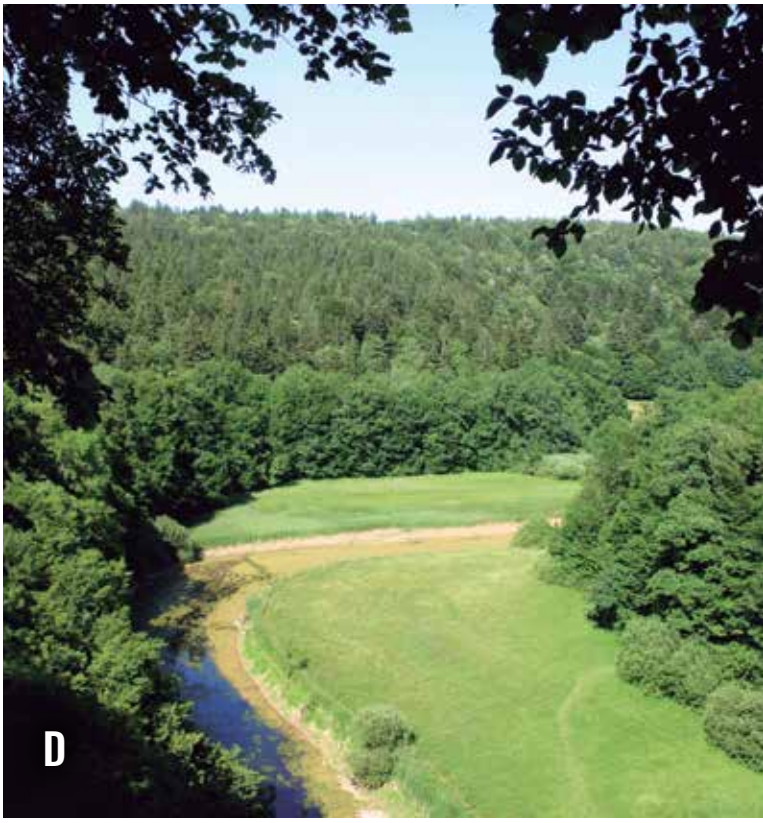


Figura 30 – *Exemplo do comportamento das águas cársticas na região do Carste Clássico, Eslovênia. A foto foi tirada sobre a ponte de pedra no Parque Natural de Rakov Škocjan em A) março de 2007, B) junho de 2007, C) dezembro de 2008 e D) junho de 2009 (Fotos: L.E.P. Travassos).*

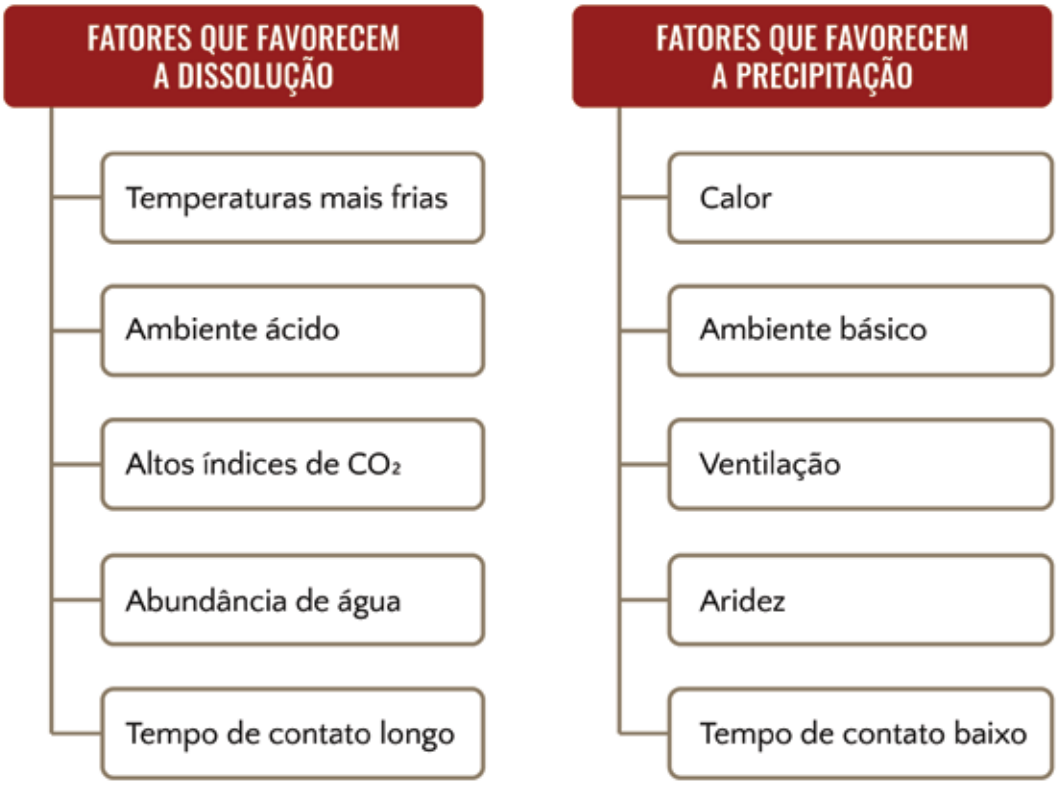
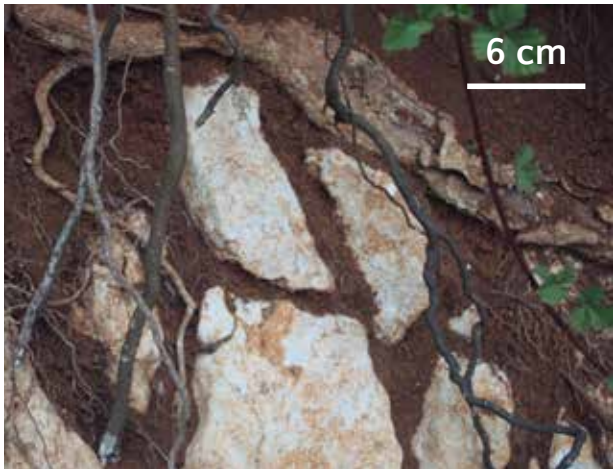


Figura 31 – *Fatores que favorecem a dissolução e a precipitação. (Adaptado de Gilli, 2015, p. 23)*



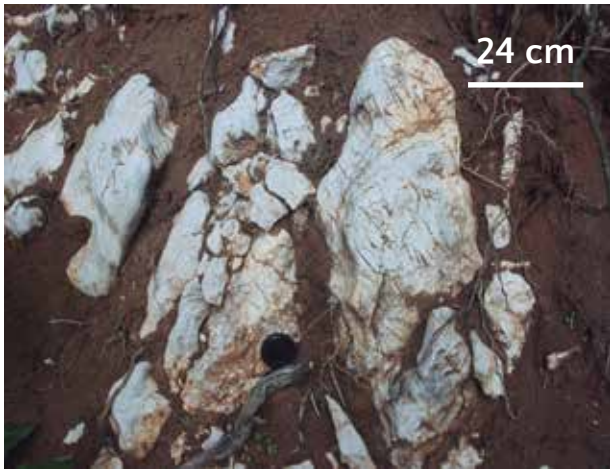


Figura 32 – *Corte de estrada vicinal eslovena que mostra o progressivo alargamento das aberturas na rocha carbonática. Com o preenchimento dos vazios pelo sedimento, a água tem sua agressividade aumentada e continua seu processo de dissolução (Fotos: L.E.P. Travassos).*

Dessa forma, interpretando as informações, podemos chegar à conclusão de que existem zonas geográficas favoráveis e não favoráveis para a carstificação. Nas zonas intertropicais chuvosas, a vegetação abundante favorece a produção de CO_2 e ácido húmico que, aliados a solos espessos, aumenta o tempo de contato dos elementos envolvidos. Da mesma forma, embora com processos distintos, *zonas montanhosas* ou *periglaciais* são favoráveis para a carstificação, por causa das baixas temperaturas que permitem que a água acumule mais CO_2 e, portanto, se torne mais agressiva. A água é abundante durante o degelo e as coberturas de neve favorecem um período de contato longo. Em relação às áreas menos favoráveis para a carstificação, destacamos que elas são as zonas áridas e as zonas árticas. Na primeira, a chuva é um processo mais escasso ou muito concentrado em apenas um rápido período de tempo. A vegetação também é mais escassa do que nas zonas tropicais, as altas temperaturas favorecem a evapotranspiração e o volume de CO_2, para efetiva carstificação, é quase

inexistente. Nas zonas árticas, a temperatura impede a circulação da água, que está congelada em sua maior quantidade; a vegetação é ausente e o CO_2 é mais raro.

Por muito tempo se falou somente na existência de um compartimento externo (o exocarste) e de um compartimento interno (o endocarste). Entretanto, o desenvolvimento da Carstologia nos mostrou a presença de um terceiro compartimento intermediário, e muito importante no sistema, chamado epicarste ou zona subcutânea (Figura 32), na qual observamos que o poder de dissolução da água da chuva é aumentado significativamente nas primeiras dezenas de metros a partir da superfície cárstica, maximizando sua agressividade para a elaboração das complexas redes subterrâneas do endocarste.

Além disso, a existência do epicarste e dos seus processos favorece a elaboração de feições superficiais, como as *dolinas*, as *uvalas*, os *poljes* e os *karren*, bem como de outras formas desta última feição, que podem ser elaboradas em subsuperfície. Bakalowicz (2013) afirma que, devido ao fato do epicarste ser a interface entre o carste, a atmosfera e a biosfera, ela é o lugar onde os agentes do intemperismo são mais eficientes (Figura 33).

Figura 33 – Epicarste visível em corte provocado por uma mineração desativada demostrando no Parque Estadual do Sumidouro, Minas Gerais (Foto: L.E.P.Travassos).

3.8.2. Feições de superfície

É possível classificar didaticamente as formas de superfície, em função da sua escala, como *nano* e *micro* feições, bem como *pequenas*, *meso* e *macro* feições, embora as dimensões possam variar entre diferentes tipos de carste. Neste livro, concentraremos os esforços na descrição e na identificação das *pequenas*, *médias* e *grandes* feições. Ainda que tenhamos dividido tais formas dessa maneira, ressaltamos que os *karren* ou lapiás são considerados feições que podem ser *nano* até *macro* formas de dissolução.

Quando o assunto é o carste, maior destaque deve ser dado às depressões fechadas, que são consideradas as feições mais características desse tipo de paisagem e que pertencem à categoria das meso e macroformas. Sobre as meso e macroformas, Kranjc (2003; 2005; 2009; 2013) afirma que, na segunda metade da década de 1600, mesmo que a noção de carste ainda não fosse conhecida entre os estudiosos daquele tempo, a noção de depressão fechada já era destacada por Valvasor (1689) e, alguns anos mais tarde, por Hacquet (1778), que já utilizava a palavra alemã *kessel* (= kettle; marmita, caldeirão etc) para descrever as dolinas (Figura 34). Além disso, a palavra *kesseltal* (= kettle valey; vale de marmitas, vale de

Figura 34 – Dolina de dissolução preenchida por sedimentos, que compõem o epicarste visível em um perfil em Pivka, Eslovênia (Foto: L.E.P. Travassos).

caldeirão etc.) era utilizada pelo autor para identificar os *poljes*, ou planícies cársticas no século XVIII. O uso desses termos já indicava o fato de que era possível observar, na paisagem, o fato das feições serem fechadas.

A seguir, dividiremos as feições de superfície com base na Figura 35 (FORD; WILLIAMS, 2007), por acharmos que resume bem didaticamente o sistema cárstico e suas peculiaridades. Nas próximas páginas, buscamos seguir a ordem proposta pela figura e que parte da *zona de erosão* (com suas feições de recarga) até a *zona de deposição* (com suas formas residuais e de descarga).

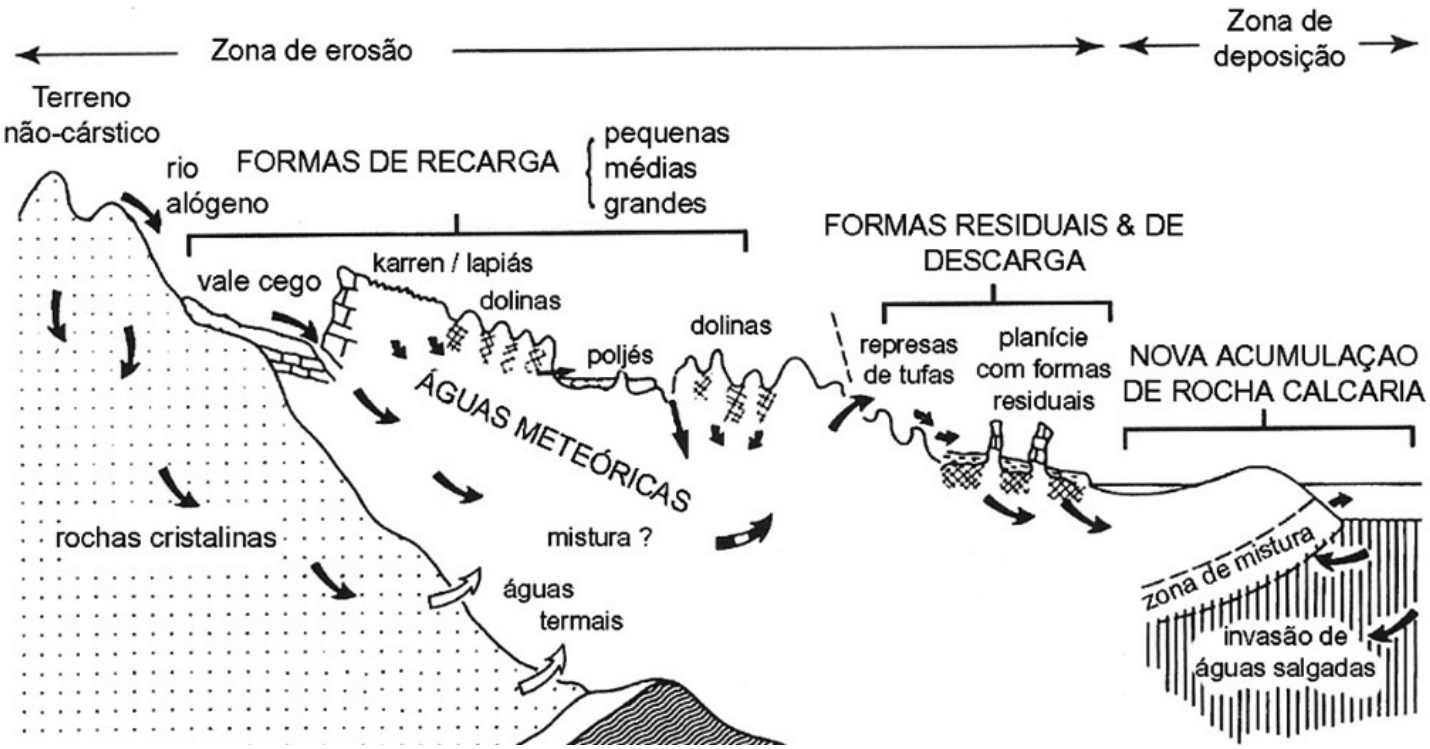


Figura 35 – O complexo sistema cárstico com a circulação da água, bem como as feições de superfície divididas em formas de recarga, residuais, descarga e de acumulação (Adaptado de Ford e Williams, 2007, p.3).

3.8.3. As formas de recarga

3.8.3.1. Os vales cegos (*Blind valleys*)

Um *vale cego* é uma feição fluviocárstica, considerada um vale fluvial que se fecha abruptamente à jusante, devido à existência de uma barreira natural que, ao invés de represar a água, a captura por meio de um sumidouro ou *ponor*. Às vezes, de acordo com Jennings (1985), um rio escava seu leito tão profundamente que nunca é capaz de transpor a barreira. Normalmente, o resultado é uma vertente que pode ter de algumas dezenas a centenas de metros. Sweeting (1972) destaca que, em carste exposto e formado por carbonatos altamente fraturados, rios de volumes significativamente grandes podem ser absorvidos quase imediatamente. Entretanto, em regiões onde o carste é menos fraturado e em outros com

Figura 36 – *Exemplo de um vale cego, na Eslovênia, onde a água do curso d'água superficial é capturada por um sumidouro em meio ao maciço encoberto por vegetação (Foto: L.E.P.Travassos).*

alguma cobertura, o rio pode fluir por distâncias consideráveis, elaborando a superfície até ser capturado, geralmente por um único *sumidouro*. Em um vale cego verdadeiro, toda água é drenada e desaparece mais ou menos no mesmo lugar e durante todo o ano.

3.8.3.2. Vales fechados (*Pocket valleys*)

Um *pocket valley* ou *reculée karstique* é um vale escavado por um rio que seja alimentado por uma nascente ou surgência. O que ocorre nessa feição é que, com o tempo, o vale se aprofunda e a porção à montante da nascente (cabeceira) recua, tornando-se mais alta e escarpada. É basicamente o oposto do que ocorre em um vale cego. Sweeting (1972) destaca que *pocket valleys* ocorrem em associação a nascentes de grande vazão localizadas mais próximas à base do maciço.

3.8.3.3. Vales secos (*Dry valleys*)

Os *vales secos* são os vales fluviais sem rios, que existem devido ao fato da água ter sido capturada por um sistema subterrâneo. Eles mantêm sua forma, visto que em seu nível de base ocorre dissolução acelerada pela convergência de água epicárstica. Em condições específicas, podem apresentar água intermitente em determinadas épocas do ano. Para Sauro (2008), o vale é criado devido à perda de água superficial, em função do soerguimento do maciço, da reativação tectônica ou de modificações climáticas (Figura 38). Sweeting (1972) destaca que, em regiões tropicais, os vales secos são menos numerosos, provavelmente em função de intensos processos de carstificação e precipitação elevada.

Figura 37- *Nascente do rio Una, na Croácia. Exemplo de um vale fechado com nascente de grande vazão próxima à base do maciço (Fotos: L.E.P. Travassos).*

3.8.3.4 Sumidouros (*Ponor*)

O termo *sumidouro* é amplamente utilizado para descrever um buraco, fissura ou rachadura tanto em maciços rochosos quanto nos contatos litológicos de uma região cárstica. No dicionário Michaelis da Língua Portuguesa um sumidouro é: 1) Abertura profunda por onde alguma coisa se some; escoadouro. 2) Lugar onde se perdem de contínuo os objetos. 3) Curso subterrâneo das águas de um rio, através de rochas calcárias. 4) Coisa em que se consome ou gasta muito dinheiro; sorvedouro e 5) Boca de esgotos nas sarjetas. Apesar de esse dicionário apresentar uma visão mais correta em relação às áreas cársticas, é preciso dizer que o sumidouro *não* é um rio subterrâneo. Ao contrário: um sumidouro é uma abertura por meio da qual o rio superficial é capturado para o subterrâneo. Sweeting (1972) destaca que existem sumidouros que são ligados a cavernas e que tendem a ocorrer em calcários que estão mais horizontalizados e subhorizontalizados; são os *ponors* em senso estrito. Já aqueles que ocorrem nas juntas, fraturas e em calcários com camadas mais verticalizadas, são chamados de *pot-holes*. Neste livro, achamos que, inicialmente, não devemos fazer tal distinção, pois os dois termos fazem referências às feições que capturam a água para o subterrâneo, não importando se o fazem horizontalmente ou verticalmente. São todos *sumidouros* ou *ponors* e podem ser capturados em pequenas e grandes aberturas na superfície (Figura 39, 40, 41 e 42) ou em cavernas na rocha (Figura 43 e 44).

Figura 39 – *Sumidouro ou ponor que leva a água superficial até as camadas mais horizontalizadas em uma região do carste romeno. Também vemos aqui um exemplo de vale cego (Foto: H. C. Kohler, in memorian).*

Figura 38 – *Vale seco em Dvi Grad, Croácia. Nota-se que o fundo do vale apresenta uma estrada vicinal e o leito do rio é utilizado para o cultivo agrícola (Foto: L.E.P. Travassos).*

Figura 40 – *Sumidouros de cerca de 1 metro na superfície do carste em Cordisburgo, Minas Gerais (Foto: L.E.P. Travassos).*

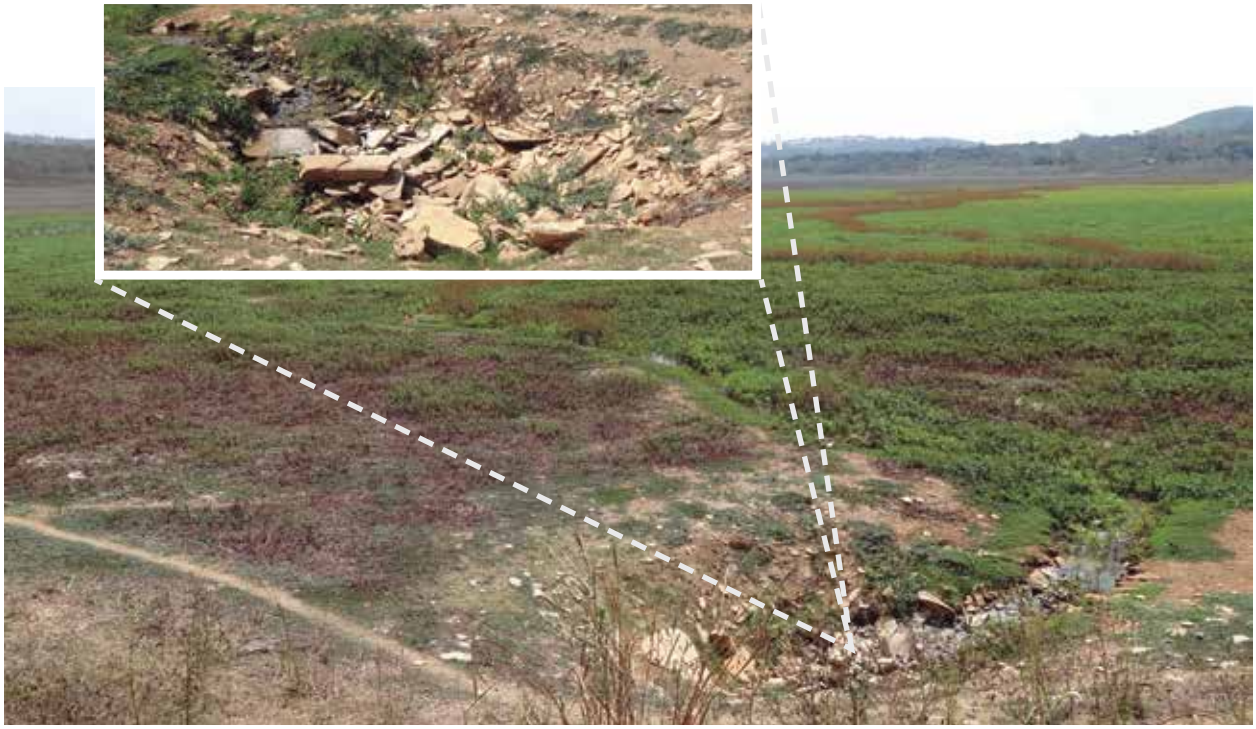


Figura 41 – *Um dos sumidouros da Lagoa do Sumidouro no Parque Estadual do Sumidouro, Lagoa Santa, Minas Gerais. Na primeira foto, é possível ver o ribeirão cruzando a planície e entrando no sumidouro, em destaque pela seta. Na outra foto, temos o sumidouro, no detalhe, com cerca de 6 metros de diâmetro (Foto: L.E.P. Travassos).*

Figura 42 – *Detalhe de um dos sumidouros do Lago de Cerknica, Eslovênia. O quadrado na foto mostra três adultos de cerca de 1,80 metros como escala (Foto: L.E.P. Travassos).*

Figura 43 – *Caverna funcionando como um sumidouro na região de Rakov Škocjan, Eslovênia. Nesta foto, o rio flui para dentro de uma caverna acessível ao homem (Foto: L.E.P. Travassos).*

Figura 44 – *Sumidouro do Cuba, nos limites do Monumento Natural Estadual Peter Lund, Cordisburgo, Minas Gerais (Foto: M.B. Timo).*

Figura 45 – *Aspecto geral de um campo de lapiás nos Alpes Apulianos, Itália (Foto: L.E.P. Travassos).*

Figura 46 – *Aspecto geral de um campo de lapiás na região de Itacarambi, norte do Estado de Minas Gerais (Foto: L.E.P. Travassos).*

3.8.3.5. As pequenas e médias feições em superfície: os *karren*

Consideradas formas de pequenas dimensões, iremos identificar agora os *karren*, conhecidos mais comumente, no Brasil, como *lapiás*. Tais feições, embora sejam menores se comparadas a outras existentes na paisagem cárstica, podem chegar a tamanhos de dezenas a centenas de metros, dependendo das condições específicas de sua formação. Tais condições incluem, por exemplo, o clima, a litologia, o volume e a agressividade da água. São, portanto, diferentes tipos de feições esculpidas na rocha pela dissolução.

Na literatura, os *karren* podem indicar "microfeições cársticas", mas Sauro (2008) acredita que isso deve ser evitado, uma vez que tais formas podem incluir uma ampla gama de tamanhos, que vão das nano às meso formas e, em alguns casos, às macro formas. DeWaele, Plan e Audra (2009) afirmam que são feições geralmente poligenéticas, criadas pela dissolução da rocha pela água, embora recebam contribuições dos processos de erosão por água, gelo, vento e agentes biológicos.

Ginés (1995) e Fornós e Ginés (1996) destacam que os *karren* são feições ainda mais significativas do que as dolinas para a caracterização superficial de uma paisagem cárstica. Muitas vezes, aparecem em conjunto, formando campos de lapiás ou *karrenfields* (Figura 45 e 46).

Para Ginés (2009), o interesse pelo estudo dos campos de lapiás teve início na segunda metade do século XIX, provavelmente pelo aumento das atividades de montanhismo e o valor cênico da paisagem alpina. Inicialmente, ocorreram as descrições de alemães e austríacos e, depois, as descrições em outros países. Interessante ressaltar, ainda, que o autor afirma que é preciso que a paisagem apresente um

mínimo de 50% de exposição da rocha para que a consideremos como um campo de lapiás. É óbvio, contudo, que é necessária a presença de continuidade hidrológica ao longo das rochas expostas, normalmente demonstrando um claro caminho em direção à parte mais inferior do maciço. Para Salomon et al. (1995), caso existam campos de lapiás ou *karren fields* encobertos por solo ou vegetação, há o que se convencionou chamar de *criptocarste*. Com os conceitos atuais, poderíamos dizer que o criptocarste seria justamente o *epicarste*.

Nas décadas de 1970 e 1980, percebemos o aumento do interesse por esse tipo de paisagem em conjunto, sendo seu estudo individualizado, uma vez que, em um campo de lapiás, é possível a identificação de vários tipos de *karren*. Neste livro, iremos nos concentrar nos exemplos mais comuns e encorajamos os leitores a se aprofundarem na obra mais recente dedicada exclusivamente ao estudo destas formas (GINÉS et al., 2009), especialmente em relação aos carbonatos. Entretanto, é possível identificar tais feições de dissolução em outras rochas, como arenitos e granitos (Figura 47), e sua gênese pode ter ocorrido não somente por dissolução pela água, mas por ter recebido contribuição de atividade biológica, outros ácidos, volume de água, clima etc.

Figura 47 – *Feições similares aos karren, de escala métrica em afloramento granítico na região de Rurópolis, Pará. O tamanho é de cerca de 2 metros da base ao topo (Foto: L.E.P. Travassos).*

Ford e Williams (1989; 2007) distinguiram pelo menos quatro grupos principais de *karren*, ou seja, aqueles que são basicamente 1) *formas planas circulares*, 2) *formas lineares controladas por fraturas*, 3) *formas lineares controladas hidrodinamicamente* e 4) *formas poligenéticas*. Já Sauro (2008) destaca ser possível organizar essa classificação em outras que, em nossa opinião, mudam realmente muito pouco: 1) *formas controladas predominantemente pela hidrodinâmica*, 2) *formas controladas predominantemente por fraturas e descontinuidades da rocha*, 3) *formas biocársticas* e 4) *formas complexas e poligenéticas*.

Todavia, Sweeting (1972, p.75) identifica alguns fatores que afetam a formação dos diversos tipos de *karren* e, por isso, acreditamos que não é tão simples, nem determinística, a proposta de Sauro (2008). Iremos utilizá-la para facilitar a identificação e a relação com os processos atuantes de destaque, mas não devemos esquecer os principais fatores de formação:

a) Natureza da reação química que envolve a rocha, o dióxido de carbono e a água;
b) Natureza, quantidade e distribuição da precipitação, seja ela na forma de chuva ou neve;
c) Natureza e textura da rocha, especialmente dos carbonatos;
d) A declividade da rocha e suas estruturas;
e) A natureza (ou ausência) da cobertura de solo e vegetação e,
f) Fases climáticas do passado, uma vez que muitas das feições podem se relacionar a esse passado climático.

Além disso, Lundberg (2013) afirma que, na gênese dos *karren*, existem pelo menos quatro fatores de controle em operação: 1) propriedades físicas da água (e.g. fluxo, tensão superficial e percolação), 2) propriedades químicas da água (e.g. água da chuva não alterada, agressividade aumentada e agressividade reduzida), 3) propriedades químicas da rocha (e.g. grau de solubilidade) e 4) propriedades físicas da rocha (e.g. grau de fraturamento e textura).

Assim sendo, por toda essa complexidade genética, os *karren* podem ser considerados formas de dissolução do relevo que são, provavelmente, as que mais chamam atenção no carste, por causa de seu impacto visual na paisagem. São essas formas que geralmente atribuem o caráter ruiniforme do carste. Inúmeros são os processos envolvidos na gênese dos *karren*, que são lentamente esculpidos pela água na rocha. Ginés (2009) destaca uma grande variedade de formas características, sendo extremamente difíceis de serem resumidas. Além desse autor, Veress (2010) destaca aspectos importantes da gênese dos *karren* em ambientes de alta montanha, bem como a evolução da terminologia. No caso específico do carste tropical brasileiro, alguns dos exemplos destacados por Veress (2010) não são facilmente observados.

Neste livro, apresentamos as feições mais comuns e evitamos destacar seus aspectos morfométricos, para não repetirmos os conceitos encontrados em vários outros trabalhos. Nós nos concentramos nos aspectos genéticos

e morfológicos mais facilmente identificáveis em campo e que são mais importantes para uma primeira abordagem. Ressaltamos, ainda, que é possível identificar subtipos de um mesmo tipo de karren, fato que não foi abordado neste livro, em função do seu foco principal de ser uma introdução ao estudo do carste. Para mais detalhes sobre a gênese dos diversos tipos de karren, aconselhamos a consulta aos trabalhos de Ginés et al. (2009) e Veress (2010), que apresentam sessões esquemáticas e mais ilustrações.

3.8.3.5.1. Formas controladas predominantemente pela hidrodinâmica:

» ***Kamenizta*** *(solution pans ou marmitas de dissolução)*: No carste, são as formas superficiais circulares ou elípticas, quase planas e lisas, que podem se localizar ou não ao longo de uma faixa à jusante dos *rillenkarren*. Desenvolvem-se devido ao fato de que, durante as chuvas, o escoamento superficial forma uma espécie de "camada" homogênea de água, capaz de nivelar a superfície por meio da dissolução. Podem aparecer juntas aos *rinnekarren* ou isoladas em um maciço (Figura 48). No interior, podem apresentar uma fina camada de solo ou vegetação, que podem favorecer a dissolução ao longo do tempo. Cucchi (2009) afirma que formas similares às *kamenitzas* podem aparecer em rochas não carbonáticas como granitos, basaltos e rochas metamórficas. Para o autor, tais feições recebem o nome de *copo* ou *cálice de corrosão (corrosion cups)*, tendo sido descritos por Mihevc (2001) na Eslovênia, e por Forti et al. (2001) em cavernas brasileiras.

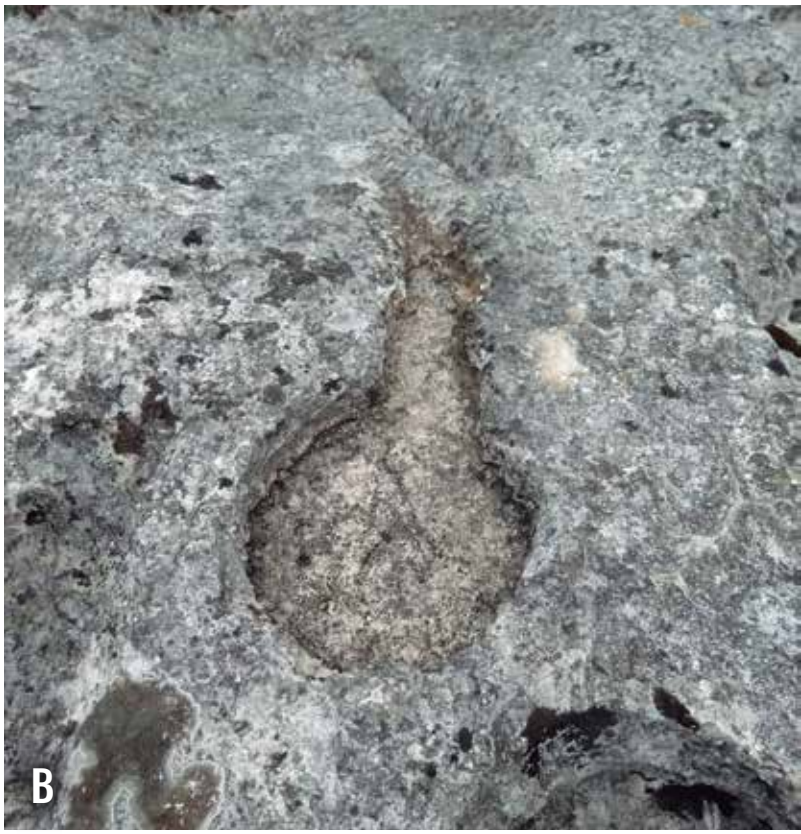


Figura 48 – *A) Kamenitza na região de Itacarambi, Minas Gerais. A escala no centro da foto tem 8 cm. Em B, kamenitza em afloramento próximo à Slivia, Itália. Seu diâmetro é de 15 cm (Foto: L.E.P. Travassos).*

Figura 49 – *Detalhe de rillenkarren ou lapiás em caneluras em um afloramento carbonático em Monjolos, Minas Gerais (Foto: L.E.P. Travassos).*

» ***Rillenkarren*** *(solution flutes – lapiás em caneluras)*: São as caneluras de dissolução ou lapiás em caneluras, geralmente de pequena escala, estreitas, retilíneas, organizadas de forma compacta e paralela, que têm início no topo de uma vertente ou afloramento e que se extinguem em direção à base, pois a água que escoa satura-se rapidamente. Desenvolvem-se basicamente em superfícies mais inclinadas ou quase verticais. De acordo com Veress (2010), consistem em uma série de pequenas caneluras paralelas cuja direção é idêntica a da fácie ou vertente. Apresentam forma parabólica (em "U") e, às vezes, em "V", sendo separadas por cristas afiadas (Figura 49).

Para Sweeting (1972), talvez sejam as feições mais comuns e que se formam mais rapidamente (em poucos anos ou meses) em rochas que foram expostas à chuva ou água do degelo. É importante destacar que a extensão das feições varia de acordo com a declividade, a quantidade de precipitação e a temperatura (BÖGLI, 1980; VERESS, 2010). Assim sendo, vários autores contribuíram para o estudo desse tipo de *karren*, entre eles, Sweeting (1972), Perna e Sauro (1978), Dunkerley (1979), Bögli (1960; 1976; 1980), Osmaston (1980), Jennings (1985), Ford e Williams (1989; 2007), Gines (1996), Mottershead (1996) e Vincent (1996). Ainda sobre os *rillenkarren*, bem como na maioria das feições cársticas, Lundberg e Ginés (2009) lembram que vários estudos morfométricos, aliados a outros geoquímicos auxiliam na compreensão de sua gênese, visto que são um produto de processos químicos, biológicos e mecânicos.

» ***Rinnenkarren*** *(solution runnels – lapiás em sulcos)*: São formas que consistem em canais lineares ou sulcos, que apresentam aumento de largura e profundidade em direção à base do maciço. Isso ocorre, pois o escoamento superficial passa a fluir de forma mais concentrada nos canais iniciais. Os rinnenkarren (runnels) se formam normalmente à jusante das

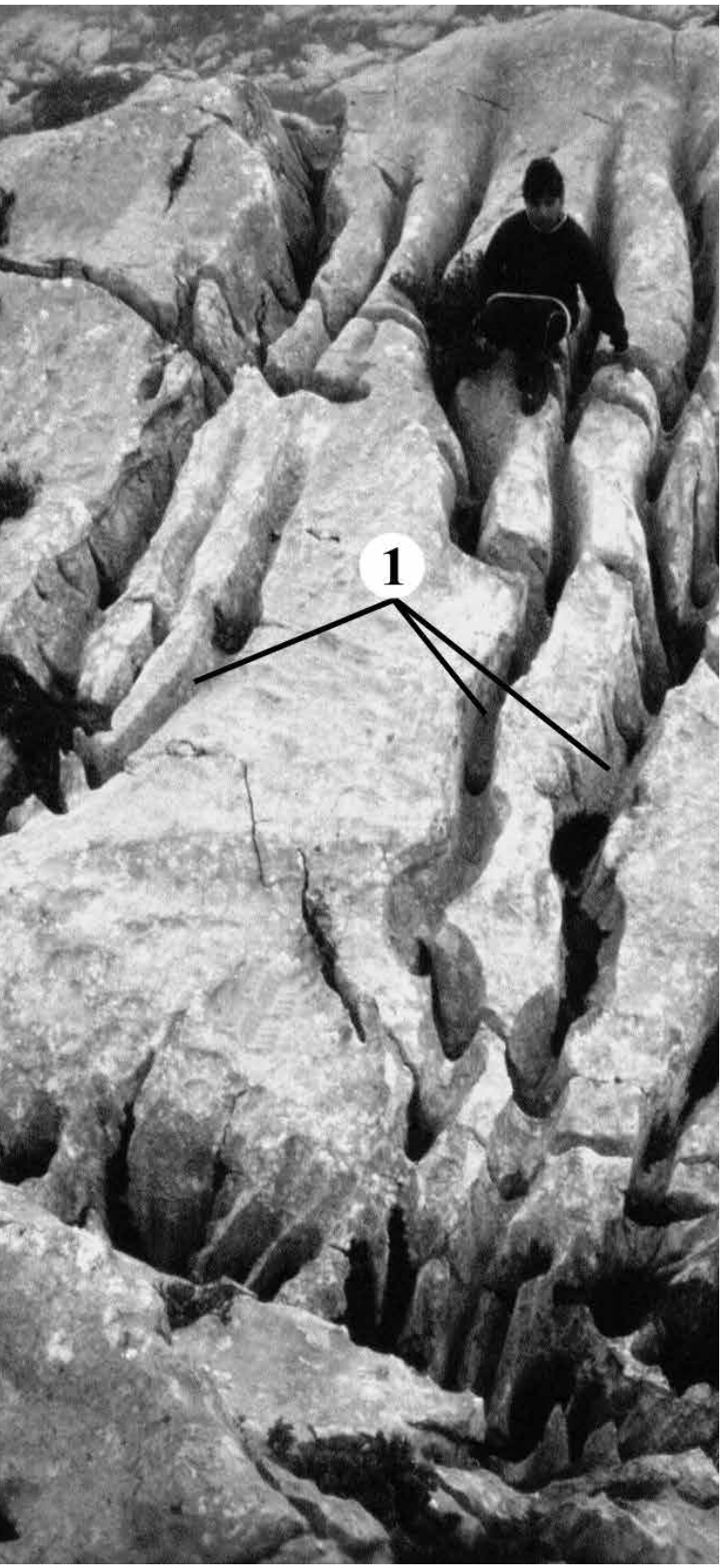


Figura 50 – *Aspecto geral de um rinnenkarren (1) em uma superfície carbonática (Foto: M. Veress; modificado de Veress, 2010, p.141)*

kamenitzas, como resultado desse escoamento superficial concentrado, tendo sua largura aumentada para jusante. Normalmente são característicos de vertentes mais inclinadas, porém não verticalizadas. Veress (2010) destaca que, assim como os *rillenkarren*, podem se desenvolver paralelamente, mas também de forma separada dos canais principais em vertentes mais suaves. Para Wagner (1950), citado por Veress (2009a; 2010), os *rinnenkarren* ocorrem em declividades que variam entre 30° e 90°, embora, na literatura, seja mais aceito o fato de que são os *Wandkarren* que ocorrem em vertentes mais abruptas (60 a 90°). Veress (2009a) lembra que Bögli (1976) afirmava ser possível identificar que a superfície remanescente entre os sulcos poderia ser plana ou arredondada, dando o nome, ao último tipo, *rundkarren*. Ainda de acordo com Veress (2009a), para a descrição desta feição é necessário considerar o ambiente de formação e a sua morfologia, que varia de acordo com a sessão de seus canais (Figura 50).

» ***Wandkarren*** *(wall-runnels – lapiás verticais)*: Ainda como feições formadas preponderantemente pela ação da água, os *wandkarren* são as ranhuras identificáveis em fácies verticais em um afloramento. São mais profundas que os lapiás em sulcos e podem ser separadas por superfícies não significativamente corroídas, bem como por ranhuras mais estreitas (Figura 51). De acordo com Bögli (1960), Ford e Williams (1989; 2007), Jennings (1985) e Veress (2009b; 2010), os *wandkarren* são criados pelo escoamento da água em superfícies verticais. São paralelos uns aos outros e um corte transversal revela uma sessão semi-circular. Para Veress (2010), pesquisadores alemães (e.g. Bögli, 1960) consideram esse tipo de *karren* uma forma independente.

No entanto, Ford e Williams (1989) e Jennings (1985) consideram esse tipo um subtipo de *rinnenkarren*. Aqui, adotamos o conceito alemão. Veress (2009b) afirma que é possível classificar os *wandkaren* em pelo menos quatro tipos: 1) *aqueles similares aos lapiás em fendas*; 2) *os lapiás verticais half-pipe*; 3) *o wandkarren cavernoso* e 4) *os lapiás verticais complexos*. Neste livro, acreditamos que a identificação inicial do tipo de karren é mais importante do que os desdobramentos em subtipos, que podem ocorrer dependendo da escala de análise de um futuro trabalho do leitor.

Figura 51 – *Detalhe de um paredão carbonático de cerca de 20 metros no norte de Minas Gerais, que se apresenta completamente sulcado verticalmente por lapiás do tipo wandkarren. É comum perceber que esse tipo de karren pode ser interrompido por lapiás horizontais ou Schichtfugenkarren (Foto: L.E.P. Travassos).*

» ***Craterkarren*** *(rainpits ou raincraters – crateras pluviais)*: Também chamados de lapiás alveolares, são pequenas concavidades subcirculares parecidas com cálices, que podem ter diâmetros de 1 a 5 cm e que, excepcionalmente, podem ter mais de 2 cm de profundidade. Geralmente aparecem em grupos e podem coalescer, dando impressão de uma superfície rochosa irregular. O processo de formação é relativamente simples e é a consequência do impacto das gotas de chuva na rocha (Figura 52). Destaque deve ser dado ao trabalho de Ginés e Lundberg (2009), que apresenta importantes considerações sobre a evolução do estudo, terminologia, classificação e hidrologia destas feições.

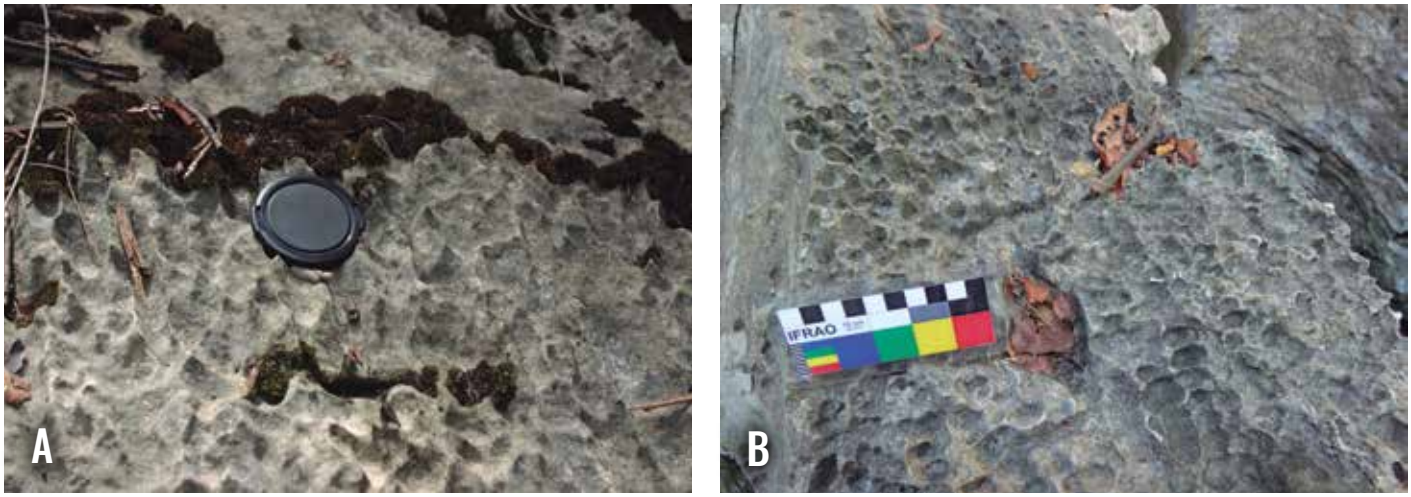


Figura 52 – *Rainpits em um bloco carbonático no Parque Estadual de Cerca Grande, Matozinhos, Minas Gerais. É importante destacar a contribuição biológica neste exemplo. Liquens se desenvolvem nas pequenas depressões ou alvéolos e podem contribuir para seu desenvolvimento. Em (A) a tampa da máquina fotográfica serve como escala e tem cerca de 6 cm; em (B) a escala possui 10 cm (Foto: L.E.P. Travassos).*

» ***Mäanderkarren*** *(meandering-runnels ou lapiás meandriformes)*: Ocorrem devido à dissolução da rocha em superfícies com baixa declividade e que possuem a forma de meandros similares àqueles identificados em canais fluviais (Figura 53). São uma variação dos lapiás em sulcos que são formados em função do aumento do tempo de permanência da água na superfície da rocha. Acontece, portanto, aumento da corrosão da superfície. Veress (2009c; 2010) destaca que são mais comuns em declividades de menos de 10°. Para esse autor, Bögli (1976), Jennings (1985) e Ford e Williams (1989) os classificam como um tipo especial de *rinnenkarren*. Além disso, podem ser classificados como falsos ou verdadeiros (VERESS, 2009c), quando o foco do estudo é a simetria da sessão do canal.

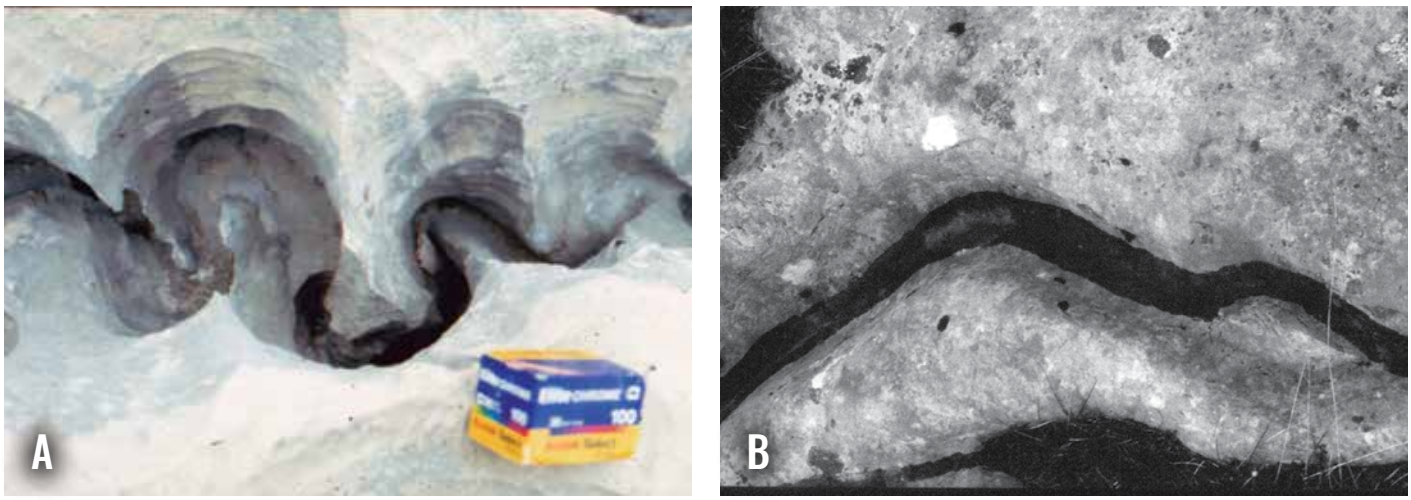


Figura 53 – *Exemplo de lapiás meandriformes verdadeiro em "a" e falso em "b" (Fotos: M. Veress; modificado de Veress, 2010, p.108; 111). A escala em "a" é de cerca de 8 cm.*

» ***Trittkarren*** *(heelprint karren – lapiás em degraus)*: Esse tipo de *karren* surge no maciço como pequenos "degraus" em superfícies de rochas expostas, mais planas ou inclinadas. Sua gênese pode ser explicada pelo movimento da água sobre pequenas irregularidades da superfície. A melhor tradução para o termo seria lapiás em degraus (*step karren* conforme WERNER, 1975), níveis de dissolução ou terraços de dissolução (Figura 54). Na verdade, a tradução para o português do termo inglês "heel", que mais se aproxima da forma em questão é, "calcanhar" ou "salto do sapato". Observando o modelo conceitual (Figura 55), parece que isso é correto, embora o termo proposto por Werner (1975) seja mais adequado para ser utilizado em língua portuguesa. Mais planas, seu mecanismo de formação pode ser explicado quando a água flui sobre a superfície plana, mas encontra uma escarpa ou irregularidade e o fluxo laminar, antes relativamente lento, torna-se rápido e turbulento, dando início ao recuo da pequena escarpa (Figura 54). Veress (2009d) destaca pelo menos 7 subtipos desse *karren*, mas acreditamos que apenas o conceito inicial de sua formação é necessário ao leitor deste livro neste momento.

Figura 54 – *Superfície carbonática coberta por trittkarren ou lapiás em degraus (Foto: M. Veress).*

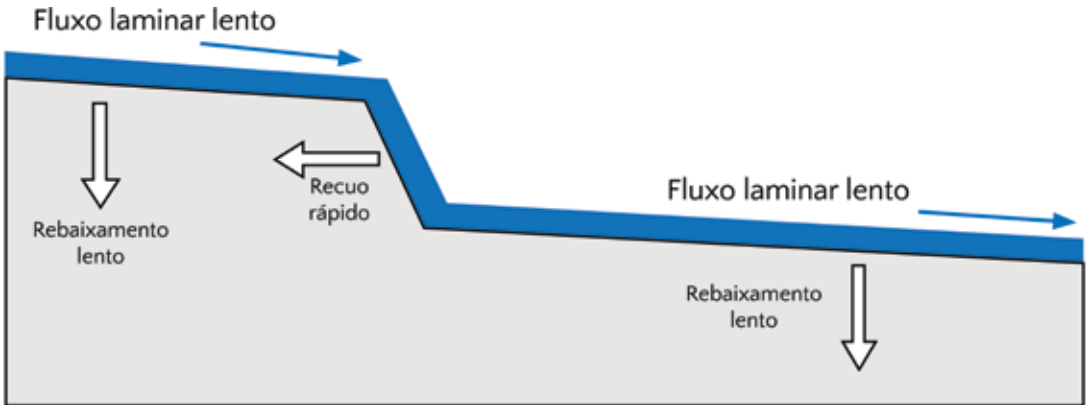


Figura 55 – *Modelo conceitual da evolução de um trittkarren. Adaptado de Sweeting (1972) e Sauro (2008)*

Figura 56 – *A) Exemplo de um trittkarren encontrado no Monumento Natural Estadual Gruta Rei do Mato, Sete Lagoas, Minas Gerais. A linha pontilhada tenta demonstrar o caminho percorrido pela água durante o processo de formação da feição, conforme modelo conceitual. B) Exemplo de trittkarren encontrado no carste de Monjolos, Minas Gerais (Fotos: L.E.P. Travassos).*

» ***Rillenstaine*** *(microrills ou lapiás em micro caneluras)* são ranhuras bem pequenas, com cerca de 1 mm de largura e comprimento centimétrico. São formadas pelo fluxo laminar de uma fina camada de água controlada por forças de capilaridade e vento, bem como pela gravidade. Tais micro canais podem se encontrar e desenvolver pequenas cristas e pontos entre eles.

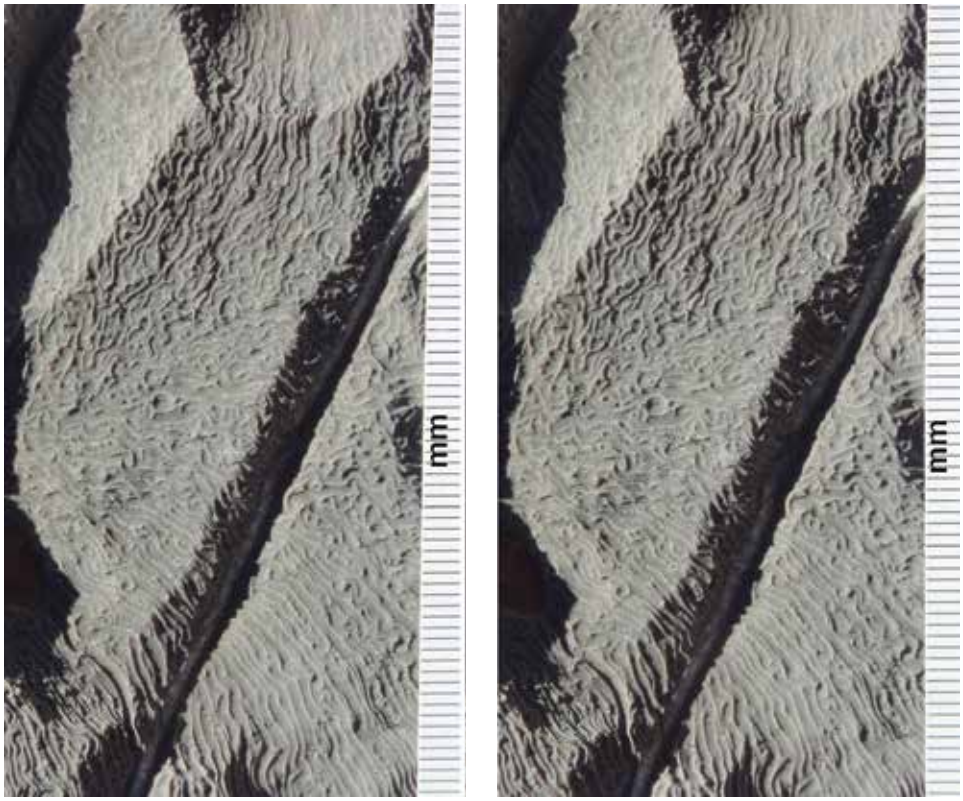


Figura 57 – *Par Estereoscópico de micro sulcos e microrredes sobrepostas a em rillenkarren maiores. Note-se como os micro sulcos continuam através das cristas e depressões dos rillenkarren maiores, o que está de acordo com o conceito de solução por uma fina película com efeitos de tensão de superfície, sugerindo, também, que a fina camada de água pode ter sido movida pela ação do vento (Fonte: GRIMES, 2012, p.24).*

3.8.3.5.2. Formas controladas predominantemente por fraturas e outras descontinuidades da rocha:

» ***Kluftkarren*** *(grikes – lapiás em fendas ou ranhuras)*: são as feições que se desenvolvem em superfícies preferencialmente horizontais ou sub-horizontais devido ao processo de dissolução e alargamento de descontinuidades, como as juntas, fraturas e diaclases (Figura 58). O tamanho e a profundidade são bastante variáveis e sistemas paralelos e complexos podem surgir conforme destacado por Bögli (1976), Jennings (1985) Ford e Williams (1989; 2007) e Veress (2010). Para Ford e Williams (1989; 2007), a estrutura da rocha, com suas fraturas, é a principal causa para a forma praticamente linear destes lapiás. É possível perceber em campo que o desenvolvimento desse tipo de *karren* pode ocorrer quando a rocha está encoberta por solo; depois ocorre a remoção da cobertura e o processo de dissolução e consequente alargamento continua durante a evolução do sistema (Figuras 59 e 60). Goldie (2009)

considera esse tipo de *karren* como sendo um fenômeno cárstico fundamental, pois, na paisagem, é a principal drenagem de água para porções mais profundas do epicarste, também podendo ser considerado como parte importante nesta zona do aquífero.

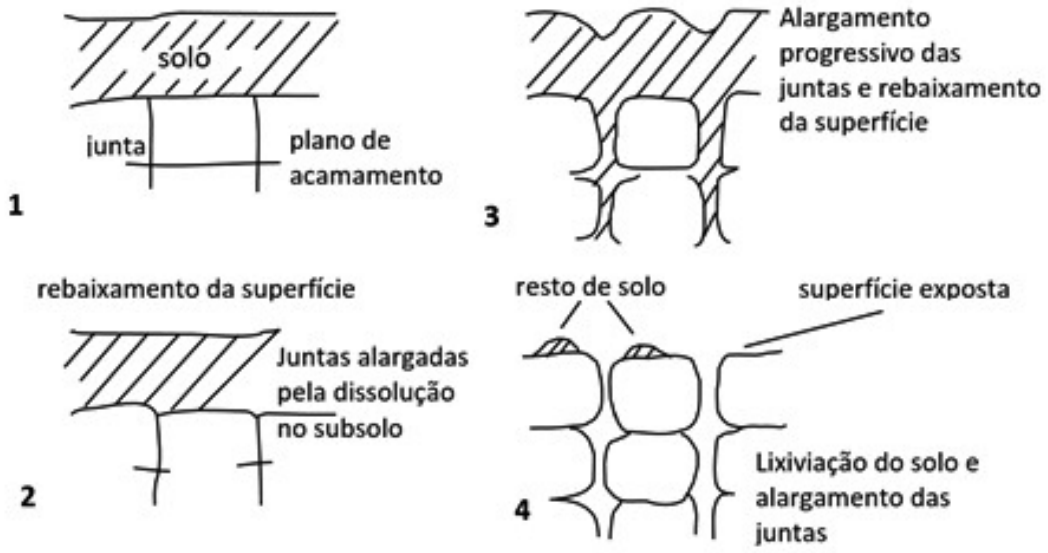


Figura 58 – *Modelo conceitual de formação de um Kluftkarren adaptado de Trudgill (1985) citado por Veress (2010, p.133)*

Figura 59 – *Kluftkarren iniciais na região de Montes Claros, Minas Gerais. A escala na foto é uma caneta esferográfica de cerca de 13 cm (Foto: L.E.P. Travassos).*

Figura 60 – *A) Juntas preenchidas por vegetação na região de Planina, Eslovênia. B) Kluftkarren em pavimento cárstico na Eslovênia. A escala na foto é uma tampa de máquina fotográfica com aproximadamente 6 cm (Fotos: L.E.P. Travassos).*

» ***Spitzkarren*** *(pinnacles – pináculos – lapiás em agulhas)*: são feições muito pontiagudas devido à dissolução de calcários altamente fraturados. A dissolução ocorre verticalmente, na parte superior dos *kluftkarren*, formando pontas afiadas que se destacam na paisagem do maciço (Figura 61). Para Bögli (1976), citado por Veress (2010), esse tipo de karren são formas remanescentes dos *kluftkarren* e dos *rinnenkarren*, embora Trudgill (1985) não aceite essa ideia.

Figura 61 – *Detalhe de um paredão carbonático, com seus spitzkarren no topo. Pains, Minas Gerais (Foto: L.E.P. Travassos).*

Figura 62 – *Detalhe de feições do tipo Schichtfugenkarren em parte de um afloramento próximo à gruta da Lapinha, Parque Estadual do Sumidouro, Lagoa Santa, Minas Gerais. Nesta foto, a distância da abertura dos karren é de aproximadamente 35 cm (Foto: L.E.P. Travassos).*

» ***Schichtfugenkarren*** *(bedding plane karren – lapiás em planos de acamamento ou lapiás horizontais)*: são os lapiás desenvolvidos a partir da dissolução preferencial, ocorrida nos planos de acamamento horizontais ou sub-horizontalizados do pacote rochoso. Nas figuras 62 e 63, a seguir, são as feições de dissolução que aparecem horizontalmente.

3.8.3.5.3. As formas biocársticas

» ***Biokarstic borings*** *(perfuração biocárstica)*: formas consideradas *nanokarren* e que são produzidas pela atividade biológica de organismos, como bactérias, cianobactérias, algas, fungos, liquens e raízes. Segundo a literatura, podem apresentar menos que 1 mm, mas podemos encontrá-las em outras dimensões. Na verdade, inicialmente podem ter sido *nanokarren*, mas com a evolução da paisagem, aumentaram de tamanho devido à dissolução da rocha. Lundberg (2012) afirma que para o desenvolvimento destas feições, a atividade biológica possui papel ativo e primordial, fazendo com que as perfurações sejam microscópicas, milimétricas e centimétricas.

» ***Rundkarren*** *(rounded runnels – lapiás em sulcos arredondados)*: formados quando a rocha estava coberta por uma camada fina de húmus ou pela vegetação (serapilheira), conforme Figura 64. São similares, em tamanho, aos *rinnenkarren*, mas as bordas entre uma canelura e outra são bem

Figura 63 – *Detalhe de parte de um paredão carbonático de cerca de 20 metros, com seus Schichtfugenkarren. Pains, Minas Gerais (Foto: L.E.P. Travassos).*

mais arredondadas (Figuras 65 e 66). A superfície do maciço também pode ser arredondada pela ação da água abaixo da fina camada de cobertura e dissolve o calcário, conferindo um aspecto mais arredondado ou polido, bem menos afiado que os outros tipos de lapiás (Figura 67).

Figura 64 – *Detalhe de um pequeno afloramento coberto por serrapilheira. A água, ao circular entre essa fina camada de cobertura e a rocha, confere a característica arredondada dos rundkarren. Caetanópolis, Minas Gerais (Foto: L.E.P. Travassos)*

Figura 66 – *Exemplo de rundkarren na Montanha Jinfo, China. Neste exemplo, é possível notar a cobertura parcial de vegetação, serapilheira e neve (Foto: L.E.P. Travassos).*

Figura 65 – *Detalhe de parte de um bloco carbonático, que apresenta rundkarren em toda a sua extensão no Carste de Wulong, China. A escala na foto é de 8 cm (Foto: L.E.P. Travassos).*

Figura 67 – *Lapiás em sulcos arredondados no maciço da Lapinha, Parque Estadual do Sumidouro, Lagoa Santa, Minas Gerais. Na foto, é possível identificar lapiás aveolares (Foto: L.E.P. Travassos).*

» ***Wurzelkarren*** *(root groves – entalhes de raízes)*: esse tipo de karren é aquele que se desenvolve tanto pela ação mecânica das raízes quanto pela ação química dos ácidos produzidos pela atividade biológica. Para Veress (2010), são pequenos tubos, cavidades e ranhuras na rocha. Na Figura 68 é possível identificar sulcos à esquerda das raízes no cento da foto. É de se esperar, também, que a água passe a fluir preferencialmente entre a raiz e a rocha, contribuindo, assim, para a dissolução da última.

Figura 68 – *Wurzelkarren na região de Monjolos, Minas Gerais. (Foto: L.E.P.Travassos).*

3.8.3.5.4. Formas complexas e poligenéticas

» ***Karrentischen*** *(limestone pavements – pavimentos calcários)*: de acordo com a literatura são superfícies suavemente inclinadas e separadas por fissuras verticais e profundas. Para Veress (2010), são superfícies truncadas por glaciares, que apresentam caneluras e fendas. Dependendo do tempo de exposição ao intemperismo, podem apresentar formas mais arredondadas e menos agudas (Figuras 69 e 70).

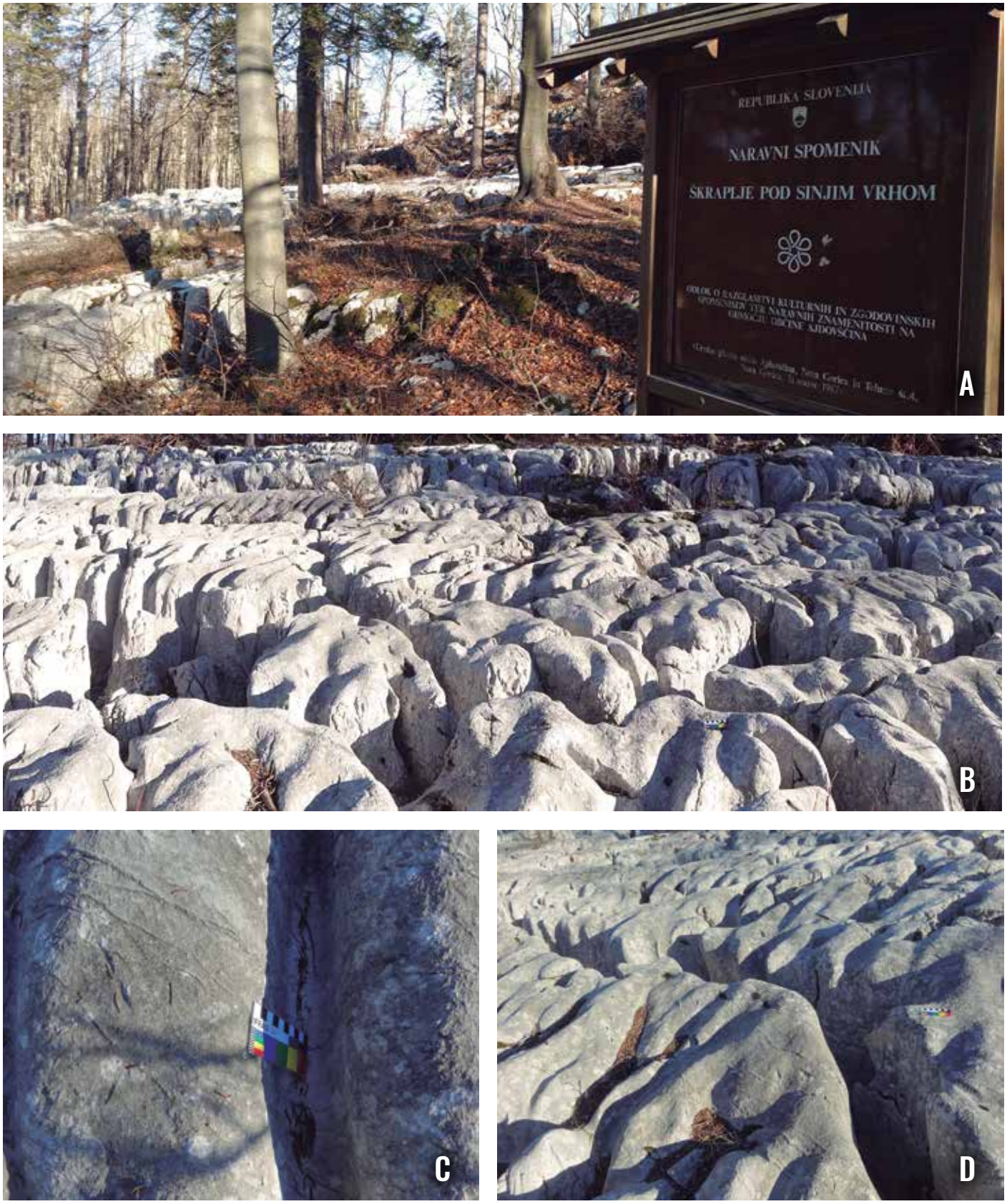


Figura 69 – *Detalhes do pavimento calcário próximo à vila de Col, Eslovênia. A) Detalhe da placa indicando que o local é um Monumento Natural protegido por lei. B) Visão panorâmica do local de interesse geológico. C) Detalhe de uma seção do pavimento calcário demonstrando o arranjo espacial dos lapiás. D) Detalhe da profundidade média das feições. A escala nas fotos tem 10 cm (Fotos: L.E.P. Travassos).*

Figura 70 – *Comprovação da característica poligenética do mesmo pavimento calcário da figura 69. Nas fotos é possível perceber acumulo de vegetação que auxilia no aumento da agressividade da água. A escala na foto tem 10 cm (Fotos: L.E.P. Travassos).*

» ***Stone forests*** *(florestas de pedra)*: as florestas de pedras são um complexo tipo de pináculos e torres de rocha esculpidas, assim como os *karren*, em superfície. A diferença aqui está no fato de que as formas se apresentam inicialmente mais arredondadas, por terem sido dissolvidas quando encobertas por sedimentos ou solo. São, portanto, formas subcutâneas. De maneira geral, Chen et al. (1986), citados por Veress (2010), afirmam que essas "florestas" consistem em "dentes" de rocha que se desenvolveram sob um regime climático abundante em chuvas e por um longo período que favoreceu a dissolução. Podemos chamá-las de *conjunto de lapiás (karren assemblages)*, devido ao fato de apresentarem diversos tipos de *karren* que, juntos, apresentam uma paisagem peculiar, da mesma forma que os campos de lapiás em superfície. Em muitos casos, as formas inicialmente arredondadas deram lugar a feições mais pontiagudas, devido à exposição da rocha aos processos intempéricos e erosão. As florestas de pedra são bem conhecidas na China (*Kunming*), na Malásia (*Sarawak*), em Madagascar (*Bemaraha*) e em Malorca. Todos estes exemplos foram expostos há muito mais tempo do que os exemplos existentes na Eslovênia

(descobertos quando da construção de rodovias) e no Parque Estadual do Sumidouro, em Lagoa Santa, em uma mineração desativada. Knez e Tadej (2013) afirmam que o desenvolvimento das florestas de pedra e suas dimensões são condicionadas por fatores geológicos, gemorfológicos, hidrogeológicos e climáticos. A água da chuva penetrando no carste é, basicamente, o fator decisivo na sua formação. No entanto, em algumas regiões, a gênese é afetada pela oscilação do nível de base hídrico. De acordo com Salomon (2006), são paisagens soberbas, com conjuntos de *spitzkarren*, podendo ser chamadas de carste em pináculos ou *tsingy* (Figuras 71, 72, 73, 74, 75 e 76).

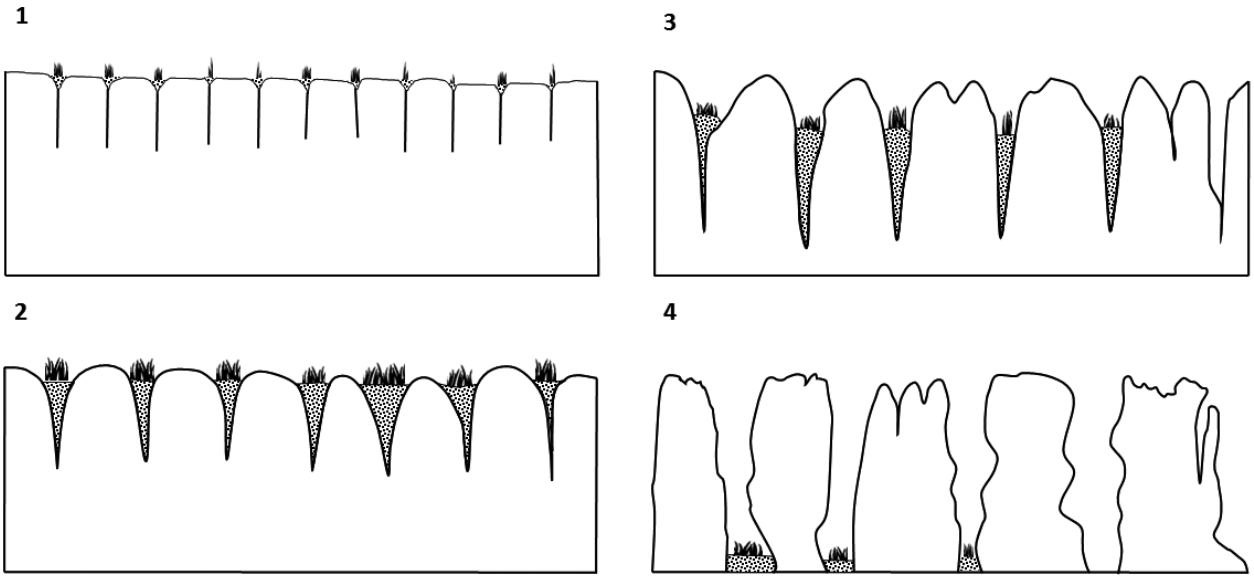
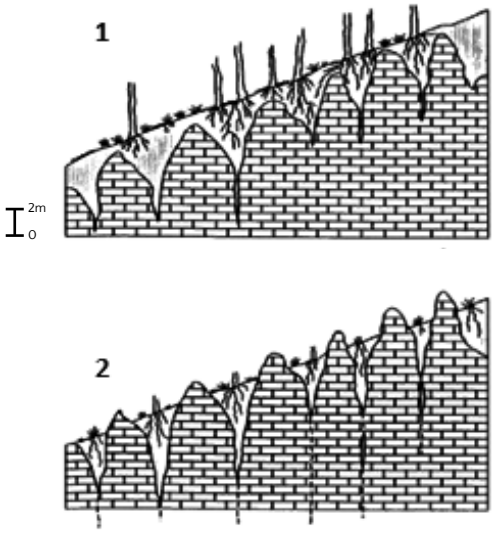


Figura 71 – *Os diferentes estágios evolutivos de uma "floresta de pedra". 1) Superfície calcária fissurada original. 2-3) Erosão subsuperficial, alargando as fissuras e formando os "dentes de pedra". 4) Desenvolvimento de estágio avançado da floresta de pedra (Modificado de Sweeting, 1995, p. 129).*

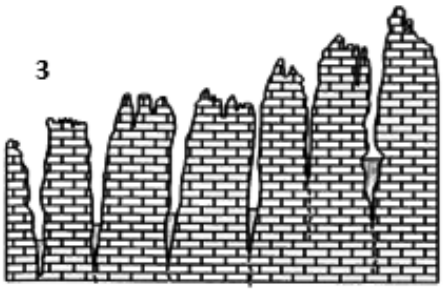


Fase do criptocarste com cobertura pedológica e alterita. Presença possível de floresta.

O carste se desenvolve preferencialmente em função de diaclases e fraturas.

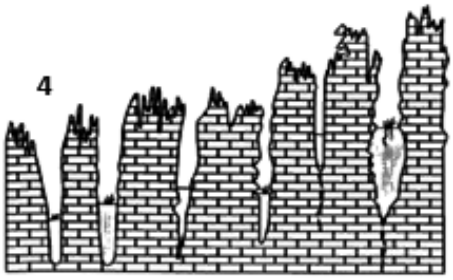
Fase dos "dentes de dragão"

Remoção da cobertura pela erosão e emergência das feições de dissolução (*rundkarren*)



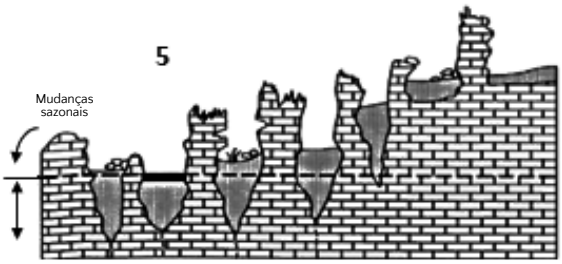
Fase dos pináculos e relevos ruiniformes

Individualização dos pilares e torres com desenvolvimento de *rillenkarren*



Fase dos 'tsingy'

Alcançada quando os calcários são puros e muito expostos às intempéries ao longo de muito tempo. Alargamento e desenvolvimento de *kluftkarren* e vegetação



Fase evoluída

Paisagem com torres isoladas, corredores alargados e com blocos abatidos e terra. É possível a emergência de água em pontos mais baixos.

Figura 72 – *Os diferentes estágios evolutivos da morfologia de uma "floresta de pedra" (SALOMON, 2006, p. 153).*

Figura 73 – *Lapiás arredondados do tipo "dente de dragão", próximos à base de pesquisas do sistema subterrâneo de Haiyang-Zhaidi, Guangxi, China (Foto: L.E.P. Travassos).*

Figura 74 – *Tipo de "tsingy", ou floresta de pedra em pináculos, na região de Monjolos, Minas Gerais. Nesta foto, é possível identificar lapiás do tipo vertical, horizontal, em agulhas etc. (Foto: L.E.P. Travassos).*

Figura 75 – *Vista parcial de uma floresta de pedra chinesa na região de Chongqing. No detalhe é possível perceber de que forma os sedimentos preenchem as descontinuidades e de que forma sua exposição pode contribuir para a paisagem de pináculos no futuro. Nas imagens, ainda é possível perceber a presença de lapiás horizontais ao longo dos planos de acamamento (Foto: L.E.P. Travassos).*

Figura 76 – *Floresta de pedra no Parque Estadual do Sumidouro, Lagoa Santa, Minas Gerais. Assim como as florestas de pedra descobertas na Eslovênia, esta foi exposta à dissolução externa muito mais recentemente do que aquelas que apresentam feições mais pontiagudas. Neste caso específico, os "pilares" somente foram expostos em função da atividade minerária que, em alguns casos, não preservou a forma como conhecida em outros exemplos mais "clássicos" (Fotos: L.E.P. Travassos).*

Outros exemplos em meio tropical são as florestas de pedra em Lunan, Província de Yunnan, China (*Shilin*), que foram inscritas como Patrimônio da UNESCO e que atraem milhões de visitantes por ano. Além dos *tsingy*, é possível identificar – na literatura e em campo – outros exemplos de florestas de pedra que recebem o nome de "dentes de cão", como os exemplos encontrados em Cuba. A formação destes "mega lapiás" exige condições litológicas particulares (e.g. pureza do calcário), assim como sua evolução ao ar livre recente e ausência de gelo, que destruiria as feições.

Com o exposto, é possível perceber quão complexo e fascinante é o estudo dos diferentes tipos de lapiás, pois sua gênese não é condicionada a somente um fator. Nesta seção, tentamos destacar os tipos mais fácies de serem identificados em campo e encorajamos o leitor a se aprofundar mais na literatura disponível.

3.8.3.6. As meso e macro feições na superfície

3.8.3.6.1. As dolinas

Muitos autores consideram as dolinas como sendo as feições mais típicas e representativas da paisagem cárstica. Por esse motivo, talvez, sejam as mais conhecidas e estudadas quando o foco das pesquisas é o carste. São formas geométricas circulares ou ovais, que normalmente possuem largura maior que a profundidade. Vêm sendo descritas em detalhes desde o final do século XIX e são, em sua maioria, dolinas de dissolução. Entretanto, podem apresentar-se como dolinas de colapso, entre outros vários tipos. Alguns autores optam por classificar as dolinas de acordo com sua forma; outros, de acordo com os mecanismos de sua gênese.

Para se ter uma ideia da complexidade dos estudos relacionados às dolinas, Panoš (2001), citado por Kranjc (2013), destaca a existência de cerca de 35 tipos de dolinas e as classifica de acordo com seus estágios de evolução, processos de gênese, tipo de sedimento de cobertura, fatores climáticos, depósitos internos e forma. Já Williams (2004) compilou e sintetizou, a partir da literatura disponível, seis tipos principais de dolinas: 1) as de dissolução, 2) as de colapso ou abatimento, 3) as encobertas ou enterradas (buried), 4) as encobertas por rocha (caprock doline), 5) as de sufusão (suffosion) e 6) as de "abandono" (dropout). Desses tipos, Kranjc (2013) destaca os dois que não apresentam pontos totalmente convergentes entre os autores, mas que são os tipos mais facilmente identificados no terreno em uma primeira e rápida abordagem: as dolinas de dissolução e as dolinas de abatimento ou colapso (Figura 77).

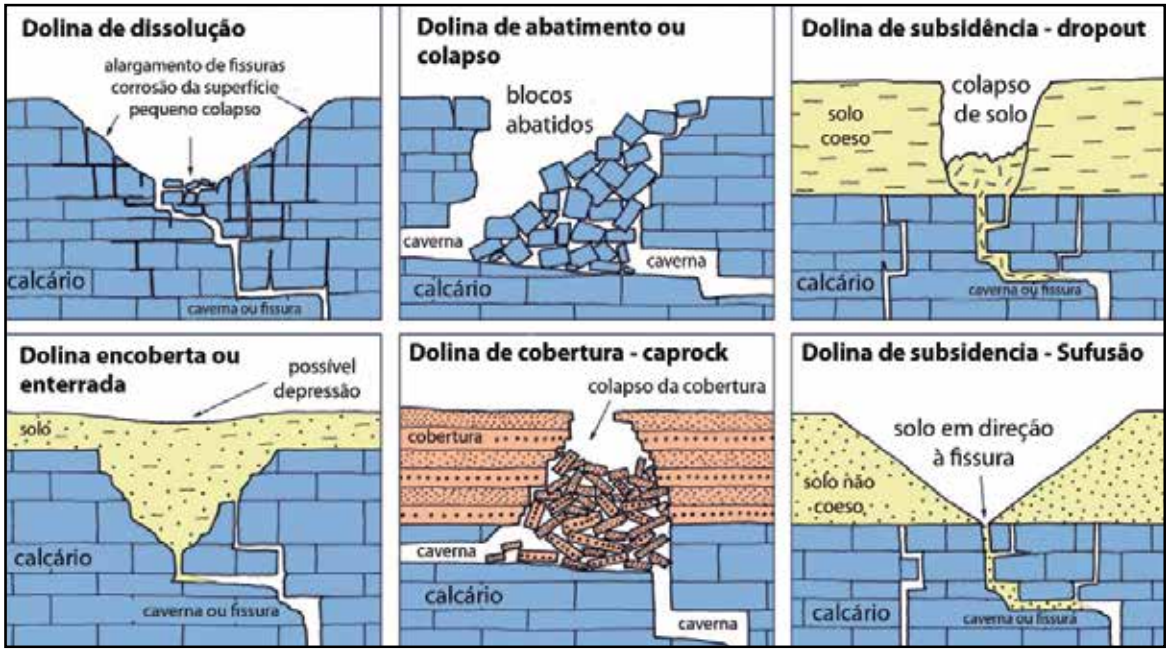


Figura 77 – *Modelos conceituais de classificação de dolinas conforme mecanismos genéticos (Adaptado de WALTHAM; FOOKES, 2003, p. 106; WALTHAM, 2008b, p.292).*

DeWaele, Plan e Audra (2009) destacam a existência de que se formam devido ao colapso da rocha, bem como ao colapso de material consolidado ou inconsolidado, que pode estar encobrindo o carste. Muitas das dolinas de colapso passaram a ser estudadas e melhor compreendidas em função do seu impacto na sociedade e ocorrem justamente em razão das atividades antrópicas, como bombeamento de água subterrânea, mineração e problemas relacionados à drenagem urbana. São, portanto, importantes variáveis no estudo dos riscos geológicos de uma área.

Sobre a nomenclatura, é preciso realizar uma breve intervenção. Por muitos anos, o termo *sinkhole* foi utilizado internacionalmente para designar as dolinas. Entretanto, assim como o termo *uvala* e *polje* vêm sendo utilizados em sua língua original, acreditamos que o termo dolina deva ser igualmente utilizado em sua forma original.

a) Dolina de Dissolução

Como o próprio nome sugere, esse tipo de dolina é formado quando o processo envolvido em sua gênese e evolução é a dissolução ou corrosão da rocha. Para Waltham e Fookes (2003), esse processo genético pode ser auxiliado por pequenos colapsos. As dolinas de dissolução são consideradas formas "normais" em uma paisagem cárstica, onde a dissolução é um processo fundamental na escala de tempo geológico (Figura 78).

Kranjc (2013) destaca que o processo é mais intenso quando a recarga difusa permite que a água ataque diretamente a rocha exposta ou a rocha logo abaixo do epicarste. Fendas, fraturas, juntas, falhas e planos de acamamento são os locais preferenciais por onde a água penetra na rocha. Em áreas de calcário altamente fissurado, por exemplo, existem mais dolinas menores, enquanto em áreas de rochas mais maciças e menos fissuradas, grandes dolinas ocorrem (WILLIAMS, 2004).

A distribuição das dolinas em uma área está intimamente relacionada à estrutura geológica. Assim sendo, é comum perceber alinhamentos de dolinas ao longo de uma linha tectônica ou planos de falha. O fundo é geralmente coberto por uma camada de sedimentos finos, como resultado de detritos não solúveis, bem como outros tipos de materiais do entorno, que foram levados por ação da água, gelo ou vento. Em alguns casos, tais feições podem ser modificadas pela ação antrópica e, portanto, seus sedimentos de fundo podem apresentar quantidades e características diferentes (Figura 79).

Figura 78 – *Dolina de dissolução exposta pela atividade de mineração na Eslovênia. Nota-se claramente a dissolução da rocha formando a depressão (Foto: L.E.P. Travassos).*

Figura 79 – *Dolinas de dissolução com fundo preenchido por sedimentos e utilizadas para plantio de hortaliças na região da Ístria, Croácia (Foto: L.E.P. Travassos).*

Kranjc (2013) destaca que, no trabalho de Cvijić (1893), existe um capítulo chamado *Dolinen* no qual o autor identifica não somente as dolinas, mas também, outros tipos de depressões fechadas existentes, como algumas nascentes cársticas. Contudo, aquele autor deixa de fora desse capítulo as *uvalas* e *poljes*, que foram estudas separadamente.

As dolinas das áreas tropicais úmidas podem alcançar dimensões significativas. Nesse caso, a evolução dos pequenos vales encaixados nas vertentes tende a convergir para o fundo da depressão e pode formar ou delimitar um perímetro de forma estrelada ou poligonal, em alternância com morros mais arredondados. Essas feições são as grandes dolinas de dissolução existentes em algumas regiões da China e da Jamaica que, em conjunto, recebem o nome de carste *poligonal* ou carste em *cockpit*. Segundo Kranjc (2013), isso seria o sinônimo para uma dolina tropical de grandes dimensões, embora o mesmo autor afirme que um grande número dessas dolinas apresente propriedades que as deixariam mais próximas de uvalas do que uma dolina de dissolução propriamente dita. Para Sauro (2008), essas feições mostram uma diferença notável entre o desnível máximo e a profundidade dos morros que as circundam. Afirma, ainda, que os perímetros dos *cockpits* são geralmente adjacentes uns aos outros, dando origem ao relevo cárstico poligonal.

b) Dolina de Colapso ou Abatimento

Formadas essencialmente pelo rápido colapso da rocha, inicialmente apresentam-se com paredes abruptas e, muitas vezes, são as entradas de cavernas. Em outros casos muito mais comuns, são formadas pelo o abatimento do solo e não da rocha (Figura 80). Isso ocorre, posto que os "pacotes" carbonáticos são geralmente bem resistentes e eventos de abatimentos de tetos de cavernas em larga escala são mais raros. Para Waltham e Fookes (2003), o que ocorre com mais frequência são os abatimentos em pequena escala, tanto na superfície

Figura 80 – *Dolina de abatimento de solo no município de Unaí, Minas Gerais (Foto: Mauro Gomes, CECAV-MG).*

quanto no subterrâneo, que auxiliam na carstificação e em futuros colapsos. Sendo assim, os autores destacam a íntima relação entre as dolinas de dissolução e as de abatimento. No caso das dolinas de abatimento da rocha, com o tempo as paredes são aplainadas e apresentam-se mais inclinadas e menos abruptas por causa dos processos de intemperismo e erosão. As dolinas de abatimento são menos comuns do que as dolinas de dissolução e sua frequência deve ser pensada em função da escala de análise, bem como ao tipo de carste.

Kranjc (2013) destaca que na China, por exemplo, existem muitas imensas dolinas de abatimento que chegam a ter mais de 500 metros de profundidade e volumes que excedem 100 milhões de m^3. São tão específicas de uma região, que recebem o seu próprio nome e a comunidade carstológica mundial tende a inserí-lo na terminologia internacional: *tiankeng* (tian= céu, natureza; keng= buraco). Xuewen e Weihai (2006) afirmam que o estudo das *tiankengs* apresenta importantes implicações para a hidrogeologia e geomorfologia cársticas, bem como para o estudo dos processos neotectônicos. Onde esse tipo de dolina se desenvolve, é possível relacionar um sistema hidrodinâmico poderoso com a sua gênese (Figura 81, 82 e 83).

Figura 81 – *Extenso cockpit no carste tropical, Guangxi, China (KRANJC, 2013, p.107)*

Figura 82 – *Parte de uma dolina de colapso no Carste de Wulong, Chongqing, China. É possível observar paredes abruptas bem como material acumulado no fundo e recoberto por vegetação (Foto: L.E.P. Travassos).*

Figura 83 – *As famosas dolinas das cavernas de Škocjan, Eslovênia (Foto: L.E.P. Travassos).*

c) Dolina Encoberta ou Enterrada (buried doline)

Esse tipo de depressão é uma dolina de dissolução normal, completamente preenchida por sedimentos. Na superfície não existem evidências de dissolução e, por isso, são passíveis de identificação somente por meio de métodos geofísicos e/ou geotécnicos e escavação (Figura 84). Williams (2004) afirma que, em alguns casos, os sedimentos existentes podem apresentar valor econômico, sendo ricos em bauxita.

d) Dolina Encoberta por Rocha

É possível considerar esse tipo como um subtipo das dolinas de abatimento, visto que, de acordo com Kranjc (2013), o processo de abatimento é o mesmo. Uma abertura no calcário cresce, o teto se torna muito fino ou muito fraco e o colapso ocorre. Contudo, destaque deve ser dado ao fato de que, nesse caso, o carbonato é encoberto por outro tipo de rocha não carbonática.

e) Dolina de Subsidência

As dolinas de subsidência são depressões fechadas similares às dolinas de dissolução, porém, encobertas por uma camada de sedimentos. É desenvolvida a partir da evacuação da cobertura de sedimentos em direção a uma abertura abaixo da superfície, que podem ser condutos na rocha (Figuras 85 e 86). O resultado é uma subsidência rápida ou gradual. Kranjc (2013) destaca que quando o processo ocorre em sedimentos coesos e de forma repentina, este recebe o nome de *dropout* ou de *abandono*. Já nos processos ocorridos em sedimentos pouco coesos, as parcelas de argila tendem a se mover lentamente nas cavidades existentes abaixo, enquanto outras parcelas do solo tendem a ficar na superfície. Esse último processo recebe o nome de dolina de sufusão *(suffusion doline)*.

Figura 84 – *Exemplo de dolina encoberta em afloramento minerado em João Pessoa, Paraíba, Brasil. A linha tracejada mostra o limite da dissolução no carbonato e comprova a impossibilidade de se ver a depressão na superfície (Foto: L.E.P. Travassos).*

Figura 85 – *Dolina de subsidência em área residencial no município de Matozinhos, Minas Gerais. No detalhe é possível identificar o conduto por onde o material de cobertura teria sido drenado (Foto: L.E.P. Travassos).*

Figura 86 – *Exemplo de dolina de sufusão em uma planície eslovena (Foto: L.E.P. Travassos)*

No Brasil, Sallum Filho (2009) dedica um capítulo de um livro organizado por Tominaga, Santoro e Amaral (2009) para focar nos exemplos nacionais, principalmente em São Paulo. Tal trabalho destaca casos que tiveram projeção nacional na mídia em função de suas dimensões e devido ao fato de ocorrerem em áreas mais habitadas (Tabela 1). É importante ressaltar, contudo, que muitas outras dolinas desse tipo podem ocorrer em áreas menos densamente povoadas e, por isso, passarem despercebidas do público em geral.

3.8.3.6.2. As uvalas

A terminologia em língua eslovena afirma que *uvala* é uma depressão fechada, normalmente menor que um *polje* e maior que uma *dolina*. O termo foi introduzido internacionalmente por Cvijić (1901). Em sérvio, significa um vale ou abertura entre duas montanhas ou elevações (KRANJC, 2013). Geralmente são formas alongadas e irregulares, que podem atingir extensões de escala quilométrica localizadas acima do nível de base do carste regional. Sua base (ou fundo) é normalmente ondulado ou irregular por apresentar dolinas e sumidouros. Em outros casos, podem ser aplainadas por sedimentos coluviais. Sua origem e desenvolvimento são fortemente condicionados por fatores estruturais e elas podem ser inundadas, ou não, apresentando um lago temporário (Figura 87).

No Brasil, por muitos anos convencionou-se dizer que duas ou mais dolinas dariam origem a uma *uvala* que daria origem a um *polje*. Na verdade, pesquisas mais recentes têm demonstrado que esse conceito precisa evoluir um pouco mais e não se limitar, como afirma Kranjc (2013), a um conceito estritamente morfológico. Para Ćalić (2009; 2011), diferentemente das dolinas, que apresentam a drenagem concentrada para somente um ponto, as uvalas são muito mais complexas e, por isso, apresentam mais pontos de recarga. Além disso, enquanto as dolinas podem aparecer "espalhadas" e alinhadas estruturalmente, as uvalas normalmente estão sozinhas na paisagem (Figuras 88, 89 e 90).

Tabela 1- Histórico de ocorrências de afundamentos em áreas cársticas no Brasil.

ANO	LOCAL	DESCRIÇÃO
1981	Mairinque – SP	Várias edificações apresentaram trincas e afundamentos de piso
1986	Cajamar – SP	Colapso e subsidência de grandes proporções, impactantes por ocorrerem em plena área urbana. Cerca de 60 dias após os primeiros sinais na principal área atingida, três casas haviam sido tragadas em uma cratera de cerca de 30 metros de diâmetro e 15 metros de profundidade, enquanto recalques e trincas afetaram dezenas de outros imóveis em distâncias de até 400 metros do local
1988	Sete Lagoas – MG	Afundamento de cerca de 20 metros de diâmetro e 5 de profundidade tragou parte da arquibancada do Estádio Municipal e muros e paredes de edificações próximas, sendo que sinais de movimentação foram observados em edificações situadas em um raio de 40 metros.
1992	Almirante Tamandaré – PR	Vários pequenos afundamentos de terreno, trincas em edificações, inclinações de edificações, descolamento entre alvenaria e peças estruturais, rebaixamento do nível d'água em poços, cacimbas e pequenos lagos
1999	Teresina – PI	Grande afundamento, com comprometimento total de várias edificações.
1999	Cajamar – SP	Parte das edificações da moderna fábrica da Natura (Cosméticos) sofreu danos estruturais advindos de afundamentos em suas fundações
2007	Almirante Tamandaré – PR	Um dos maiores afundamentos de que se tem notícia na região, com forma elipsoidal: 50 metros de comprimento, 40 metros de largura e cerca de 30 metros de profundidade.
2007	Bocaiuva do Sul – PR	Colapso, com uma cratera de 5 metros de diâmetro e 5 metros de profundidade.

Fonte: adaptado de Santos (2008) e Sallum Filho (2009, p. 106)

Figura 87 – *Vista de uma uvala preenchida por água na Eslovênia (Foto: L.E.P. Travassos).*

Figura 89 – *Vista parcial de uma área mais plana e cultivada na região de Pains, Minas Gerais. Muito provavelmente, uma uvala, diferenciando-se de um polje por não apresentar fluxo hídrico perene ou intermitente (Foto: L.E.P. Travassos).*

Figura 88 – *Fotografia aérea de uma uvala na região do vetor norte da região metropolitana de Belo Horizonte, Minas Gerais. Indicados pelas setas, vários pontos de recarga e/ou descarga na superfície irregular da feição (Foto: L.E.P. Travassos).*

Importantes contribuições para o estudo destas feições foram apresentadas por Ćalić (2009; 2011), que destaca tanto os principais aspectos da história das pesquisas no Carste Dinárico, quanto os problemas causados por traduções equivocadas ao longo dos anos. Por esse motivo, a autora afirma que as definições que temos na literatura, até hoje, variam consideravelmente. Na maioria delas, desde a década de 1960, autores afirmam que as uvalas são depressões cársticas formadas a partir da coalescência de várias dolinas, como são os exemplos dos trabalhos de Trimmel (1965), Fairbridge (1968), Sweeting (1972) e Goudie et al. (1994). Ocasionalmente, a proposição de outros termos foram utilizados para designar as uvalas: dolina composta (WHITE, 1988) ou dolina poligenética (SAURO, 2004), por exemplo.

Ćalić (2011) afirma que alguns autores, ao citarem Cvijić (1893; 1900; 1901), se equivocaram na tradução do texto que afirmava que as uvalas eram formas evolucionais de transição entre as dolinas e os poljes e, de certa forma, menos importantes. Por esse motivo, o termo caiu em desuso. Ćalić (2009; 2011) acrescenta que atualmente existem razões suficientes para que se reintroduza o termo na Carstologia moderna, uma vez que são feições cársticas formadas pela combinação do intemperismo químico e físico, além da topografia, litologia e tectônica que agem como fatores passivos. Além desses, outros fatores como os processos hidrológicos (dependentes do clima), a dinâmica de carstificação (dependente do ambiente) e os processos gemorfológicos (intemperismo, declividade, processos fluviais, glaciais etc.) modificam ativamente o desenvolvimento destas feições.

Com o exposto, percebemos que não se pode aceitar mais um tipo de modelo conceitual cíclico entre *dolina–uvala–polje* (conforme sentido atribuído por Cvijić, 1901; 1960). O termo *uvala* precisa ser afastado de tais contextos, pois, ao contrário do que Cvijić (1960) afirma, elas não são apenas grandes dolinas com diâmetros até 1.000 m. Com a pesquisa, a autora demonstrou que as uvalas distinguem-se das dolinas em sua origem e desenvolvimento (ĆALIĆ, 2009; 2011).

Figura 90-*Exemplo de duas uvalas no carste dinárico. A) Vista geral da uvala Lomska-Duliba, Velebit, Croácia. B) Baljacki-Do, Montenegro (Fotos: Jelena Ćalić).*

3.8.3.6.3. Os poljes

São as grandes depressões fechadas existentes no carste e geralmente são planícies de mais de um quilômetro de extensão. Ressaltamos que não são feições cársticas puras, pois são poligenéticas (e.g. processos tectônicos e cársticos; processos fluviais e cársticos etc.). Por esse motivo, Kranjc (2013) afirma que, às vezes, podem se apresentar abertas devido ao fato do rio que abriga fluir para fora dos limites da depressão. Devido à sua complexidade, nem todos os *poljes* se encaixam em todos os critérios propostos ao longo da evolução da carstologia.

É possível identificar 46 tipos diferentes de planícies cársticas classificadas basicamente de acordo com a posição geológica e estrutural, a origem, a hidrogeologia, o clima etc. (PANOŠ, 2001; KRANJC, 2103). Gams (2004) afirma que podemos identificar cinco tipos principais basicamente selecionados em função das condições litológicas, morfológicas e hidrológicas. Neste livro, para o início dos estudos, aconselhamos a proposta de Ford e Williams (2007), que identifica três tipos de polje, conforme Figura 91.

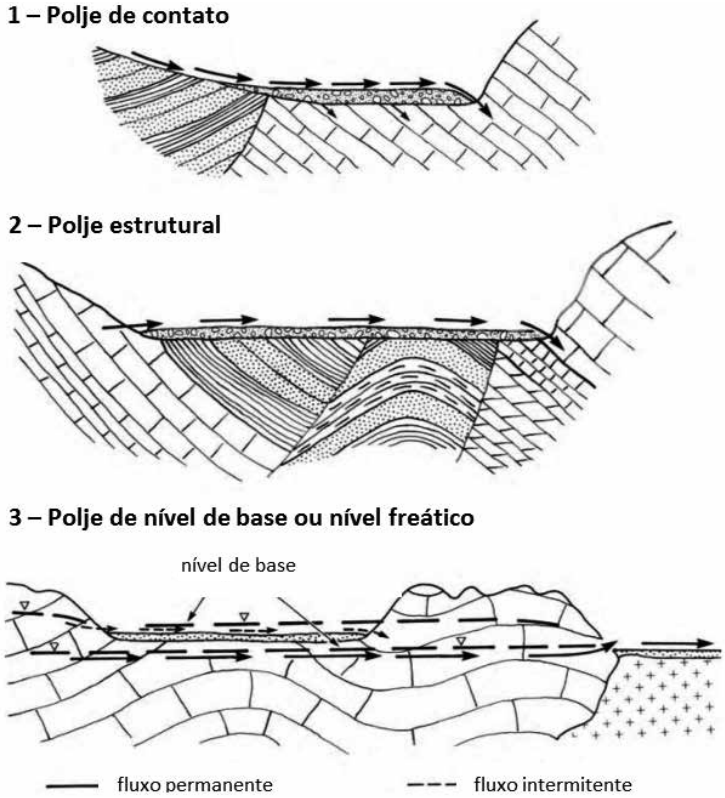


Figura 91 – *Tipos de poljes conforme proposta de Ford e Williams (2007, p. 364)*

Destacamos que, nos *poljes de nível freático*, a mesma água do lago sazonal dissolve tanto a rocha quanto os sedimentos do fundo, favorecendo o *aplainamento pela dissolução*. Tal dissolução é efetiva, também, no contato do seu limite com a base das vertentes em processo conhecido como *corrosão marginal*. Dessa maneira, a planície se expande horizontalmente e o contato com as vertentes adquire um ângulo muito acentuado.

No carste tropical, em especial naqueles com climas de monção, é possível identificar planícies cársticas que podem ser chamadas de *poljes abertos*. Nesses casos, o nível freático oscila próximo ao nível de base da planície e ocorre o aplainamento ou o rebaixamento do relevo por corrosão/dissolução. As "florestas de torres cásrticas" (*fenglin*) geralmente ocorrem em poljes abertos.

É importante destacar que os *poljes* não apresentam lagos perenes, visto que seus fundos possuem sumidouros (*ponor*) que captam a água para um sistema subterrêneo de drenagem. Durante a época chuvosa, a área de alguns poljes pode ser ocupada por um lago que, normalmente, desaparece na época seca. Assim sendo, Bonacci (1993; 2013) classifica os poljes em função de seu regime hidrogeológico, sendo divididos entre aqueles 1) *permanentemente alagados*, 2) *periodicamente, parcialmente ou completamente alagados*, e 3) *poljes secos*. Nas figuras 92 e 93, é possível identificar exemplos de poljes periodicamente alagados e nas figuras 94 e 95, exemplos de poljes secos.

Sobre o fenômeno dos poljes possuírem lagos ou não, destacamos que isso ocorre devido ao fato do nível freático da zona saturada do carste flutuar bem próximo ao seu nível de base. Quando o nível freático ascende, os sumidouros se convertem em surgências e recebem o nome de *estavelle*. A planície se torna uma feição de nível freático ou de nível de base. Sauro (2008) lembra que, nestes poljes, a mesma água do lago sazonal dissolve tanto a rocha quanto os sedimentos do fundo, favorecendo o aplainamento pela dissolução. Tal dissolução é efetiva, também, no contato do seu limite com a base das vertentes, em processo conhecido como corrosão marginal. Desta maneira, a planície se expande horizontalmente e o contato com as vertentes adquire um ângulo mais acentuado.

Figura 92 – *Vista panorâmica do Polje de Cerknica com parte de seu lago temporário visto a partir da montanha Slivinica, Eslovênia (Foto: L.E.P. Travassos).*

Figura 93 – *Vista parcial do Polje de Cerknica com seu fundo cultivado e sem o lago intermitente, Eslovênia (Foto: L.E.P. Travassos).*

Figura 94 – *Vista parcial do Radenško polje e seu fundo cultivado, Eslovênia (Foto: L.E.P. Travassos).*

Figura 95 – *Extenso polje na região de Monjolos, Minas Gerais (Foto: L.E.P.Travassos).*

3.8.4. As formas residuais e de descarga

3.8.4.1. Os Humes *(Hum)*

Humes são um tipo de feição remanescente, que pode ser chamado de *inselberg cárstico*. Um *hume* ou *hum* é basicamente uma forma residual isolada em meio a um polje ou planície cárstica. Em algumas áreas de carste tropical, recebem o nome de *mongote*. Em nosso carste brasileiro, mesmo que uma paisagem não esteja totalmente nivelada, é possível identificar *humes* isolados (Figura 96).

3.8.4.2. As Tufas

As tufas são concreções carbonáticas que se precipitaram em função da saturação da água cárstica ao longo de um curso d'água superficial ou próximo a algumas nascentes cársticas. Podem surgir na forma de "degraus", como represas, ou na forma de cachoeiras. Por serem depósitos ainda em formação, dependem de condições físico-químicas e biológicas das águas que as formaram.

Pedley (1990) menciona vários autores desde 1970 e afirma que as tufas são ocorrências comuns do Quaternário, destacando tais depósitos em ambientes lacustres, em forma de barragens e em cachoeiras. Em todos os estudos, é possível perceber que o termo *tufa* é utilizado para descrever depósitos não termais, altamente porosos, em água doce rica em carbonatos. O termo é o equivalente a *Kalktuff* (em alemão) e Travertino (em italiano), sendo utilizado, também, para descrever depósitos hidrotermais. Embora existam debates na literatura acadêmica, Pedley (1990) afirma que

Figura 96 – *Hume do Monumento Natural Estadual Vargem da Pedra, Distrito de Mocambeiro, Matozinhos, Minas Gerais (Foto: L.E.P.Travassos).*

travertino, um termo alternativo comum, é geralmente aplicado para depósitos de tufas calcárias bem litificadas, onde a precipitação diagenética posteriormente adicionou consideráveis quantidades de calcita.

A palavra *tufa* deriva de *tophus*, utilizado pela primeira vez por Plínio - e extensivamente durante a Roma Antiga - para descrever depósitos friáveis esbranquiçados, sejam eles tufas calcárias ou vulcânicas. De acordo com Ford e Pedley (1996), Pentecost (2005) e Capezzuoli et al. (2014), o desenvolvimento científico e o aumento dos estudos em áreas cársticas substituiu corretamente o uso do termo para designar materiais piroclásticos, consolidando acertadamente o uso do termo "tufa vulcânica". No caso deste livro, que se concentra em áreas cársticas, o termo tufa é utilizado para designar os depósitos que são o produto ou resultado da precipitação de $CaCO_3$ em condições de temperatura próximas à temperatura ambiente e que, tipicamente, contém vestígios de pequenos invertebrados e bactérias. Em oposição a esse termo, há o termo travertino, para depósitos cristalinos mais sólidos, formados principalmente a partir de águas quentes, portanto (Figura 97).

No Brasil, Travassos e Oliveira (2016) destacam alguns trabalhos de autores nacionais e registram um exemplo em Montes Claros, Minas Gerais (Figuras 98, 99 e 100). Os depósitos encontrados na Bahia, Ceará, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Paraíba e São Paulo foram estudados por Duarte e Vasconcelos (1980a; 1980b), Boggiani e Coimbra (1994; 1995), Boggiani et al. (1999; 2002; 2011), Auler e Smart (2001), Wang et al. (2004), Corrêa (2006), Sallun Filho et al. (2009a; 2009b; 2012), Corrêa et al. (2011) e Almeida et al. (2011).

Figura 97- *Exemplo de um travertino dentro dos banhos romanos em Bath, Reino Unido. Pela foto é possível perceber um pouco de condensação nas lentes da câmera devido ao calor (Foto: L.E.P. Travassos).*

Figura 98 – *Aspectos gerais das tufas do rio Vieira, Montes Claros, Minas Gerais (Fotos: L.E.P. Travassos).*

Figura 99 – *Aspecto geral de um depósito de tufas carbonáticas em Montes Claros, Minas Gerais (Foto: L.E.P. Travassos).*

Figura 100 – *Detalhe do mesmo depósito mostrado na Figura 93. Da base do espelho d'água ao topo, foi possível o registro de cerca de 8 metros de altura. Montes Claros, Minas Gerais (Foto: L.E.P. Travassos).*

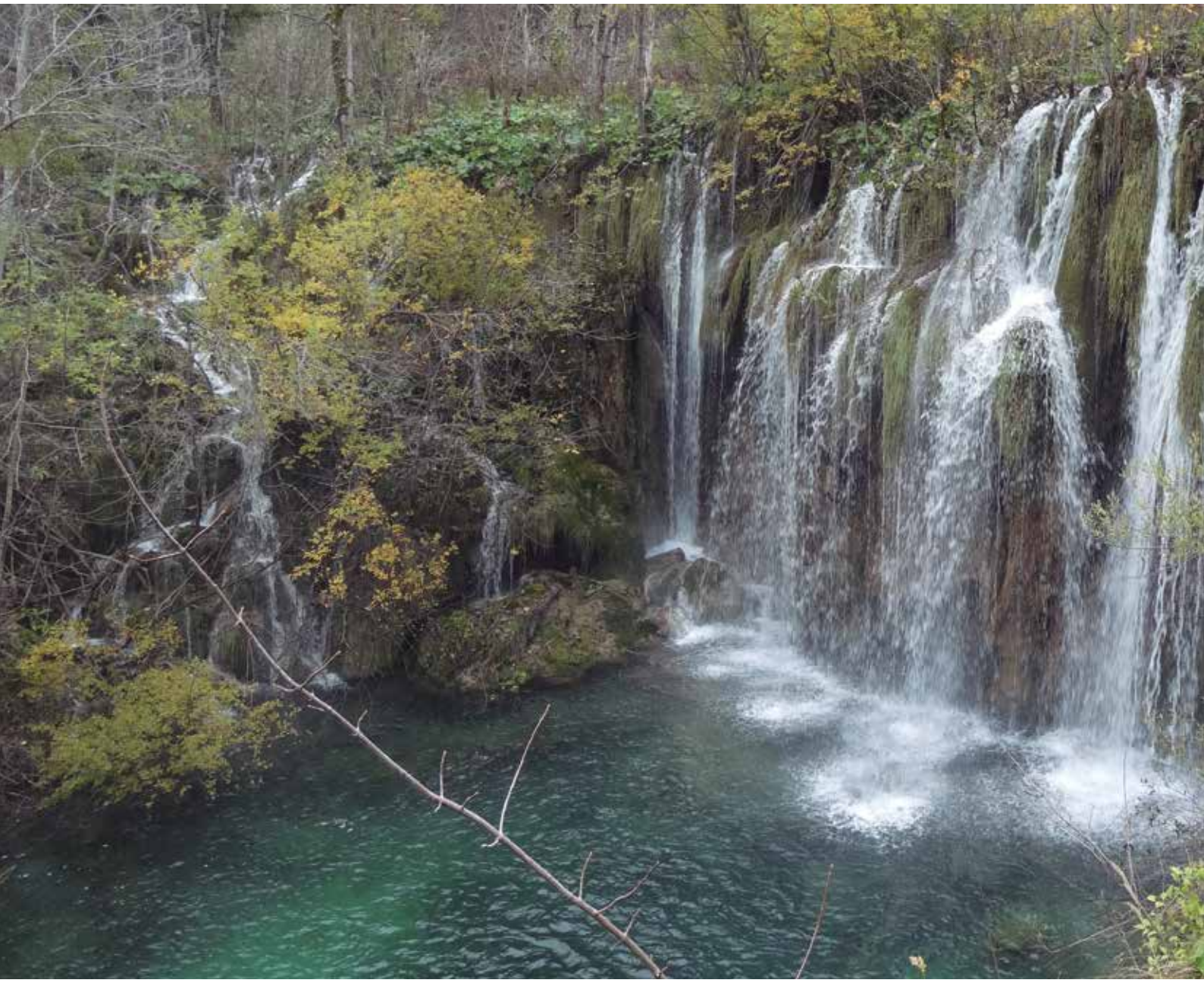


Figura 101 – *Depósitos carbonáticos em Plitvice, Croácia (Fotos: L.E.P. Travassos).*

3.8.4.3. As nascentes, surgências e ressurgências

Talvez as nascentes sejam as formas mais simples e populares do carste, embora os processos subterrâneos que ocorrem para sua formação sejam bastante complexos. Amplamente conhecidas pela população em geral, as nascentes são as fontes de água que surgem em diversas litologias, quando a água subterrânea, ou do subsolo, emerge na superfície. Na carstologia, são *surgências*, quando não é possível saber se suas águas são a mesma de algum curso d'água capturado para o subterrâneo, e *ressurgências* quando esta ligação é comprovada cientificamente. Podem ser *perenes, intermitentes, sublacustres, submarinas, ascendentes* etc.

Figura 102 – *Exemplos de nascentes cársticas. A) Nascente do rio Reka nas Cavernas de Škocjan, Eslovênia; B) Nascente na região de Koĉevje, Eslovênia; C) Surgência em uma colina eslovena; D) Nascente na região de Buzet, Croácia; E-F) Nascente na região de Rezana, Eslovênia. Nas fotos, é possível ver a estrutura de concreto de proteção da fonte e seu interior (Fotos: L.E.P. Travassos).*

3.9 A GEOMORFOLOGIA CÁRSTICA SUBTERRÂNEA

Podemos dizer que geomorfologia cárstica é o nome que se dá ao estudo das formas de relevo tanto em superfície, quanto no subterrâneo. Para DeWaele, Plan e Audra (2009), embora a dissolução seja muito mais forte na superfície, ela continua lentamente alargando fissuras e planos de acamamento no subterrâneo para a formação de uma complexa rede de condutos cársticos. Destacam, ainda, que toda a evolução dos sistemas cársticos, desde a sua origem até seu completo desenvolvimento e o estágio atual, é chamado de *espeleogênese*, ou *formação das cavernas*. Para os autores, quando os sistemas de cavernas são acessíveis, observações de macro, meso e microfromas podem nos fornecer pistas valiosas para a compreensão do sistema como um todo.

Em campo, é possível perceber que a morfologia é fortemente condicionada pela litologia, bem como pela estrutura, tipo e pureza da rocha. White (1988), Ford e Williams (1989), Gillieson (1996) e Ford e Williams (2007) afirmam que, mesmo que o desenvolvimento das cavernas seja determinado principalmente pelo gradiente hidráulico e extensão da bacia de drenagem, muito da morfologia e da arquitetura da rede de condutos está diretamente ligada à litologia e sua estrutura. Assim sendo, a circulação da água é favorecida significativamente quando existe uma rede de juntas e fraturas. Tais irregularidades na rocha são causadas por tensões que são resultados de processos de diagênese, soerguimento ou dobramentos. De maneira mais simples, se um carste apresenta fraturas pequenas, essas são geralmente mais estreitas e relativamente impermeáveis. São, portanto, facilmente preenchidas por sedimentos ou calcita. Já as fraturas maiores favorecem a formação de cavidades angulares e irregulares que, com o tempo, tornam-se mais arredondadas pela dissolução. Percebemos, assim, uma grande variedade de formas dos condutos e passagens (Figura 103).

Embora seja amplamente aceito o conceito de caverna como uma abertura natural para o subterrâneo, grande o suficiente para permitir a entrada do ser humano, Ford e Williams (2007) afirmam que, do ponto de vista da hidrogeologia e da hidrodinâmica, podemos considerar uma caverna qualquer abertura ou conduto de 5 a 15 mm de diâmetro ou largura, cujas dimensões já são suficientes para permitir a mudança de um fluxo laminar para o turbulento. Gillieson (1996) afirma que elas são parte de um sistema geomorfológico, pois uma variedade de materiais entra o subterrâneo, é transportado em seu interior até se depositar permanentemente ou temporariamente e deixar o subterrâneo por meio de uma surgência ou nascente. A definição de uma caverna é, portanto, resultado de diversos pontos de vista (e.g. locais para exploração e pesquisa, fonte de informações geológicas, hidrológicas e biológicas etc.), podendo ser formadas em vários tipos de rocha e por diversos processos.

É importante destacar que, se a água não estiver saturada de $CaCO_3$, a dissolução pode ocorrer, posteriormente, em profundidade. Da mesma forma, com a profundidade no maciço, a água que esteja saturada pode se tornar agressiva caso, no sistema, as condições físicas e químicas se alterem. Portanto, a dissolução pode ocorrer, escavando o subterrâneo. A grande resistência mecânica do calcário permite que tais cavidades naturais subterrâneas permaneçam estáveis, favorecendo o fluxo hídrico, tanto alargando as passagens, quanto depositando sedimentos ao longo do caminho.

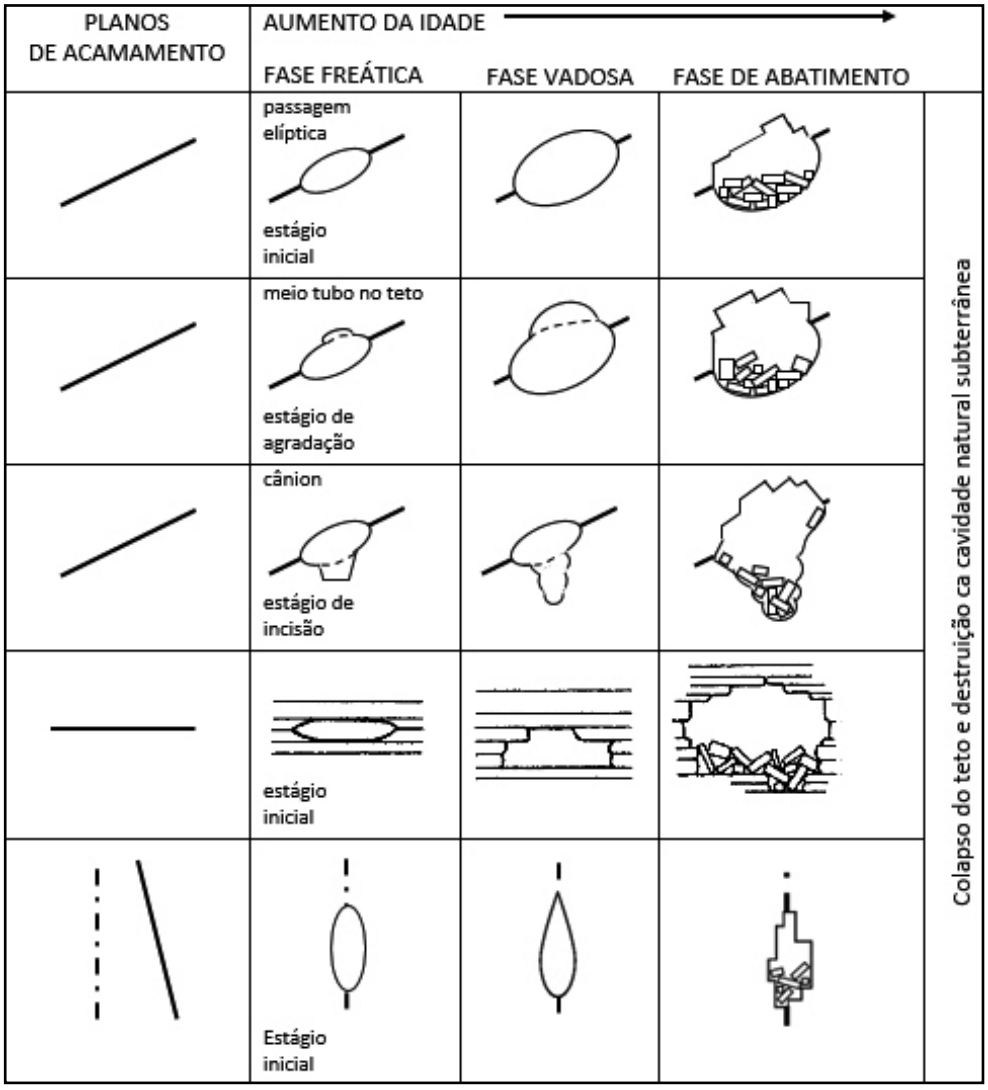


Figura 103 – *Variação da morfologia dos condutos e cavernas em relação aos planos de acamamento e orientação das fraturas. É possível identificar o aumento da idade das aberturas, bem como a presença constante (fase freática) e intermitente (fase vadosa) de água (Adaptado de Bögli, 1980, p. 213 e Giellison, 1996, p. 83).*

Em resumo, é assim que o endocarste é formado e as cavernas são apenas uma pequena parcela penetrável pelo ser humano. O restante – a complexa e vasta rede subterrânea de condutos e passagens – somente pode ser estudado indiretamente. Para que a formação do endocarste ocorra, três condições básicas devem existir: 1) *presença de aberturas pré-existentes na rocha* (e.g. poros ou descontinuidades), 2) *presença de água agressiva*, e 3) *existência de forte gradiente hidráulico* (GILLI, 2015).

Assim, descontinuidades naturais, forças mecânicas e a estrutura da rocha auxiliam na formação das cavernas. Na maioria das vezes, o calcário tende a apresentar uma baixa porosidade primária (e.g. espaço entre os grãos que formam a rocha) sendo, portanto, mais impermeável. Entretanto, justamente por sua

natureza sedimentar, a água tende a fluir por entre as camadas de deposição de sedimentos, descontinuidades, juntas e falhas. Martel, importante pioneiro da espeleologia, já fazia referências ao controle estrutural na espeleogênese em 1894. Na verdade, as primeiras tentativas de teorização em relação a formação das cavernas ocorrem em meados do século XVIII, evoluindo até o presente. Obviamente algumas delas já foram superadas, embora tenham contribuído para a formação de conceitos posteriores, conforme resumidos na Tabela 2.

Tabela 2-Principais cientistas e explicações para a espeleogênese.

CIENTISTA	DATA	PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES E ABORDAGENS
A. Catcott	1756	Cavernas são formadas pela ação da água de acordo com teorias diluvianas.
C. Lyell	1830	Reconhece a importância do CO_2 na dissolução do calcário.
C.E. Thirria	1830	Reconhece a importância do CO_2 na dissolução do calcário.
F.G. Evans	1870	Reconhece que as cavernas também podem se formar abaixo do nível de base hídrico.
J. Cvijić	1893 1918	Marco no estudo do carste e, posteriormente, do aperfeiçoamento da Teoria de Grud, dividindo o carste em zonas de percolação, oscilação e inferior.
E.A. Martel	1896	Erosão e corrosão pelo fluxo da água dentro das cavernas. Não existe nível freático. Apenas rios subterrâneos.
A. Grund	1903	Existência de uma zona dinâmica acima e uma zona estática saturada abaixo do nível de base regional.
F. Katzer	1909	Inexistência de uma zona saturada e nível de base, somente rios subterrâneos existem trazendo água a partir de sumidouros e dolinas e liberando por meio de ressurgências. Teoria dos rios de caverna.
E.A. Martel	1921	Inexistência de uma zona saturada e nível de base, somente rios subterrâneos.
A.C. Swinnerton	1929 1932	As primeiras teorias freáticas foram tipificadas pelas ideias de Swinnerton (1932) que enfatizava a divisão proposta por Cvijić.

CIENTISTA	DATA	PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES E ABORDAGENS
W.M. Davis	1930	Principal defensor do desenvolvimento freático profundo das cavernas.
O. Lehmann	1932	Identifica e descreve feições de recarga e descarga (*estavelles*) e discute a dualidade hidrológica do carste que permite aos aquíferos possuírem vários inputs (*sumidouros*) e outputs (*nascentes*). Também apoia as ideias de Martel e Katzer e se opunha aos modelos de Cvijić e Grund.
J.H. Gardner	1935	É normalmente citado nas teorias de espeleogênese vadosa, mas, na verdade, identifica aspectos relacionados aos estágios iniciais do desenvolvimento abaixo do nível de base.
F.F. Laptev	1939	Identifica o papel da corrosão de mistura na espeleogênese.
R. Rhoades & N.M. Sinacori	1941	Concordam parcialmente com a visão de Martel.
J. H. Bretz	1942	Classifica feições cavernícolas como diagnóstico do crescimento dos condutos, seja na zona vadosa, seja na freática. Apoia e aprimora o modelo de Davis.
C. A. Kaye	1957	Dissolução do calcário e dinâmica dos fluidos.
J. R. Dunn	1957	Invenção do detector de traçadores utilizando carvão.
D. J. Burdon & C. Safadi	1963	Análise de grandes descargas em nascentes.
A. Bögli	1964	Aprofunda os estudos da corrosão de mistura na espeleogênese.
J. V. Thrailkill	1968	Geoquímica das águas cársticas.
A. Mangin	1970	Hidrologia cárstica.
M. J. Bakalowicz	1975	Hidrologia cárstica.
D. C. Ford & R. O. Ewers	1978	Modelo conceitual da evolução do carste baseado no grau de fraturamento da rocha e a relação com nível de base hídrico.
Dublyanski	1980	Identificação dos processos de formação do carste hidrotermal.

CIENTISTA	DATA	PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES E ABORDAGENS
H.P. Schwarcz & D.C. Ford	1982	Datação de espeleotemas (U/Th).
V.A. Schmidt	1982	Magnetoestratigrafia em sedimentos cavernícolas.
A.N. Palmer	1987	Níveis de cavernas e sua interpretação.
V.A. Schmidt	1991	Formação e morfologia das cavernas.
W. Dreybrodt	1996	Modelos matemáticos e numéricos para a espeleogênese.
W. Dreybrodt, F. Gabrovšek & D. Romanov	2000	Modelagem da evolução de aquíferos.
A. Klimchouk	2007	Espeleogênese hipogênica.
A.N. Palmer	2007	Geologia de cavernas e espeleogênese.
A. Klimchouk	2015	Revisão de conceitos sobre o carste apresentando as mudanças, tendências e perspectivas.
P. Audra & A.N. Palmer	2015	Revisão de conceitos sobre a espeleogênese, demonstrando os processos dominandtes, as condições hidrogeológicas e os padrões de caverna resultantes.

Fonte: Compilado pelo autor a partir de Davis (1930); Swinnerton (1932); Gardner (1935); Laptev (1939); Rhoades e Sinacori (1941); Bretz (1942); Burdon e Safadi (1963); Schmidt (1982); Palmer (1991); Palmer et al. (1999); Gabrovšek (2000); Lowe (2004); Palmer e Audra (2004); Shaw (2004); Wolfgang e Gabrovšek (2004); Klimchouk (2007); Palmer (2007); DeWaele, Forti e Piccini (2008); Klimchouk (2015); Audra e Palmer (2015).

Audra e Palmer (2015) destacam que devemos considerar a espeleogênese como sendo o processo bem organizado de desenvolvimento de um sistema de cavernas, que foi formado pelo movimento de fluidos ao longo de fissuras em uma rocha solúvel. Dessa forma, é possível fazer a distinção dos tipos de cavernas de acordo com sua formação.

3.9.1 Classificação "clássica" das cavernas

Uma vez identificado o que vem a ser uma caverna, é possível adotar as classificações propostas por Bögli (1980), que vão de acordo com sua gênese, características geológicas, tamanho e características proeminentes. Destacamos que essa classificação é importante para uma primeira abordagem do assunto, por se tratar de uma classificação didática.

3.9.2. Classificação genética

Se pensarmos na forma como uma caverna é formada, é possível fazer a distinção entre dois grupos principais: as cavernas *primárias* e as cavernas *secundárias*. No caso do primeiro,

esse tipo de caverna recebe esse nome por se formar simultaneamente com a rocha. Os exemplos mais fáceis de se identificar são os tubos de lava, formados pela passagem da lava na rocha vulcânica e as cavernas formadas nos sedimentos e nos corais. Já as cavernas secundárias, tiveram sua formação após a diagênese. São formadas basicamente por forças externas e internas.

3.9.3. Classificação geológica

Como o nome sugere, é a classificação das cavernas de acordo com o tipo de rocha em que se desenvolvem. Os fatores que irão condicionar a espeleogênese em cada tipo de rocha são solubilidade, dureza e resistência ao intemperismo e a erosão. Portanto, identificamos cavernas em gipsita, calcário, dolomito, halita, arenito, granito, conglomerado, rochas ferruginosas e até mesmo em gelo.

3.9.4. Classificação de acordo com o tamanho

O tamanho de uma caverna é a consequência de sua exploração científica, que apresenta largura, comprimento, altura e profundidade, por exemplo. Dessa forma, Bögli (1980) afirma que o objetivo do mapeamento de cavernas é uma ferramenta indispensável para a compreensão das complexas redes subterrâneas.

3.9.5. Classificação de acordo com características proeminentes

Para sermos mais precisos, tal classificação é muito mais uma divisão didática do que científica ou sistemática, mas que pode ser útil. Por exemplo, a água flui por meio de seções de uma *caverna ativa* e seus visitantes devem tomar cuidado com o risco de alagamentos, enquanto *cavernas inativas* geralmente não apresentam esse perigo e, muitas vezes, apresentam belíssimos espeleotemas. Entretanto, a diferenciação entre cavernas ativas e inativas não é muito clara, uma vez que uma caverna ou seção inativa pode se alagar em um evento extremo. Outras classificações autoexplicativas são as *cavernas de abatimento*, cujo próprio nome sugere que tais processos de colapso são dominantes (BÖGLI, 1980).

3.9.6. Cavernas epigênicas ou epigenéticas

Basicamente, as *cavernas epigênicas* são formadas pelas águas meteóricas que, com o tempo, adquirem a capacidade de dissolver a rocha e formar cavernas "de cima para baixo" em uma paisagem cárstica. Como dito anteriormente, tal agressividade ocorre em função da absorção do CO_2 existente na atmosfera e, em maior porcentagem, por causa da produção de CO_2 no solo. Acredita-se que ácidos orgânicos também possam contribuir para o aumento da agressividade da água, mas a real contribuição ainda é pouco conhecida cientificamente. Em escala mundial, de acordo com Palmer (2007) e Audra e Palmer (2015), esse tipo de caverna provavelmente perfaz cerca de 80 a 90% das cavernas conhecidas.

O modelo conceitual do desenvolvimento de uma caverna epigênica (Figura 104) evoluiu a partir dos primeiros modelos para o "modelo dos quatro estágios" (*four-states model*), envolvendo a influência das fraturas para explicar desenvolvimentos profundos até os modelos digitais, que demonstram o ajuste do fluxo principal ao nível de base hídrico. As relações entre os níveis de base são complexas e os níveis das cavernas precisam ser determinados a partir da elevação das transições vadosas-freáticas. Uma vez que alagamentos na zona epifreática podem ser importantes, o topo dos condutos na zona epifreática pode se encontrar significativamente mais alto em relação ao nível de base.

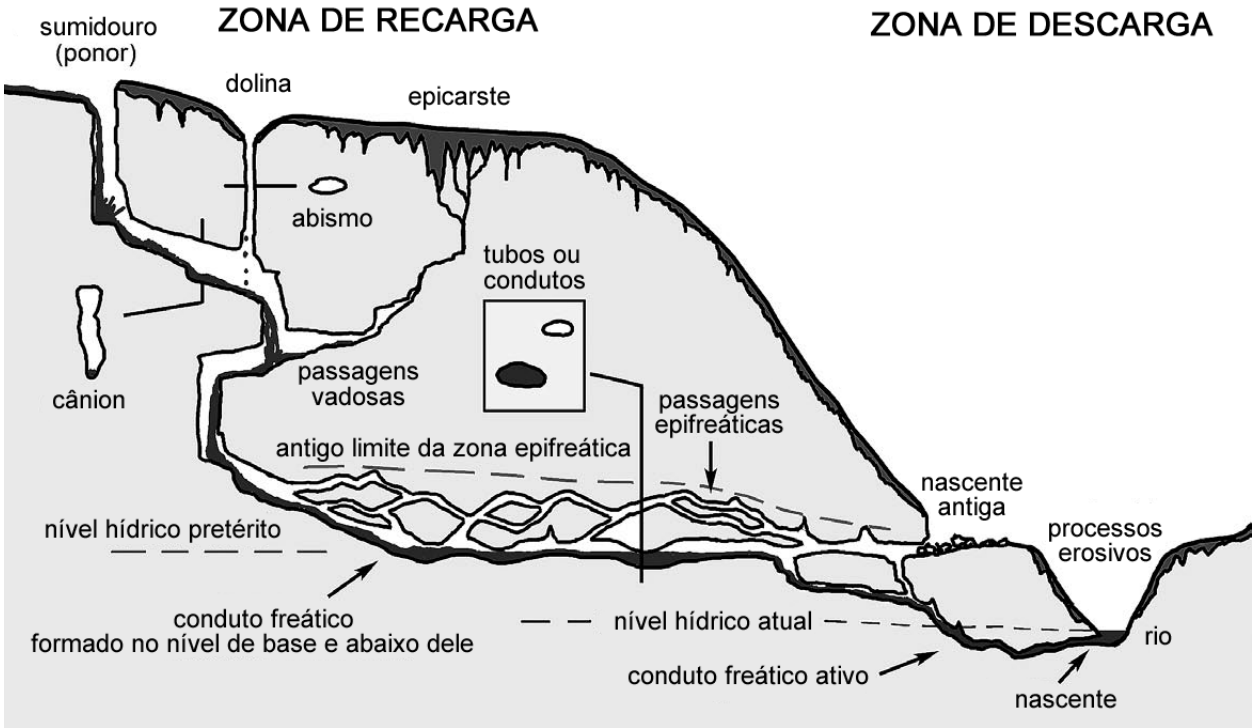


Figura 104 – *Seção transversal idealizada de um Sistema Cárstico Epigênico. Em resumo, a recarga ocorre por meio de sumidouros, dolinas e ao longo do epicarste. Passagens vadosas (formadas acima do nível de base hídrico) incluem abismos e cânions. No nível de base hídrico, a água subterrânea segue gradiente relativamente leve até as nascentes em vales próximos. A maioria das passagens freáticas são tubulares e se formam no nível de base ou logo abaixo dele. Durante as enchentes ou alagamentos (especialmente em caverna rapidamente inundadas pelo escoamento superficial), as passagens freáticas podem ser impedidas de transmitir toda água de recarga, fazendo com que complexas formas sejam elaboradas na zona epifreática (zona de flutuação do nível de água). Largas passagens freáticas são formadas quando o nível de base erosivo permanece em uma mesma elevação por um longo período de tempo, bem como quando ramificações são formadas. Na medida em que o nível de base hídrico é rebaixado e os cursos d´agua superficiais exercem erosão para baixo, passagens freáticas tendem a drenar por meio de desvios. Entretanto, antigas passagens freáticas fornecem evidências do antigo nível de base (Fonte: AUDRA; PALMER, 2015, p.318).*

O fluxo da água nas cavernas deixa vestígios de sua passagem ao longo do tempo geológico, deixando o que Slabe e Prelovšek (2013) consideram ser as primeiras e melhores explicações para se compreender a formação e o desenvolvimento das cavernas e, consequentemente,

do aquífero. Os cursos d'água fluem em velocidades distintas ao longo de condutos de vários tamanhos e formas, deixando vórtices de formas, tamanhos e direções características (Figura 105). O processo continua com massa de água, a areia e o cascalho escavando as passagens mecanicamente.

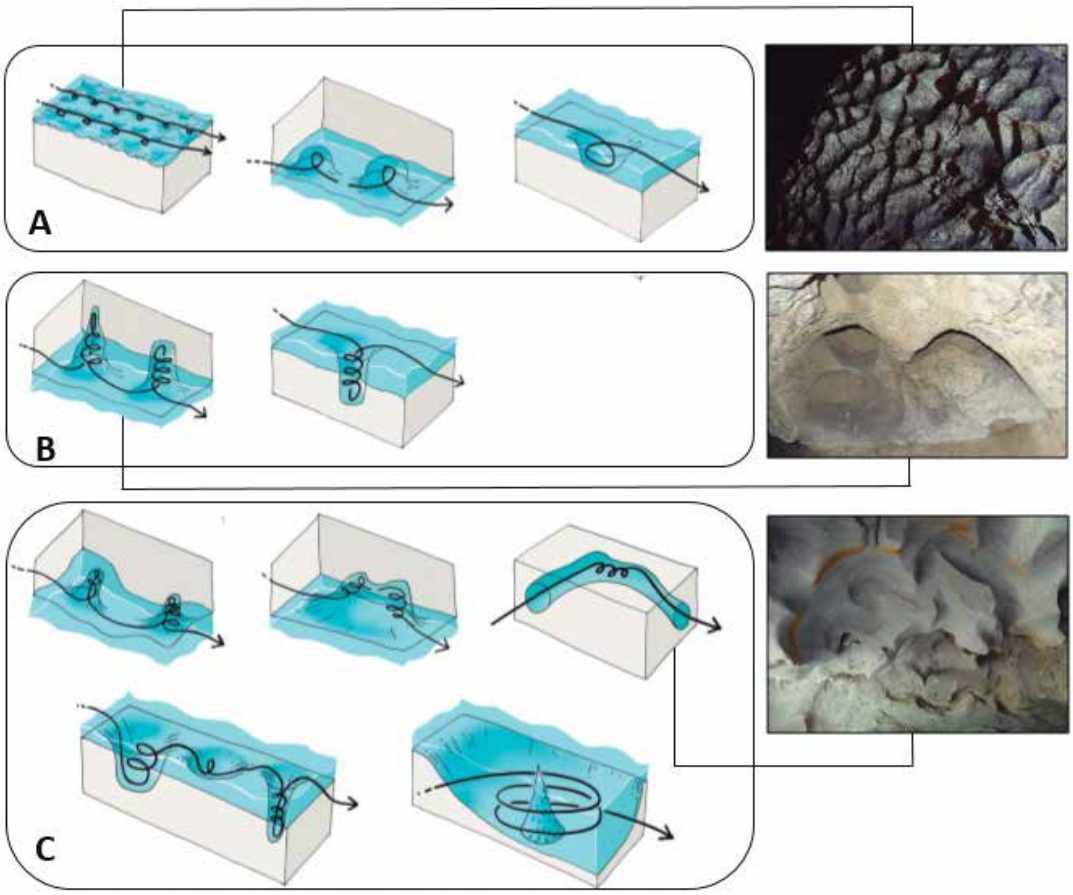


Figura 105 - *Diferentes formas, tamanhos e direções dos vórtices que dão origem a formas nas paredes, pisos ou tetos das cavernas. Vórtices marcados com (A) são causados pela fricção entre o fluxo de água e a superfície plana da caverna. Vórtices marcados com (B) são causados pelas irregularidades na estrutura da rocha (e.g. fissuras e planos de acamamento). Aqueles marcados com (C) são causados pela mudança abrupta da morfologia da passagem (Fonte: Adaptado de Slabe e Prelovšek, 2013, p.175).*

Destacamos, ainda, que quando o assunto é espeleogênese, também é preciso se familiarizar com o processo de *paragênese*. Tal termo é utilizado para descrever o desenvolvimento de condutos em cavernas quando suas partes mais baixas são preenchidas por sedimentos. Dessa forma, a água passa a fluir por cima dos sedimentos (geralmente impermeáveis) e a formação da caverna ou do conduto tende a ser impulsionada para cima. Feições, antes mais circulares, dão lugar a feições mais planas ou "polidas" em função da ação da água (Figura 106). Para Audra e Palmer (2013; 2015), tal processo geralmente registra aumento geral do nível de base hídrica. Métodos de datação dos sedimentos têm permitido aos pesquisadores a identificação do tempo para a formação dos níveis dessas cavernas.

Figura 106 – *Aspecto geral de uma caverna que teve sua fase de formação paragenética. Nas fotos é possível perceber os níveis de formação, acúmulo de sedimentos e feições características no teto (Fotos: L.E.P. Travassos).*

3.9.7. Cavernas hipogênicas ou hipogenéticas

Em contraste às cavernas epigênicas, as *cavernas hipogênicas* são aquelas formadas pela dissolução da rocha por águas profundas ascendentes (Figura 107) e que parecem ser menos conhecidas do público em geral. Entretanto, Klimchouk (2013) e Audra e Palmer (2015) afirmam que o reconhecimento de mais ocorrências, importância e características específicas desse tipo de caverna nas últimas duas décadas significou uma mudança de paradigma no tocante à formação do endocarste. Esse tipo de caverna passou a ser foco de mais pesquisas científicas e, portanto, começam a aparecer na literatura mais do que apareciam no passado.

A *espeleogênese hipogênica* é outro termo utilizado para descrever a formação das cavernas por meio de águas profundas ascendentes, geralmente apresentando altas concentrações de CO_2 e H_2S. Em alguns casos, pode ser uma fonte termal, mas nem sempre isso ocorre. De acordo com Audra e Palmer (2013; 2015), a formação de tais cavernas baseia-se no conceito do Fluxo Gravitacional Regional, que mostra, na escala da bacia, os sítios de convergência e os fluxos ascendentes, onde a dissolução tende a ocorrer. Cada parte da bacia (zonas marginal, interna e profunda) apresenta condições específicas para a formação da caverna hipogênica, que vão desde a estrutura à composição da água.

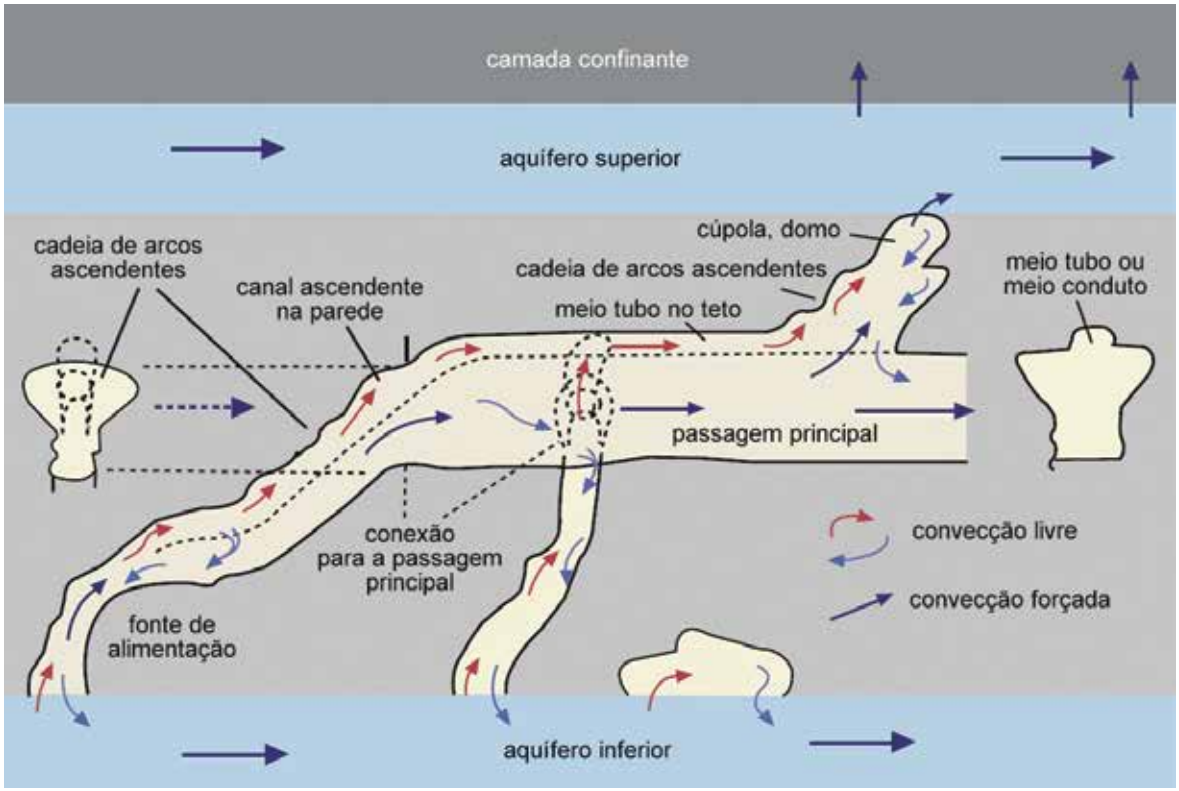


Figura 107 – *Modelo conceitual de uma caverna hipogênica (Adaptado de Klimchouk, 2013, p.235).*

3.9.8. As cavernas no sistema cárstico e seus padrões de desenvolvimento

Quando definimos as cavernas em termos de acesso ao ser humano, é possível perceber que existem vários tipos delas e em vários tipos de rocha (Figura 108), sendo a estrutura geológica importantíssima para sua formação. Gilli (2015) afirma que *cavernas tectônicas* são aquelas formadas pela dissolução da água e que se apresentam como um labirinto ou uma rede de fraturas. São, geralmente, criadas pela abertura de uma junta ou falha. Na verdade, a maioria da gênese das cavernas ocorre com uma fase tectônica, pois a existência de uma descontinuidade favorece a percolação da água. Em profundidade, a circulação hídrica é determinada por conexões hidromecânicas e altas pressões que favorecem a abertura das juntas.

Desde que a água em circulação na rocha não esteja saturada, tem-se o início da dissolução do $CaCO_3$. Caso não esteja em movimento, a água atinge um estado de equilíbrio e se torna saturada, perdendo sua habilidade de dissolver a rocha. Assim que a circulação é reiniciada no aquífero, íons dissolvidos são carreados e a água saturada é substituída pela água agressiva. Dessa forma, a dissolução pode continuar no sistema e as descontinuidades são alargadas. Gradualmente, os condutos vão se alargando e são tomados caminhos preferencias pela água, criando uma rede hierárquica de canais. Os caminhos passam a ser organizados entre as zonas de infiltração difusa, zonas de transição e zonas de saturação hídrica. Em algum momento na evolução desse sistema, a água tende a convergir para pontos de descarga, formando as nascentes, conforme Figura 109 (GILLI, 2015).

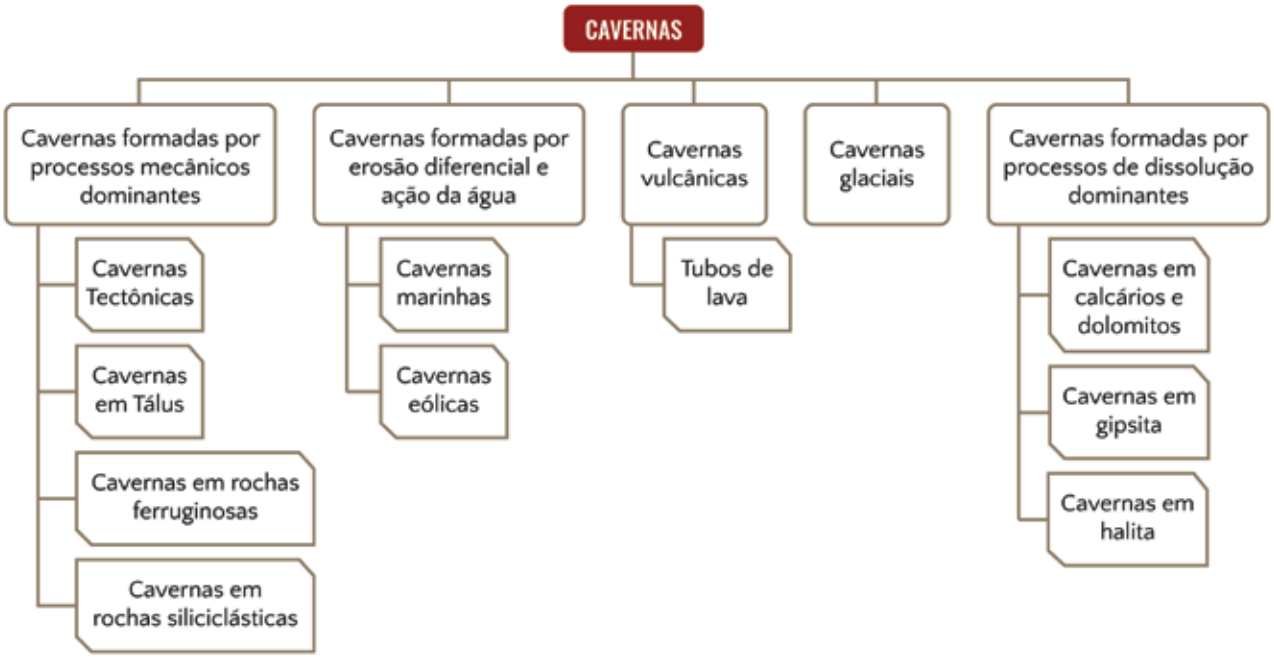


Figura 108 – *Alguns tipos de cavernas encontradas no mundo (Fonte: Adaptado de White e Culver, 2012, p.105)*

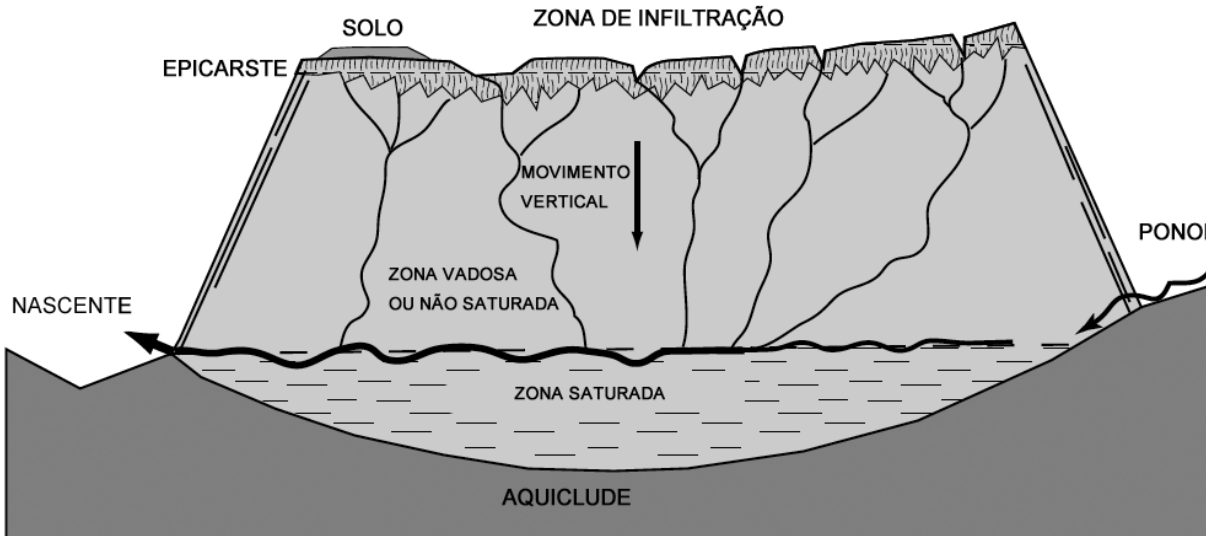


Figura 109 – *Modelo conceitual do movimento da água em um sistema cárstico com cavernas verticais e horizontais (Fonte: Adaptado de Gilli, 2015, p.60)*

Percebemos que a dissolução e o alargamento das juntas ocorre de maneira muito distinta, dependendo da zona em que se localizam. Assim, é possível afirmar que, no *epicarste*, a dissolução ocorre de forma rápida e homogênea. Na *zona vadosa*, a dissolução é mais lenta devido ao rápido fluxo da água. Em sistemas de alta transmissibilidade na zona *epifreática* e *freática*, a dissolução pode ser significativa, porém heterogênea. Em zonas

freáticas capacitivas, a água se torna saturada de $CaCO_3$ e a dissolução tende a ser lenta, porém mais homogênea. Assim sendo, afirmamos que tais processos levam à formação de uma distribuição irregular de cavernas em uma unidade carbonática (GILLI, 2011; 2015).

A espeleogênese pode ser observada na escala do *conduto* e na escala do *sistema* como um todo. Na escala do conduto, existem dois tipos principais de escavação: 1) em sistemas saturados ou freáticos, a água preenche todo o conduto e o intemperismo ocorre ao longo de toda seção. Nesse caso, a dissolução geralmente acentua o condicionamento estrutural e geológico, mas, em alguns casos, pode ser isotrópica favorecendo a formação de passagens bem mais circulares, denominadas de condutos freáticos. 2) em sistemas não saturados ou vadosos, a água flui livremente, mas é mais concentrada nas partes mais baixas do conduto. A dissolução ocorre abaixo do nível inicial vadoso do conduto e sua forma tende a ser mais vertical, com passagens sinuosas e paredes verticais paralelas que recebem o nome de *cânion vadoso*. O que geralmente vemos é que os condutos inicialmente freáticos e tubulares são modificados por fluxos vadosos que dão forma similar a uma fechadura, conforme demonstrado nas figuras 110 e 111. (FORD; WILLIAMS, 2007; AUDRA; PALMER, 2013; 2015; GILLI, 2011; 2015). Em todos os casos apresentados, a presença de sedimentos no chão faz com que a dissolução e a erosão ocorram nas laterais do conduto, alargando-o horizontalmente.

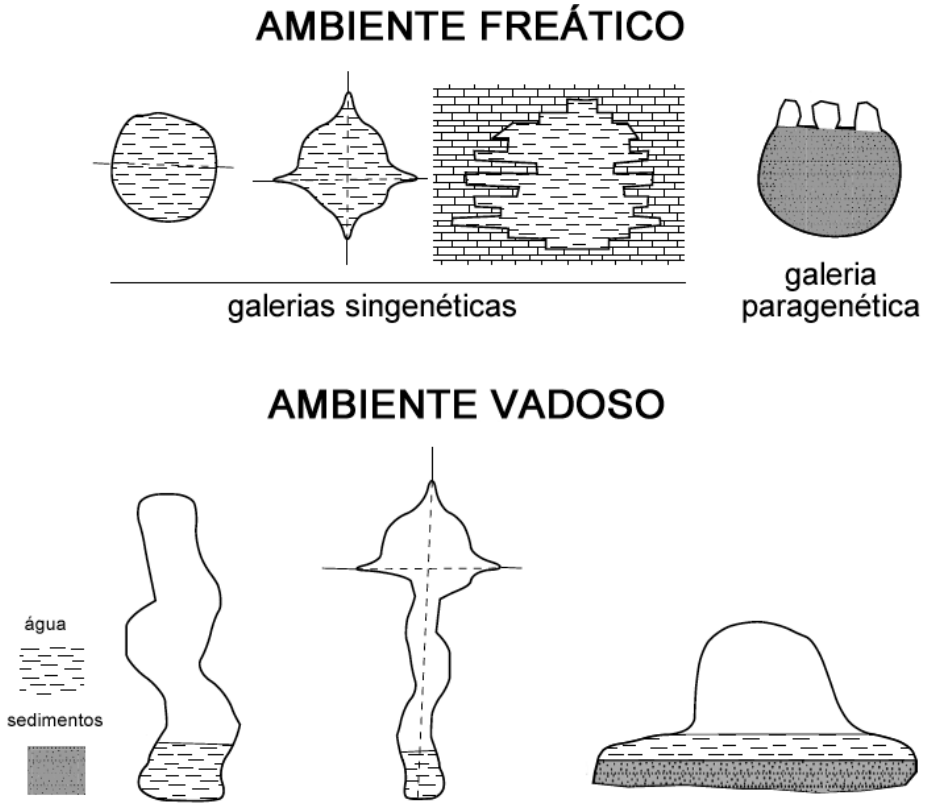


Figura 110 – *Exemplo de tipos de condutos escavados em ambiente freático e vadoso (Modificado de Gilli, 2015, p.62)*

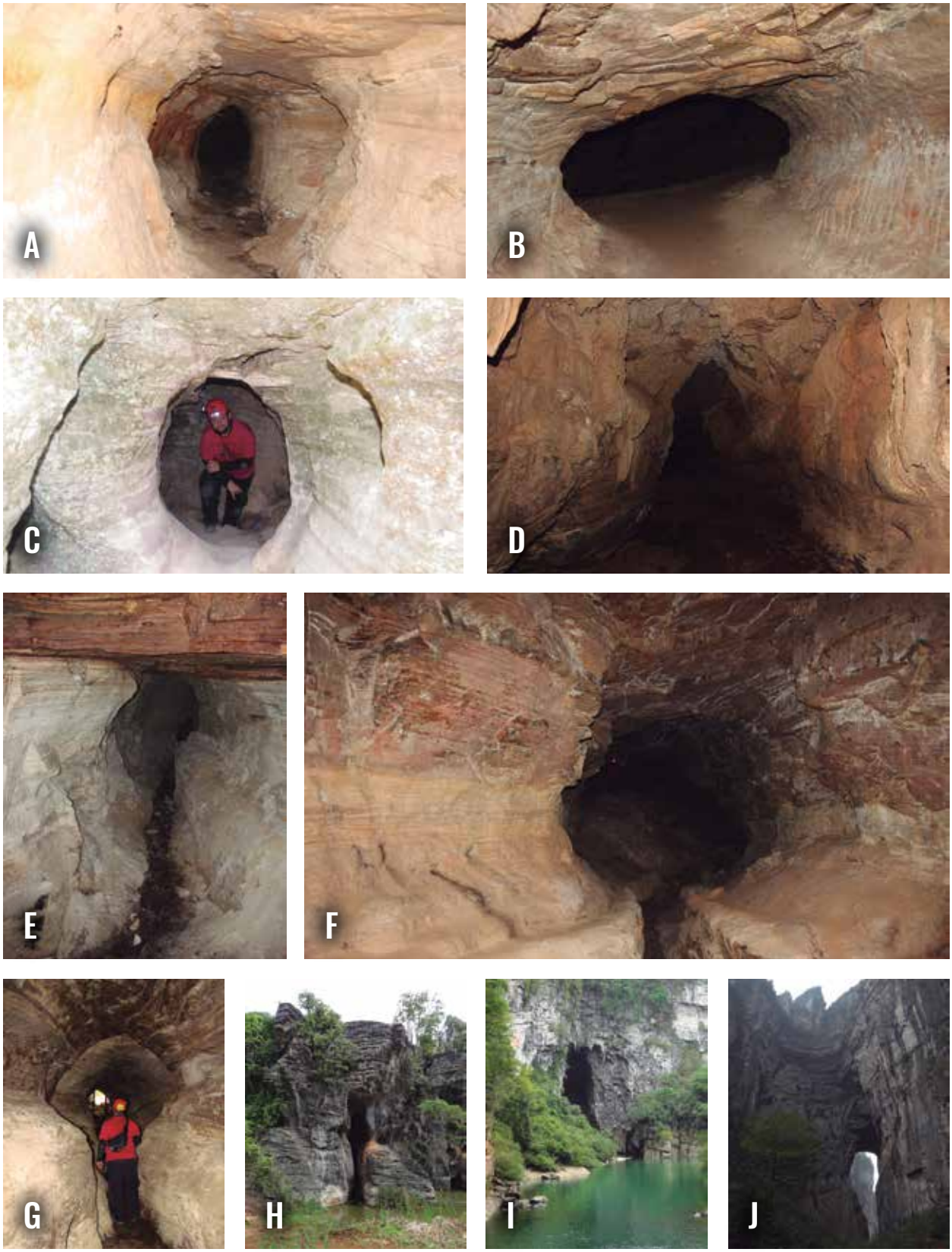


Figura 111 – *Exemplos de formas deixadas pelo processo de intemperismo em cavernas carbonáticas e quartzíticas. A, B e C) Galerias singenéticas de aspecto freático. D) Conduto vadoso, com destaque para a fase freática mais arredondada acima. E) Cânion de ambiente vadoso. F-G) Condutos inicialmente freáticos e que foram escavados em direção à base. H-I-J) Entradas de cavernas controladas fortemente pela estrutura geológica (Fotos: L.E.P. Travassos, Isabela Braichi Pôssas e Mauro Gomes).*

Além das feições mais ou menos cilíndricas ou elípticas, é importante destacar que as cavernas estão sujeitas aos colapsos. Esse fenômeno é condicionado pelas propriedades geomecânicas da rocha, bem como por sua espessura. Os colapsos ou abatimentos modificam a morfologfia dos condutos ou salões que tendem, em condições de isostasia, a adquirirem formas mais estáveis como as cúpulas.

Observando os condutos de forma conjunta, é possível classificar as cavernas de acordo com sua morfologia explicando, assim, sua gênese. A classificação planimétrica (Figura 112) é apresentada por Palmer (1991; 2000; 2002) e Audra e Palmer (2013; 2015) e pode ser resumida nos padrões: 1) *Curvilíneo ramificado*; 2) *anostomótico ou anostomosado*; 3) *rede (network) labiríntica* e 4) *espongiforme labiríntico.*

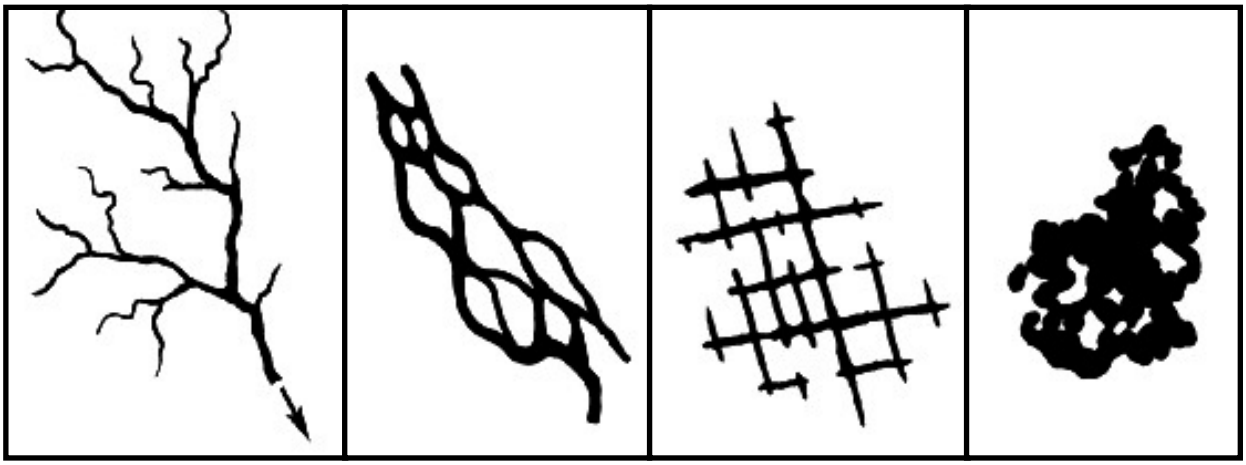


Figura 112 – *Padrões planimétricos mais comuns de cavernas. 1) Cavernas em padrão curvilíneo ramificado (branchwork) são formadas por pontos de recarga. 2) Cavernas anastomosadas geralmente são formadas ao longo de planos de acamamento pela oscilação do nível da água na zona epifreática. 3) Cavernas labirínticas, tipo network, são formadas preferencialmente ao longo das fraturas da rocha pela passagem da água sob ou sobre camadas impermeáveis. O alargamento gradual ocorre pela ação de água hipogênica. 4) Cavernas espongiformes labirínticas são formadas em rocha com alta porosidade intergranular, usualmente pela mistura de água doce com água salgada ao longo do litoral ou pela ascensão de água hipogênica (Fonte: Palmer, 1991; 2000; 2002 e Audra e Palmer, 2013; 2015).*

As *cavernas curvilíneas ramificadas* são aquelas formadas pela passagem de um rio e que apresentam aspecto similar ao de uma bacia de drenagem, com o rio principal e seus afluentes. Geralmente, cada ponto de recarga é uma dolina ou ponor que contribui para a gênese de um conduto principal, embora mais pontos de recarga possam contribuir na formação. *Cavernas anastomosadas* são compostas por canais sinuosos que se interceptam. A maioria delas é formada por alagamentos periódicos que ocorrem devido a sumidouros ou à rápida infiltração em uma superfície cárstica exposta. As cavernas conhecidas como aquelas em padrão de *rede labiríntica* são classificadas assim por se apresentarem na forma de uma rede angulosa, controlada por fraturas e fissuras. O padrão é tipicamente retangular e muitas são formadas pela infiltração uniforme da água ou alagamentos

periódicos na zona epifreática. O quarto padrão, as cavernas *espongiformes labirínticas*, consistem na conexão de inúmeras cavidades de vários tamanhos, que produzem um padrão tridimensional semelhante a poros de uma esponja. A maioria das cavernas desse tipo são hipogênicas ou formadas pela mistura da água doce e salgada (AUDRA; PALMER, 2013; 2015).

3.9.9. Cavernas como ambientes de sedimentação

As cavernas são consideradas "armadilhas" naturais de sedimentos e outros materiais que normalmente são transportados do exterior e depositados em seu interior. Neste caso, podem ser acumulados em um ambiente relativamente estável por muitos anos. Fornecem, portanto, ambientes perfeitos para estudos sedimentológicos e paleoambientais, conforme destacado mais detalhadamente por Twenhofel (1961), Bögli (1980), Jennings (1985), White (1988), Marie e Pomel (1994), Gillieson (1996), Onac (2000) e Ford e Williams (2007), entre outros.

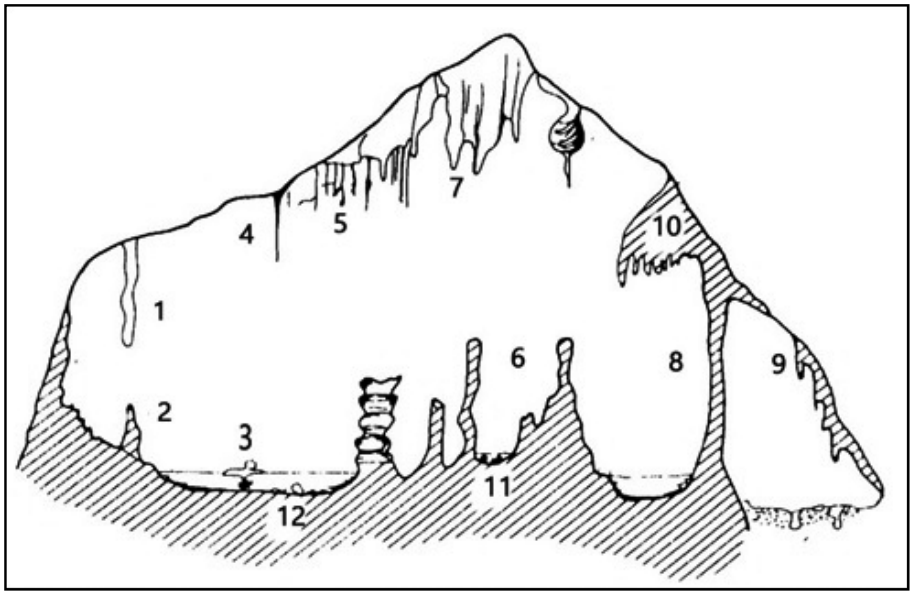
Para fins didáticos, Jennings (1985) divide os ambientes de deposição em dois, ou seja, aqueles da entrada e as do interior da caverna, cada qual com suas particularidades. Tais depósitos de sedimentos cavernícolas incluem os depósitos *clásticos* e *químicos*, os últimos sendo conhecidos como *espeleotemas*.

3.9.10. Os Espeleotemas

Talvez os *espeleotemas* sejam as feições cársticas mais conhecidas pelo público em geral e o foco principal de visitação turística a uma caverna. Termo bem consolidado na literatura, os espeleotemas são as formas de deposição existententes no interior das cavernas, que apresentam grande valor científico e, em alguns casos, têm valor sagrado para alguns grupos sociais. São estes depósitos de caverna (*spelaion*= cavernas; *thema*=depósito) que podem fornecer subsídios sobre como era a atmosfera no passado, que tipos de vegetais existiam ou mesmo quantos abalos sísmicos atingiram determinada região. Mais do que somente beleza cênica, os espeleotemas podem nos fornecer diversas informações ambientais. Gunn (2004), Ford e Williams (2007) e Fairchild e Baker (2012) destacam que esses depósitos são utilizados para auxiliar os estudos paleoambientais.

Recebem o nome de espeleotemas, os depósitos de minerais secundários nas cavernas (e.g. estalactites, estalagmites, escorrimentos, helictites, etc) que, nos carbonatos, são formados pela calcita, cujos processos de precipitação estão relacionados aos níveis de CO_2 na água (Figura 113 e 114). Não são exclusivos das cavernas carbonáticas, mas são mais conhecidos e abundantes nestas.

De acordo com Kempe (2013), as cavernas primárias podem conter espeleotemas compostos por minerais primários oriundos da própria rocha, bem como aqueles espeleotemas formados pela deposição de minerais secundários. Já as cavernas secundárias, possuem apenas espeleotemas formados por minerais secundários. Os processos principais de deposição dos espeleotemas carbonáticos são relativamente simples e ocorrem pela remoção do CO_2 dissolvido na água e a consequente deposição do carbonato ou de outros minerais (WHITE, 1989; GILLIESON, 1996).



1- Estalactite
2- Estalagmite
3- Jangadas
4- Canudo de refresco
5- Helictites
6- Estalagmites
7- Cortinas
8- Coluna
9- Cortinas
10- Escorrimento
11- Dentes de cão
12- Dentes de cão

Figura 113 – *Esquema para identificação dos espeleotemas mais comuns encontrados nas cavernas. (Modificado de Pulina, 1999).*

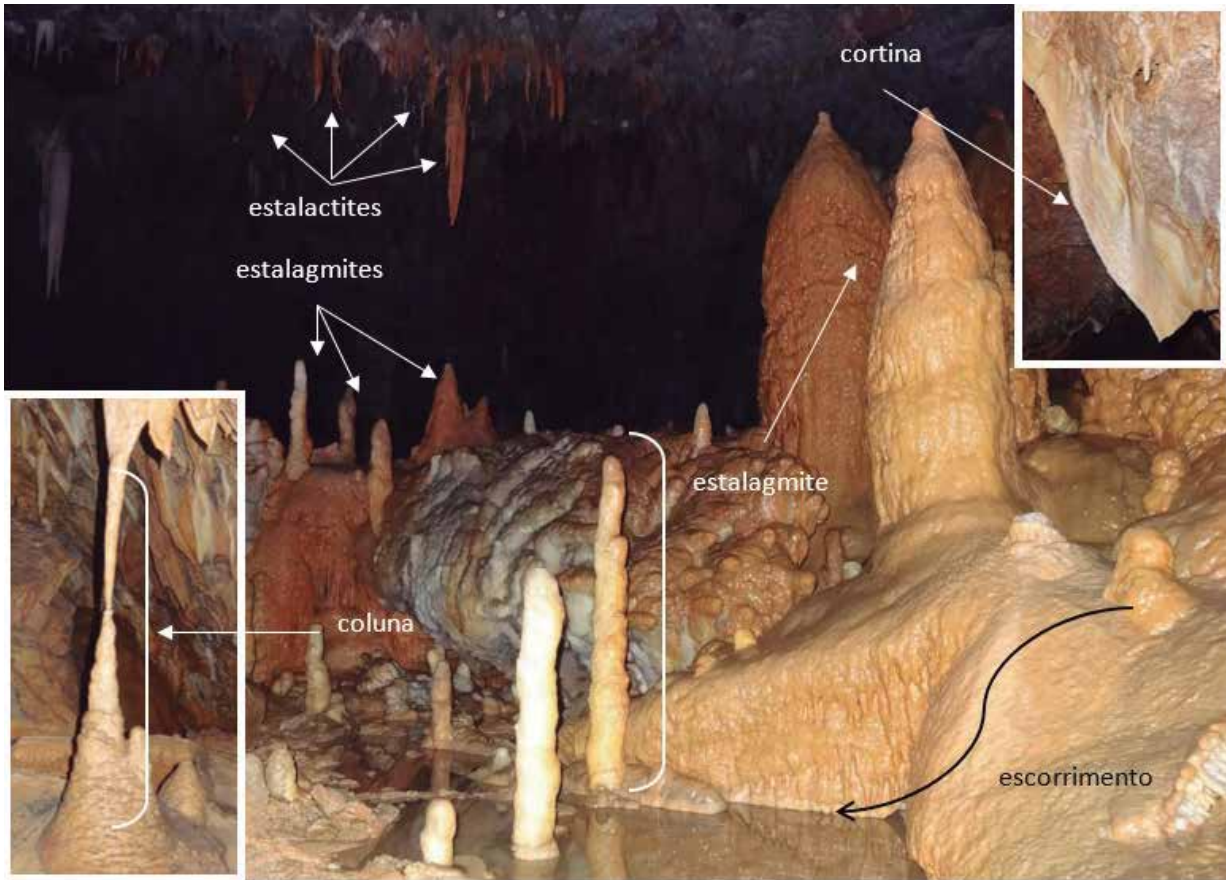


Figura 114 – *Aspecto geral de um salão subterrâneo e seus vários tipos de espeleotemas (Foto: L.E.P. Travassos).*

A literatura científica não oferece uma classificação muito rigorosa sobre os tipos de espeleotemas existentes, mas é possível agrupá-los em função de sua morfologia e gênese. White (2012) propõe o agrupamento dos espeleotemas em formas criadas 1) *pelo fluxo hídrico*, 2) *pelo gotejamento*, 3) *pelo movimento da água em capilaridade* e 4) *formas criadas pela água estagnada*. Percebemos que a classificação foi pensada com base nas características do fluxo dos fluidos que depositam os espeleotemas (Tabela 3).

Tabela 3-Uma breve proposta de classificação dos espeleotemas.

A. Formas criadas pelo fluxo hídrico 1. Escorrimentos 2. Represas de travertino 3. Coraloides B. Formas criadas pelo gotejamento 1. Estalactites 2. Estalagmites 3. Colunas 4. Cortinas	DEPÓSITOS DE ÁGUAS CIRCULANTES
C. Formas criadas pelo movimento da água em capilaridade 1. Crostas 2. Helictites 3. Flores de caverna	DEPÓSITOS DE ÁGUAS CIRCULANTES
D. Formas criadas pela água estagnada 1. Dentes de cão 2. Concreções (incluindo pérolas de caverna e jangadas)	DEPÓSITOS DE ÁGUAS PARADAS

Fonte: Modificado de White (2012, p. 779)

Neste livro, iremos destacar alguns dos espeleotemas mais comuns e facilmente identificáveis em campo. A maioria a ser abordada aqui será em carbonatos, mas podemos encontrá-los em cavernas desenvolvidas em outros tipos de rochas, como os evaporitos, arenitos, basaltos, granitos etc. Para aprofundamento teórico sobre o tema sugerimos a leitura dos trabalhos de Hill e Forti (1997; 2004a; 2004b), Forti (2005) e Kempe (2013).

3.9.10.1. Classificação dos espeleotemas

3.9.10.1.1. Espeleotemas formados pelo fluxo hídrico

São os depósitos mais comuns de serem encontrados nas paredes, tetos e pisos das cavernas e, no Brasil, são conhecidos como depósitos de águas circulantes. Impulsionados pela força da gravidade e a deposição de minerais contidos em soluções aquosas, ocorrem por meio do escorrimento, gotejamento ou turbilhonamento, os três principais mecanismos de formação. Para White (2005; 2012), o fluxo de água dentro das cavernas pode ocorrer na forma de rios subterrâneos ou de lâminas d'água, no chão ou nas paredes das cavernas. Se pensarmos nas características químicas dessas finas lâminas d'água, percebemos que, por serem drenadas a partir do epicarste para a zona vadosa, apresentam grandes concentrações de carbonato dissolvido, bem como maiores pressões de CO_2. Assim, temos a formação dos espeleotemas conhecidos como *escorrimentos*, que podem aparecer dentro das cavernas (Figura 115 e 116) ou fora delas.

Figura 115 – *Escorrimentos formados a partir da sucessão de lâminas d'água que escoam pela parede das cavernas, norte de Minas Gerais (Fotos: L.E.P. Travassos).*

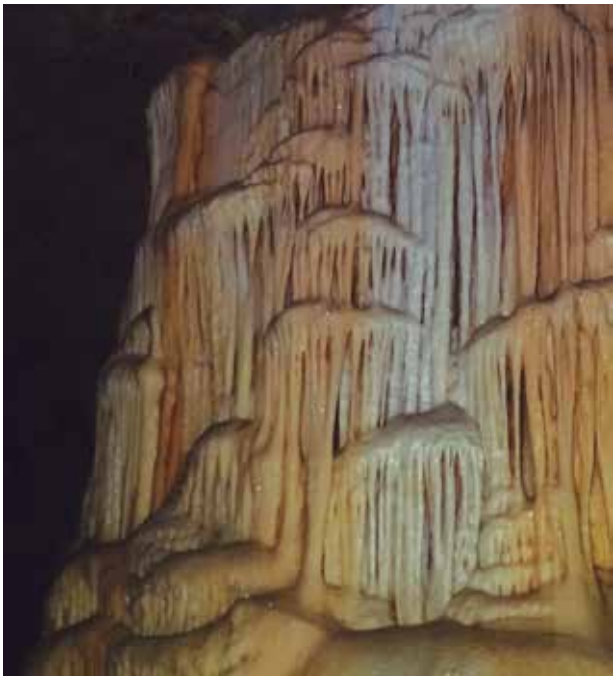


Figura 116 – *Escorrimentos nas paredes da Caverna de Postojna, Eslovênia (Fotos: L.E.P.Travassos).*

Em contraste com o tipo de água que forma os escorrimentos, White (2012) afirma que os cursos d'água nas cavernas apresentam-se menos saturados de carbonatos e CO_2, mas que, ainda assim, reúnem condições para formarem *represas de travertino* de pequenas, médias e grandes escalas (Figura 117). São um tipo especial de escorrimento que possui forma semelhante a represas por onde a água é ou já foi represada. Para White (2012), o mecanismo genético dessas represas não é bem conhecido, mas acredita-se que microrganismos podem ter um papel fundamental na deposição e consequente represamento na superfície ou no subterrâneo.

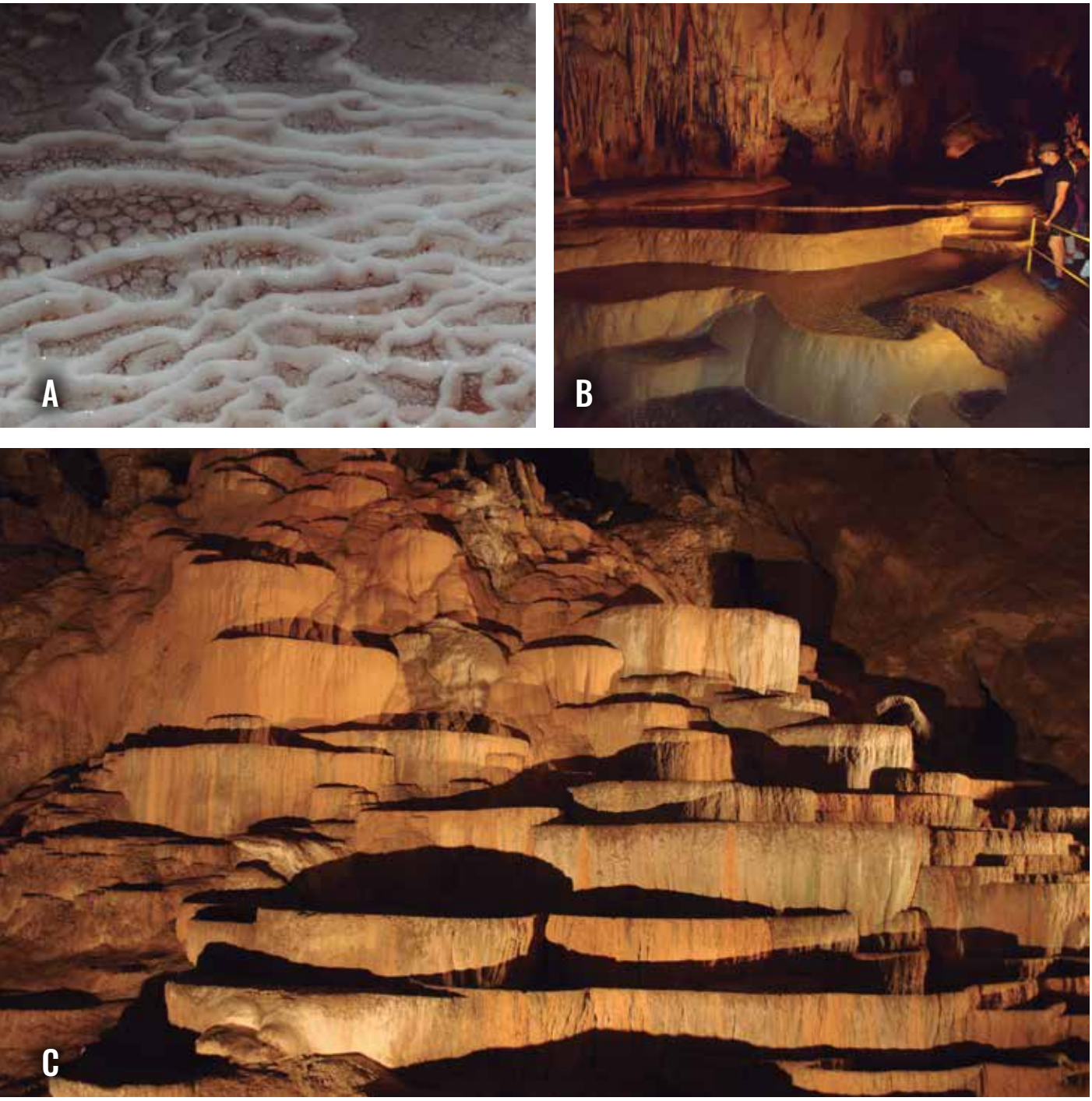


Figura 117 – *Detalhe de micro, meso e macro represas de travertino. Em A, o espaçamento médio entre uma "represa" e outra é de cerca de 3cm (Fotos A-C: L.E.P. Travassos; Foto B: Mariana Barbosa Timo).*

Talvez o tipo mais enigmático de espeleotema seja aquele que se apresenta em forma de nódulos conhecidos pelos nomes de "pipocas" ou *coraloides* (WHITE, 2012). Na verdade, recebe esse nome qualquer tipo de variedade de depósitos de calcita microcristalinos ou botrioidais, que se distinguem por apresentarem superfícies externas convexas. De acordo com White (2012), são tipicamente pequenos (de milímetros a centímetros) e crescem nas paredes das cavernas ou sobre outros espeleotemas (Figura 118). Alguns são totalmente compostos de calcita; outros contém aragonita e outros minerais que, certamente, não estão associados ao fluxo de água.

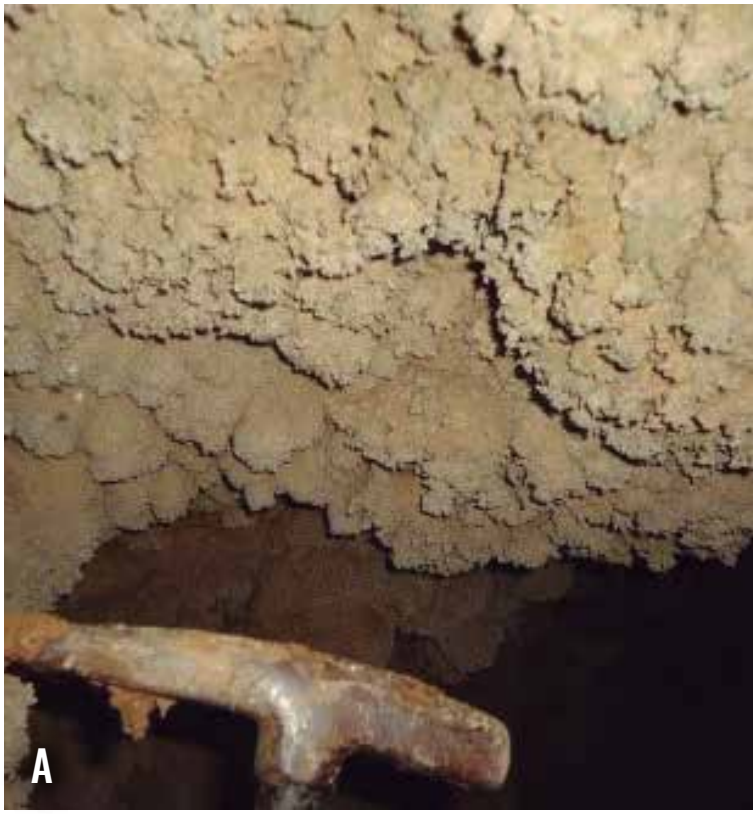


Figura 118 – *A) Coraloides na parede de uma caverna, região do Córrego do Cavalo, Piumhi, Minas Gerais (Foto: Juliana Barbosa Timo). B) Coraloides em uma estalactite na Furong Cave, Wulong Karst, China. C) Coraloides em uma caverna de Minas Gerais (Foto: L.E.P. Travassos).*

3.9.10.1.2. Espelotemas formados pelo gotejamento

A água da chuva ou de cursos d'água se infiltra pelo solo e pelo epicarste, seguindo os caminhos preferenciais fornecidos por descontinuidades e fraturas até encontrar o teto de uma caverna. Se a abertura é pequena, as gotas de água podem ficar suspensas por um período maior, tempo suficiente para que percam CO_2 para a atmosfera da caverna e, assim, tornam-se supersaturadas de calcita. Eventualmente, a gota se desprende do teto

da caverna e cai, deixando para trás um pequeno anel de calcita e uma nova gota se forma. A sucessão desse processo faz com que seja formado um espeleotema chamado de *canudo de refresco*, que é um tipo de *estalactite* (Figura 119).

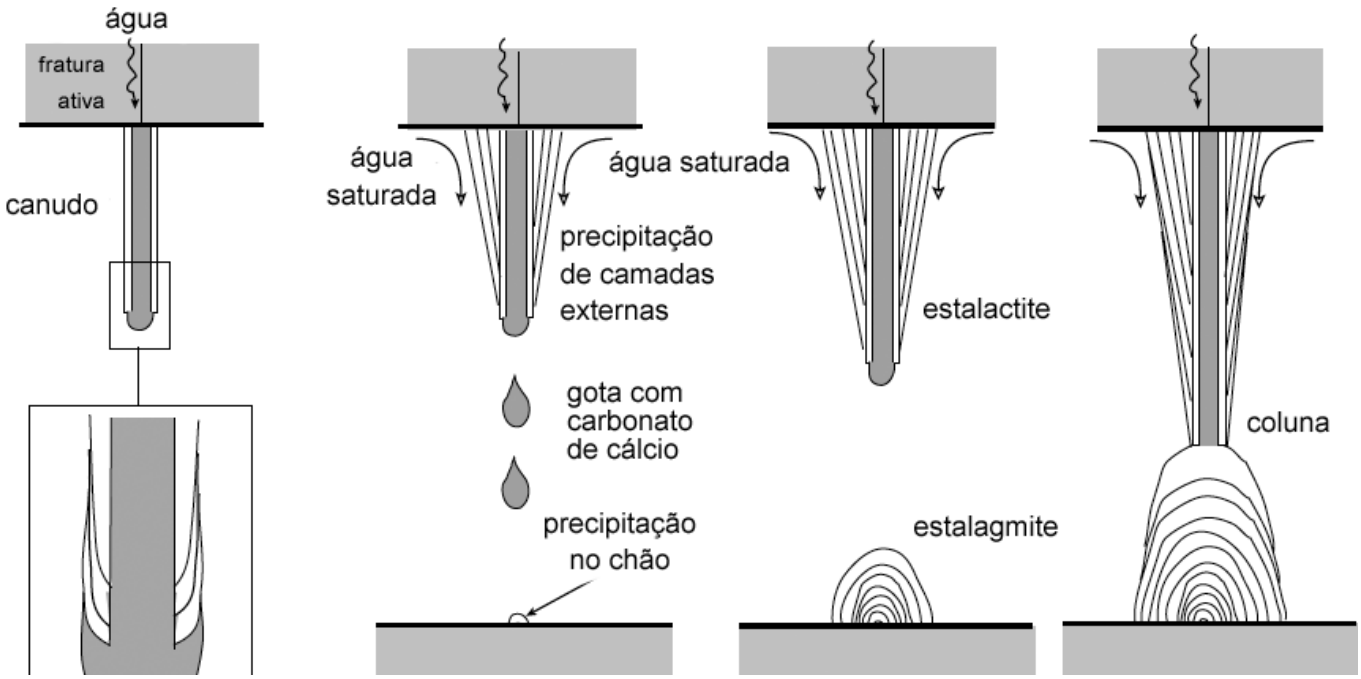


Figura 119 – *Esquema da formação inicial de um canudo de refresco até a formação de uma coluna (Fonte: Adaptado de Gilli, 2015, p.80).*

Figura 120 – *Exemplos de estalactites do tipo "canudo de refresco" (Fotos: L.E.P. Travassos).*

De acordo com White (2012), os canudos são tubos ocos, com cerca de 5mm de diâmetro, e, muitas vezes, apresentam cristais muito coesos. A partir de então, as *estalactites* continuam a crescer lateralmente e verticalmente, bem como pelo canal central. São, talvez, os espeleotemas mais conhecidos, até mesmo por pessoas que nunca visitaram uma caverna. Podem atingir vários metros e, algumas vezes, por causa de seu peso, podem se desprender naturalmente do teto (Figura 120 e 121).

A mesma água que se desprende do teto das cavernas ou de uma estalactite ainda possui minerais dissolvidos, que vão ser depositados no chão das cavernas, seja sobre a rocha, seja sobre os sedimentos. Dessa forma, temos a formação de uma *estalagmite*. São mais arredondadas que as estalactites e seu crescimento ocorre de baixo para cima. Geralmente apresentam diâmetro maior que as estalactites. As formas e dimensões variam em função do regime hídrico. Caso tenham mais aporte de água, serão maiores que as estalactites (Figura 122 e 123); caso o fluxo de água seja menor, serão pequenas. Quando observamos o encontro de uma estalactite com uma estalagmite, estamos diante de uma *coluna* (Figura 124). White (2012) destaca que múltiplos pontos de infiltração e gotejamento combinam para formar um complexo massivo de espeleotemas.

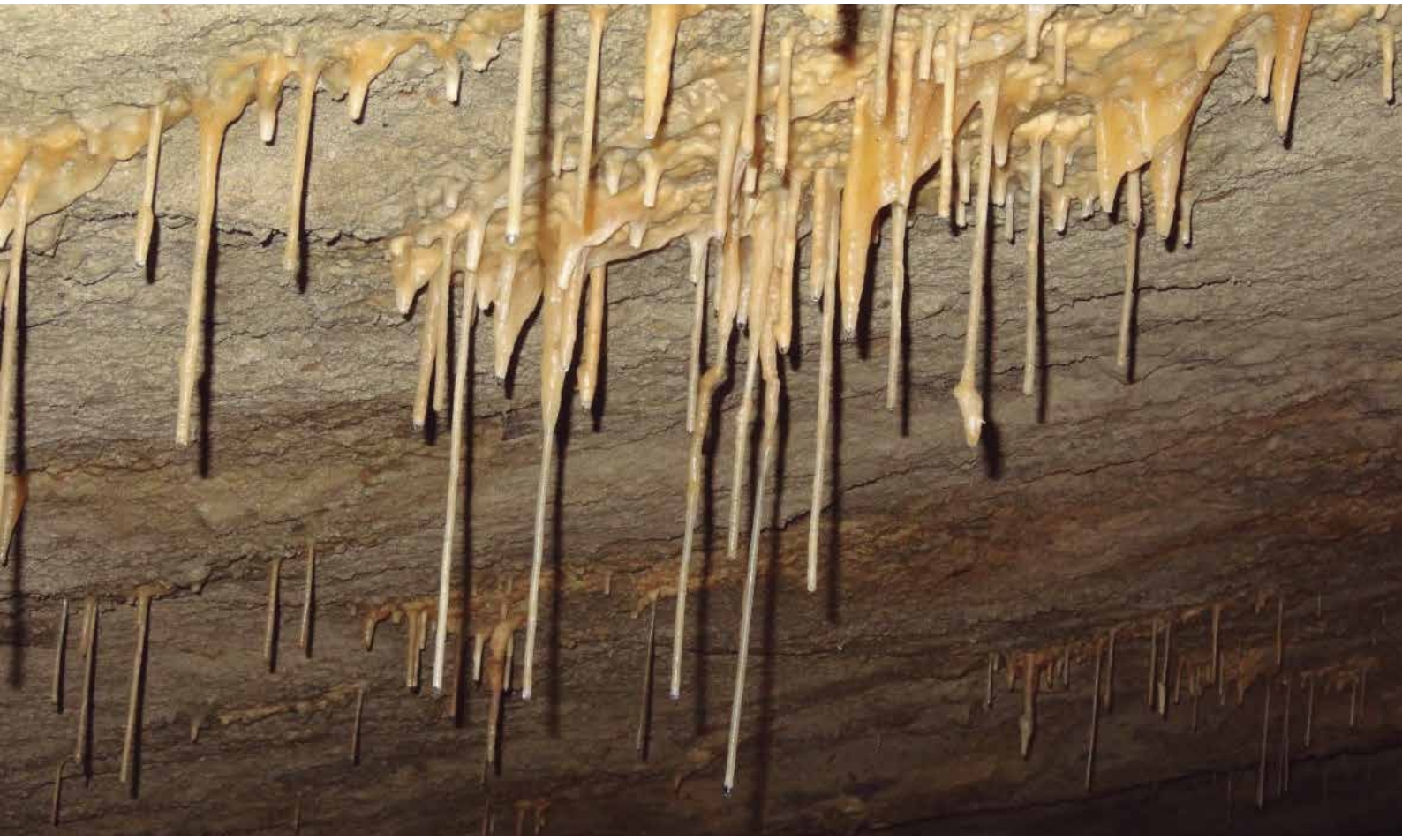


Figura 122 – *Estalagmites de vários tamanhos e formas, mas todas maiores que a estalactites acima delas (Fotos: L.E.P.Travassos).*

Figura 121 – *Estalactites bem desenvolvidas em uma caverna no norte de Minas Gerais. É interessante notar que a formação segue o caminho de uma fratura na rocha (Fotos: L.E.P. Travassos).*

Figura 123 – *Estalagmites na Gruta Rei do Mato, Minas Gerais (Fotos: L.E.P.Travassos).*

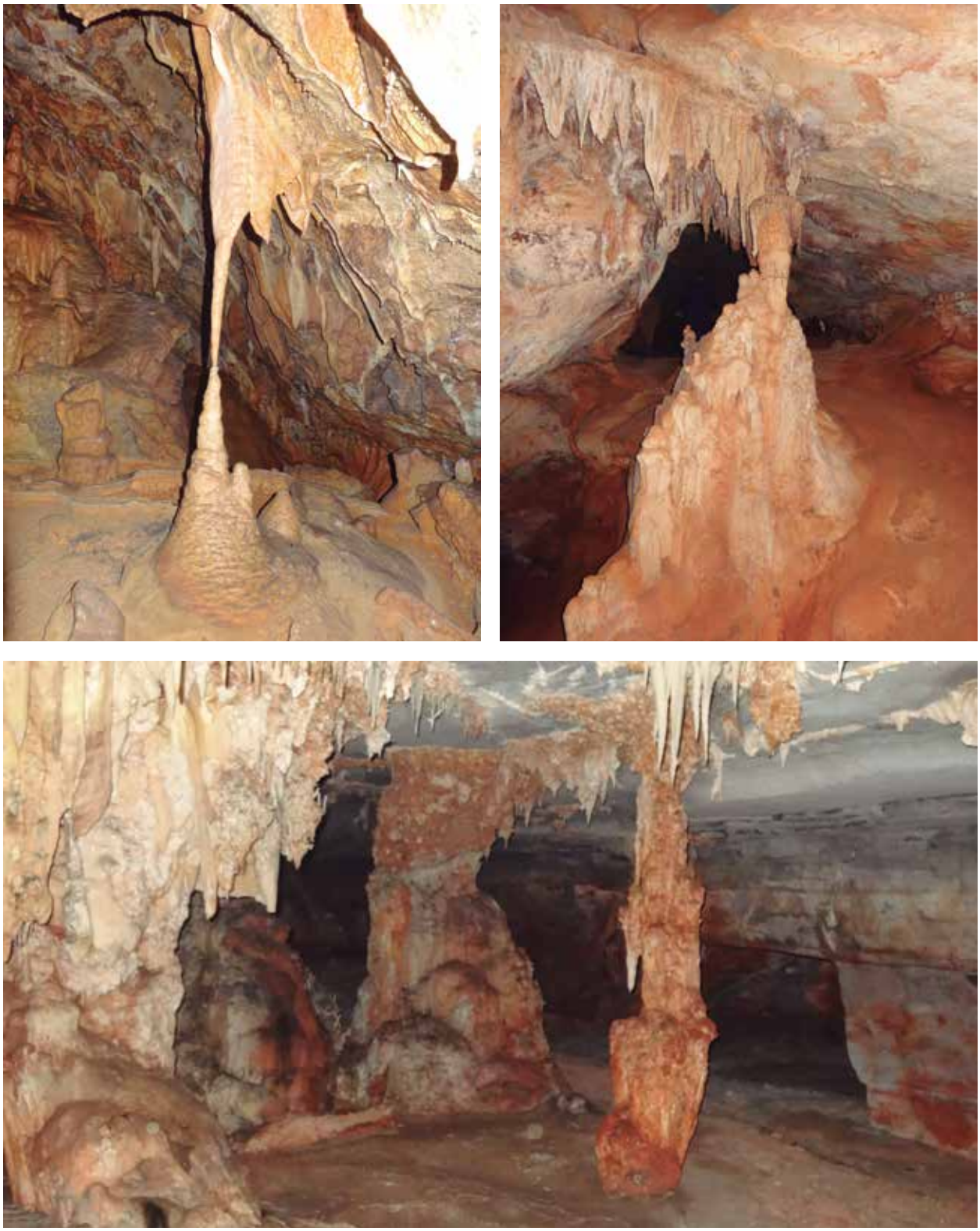


Figura 124 – *As colunas podem se apresentar de forma isolada ou em agrupamentos que podem dar origem a escorrimentos. Tudo depende da morfologia da caverna, suas fraturas, regime hídrico e antiguidade do sistema (Fotos: L.E.P. Travassos).*

A mesma gota responsável pela formação da estalactite, ao encontrar um teto ou parede que esteja inclinado ou levemente inclinado, deixará um fino rastro de calcita. Após um longo e demorado processo, teremos a formação de espeleotemas que lembram a forma de uma *cortina*. (Figura 125). Suas cores alaranjadas ou marrons ocorrem devido às impurezas na água que escoa. Assim como os demais espeleotemas, suas formas e tamanho variam de acordo com o volume de água.

Figura 125 – *Exemplo de cortinas, com composições diferentes em função de outros minerais e impurezas adicionadas à solução (Fotos: L.E.P. Travassos).*

3.9.10.1.3. Espeleotemas formados pela água em capilaridade

Conforme destacado anteriormente, as rochas carbonáticas, cujas cavernas tendem a se formar com mais facilidade pela dissolução, apresentam baixa permeabilidade intragranular. Por esse motivo, o movimento da água tende a ocorrer com mais facilidade por meio de planos de acamamento, juntas e fraturas, por exemplo. Entretanto, White (2012) lembra que a baixa permeabilidade não significa valor igual a zero e, por isso, a água pode fluir por capilaridade. Assim, os fluidos que conseguem passar pelos poros da rocha carregam a matéria mineral que se deposita na forma de crostas ou espeleotemas, quando atingem a atmosfera da caverna.

O tipo mais comum de espeleotema formado por esse processo é a *helictite* (Figura 126). Sua formação se dá por meio de um canal capilar no qual a água assume uma pressão considerável, que não obedece a gravidade, permitindo o crescimento dos cristais de forma errática. Podem aparecer de forma isolada nas paredes ou em outros espeleotemas. Em alguns casos, recebem o nome de "flores de caverna", normalmente compostas por minerais como a mirabilita ($Na_2SO_4.10H_2O$) e a epsomita ($MgSO_4.7H_2O$).

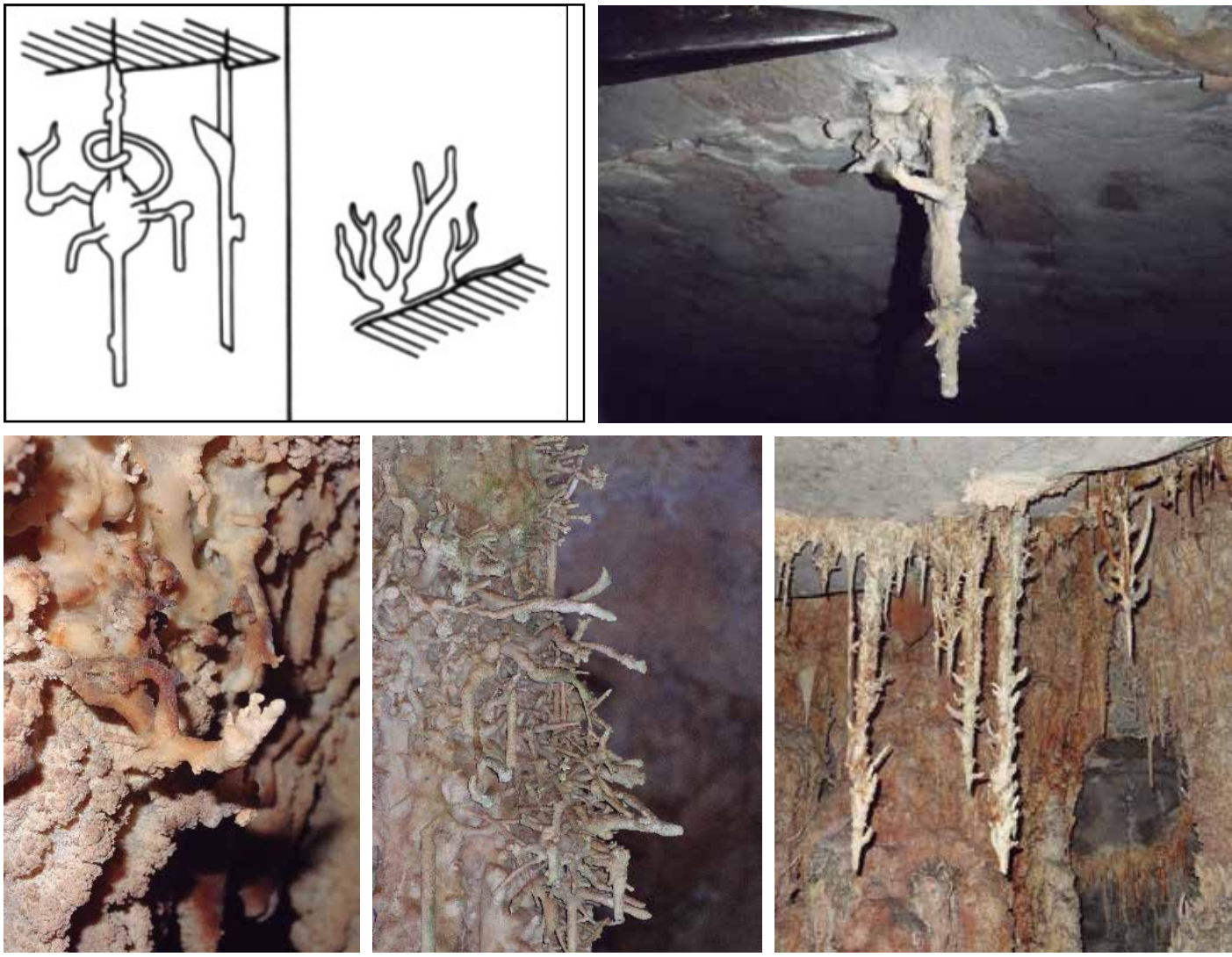


Figura 126 – *Acima das fotos, é possível observar um modelo conceitual de formação elaborado por Bögli (1980, p. 193). Nas fotos, é possível ver de helictites formadas isoladamente ou na superfície de outros espeleotemas (Fotos: L.E.P. Travassos).*

3.9.10.1.4. Espeleotemas criados pela água estagnada

São aqueles formados pela precipitação de minerais na superfície da água, no fundo de locais onde a água foi represada no interior das cavernas ou, por submersão, em águas represadas no interior da caverna. Os mais conhecidos deles talvez sejam os *cristais dente-de-cão*. White (2012) afirma que existe uma grande diferença entre os espeleotemas que crescem na interface ar-água e aqueles que são formados submersos na água. Os primeiros possuem superfícies arredondadas e mais polidas ditadas pelo fluxo da água. Já os espeleotemas submersos pela água têm o hábito de crescimento dos seus cristais.

As *pérolas de caverna* (Figura 127) são quase esféricas e são espeleotemas soltos, que se formam em pequenos nichos agitados pela água em gotejamento. O processo de gênese mais aceito na literatura é a sua formação concêntrica em torno de um núcleo, que pode ser um grão de areia ou até mesmo pequenos ossos de animais. White (2012) destaca que a agitação da água é suficiente para manter esse tipo de espeleotema não fixado na superfície e polido ao longo do tempo ao rolarem dentro de seus nichos.

Figura 127 – *Exemplos de pérolas de caverna em vários estágios evolutivos. Pérolas menos arredondadas indicam sua "juventude", bem como o volume de água para sua formação, em relação àquelas mais polidas e arredondadas (Fotos: L.E.P. Travassos).*

Os espeleotemas *dentes-de-cão* são um tipo de cristal de calcita com pontas agudas, normalmente encontrados em pequenos lagos, represas de travertino ou na superfície das cavernas. São formados pela precipitação da calcita na água supersaturada e não são limitados ao ambiente das cavernas, pois podem crescer em vazios da rocha, que um dia foram preenchidas por água saturada. Esses incluem veios, fraturas e geodos. De acordo com White (2012), a água parada no interior das cavernas pode ficar supersaturada pela lenta perda de CO_2. Os cristais de calcita podem se precipitar na superfície, unindo-se e formando um outro tipo de espeleotema, conhecido como *jangada*. Essas podem se juntar às bordas da represa e se solidificarem ou podem ficar pesadas e afundarem (Figura 128).

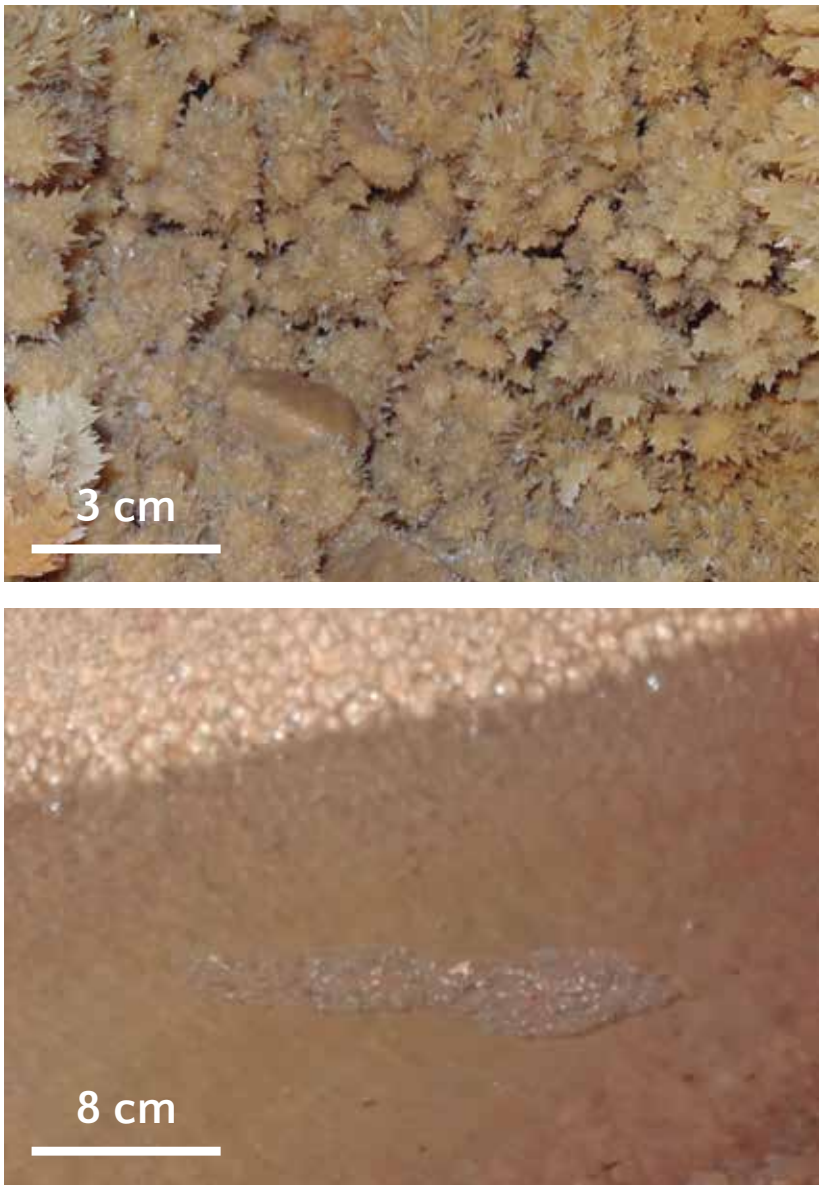


Figura 128 - *A) Exemplo de uma pequena jangada em uma represa de travertino. B) Pequenos cristais dente-de-cão no fundo de uma represa de travertino no interior de uma caverna (Fotos: L.E.P.Travassos).*

Foto: L. E. P. Travassos

ESPELEOCLIMATOLOGIA E ESPELEOMETEOROLOGIA

A atmosfera terrestre é formada por processos físicos e biológicos que vêm ocorrendo a bilhões de anos antes do presente. Embora seja uma espécie de "capa" contínua de moléculas gasosas e outras partículas, ela é dividida em finas camadas ou estratos. O ar que compõe tais camadas é formado de moléculas gasosas que se movem livremente e, como toda matéria, são atraídas pela gravidade. A gravidade é mais forte em menores altitudes e as moléculas de ar se comprimem ao nível do mar. Além dessa força, o ar também é comprimido pelo peso de toda massa de ar acima desse ponto. Tal força de compressão sobre uma unidade de área é conhecida como *pressão atmosférica* ou *pressão do ar*. Assim, a pressão atmosférica diminui na medida em que a altitude aumenta, pois existe menos gravidade e menos peso do ar acima do ponto de medição (DESONIE, 2007; BARRY; CHORLEY, 2009). Vários outros fatores atuam em conjunto para fornecer dados relativos à umidade, temperatura e precipitação, por exemplo, que nos fornecem aspectos do tempo e do clima de uma região.

De acordo com Perry (1997), o clima constitui uma importante parte do contexto ambiental do turismo e da recreação, pois o turismo é uma atividade voluntária que, normalmente, dependerá das condições climáticas favoráveis para a atividade escolhida.

Por esse motivo, é preciso diferenciar os conceitos de *tempo* e *clima*. O primeiro termo faz referência à condição atmosférica em determinado tempo e espaço, enquanto o segundo termo se refere à sucessão dos estados de tempo em longo prazo. Dessa forma, podemos identificar duas ciências distintas, porém complementares: a *Meteorologia*, para estudos sobre o tempo e a *Climatologia*, para os estudos sobre o clima. Barry e Chorley (2009) destacam que é a diferença entre o calor solar em baixas e altas latitudes que mantém as circulações atmosférica e oceânica globais.

Sendo assim, é possível identificarmos a *Espeleometeorologia* e a *Espeleoclimatologia*, essencialmente com o mesmo significado apresentado para a superfície: a *espeleometeorologia* se dedica ao estudo de processos instantâneos na atmosfera das cavernas e a *espeleoclimatologia* se concentra no estudo dos estados médios ou a sucessão dos estados de tempo na caverna. Contudo, com exceção do caso do vento ou movimento do ar, Bögli (1980) afirma que a variação dos parâmetros é geralmente tão pequena que existe apenas uma diferença mínima entre os valores instantâneos e as médias. Por esse motivo, os dois termos são utilizados como sinônimos, sendo o primeiro preferido por pesquisadores de língua inglesa e alemã e o segundo, pelos de língua francesa. Em resumo, podemos dizer que as pesquisas se dedicam ao estudo do *microclima das cavernas*.

De acordo com Lobo (2011), não existe uma pesquisa específica para determinar qual o termo mais adequado para os estudos climáticos nos subterrâneos. Dessa forma, o autor destaca que vários pesquisadores utilizaram temos como *topoclima* (MOREIRA; TRAJANO, 1992; FOKEN, 2008), *espeleoclima* (CÉSAR Jr., 1980; ZELINKA, 2002; KRANJC; OPARA, 2002; PFLITSCH; PIASECKI, 2003) ou *espeleoclimatologia* (PFLITSCH et al., 2006), *espeleometeorologia* (PFLITSCH; PIASECKI, 2003), *criptoclima* (BAILEY, 2005), o *clima subterrâneo* (MANGIN; ANDRIEUX, 1988; BADINO, 2004), a *micrometeorologia* (BADINO, 2009a) e *clima de caverna* (PFLITSCH; PIASECKI, 2003; BADINO, 2004; CIGNA, 2005).

Mesmo com as diferenças, o termo *microclima* é quase unanimemente utilizado, segundo

observado nos trabalhos de Dragovich e Grose (1990), Choppy e Cigna (1994), Hoyos et al. (1998), Sánchez-Moral et al. (1999), Freitas e Schmekal (2003), Fernández-Cortés (2006a, b), Piasecki et al. (2006) e Liñan, Vadillo e Carrasco et al. (2008), conforme destacado por Lobo (2011), que prefere adotar o termo *espeleoclima* devido às características dos ambientes cavernícolas, que condicionam uma nomenclatura mais focada para os sistemas atmosféricos subterrâneos. Neste livro, adotamos os termos *microclima cavernícola*, bem como *espeleoclima*.

4.1 ASPECTOS GERAIS DO MICROCLIMA CAVERNÍCOLA

De acordo com Badino (2010), por causa da aparente estabilidade da atmosfera das cavernas, os complexos processos e fenômenos que ocorrem como consequência da escala geológica do tempo são frequentemente esquecidos. No interior das cavernas, tais microclimas são diferentes daqueles do meio externo e o conhecimento sobre tais processos é o objetivo daqueles que se dedicam ao estudo do microclima cavernícola, especialmente se levarmos em conta o grande número de pessoas que visitam cavernas pelo mundo.

O clima das cavernas ou espeleoclima é o resultado de vários processos e fatores planetários. É influenciado pela atmosfera exterior, bem como pela topografia, pela geometria da caverna, pela distribuição espacial de entradas no sistema e pelo fluxo de água subterrânea. Além disso, é preciso destacar a presença antrópica e as atividades dentro e no entorno das cavernas. A avaliação de tais fatores não é fácil para os gestores, pois eles devem seguir as diretrizes e os padrões do turismo moderno e, ao mesmo tempo, preservar o vulnerável microclima (BADINO, 2010; MILANOLO; GABROVŠEK, 2009).

O microclima cavernícola torna-se importante no estudo da fauna e da flora subterrâneas (quando associada a entradas ou claraboias), assim como para a compreensão de certos processos cársticos que ocorrem nestes espaços. Portanto, compreender o espeleoclima é especialmente importante para o manejo e a gestão de cavernas abertas ao turismo e para permitir o uso do recurso da forma mais sustentável possível, aceitando as perdas, quando for o caso.

Pesquisas recentes têm levado em consideração o fato de que as cavernas também desempenham papel importante no ciclo global do carbono (ZHAO; WU, 2011; JIANG, 2012; JIANHUA, 2012; WANG, 2012; PU, 2014). Essa é outra razão pela qual percebemos o aumento do interesse nas pesquisas relacionadas à ventilação subterrânea e o transporte de CO_2 ao longo dos sistemas cársticos (GREGORIČ et al., 2013; GABROVŠEK et al., 2010; 2011; 2012; COVINGTON et al., 2011; 2013; MANDIĆ, 2013).

Por esses motivos, um dos maiores desafios para os gestores de uma caverna, quando pensam as atividades turísticas, é a busca da melhor forma de desenvolver o turismo e a infraestrutura associada ao mínimo de impacto no ambiente, nos guias e nos turistas. Além dos impactos físicos diretos, que são relativamente mais fáceis de identificar e avaliar (e.g. passarelas, quebra de espeleotemas, sujeira em espeleotemas etc.), o turismo altera o microclima da caverna, fator crucial para manutenção do ecossistema subterrâneo. Tanto a literatura quanto a prática em campo nos mostram que a mudança do microclima pode ameaçar espécies endêmicas, bem como alterar

processos naturais, como a deposição de espeleotemas, e aumentar sua corrosão, por exemplo (Figura 129). Além disso, Smith, Wynn e Barker (2013) afirmam que a compreensão da atmosfera cavernícola tem se tornado cada vez mais importante para diversos estudos nos subterrâneos, que vão desde a interpretação isotópica e de elementos-traço nos espeleotemas aos estudos de capacidade de carga do ambiente.

Sabemos que o CO_2 é fundamental para os processos de dissolução e deposição em um sistema cárstico e, por essa razão, Milanolo e Gabrovšek (2009) destacam que mudanças na pressão parcial desse gás pode aumentar a precipitação de $CaCO_3$, mudar o equilíbrio para soluções agressivas ou aumentar o efeito da corrosão por condensação. Dessa forma, torna-se importante o controle do aporte de CO_2 que pode ocorrer com o aumento do número de visitantes em uma caverna.

Para Bögli (1980) e Pflitsch e Piasecki (2003), enquanto as condições climáticas externas dependem de mudanças regionais ou globais, as mudanças que são observadas nas cavernas dependem, em grande parte (ou exclusivamente), das condições locais. Nesses espaços prevalecem a alta umidade relativa e a baixa variação de temperatura, sendo a temperatura do ar, fator chave na geração das correntes de ar.

Inicialmente, muito do que foi escrito sobre ventilação de espaços subterrâneos ocorreu em função da antiguidade das atividades antrópicas em minas nos séculos passados. Especificamente na Europa, McPherson (1993) afirma que a morte de crianças, homens e mulheres no século XVIII e XIX deu início ao maior número de estudos teóricos e práticos sobre a ventilação das minas subterrâneas. Antes disso, gregos e romanos e, posteriormente, como europeus na Idade Média, desenvolveram a habilidade de usar o fogo para promover a circulação do ar nestes espaços. Entretanto, em muitos casos, quando a temperatura na superfície e no subterrâneo era quase a mesma, o ar ficava estagnado e uma atmosfera nociva causava acidentes.

Em cavidades naturais subterrâneas, os processos são regulados por fatores naturais e o risco de uma atmosfera nociva é mínimo, salvo em casos nos que condutos ou salões estão muito afastados da entrada e apresentam

Figura 129 – *Corrosão causada pelo excesso de CO_2 na atmosfera de uma parte da Caverna de Postojna. Nas fotos, vemos a corrosão em superfícies carbonáticas e em espeleotemas (Fotos: L.E.P. Travassos).*

grande quantidade de matéria orgânica acumulada, o que pode liberar outros gases, por exemplo. Assim, na impossibilidade de ocorrer a troca de ar com o exterior, o ar da caverna adota a temperatura e a umidade da rocha. Porém, de acordo com Freitas e Schmekal (2003), na maioria das cavernas, o ar se move devido a forças de convecção ou forças gravitacionais.

Para entender como a atmosfera cavernícola se comporta é necessário compreender algumas noções básicas sobre mecânica dos fluídos. Um fluido é uma substância cujas moléculas constituintes estão livres para se mover em relação umas às outras. Em um sólido, por outro lado, as moléculas se mantém essencialmente fixas em condições não destrutivas de temperatura e pressão. Assim, a matéria pode ser classificada em fluidos e sólidos, sendo os *fluidos* divididos em *líquidos* e *gases*. Esses últimos, portanto, são o foco principal de um estudo microclimático em uma caverna.

No caso das cavernas, temos que ter em mente que as condições naturais impedem que o fluido seja tratado como "ideal", pois todo seu movimento é influenciado pelo atrito com as superfícies irregulares da caverna.

McPherson (1993) afirma que, quando um fluido passa por um tubo, conduto ou outra abertura contínua, geralmente ocorrerão mudanças em sua velocidade e pressão. Na literatura sobre termodinâmica, muita atenção é dada a processos sem forças de fricção (MCPHERSON, 1993) e que são chamados de processos ou condições "ideais".

Entretanto, as cavernas não apresentam tais condições ideais e cada análise deve ser feita levando em consideração a ausência delas. Toda caverna é única em sua geometria, extensão, geologia e gênese. Assim sendo, o comportamento da circulação do ar pelos condutos será igualmente variável. Condutos mais estreitos podem apresentar mais velocidade do ar, mas não necessariamente maior volume de ar, por exemplo. Para Cigna (1968), existem fatores *dinâmicos* e *estáticos* que influenciam a circulação do ar em uma caverna. Os primeiros dizem respeito aos fluidos em movimento, como a água e o ar. Já os fatores estáticos dizem respeito às variações de pressão, temperatura ou composição do ar.

Observa-se que a ventilação natural de espaços subterrâneos ocorre devido às diferenças

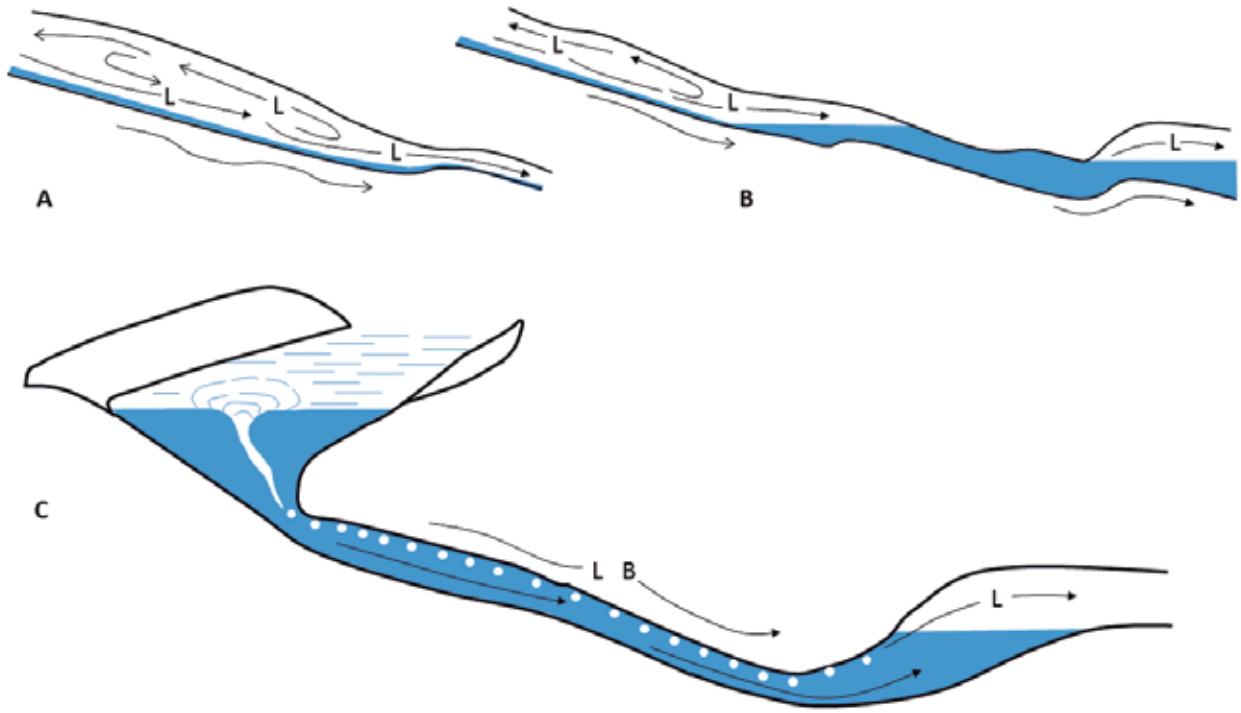


Figura 130 – *Modelo conceitual do movimento do ar estimulado pelo fluxo de água onde "L" é o ar em movimento e LB o transporte do por meio de bolhas de ar (Modificado de Bögli, 1980, p. 222).*

de densidade entre os fluidos e, enquanto durar essa diferença, o movimento do ar irá continuar. Dessa forma, se for adicionado calor ao ar, ele ficará menos denso e irá se mover mais rápido pelo conduto, até que um estado de equilíbrio dinâmico seja atingido (McPHERSON, 1993). Logo, diferenças de temperaturas na atmosfera externa à caverna, geralmente darão início aos movimentos que são observados no interior.

É fácil percebermos que a compreensão do microclima das cavernas como resposta a mudanças naturais e antrópicas no subterrâneo e na superfície é complexa e, talvez, somente seja efetivamente atingida por meio de modernos modelos numéricos que considerem os principais fatores e processos envolvidos na atmosfera cavernícola.

Além dos gases comuns que compõe a atmosfera externa (e.g. nitrogênio, oxigênio, argônio, gás carbônico e uma pequena quantidade de outros gases), as cavernas podem apresentar grandes quantidades de CO_2 e Rn. Esse último, o Radônio, não é tão importante para os processos do microclima, mas é significativo para a manutenção da saúde humana. Esse gás inerte é produto natural da decomposição do urânio e normalmente emana da rocha matriz (ou da água subterrânea) após ter tido contato com minerais radioativos. McPherson (1993) nos lembra que a meia vida do Rn é de 3.825 dias, tempo em que emite radiação alfa. É, portanto, radioativo e estar sob exposição prolongada a ele pode causar danos em longo prazo.

Bögli (1980) destaca que a meteorologia cavernícola é essencialmente diferente das condições externas. O comportamento da atmosfera das cavernas resulta das alterações pronunciadas de causas locais, ou seja, da rede de condutos e conexões com a superfície. A falta de luz

solar é outra diferença importante na comparação com a atmosfera externa. O movimento do ar tende a ser linear ao longo dos condutos; entretanto, correntes de convecção verticais tendem a ser mais limitadas a espaços mais amplos. Além disso, a umidade relativa do ar é quase sempre próxima a 100% ou apresenta valores muito altos. As variações na temperatura são geralmente menores e o movimento do ar é menor do que aquele registrado no exterior.

Cigna (1967; 1968) e Bögli (1980) destacam que o movimento do ar pode ocorrer induzido pelo movimento da água no interior das cavidades como resultado da fricção entre água e ar. Se o curso d'água atingir passagens mais estreitas ou sifões, a circulação do ar local ocorre antes destes locais: (A) com o ar deslizando para à montante do curso d'água, ao longo do teto. Fluxos hídricos mais rápidos arrastam o ar até que ocorra a transição para um fluxo de pressão (B) ou pode ser sugado para o centro de um espiral (C), conforme demonstrado na Figura 130. Além desses movimentos, cachoeiras e outras quedas d'água também auxiliam no movimento do ar.

Sobre a temperatura do ar nas cavernas, é possível afirmar que a maioria delas está próxima da média anual externa o que, nas palavras de Burges et al. (2014), indica que um ou vários mecanismos são capazes de neutralizar ou contrabalancear o efeito do gradiente geotérmico.

Contudo, cavernas que possuem rios perenes tendem a apresentar outros valores, pois geralmente a água diminui a temperatura do ar. Assim sendo, Bögli (1980) nos lembra das relações térmicas entre água, ar e rocha, que são determinadas pelo calor específico e suas densidades (Tabela 4). Badino (2004) destaca que os fluidos que penetram no subterrâneo entram em contato com outras matérias que possuem uma capacidade térmica muito maior.

Tabela 4-Calor específico e densidade da água, rocha e ar (1 cal=4.1868J).

	CALOR ESPECÍFICO (cal/g)	DENSIDADE (g/cm^3)	(cal/cm^3)	(cm^3/cal)
Água	1	1	1	1
Calcário	0,210	2,7	0,567	1,76
Ar	0,241	0,001293	0,0003116	3209

Fonte: Bögli (1980, p.226)

Uma vez que o volume de ar é 3.200 vezes mais baixo do que o mesmo volume de água e 1.820 vezes mais baixo do que o calcário, a temperatura do ar tende a se adaptar rapidamente à da água ou rocha, desde que exista contato entre os meios. Eles se aquecem e se esfriam tão levemente durante um dia, que as diferenças são negligenciadas. Entretanto, períodos mais longos de divergência unilateral de temperatura são facilmente identificáveis (BÖGLI, 1980). Assim, é possível identificar cavernas *estáticas* e *dinâmicas*.

Para Bögli (1980), as cavernas dinâmicas apresentam um sistema de circulação do ar que cria um estado de equilíbrio na temperatura. Por outro lado, nas cavernas estáticas,

a atmosfera se apresenta estratificada dependendo da temperatura do ar ou de sua densidade. Normalmente cavernas estáticas podem ser armadilhas tanto de ar quente quanto de ar frio em função das condições climáticas externas (Figura 131). Destacamos, ainda, que tais "armadilhas" podem ocorrer dentro de um mesmo sistema de cavernas.

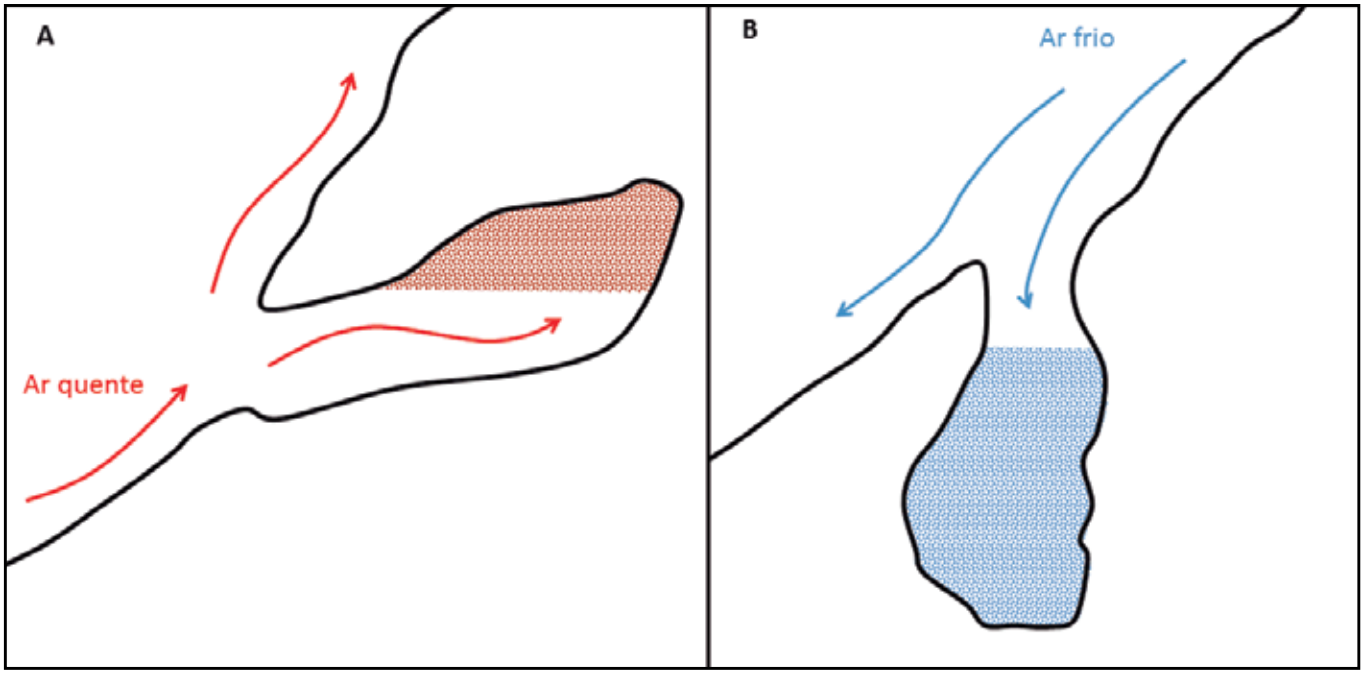


Figura 131 – *Exemplo do comportamento do ar em uma caverna estática hipotética. A) condição no verão, com formação de um "bolsão de ar quente" e em B) condição no inverno, com a formação de um "bolsão de ar frio" (Modificado de Bögli, 1980, p. 225).*

Outra forma de circulação de ar é a convecção. Tal movimento ocorre quando uma massa de matéria se move de forma ascendente ou descendente em função da temperatura. De acordo com Badino (2010), Lobo e Zago (2010) e Lobo (2011), impactos naturais ou antrópicos ocorridos em trechos pequenos e mais afastados de uma caverna podem se propagar por todo ambiente por meio de correntes de convecção, alterando os padrões de circulação e o balanço térmico naquele sistema.

Cigna (1967), Badino (2010) e Lobo (2011) destacam que todo esse movimento do ar ocorre em função de aspectos estáticos e dinâmicos. O primeiro aspecto diz respeito às diferenças de densidade dentro e fora da caverna, levando em consideração a temperatura do ar, umidade relativa e variações na pressão atmosférica. Conforme mencionado por Bögli (1980), como causas dinâmicas, observamos os fluxos de cursos d'água dentro e fora das cavernas. Além desses fatores, Lobo (2011) também destaca o papel do número de acessos da caverna, diferenças nas dimensões de galerias e salões, além das distâncias entre tais acessos. De acordo com Faimon et al. (2012), existe um consenso na literatura sobre o mecanismo principal de ventilação no subterrâneo, que

se baseia na indução do movimento do ar por causa dos gradientes de pressão.

As diferenças na pressão do ar nas cavernas são parcialmente influenciadas pelas condições externas. Bögli (1980) destaca que um sistema de cavernas com várias aberturas é exposto ao vento da superfície. Em geral, gradientes de pressão são criados e causam o movimento do ar a partir da zona de alta pressão em direção à zona de baixa pressão. Até mesmo as diferenças de temperatura do lado de fora da caverna podem causar diferenças de pressão do ar. Por esse motivo, Smith, Wynn e Baker (2013) afirmam que a dinâmica atmosférica das cavernas é controlada, além de pela produtividade do solo acima dela e por sua geometria, pelas diferenças de pressão entre a caverna e o exterior.

Geralmente, as diferenças de pressão são controladas pela diferença de temperatura entre o ar da caverna e o ar fora dela. Durante o inverno, o ar que entra na caverna se aquece, torna-se menos denso, se move para cima e escapa em direção a alguma abertura, causando uma pequena queda de pressão em função dessa perda de massa. Durante o verão, o ar que entra na caverna esfria, fica mais denso e flui para fora por meio de aberturas em níveis inferiores. Além deste processo, conhecido entre os carstólogos e espeleólogos, Bögli (1980) destaca que também existem fatores endógenos para o movimento do ar. Diferenças de pressão dentro da caverna são causadas pela diferença de densidade do ar que, por sua vez, é o resultado das diferenças de temperatura, da umidade e da quantidade de CO_2. Além disso, podem ocorrer transferências de energia por meio de um fluxo de água turbulento ou mudanças de volume causados pela variação do nível de água nas cavernas.

Se levarmos em consideração a topografia e a morfologia de uma caverna, essa condição pode se alterar. Em cavernas retilíneas, desenvolvidas praticamente ao longo de um único canal, o local de maior pressão será o barlavento, em oposição ao sotavento (Figura 132).

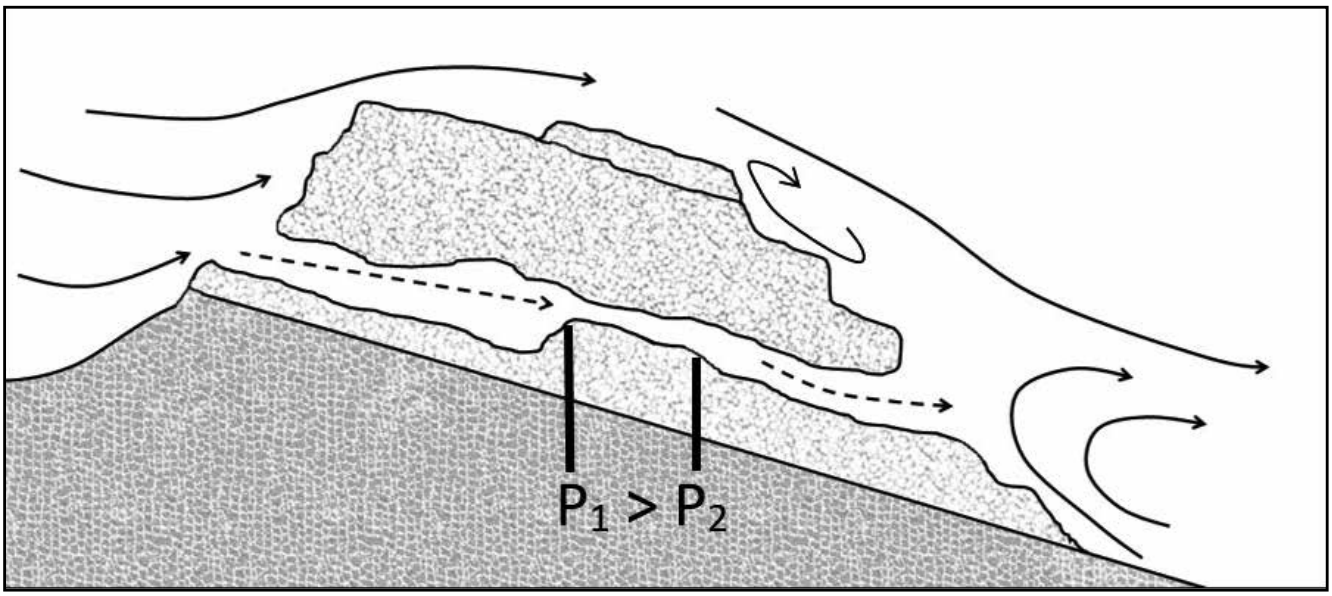


Figura 132 – *Modelo conceitual do movimento do ar e as diferenças de pressão em função da topografia e morfologia da caverna (Modificado de Bögli, 1980, p. 215).*

É importante destacar que as diferenças de pressão também podem ocorrer dentro da caverna por causa da morfologia (e.g. dimensões, níveis etc.), bem como do resultado das diferenças de temperatura, umidade e quantidade de CO_2. De acordo com Bögli (1980), os movimentos de ar causados por diferenças endógenas de temperatura e umidade são bem próximos dos limites perceptíveis e sua importância reside no fato de que misturam o ar na caverna, levando umidade às áreas menos úmidas, por exemplo.

Além disso, cavernas que são abertas ao turismo e apresentam modificações na geometria estão sujeitas a alterações na composição da atmosfera, assim como nos padrões de ventilação. Tanto os túneis que foram escavados ou alargados para adaptar o espaço ao turismo quanto a inserção de portões podem ser barreiras significativas para essa circulação do ar.

Lobo (2011), citando outros autores (ERASO, 1969; POULSON; WHITE, 1969; MANGIN; ANDRIEUX, 1988; CIGNA, 2004; BADINO, 2009; 2010; PFLITSCH et al., 2006; PFLITSCH et al., 2010) destaca diferentes padrões básicos de circulação de ar que interferem no microclima cavernícola. Nos exemplos, o autor identifica as principais condições que ocorrem em função das estações do ano e/ou do ciclo diário. Segundo Faimon et al. (2012), a temperatura explica cerca de 99% das variações na densidade do ar e, por isso, a temperatura pode ser utilizada como uma alternativa na previsão do movimento do ar em uma caverna.

Por fim, mas não menos importante, destacamos o papel da umidade do ar no interior das cavernas. Geralmente espera-se que o ambiente das cavernas mantenha temperatura e umidade constantes. Scaleante (2003) afirma que embora seja difícil o cálculo do calor dissipado nas cavernas, o autor menciona Cigna e Forti (1989), bem como Villar et al. (1984), que estimaram o calor dissipado pelo ser humano entre 82 a 116 watts. Obviamente a poluição térmica varia de indivíduo para indivíduo, devido ao seu tamanho, peso, velocidade, roupa etc. Ainda assim, esses valores médios dão uma dimensão do problema: um aumento na temperatura da caverna pode significar a diminuição da umidade relativa do ar e a alteração nos processos de dissolução e deposição. Villar et al. (1984) estimaram que uma pessoa em movimento emite cerca de 170 watts; portanto, o aporte de calor para a atmosfera de uma caverna pode ser estimado por meio da equação: $E=170 \cdot t \cdot 3600 \cdot N$ onde "t" é o tempo médio de visitação e "N", o total de visitas em um ano.

Cigna e Forti (1988) destacam que um experimento realizado em uma caverna mostrou o impacto de uma lâmpada de 1Kw posicionada a 50 cm da rocha. A temperatura passou de 15°C para 25°C em poucos segundos e a umidade baixou de 95 a 100% para 55 a 60 %, comprovando a poluição térmica a que estão sujeitas as cavernas turísticas.

Com o exposto até aqui e para concluirmos esse capítulo, sugerimos que as pesquisas microclimáticas em cavernas sigam as linhas gerais apresentadas por Cigna (1993; 2000; 2003) e os exemplos de monitoramento microclimático moderno propostos por Zelinka (2002) e Zelinka e Poturnaj (2008). Além desses autores, destacamos Buecher (1999), que monitorou parâmetros climáticos em 22 pontos nas cavernas Karchner (Estados Unidos), demonstrando que ocorreram variações sazonais em diferentes locais, principalmente em função da distância das estações em relação à entrada ou às correntes de ar. Além de temperatura, umidade e

velocidade do vento, Baldini et al. (2006) destaca que o CO_2 deve ser monitorado nas cavernas, pois apresenta papel importante nos processos cársticos. Sua concentração também é influenciada pela circulação do ar na caverna (ventilação), conforme demonstrado por Danko (2013).

Em cavernas turísticas, concentrações de Radônio também devem ser estudadas por serem potencialmente perigosas para os guias (GREGORIČ et al., 2013). A maioria dos estudos sobre o microclima cavernícola também está, de alguma forma, relacionados a estudos de reconstrução paleoclimática. Inúmeros estudos apontam o papel do microclima subterrâneo na taxa de deposição de espeleotemas, por exemplo (FAIRCHILD et al., 2006; SPOTL et al., 2005).

Para cavernas nacionais, os trabalhos de Lobo (2010; 2011) são importantes, por serem uma significativa contribuição no resgate de literatura sobre assunto, bem como em relação aos aspectos metodológicos da pesquisa.

Percebemos que as principais variáveis que devem ser monitorados nas cavernas são a temperatura, a umidade, o CO_2 e o movimento do ar. Sabemos, entretanto, que nem sempre é possível adquirir os equipamentos para medição de CO_2 e movimento de ar, mas acreditamos que qualquer esforço seja válido para apresentarmos argumentos defensáveis e não os baseados em opiniões não comprovadas.

O problema que percebemos atualmente é que muitas redes de monitoramento microclimático foram estabelecidas após um longo período de visitação já ter sido iniciado. Isso torna extremamente difícil a verificação das condições ambientais naturais. O que os pesquisadores percebem, neste caso, por exemplo, é uma espécie de estimativa de quais seriam as condições "ideais" em cavernas que não são abertas todos os dias para visitação.

É importante destacar que algumas medidas em relação ao manejo de cavernas turísticas já foram adotadas no Brasil e no mundo, como o fechamento total do espaço. Em alguns casos, os fechamentos foram temporários; em outros, apenas partes das cavernas foram fechadas e a redução do número de visitantes foi implementada. Tais medidas podem ser consideradas radicais por alguns e, para outros, necessária. Municípios com baixa densidade demográfica e dificuldades financeiras podem ter, no turismo corretamente estruturado, o apoio necessário para seu desenvolvimento. Entretanto, o que deve ser pensado nesses casos é o interesse coletivo, não somente o interesse individual.

Cigna (2002) sugere que, se possível, em uma caverna turística sejam monitorados os seguintes parâmetros: (a) temperatura do ar em °C, (b) temperatura da água em °C (se aplicável), (c) umidade relativa em %, (d) concentrações de CO_2 e ppm, bem como (e) concentração de Radônio em Bq/m^3. Para a coleta dos dados, a frequência para os registros deve ser de quarto vezes por dia (e.g. 6:00, 12:00, 18:00 e 24:00), com pelo menos um ano de duração.

O que é certo, portanto, é que as medidas sejam tomadas de acordo com pesquisas sistemáticas, que auxiliem na melhor gestão do espaço, sem deixar que paixões ou impressões pessoais falem mais alto que a Ciência.

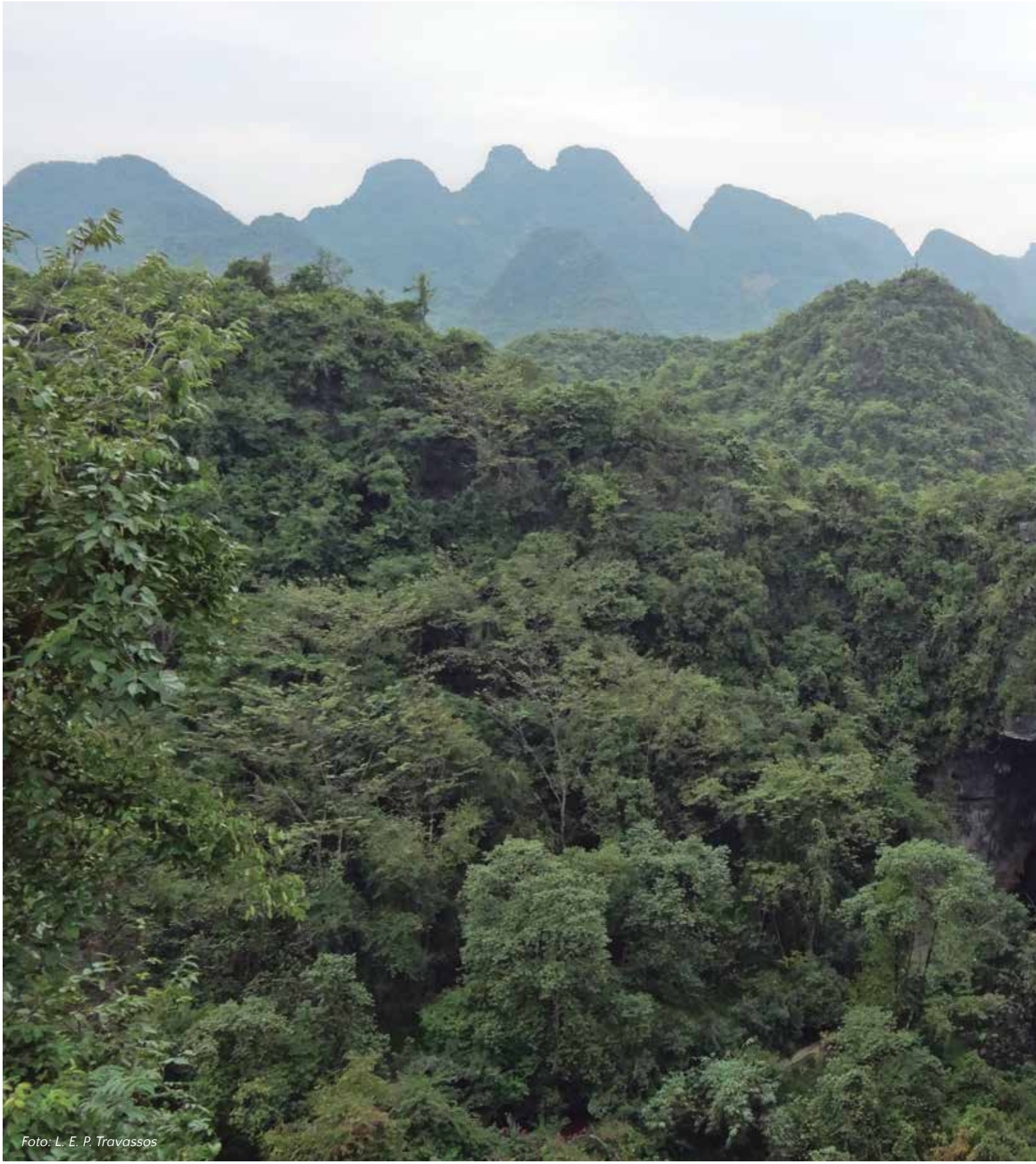


Foto: L. E. P. Travassos

GEODIVERSIDADE, GEOPATRIMÔNIO E GEOCONSERVAÇÃO NO CARSTE

A paisagem cárstica deve ser percebida como um sistema complexo, sujeito a diversas pressões, sejam elas naturais, e inerentes a própria dinâmica da paisagem ou antrópicas. Talvez o termo mais correto (e ligado à Geografia) para resumir o carste seja considerá-lo um *geossistema* e, a partir de então, verificar as interações existentes, não nos esquecendo da paisagem "escondida", ou seja, do endocarste.

As cavernas, que podem se desenvolver nos mais diversos tipos de rocha, devem ser compreendidas como um importante patrimônio e, como tal, devem ser acessíveis à população, para que seja possível "conhecer para preservar". Uma forma de facilitar a compreensão dos processos naturais que levaram à formação do arcabouço geológico é o *geoturismo*, prática fundamentada na *geodiversidade*, no *geopatrimônio* e na *geoconservação*.

De acordo com Hose (1995), o *geoturismo* deve facilitar a compreensão e fornecer facilidades de serviços para que os turistas possam ter conhecimentos geológicos e geomorfológicos sobre um determinado lugar. Assim sendo, espera-se que o conhecimento científico seja agregado a uma atividade de lazer de forma agradável, sem deixar de lado as questões relativas à visitação turística o mais sustentável possível. Anos mais tarde, Hose (2000) aprimora esse conceito e acha mais adequado utilizar o termo para designar o fornecimento de facilidades interpretativas e serviços, para a promoção dos valores e os benefícios sociais de lugares e materiais geológicos e geomorfológicos, assegurando conservação para uso por parte de estudantes, turistas e outras pessoas com interesse recreativo ou de lazer.

Sobre *geodiversidade*, é possível afirmar ser um termo que faz referência à variedade de ambientes geológicos e processos ativos e inativos que dão origem às paisagens. É a geodiversidade que, de acordo com Pemberton (2000) e Gray (2004; 2005), é a base para o desenvolvimento de boa parte da biodiversidade. Assumindo a proposta da *Royal Society for Nature Conservation*, do Reino Unido, geodiversidade também pode ser compreendida como a variedade de ambientes geológicos, fenômenos e processos ativos que dão origem a paisagens, rochas, minerais, fósseis, solos e outros depósitos superficiais que agem como o suporte para a vida na terra (BRILHA, 2005; BENTO; RODRIGUES, 2010; PEREIRA, 2015).

No campo da geodiversidade encontra-se o *patrimônio abiótico*. Ruchkys (2007) afirma que, de maneira geral, a palavra "patrimônio" nos remete a uma heraça ou riqueza que deve ser transmitida de geração a geração. Para Choay (2001), esse termo foi inicialmente empregado para outros fins, abrangendo áreas como genética, cultura e natureza, sendo frequentemente utilizado para designar um conjunto de bens materiais ou imateriais. Pereira (2006) considera como "patrimônio" os bens que, pela percepção humana, adquiriram um valor especial, sendo essa valorização o que os distingue dos restantes bens (EVANGELISTA; TRAVASSOS, 2014; 2015). Destacamos, portanto, o *patrimônio geológico* que, de acordo com Ruchkys (2007), é representado pelos sítios geológicos e pode ser definido como recurso documental de caráter científico, que apresenta conteúdo importante para o conhecimento e estudo da evolução dos processos geológicos. Em determinada região, é formado pelo conjunto de sítios geológicos notáveis e que representam apenas a parcela mais expressiva e importante da geodiversidade.

Transportando tais conceitos para o carste, pensemos em um afloramento carbonático em meio a uma planície, bem como em alguns sumidouros existentes nessa área. O afloramento, tecnicamente considerado um *hume* como foi

explicado no capítulo 3, pode ser percebido como um geossítio, que pode apresentar diversos *locais de interesse geológico* ou *geomorfológico* passíveis de contemplação e interpretação. Temos, portanto, o patrimônio geológico ou geomorfológico daquela região, que se resume na própria planície, no afloramento e nos sumidouros.

Ruchkys (2007) afirma que a proteção do patrimônio pode ocorrer por meio da *preservação* ou da *conservação*. Geralmente, a *preservação* considera que, para a efetiva proteção, os patrimônios devem ser mantidos intactos, sem quaisquer modificações e intocados. Já a *conservação* considera que os patrimônios passem por mudanças, visto que representam o testemunho de uma determinada época e se adaptam com o passar do tempo. Temos, então, o que se convencionou chamar de *geoconservação*, cujo objetivo principal é a preservação do patrimônio geológico e a compreensão dos processos naturais existentes, envolvendo todas as ações empreendidas na defesa da geodiversidade.

Apenas mais recentemente o carste e as cavernas passaram a ser foco dos estudos relativos ao geoturismo, mesmo que, há mais tempo, esse tipo de paisagem já fosse foco de atividades turísticas fora do Brasil. Gilli (2015) afirma que, na França, trabalhos de Martel, já no século XIX, serviram para popularizar o carste daquele país. Calanques, Fontaine de Vaucluse, as nascentes de Loue e Lison, as Gorges du Verdon, Tarn e Ardèche são alguns exemplos que atraem milhões de visitantes a cada ano.

Historicamente, outras áreas cársticas mundiais têm chamado atenção das pessoas. Alguns desses destaques são a região do "Carste Clássico" esloveno e italiano, a costa e as ilhas da Dalmácia (Croácia), as Florestas de Pedra da Província de Yunnan (China), o carste ao longo do Rio Li (China), a Baía Ha Long (Vietnã) e o Tsingy das Reservas de Bemaraha e Ankarana (Madagascar). William (2008) apresenta um número ainda maior em uma revisão que realizou sobre o carste e as cavernas em relação à Lista do Patrimônio Mundial da UNESCO. Travassos (2010; 2012; 2015) e Gilli (2015) afirmam que dos 180 sítios do Patrimônio Mundial da UNESCO, em 2010, apenas algumas áreas cársticas ou cavernas englobavam a lista. Atualmente, é possível identificar vários sítios cársticos tradicionais, bem como outros sistemas desenvolvidos em arenitos, quartzitos e granitos nessa lista. Nesses casos, o destaque foi dado pelo fato de elementos da geodiversidade terem sido importantes para a inclusão dessas áreas na lista do Patrimônio Mundial.

Outros 30 sítios que apresentam fenômenos cársticos passíveis de se tornarem Patrimônios Mundiais da UNESCO foram apresentados por Williams (2008), conforme Tabela 5. Entretanto, é importante destacar que, em 2017, a lista do Patrimônio Mundial da UNESCO reunia 1.073 sítios distribuídos em 167 países. Desses sítios, 37 se localizavam entre fronteiras de países, 54 estavam em perigo, 832 eram sítios culturais, 206 naturais e 35 apresentavam características relevantes do ponto de vista cultural e natural. Nenhum dos propostos na Tabela 5 (WILLIAMS, 2008) foram incluídos até o momento, demonstrando a dificuldade de se estabelecerem novos sítios do Patrimônio Mundial que estejam no carste ou sejam cavernas.

Ainda assim, é inegável o fato de que elementos da geodiversidade foram utilizados nos locais e atribuíram algum tipo de valor aos sítios que foram listados como Patrimônio Mundial, mesmo que o carste ou as cavernas não sejam explicitamente destacados nos processos de inclusão. Atualmente, dos 1.073 sítios do Patrimônio Cultural da UNESCO, poucos apresentam cavernas, arte rupestre ou o próprio sistema cárstico como principal atrativo, conforme

demonstrado pela Tabela 6. No entanto, vale a pena destacar que inúmeros outros sítios localizam-se em áreas cársticas carbonáticas tendo, portanto, elementos de destaque da geodiversidade utilizados na construção dos monumentos.

Além disso, inúmeras outras áreas cársticas mundiais apresentam potencial geoturístico, mas são pouco documentadas e os governos dos países carecem de recursos financeiros e científicos para tal implementação. Exemplos foram destacados por Kiernam (2009; 2011; 2013) no Laos e quase os mesmos tópicos elencados pelo autor podem ser aplicados em outras regiões do mundo. Embora o autor destaque algumas dificuldades, ele ressalta que as comunidades locais podem ter um papel importante no desenvolvimento do geoturismo em tais regiões, pois possuem o conhecimento, a experiência e o desejo de direcionar esforços nesse sentido. Entretanto, devido a própria natureza do terreno, o carste apresenta tanto oportunidades quanto desafios para seu uso sustentável no geoturismo, para que seja benéfico para as comunidades locais.

Tabela 5- Propostas de sítios cársticos passíveis de serem incluídos na lista do Patrimônio Cultural da UNESCO por apresentarem critérios naturais e culturais.

PAÍS	SÍTIO DO PATRIMÔNIO MUNDIAL	PRINCIPAIS FEIÇÕES GEOLÓGICAS E GEOMORFOLÓGICAS
Afeganistão	Band-E-Amir	Grandes represas de tufas em ambiente árido montanhoso.
Botswana	Gewihaba	Área de cerca de 380 km² com agrupamentos de colinas dolomíticas ricas em cavernas.
Brasil	Cânion do Rio Peruaçu, Minas Gerais	Possibilidade de ser o maior cânion cárstico formado por abatimentos. Enormes dolinas de colapso, pontes naturais, nascentes e florestas de pedra. A arte pré-histórica nas cavernas remete à ocupação desde 12.000 anos antes do presente.
Bulgária	O Carste de Vratsa	Extensa área cárstica ruiniforme com cavernas a oeste dos Bálcãs.
China	Abismo do Céu	Região de beleza cênica, com picos e gargantas "costuradas" por vários quilômetros por um rio subterrâneo. Grande dolina de colapso de cerca de 500 m de profundidade.
China	Jinfushan	Carste montanhoso a cerca de 2200 m de altitude. Extensos sistemas de cavernas e evidências de mineração de nitratos.
China	Rio Li, Guilin	Carste em cones ao longo do Rio Li, entre as cidades de Guilin e Yangshuo. Inúmeras cavernas.

PAÍS	SÍTIO DO PATRIMÔNIO MUNDIAL	PRINCIPAIS FEIÇÕES GEOLÓGICAS E GEOMORFOLÓGICAS
China	Gargantas do Yangtze	Paisagem impressionante de cânion carstificado, com pelo menos 174 cavernas.
Croácia	Parque Nacional Kornati e Parque Natural Telašćica	Carste parcialmente submerso, com cerca de 150 ilhas calcárias e dolomíticas espalhadas por uma área de 320 km² no Mar Adriático.
Croácia	Montanha Velebit	Maciço importante no famoso Carste Dinárico. Região composta por carbonatos bem carstificados com ampla gama de fenômenos cársticos.
Egito	Paisagens do Grande Deserto	Porções de carste ao longo da paisagem desértica. Dolinas e cavernas são comuns nos calcários do Planalto Diffa, que separa a Depressão de Qattara da Planície Costeira do Mediterrêneo. A Caverna Wadi Sannur pode ser o maior salão natural do mundo em evaporitos.
Eslovênia	Carste Clássico	O "Carste Clássico" é a área onde as primeiras pesquisas científicas sobre o carste ocorreram. Apresenta quase 500 km², principalmente na Eslovênia, mas estende-se à Itália. Amplamente conhecida por suas depressões fechadas, sumidouros, ressurgências e cavernas. Aproximadamente 2000 anos de ocupação transformaram a região em uma paisagem cultural.
Filipinas	Monumento Natural Chocolate Hills (Ilha Bohol)	Exemplos notáveis de carste cônico (Cockpit), quase simétricos, em uma superfície relativamente plana 500 m acima do nível do mar. Cerca de 1776 afloramentos apresentam quase as mesmas formas e dimensões. Excelente exemplo de carstificação avançada em calcário soerguido.
França	Cavernas e concreções do sul da França	Dezenove cavernas ou agrupamentos de cavernas que apresentam excepcionais exemplos mineralógicos sob o ponto de vista dos valores estéticos, científicos e de raridade. Alguns tipos de espeleotemas são únicos no mundo.

PAÍS	SÍTIO DO PATRIMÔNIO MUNDIAL	PRINCIPAIS FEIÇÕES GEOLÓGICAS E GEOMORFOLÓGICAS
França	Les Cevennes et les Grands Causses	Quatro grandes planaltos calcários (Méjean, Sauveterre, Cause Noir e Bégon) com carste bem desenvolvido. São delimitados por penhascos íngrimes e gargantas profundas.
Hungria	Carste e Cavernas Hipogênicas do Sistema Rózsadomb	Quatro cavernas hipogênicas, com cerca de 7 km, que foram formadas pela ascenção de águas termais. As cavernas possuem indícios de dissolução, tanto por CO_2 quanto por H_2S.
Irã	Caverna Alisadr	Caverna turística com um rio subterrâneo e cerca de 2,4 km fora da água. Exemplos notáveis de dissolução, bem como amplos salões e vários espeleotemas.
Irlanda	Burren	Afloramentos fortemente erodidos pelo gelo e com cavernas e exemplos notáveis de pavimentos calcários. Riqueza de sítios arqueológicos.
Itália	Altamura	Região, no sudeste italiano, com inúmeras cavernas, mas com uma muito importante como sítio arqueológico. Pelo menos 4.000 pegadas de dinossauros expostas em uma pedreira.
Kiribati	Ilhas Phoenix	Oito ilhas recifais e atois.
Marrocos	Parque Natural de Talassemtane	Região com montanhas calcárias, gargantas e cavernas.
México	Reserva da Biosfera Selva El Ocote	Na região de Chiapas, sul do país, montanhas calcárias que chegam até 1.500 m acima do nível do mar. Inúmeras feições cársticas e alguns sítios arqueológicos em cavernas.
Noruega	Arquipélago Svalbard	Arquipélago ártico, que inclui a ilha Spitzbergen, com áreas bem estudadas de carste ativos e desenvolvidos acima e abaixo do permafrost. Exemplo notável de carste em ambiente marítimo polar.

PAÍS	SÍTIO DO PATRIMÔNIO MUNDIAL	PRINCIPAIS FEIÇÕES GEOLÓGICAS E GEOMORFOLÓGICAS
Nova Zelândia	Parque Nacional Kahurangi, Farewell Spit e Sistema Cárstico Canaan	Contém montanhas em mármore de até 1.875 m e presença de cavernas até 46 km. Presença de grandes nascentes cársticas.
Palau	Rock Islands	Carste parcialmente submerso, com cerca de 424 ilhas calcárias, além de recifes de coral em uma área de 600 km². Dessas, 397 são ilhas emersas íngremes e 27 baixas e ao longo de uma barreira de corais. Cerca de 50 lagos de água salgada dentro das "Rock Islands" representam bacias cársticas inundadas pela elevação pós-glacial do nível do mar.
Papua Nova Guiné	Terraços Huon	Exemplo notável e cientificamente bem conhecido de terraços de corais do Quaternário.
Papua Nova Guiné	Bacia do Rio Kikori / Grande Planalto	Região cárstica, em sua maioria, com mais de 20.000 km², que vão da zona alpina ao nível do mar.
Papua Nova Guiné	O Carste Sublime da Papua Nova Guiné	Uma série de sítios em três províncias diferentes, dois no planalto central e um no de New Britain. Todos são bem carstificados, com excelentes exemplos de rios que são capturados para o subterrâneo, cavernas, nascentes enormes, pináculos e depressões fechadas com drenagem interior.
Rússia	Paque Natural Pilares Lena	Planalto cárstico com cerca de 300 m de altitude e com presença de calcário, dolomito e folhelho da bacia do rio Lena. Carste e termocarste congelados no permafrost, com cerca de 100 a 500 m de espessura.
Sérvia	Parque Nacional Tara com o Cânion do Rio Drina	Montanhas com altitudes de até 1.600 m e relevo acentuado cortado por vales profundos. Extensa área cárstica.

Fonte: Compilado pelo autor, a partir de Williams (2008).

Tabela 6- Sítios do Patrimônio Cultural da UNESCO que apresentam o carste, as cavernas ou a arte rupestre como atrativos principais.

PAÍS	SÍTIO DO PATRIMÔNIO MUNDIAL
Arábia Saudita	- Arte rupestre da região de Hail na Arábia Saudita (2015)
Argentina	- Cueva de las Manos del Río Pinturas (1999)
Azerbaijão	- Paisagem cultural de arte rupestre de Gobustán (2007)
Bulgária	- Igrejas rupestres de Ivanovo (1979)
China	- Grutas de Mogao (1987) - Esculturas rupestres de Dazu (1999) - Grutas de Longmen (2000) - Grutas de Yungang (2001) - South China Karst (2007, 2014)
Eslováquia e Hungria	- Grutas do carste de Aggtelek e do carste da Eslováquia (1995, 2000)
Eslovênia	- Cavernas de Škocjan (1986)
Espanha	- Caverna de Altamira e arte rupestre paleolítica do norte da Espanha (1985, 2008) - Arte rupestre do arco mediterrâneo da Península Ibérica (1998) - Sítios de arte rupestre pré-histórica do Valle do Côa e de Siega Verde (1998, 2010)
Estados Unidos	- Parque Nacional de Mammoth Cave (1981) - Parque Nacional das Cavernas de Carlsbad (1995)
França	- Sítios pré-históricos e cavernas com pinturas do vale do Vézère (1979) - Gruta Chauvet-Pont d'Arc, Ardèche (2014)
Grécia	- Centro histórico (Chorá) com o mosteiro de São João e a Gruta do Apocalipse na Ilha de Patmos (1999)
Honduras	- Sítio Maya de Copán (1980)
Índia	- Grutas de Ajanta (1983) - Grutas de Ellora (1983) - Grutas de Elefanta (1987) - Refúgios rupestres de Bhimbetka (2003)
Israel	- Cavernas de Maresha e Bet-Guvrin nas Planícies da Judéia como um Microcosmo da Terra das Cavernas (2014)

PAÍS	SÍTIO DO PATRIMÔNIO MUNDIAL
Itália	- Arte rupestre de Val Camónica (1979) - Os Sassi e o conjunto de igrejas rupestres de Matera (1993) - Siracusa e a necrópole rupestre de Pantalica (2005)
Líbia	- Sítio rupestre de Tadrart Acacus (1985)
Malawi	- Arte rupestre de Chongoni (2006)
México	- Cidade pré-hispânica de Teotihuacán (1987) - Cidade pré-hispânica e parque nacional de Palenque (1987) - Cidade pré-hispânica de Chichén-Itzá (1988) - Pinturas rupestres da Sierra de San Francisco (1993) - Cidade pré-hispânica de Uxmal (1996) - Antiga cidade Maya City e Floresta Tropical Protegida de Calakmul, Campeche (2002, 2014) - Cavernas pré-históricas de Yagul e Mitla nos Valles Cetrais de Oaxaca (2010)
Noruega	- Arte rupestre de Alta (1985)
Portugal	- Sítios de arte rupestre pré-histórica do Valle do Côa e de Siega Verde (1998, 2010)
República da Coreia	- Gruta de Seokguram e templo de Bulguksa (1995)
República Unida de Tanzânia	- Sítios de arte rupestre de Kondoa (2006)
Turquia	- Parque Nacional do Göreme e Sítios Rupestres da Capadócia (1985) - Hierápolis – Pamukkale (1988)

Obs: Para a versão eletrônica deste livro, os sítios do Patrimônio Mundial foram registrados como hiperlink para a página em espanhol da UNESCO. Informações mais completas estão na página em inglês.
Fonte: Compilado pelo autor a partir de Travassos (2010; 2012; 2015) e UNESCO (2016a).

Percebemos, portanto, que, se compararmos o geoturismo com outras modalidades de turismo, ainda é preciso muito desenvolvimento (McKEEVER et al., 2006 *apud* MOREIRA, 2010). Se levarmos essa afirmativa para o carste, o desenvolvimento e os cuidados para implantação do turismo nessas áreas precisam ser ainda maiores.

Moreira (2010) afirma que alguns dos impactos positivos do geoturismo estão relacionados à conservação do Patrimônio Geológico com a geração de empregos diretos e indiretos, conforme mencionado por Kiernam (2009; 2011; 2013) nas áreas cársticas. Além disso, Moreira (2010) afirma que a compreensão do ambiente, por meio da educação geológica e ambiental dos visitantes, auxilia no aumento da consciência da população local e dos turistas a respeito desse Patrimônio. No Brasil, Lobo et al. (2007)

destacam o enorme pontencial geoturístico da paisagem cárstica e suas formas de macro, meso e micro escalas.

Nesse sentido, em alternativa à Lista do Patrimônio Cultural Mundial da UNESCO e visando a geoconservação e o desenvolvimento econômico sustentável, surge neste cenário a criação de Geoparques, reunidos na Rede Global de Geoparques (GGN-Global Geoparks Network). De acordo com Nascimento, Ruchkys e Mantesso-Neto (2007), a GGN vem sendo cada vez mais difundida nos países que se preocupam com a conservação e a promoção do patrimônio geológico. Entre eles, destacam-se vários países na Europa e a China.

O início da Rede Global de Geoparques (GNN) remonta ao ano de 2004, quando a Rede Europeia de Geoparques (EGN), criada em 2000, com apoio da China, se uniu na tentativa de combinar conservação, desenvolvimento sustentável e envolvimento comunitário. Embora a UNESCO já lhes fornecesse apoio *ad hoc* desde 1999, somente em 17 de novembro de 2015 os 195 membros ratificaram a criação de uma nova "marca", a UNESCO Global Geoparks.

Assim, a UNESCO e a GGN tentam desenvolver, em conjunto, modelos de melhores práticas e padrões de qualidade estabelecidos para os territórios que integram a preservação do patrimônio geológico em estratégias para o desenvolvimento econômico sustentável regional. O estabelecimento de um Geoparque tem como objetivo trazer sustentabilidade e real benefício econômico para as populações locais, geralmente por meio do desenvolvimento de um turismo sustentável e outras atividades econômicas e culturais. Atualmente existem 120 UNESCO Global Geoparks em 33 países (GGN, 2016; UNESCO, 2016d). Desses 120, alguns encontram-se registrados na GNN, mas outros não, sendo que cerca de 72 apresentam Locais de Interesse Geológico (LIG) e Locais de Interesse Geomorfológico (LIGeom) desenvolvidos em algum tipo de carste, conforme demonstrado na Tabela 7.

Tabela 7- Lista dos Geoparques da UNESCO que apresentam algum tipo de carste em seus limites.

PAÍS	UNESCO GLOBAL GEOPARK
Alemanha	- Bergstrasse-Odenwald - Harz Braunschweiger Land Ostfalen* - Swabian Albs* - TERRA.vita*
Áustria	- Carnic Alps* - Eisenwurzen*
Brasil	- Araripe
Canadá	- Stonehammer* - Tumbler Ridge
China	- Dunhuang - Fangshan*

PAÍS	UNESCO GLOBAL GEOPARK
China	- Funiushan - Hong Kong* - Leye Fengshan* - Lushan - Mount Kunlun - Qinling-Zhongnashan* - Sanqingshan* - Shennongjia* - Shilin* - Xingwen* - Yanqing * - Zhangjiajie* - Zhijindong Cave
Chipre	- Troodos
Croácia	- Papuk*
Eslovênia	- Idrija*
Espanha	- Basque Coast* - Central Catalonia* - Maestrazgo Cultural Park* - Molina & Alto Tajo - Sierra Norte de Sevilla* - Sobrarbe* - Villuercas Ibores Jara*
França	- Chablais* - Massif des Bauges* - Monts d'Ardèche - Parc naturel régional du Lubéron* - Réserve Géologique de Haute-Provence*
Grécia	- Chelmos Vouraikos* - Psiloritis Natural Park* - Sitia - Vikos Aoos*
Hungria	- Bakony-Balaton*

PAÍS	UNESCO GLOBAL GEOPARK
Indonésia	- Gunung Sewu
Islândia	- Katla*
Itália	- Adamello Brenta* - Apuan Alps* - Cilento e Vallo di Diano National Park* - Geological and Mining Park of Sardinia* - Madonie Natural Park* - Parco delle Madonie - Parco Nazionale del Cilento e Vallo di Diano - Pollino - Rocca Di Cerere* - Tuscan Mining Park*
Malásia	- Langkawi*
Marrocos	- M'Goun*
Reino Unido	- English Riviera* - Forest Fawr* - Geo Môn* - North Pennines A.O.N.B.* - North-West Highlands
República Tcheca	- Bohemian Paradise *
Uruguai	- Grutas del Palacio
Vietnã	- Dong Van Karst Plateau

Obs: Na lista oficial, todos os locais apresentam seu nome, seguidos pelo termo "UNESCO Global Geopark". Aqueles marcado com * também são Geoparques da Global Geoparks Network (GNN).
Fonte: Compilado pelo autor, com dados da UNESCO e da GNN em 2016.

Tais esforços de popularização da paisagem cárstica são extremamente úteis, embora não somente os Geoparques sejam necessários para trazer benefícios às comunidades locais ou conhecimento para o turista. Em países mais tradicionais na geoconservação, talvez essa seja a estratégia mais eficaz. No caso específico do Brasil e suas áreas cársticas, as Unidades de Conservação já existentes podem auxiliar na geoconservação.

Além disso, até mesmo a criação de uma "Rede Brasileira de Geoparques" pode ser útil, a exemplo do que ocorre na China. Naquele país, além dos muitos sítios listados pela UNESCO e pela GNN, existe uma rede nacional com cerca de 190 geoparques aprovados e 51

pré-aprovados, muitos deles em áreas cársticas (Figura 133). Em 2016, o Brasil apresentava apenas um Geoparque, o do Araripe, no Ceará. Entretanto, Nascimento, Ruchkys e Mantesso-Neto (2007), Travassos (2012) e Pereira (2015) chamam atenção para as Unidades de Conservação nacionais, como a Gruta de Ubajara e a Serra da Capivara, entre muitas outras, que possuem apelo geoturístico, embora ainda não se tenha real consciência disso.

Figura 133 – *Aspectos gerais de um parque da Rede Nacional de Geoparques Chineses em Xiangqiao (Fotos: L.E.P.Travassos).*

Figura 133 – *Aspectos gerais de um parque da Rede Nacional de Geoparques Chineses em Xiangqiao (Fotos: L.E.P.Travassos).*

Apesar de identificarmos áreas cársticas nas listas da UNESCO e da GNN, é preciso lembrar que a geoconservação do carste não se restringe somente a esses geoparques. No Brasil, Evangelista e Travassos (2014) destacam a criação da Comissão Brasileira de Sítios Geológicos e Paleobiológicos (SIGEP), que tem cumprido com sua tarefa de contribuir para a divulgação de informações relativas ao Patrimônio Geológico, por meio da seleção de diversos geosítios que apresentam importância palentológica, sedimentológica, geomorfológica, espeleológica, entre outras.

Até o momento, a Comissão publicou três livros (*Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil*) com a descrição de 116 sítios, sendo 58 no primeiro volume, 40 no segundo e 18 no terceiro. O carste e as cavernas aparecem conforme Tabela 8.

Tabela 8 – Lista de geossítios reunidos pela SIGEP que apresentam relação com algum tipo de carste, embora nem todos mencionem especificamente esse sistema.

TIPO	UNESCO GLOBAL GEOPARK
SÍTIO PALEONTOLÓGICO	- Sítios Paleobotânicos do Arenito Mata nos Municípios de Mata e São Pedro do Sul (RS)* - Afloramento Bainha, Criciúma (SC)* - Sítio Jaguariaíva, Estado do Paraná* - Jazigo Icnofossilífero do Ouro, Araraquara (SP)* - Sítio fossilífero de Pirapozinho (SP)* - Sítio Paleontológico de Fonseca (MG)* - Mesossauro da Serra do Caiapó (GO)* - Fazenda Cristal – Estromatólitos Mesoproterozóicos (BA)* - Fazenda Arrecife – Estromatólitos Neoproterozoícos (BA)* - As pegadas de dinossauros das bacias Rio do Peixe (PB) - Membro Crato da Formação Santana (CE)* - Membro Romualdo da Formação Santana, Chapada do Araripe (CE)* - A Jazida Pleistocênica da Toca da Janela da Barra do Antonião, - São Raimundo Nonato (PI)* - Ilha de Fortaleza (PA)* - Conophyton de Cabeludo, Grupo Vazante, MG** - Estromatólitos colunares no Sumidouro do Córrego Carrapato, Lagamar, MG** - Mina B-17, Capanema, PA** - Campo de Estromatólitos Gigantes de Santa Rosa de Viterbo, SP** - Sítio Peirópolis e Serra da Galga, Uberaba, MG** - Lajedo de Soledade, Apodi, RN** - Bacia São José de Itaboraí, RJ**

TIPO	UNESCO GLOBAL GEOPARK
SÍTIO PALEOAMBIENAL	- Sítio Inhaúma (MG)* - Serra do Sincorá, Chapada Diamantina (BA)* - Morraria do Puga (MS)* - Lagoa Salgada (RJ)* - Estratos Calcários da Pedreira Poty, Paulista, PE**
SÍTIO SEDIMENTOLÓGICO	- A Costa do Descobrimento (BA)* - Canyon do Rio Sergi (BA)* - Tufas Calcárias da Serra da Bodoquena (MS)* - Conglomerado São Miguel no Vale da Lua, sul da Chapada dos Veadeiros (GO)** - Guaritas do Camaquã, RS*** - Arrecifes, a Calçada do Mar de Recife, PE***
SÍTIO MARINHO	- Abrolhos (BA)* - Arquipélago de Fernando de Noronha (PE)* - Atol das Rocas, Litoral do Nordeste do Brasil* - Arquipélago de São Pedro e São Paulo**
SÍTIO GEOMORFOLÓGICO	- Vila Velha (PR)* - Canyon do Guartelá (PR)* - Lagoa Dourada (PR)* - O Escarpamento Estrutural Furnas (SP/PR)* - Morro do Pai Inácio (BA)* - Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros (GO)* - Parque Nacional de Sete Cidades (PI)* - Monte Roraima, RR** - Eolianitos de Flecheiras/Mundaú, Costa Noroeste do Estado do Ceará, Brasil** - Cachoeira da Casca D'Anta, São Roque de Minas, MG** - Cachoeira de Santa Bárbara no Rio São Jorge, PR** - Pico do Itambé, Serra do Espinhaço, MG*** - Pedra Furada de Venturosa, PE***
SÍTIO ESPELEOLÓGICO	- Carste e Cavernas do Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira (SP)* - Carste de Lagoa Santa (MG)* - Gruta do Centenário, Pico do Inficionado (MG)* - Toca da Boa Vista (BA)* - Cavernas do Vale do Rio Peruaçu (MG)* - Grutas de Iraquara (BA)*

TIPO	UNESCO GLOBAL GEOPARK
SÍTIO ESPELEOLÓGICO	- Lapa dos Brejões - Vereda Romão Gramacho, Chapada Diamantina (BA)* - Caverna Aroe Jari, Chapada dos Guimarães (MT)* - Poço Encantado, Chapada Diamantina (BA)* - Furna do Buraco do Padre, Formação Furnas, PR ** - Gruta do Lago Azul, Bonito, MS**
SÍTIO TECTÔNICO	- Falésias na Praia de Ponta Grossa, Icapuí, CE**

Obs: Os sítios foram marcados com um asterisco para informar em qual volume do livro podem ser encontrados.
* Volume I | ** Volume II | *** Volume III
Fonte: Compilado pelo autor.

Ainda com o objetivo de contribuir para a popularização do geoturismo nacional, o Serviço Geológico do Brasil possui o "Programa Geoecoturismo", com a proposta de excursões virtuais e alguns outros roteiros que podem ser acessados, por qualquer interessado, no site da instituição, bem como uma publicação "Geoparques do Brasil", que apresenta propostas em quase todo território nacional. No primeiro volume é possível identificar 17 propostas de criação de geoparques, sendo que quase a totalidade delas apresentam cavernas e outras feições cársticas dentro dos limites propostos. Das propostas existentes no site da CPRM, as que mais se destacam, por apresentarem geossítios em algum tipo carste, são as dos Geoparques da Bodoquena-Pantanal, Seridó, Serra da Capivara, Chapada dos Guimarães, Pireneus, Chapada Diamantina, Iraquara, Morro do Chapéu, Chapada dos Veadeiros, Cânion do São Francisco, Ubajara e Alto Vale do Ribeira.

Conforme mencionado anteriormente, o país possui várias Unidades de Conservação (UCs) municipais, estaduais e federais com sistemas cársticos na totalidade de seus limites ou parcialmente. Outras regiões fora de tais unidades também tem sido foco crescente de trabalhos acadêmicos (monografias, dissertações e teses) e devem servir para maior divulgação tanto do carste quanto do geoturismo. De acordo com Pereira (2015), as UCs são fundamentais para a manutenção e equilíbrio da paisagem natural, pois além de propiciarem a contemplação da natureza, podem servir como ferramentas pedagógicas que objetivam a compreensão e conservação dos ambientes bióticos e abióticos.

Foto: L. E. P. Travassos

VIVENDO NO CARSTE

Como era de se esperar, por toda a complexidade dos geossistemas cársticos que foi destacada nas páginas anteriores, podemos dizer que tais sistemas naturais são altamente frágeis e vulneráveis às atividads antrópicas. São, portanto, alvo de progressiva degradação em várias regiões do mundo. As diversas interações entre o ser humano, o carste e o Patrimônio Espeleológico têm sido relevantes desde a Antiguidade grega e romana, conforme destacam Nicod et al. (1997). No entanto, sabe-se que os inmpactos mais significativos iniciaram-se a partir da Revolução Industrial.

Apesar do longo período histórico de impactos induzidos pelo ser humano no carste, os problemas passaram a ser foco da atenção da comunidade científica com mais frequência somente a partir de 1990. Felizmente, tanto a importância dos sistemas cársticos quanto os esforços da ciência para compreendê-los aumenta a cada dia. O esgotamento dos recursos naturais e as subsidências são os impactos mais significativos e, além das perdas ambientais, perdas econômicas têm se agravado em várias regiões do Planeta, seja em países desenvolvidos ou em desenvolvimento.

A subsidência nesse tipo de paisagem pode causar perdas materiais e humanas e trabalhos sobre o desenvolvimento em áreas de risco surgem com mais frequência (GUTIERREZ et al., 2008a). Entre outros assuntos, as pesquisas incluem modelagens hidrogeológicas e preditivas (SALVATI; SASOWSKY, 2002; HE et al., 2004), pesquisas geofísicas (ARDAU et al., 2007), estudos espeleológicos (KLIMCHOUK et al., 2002) e investigações no paleocarste (GUTIERREZ et al., 2008b) que têm fornecido importantes contribuições para a compreensão dos fenômenos cársticos atuais.

De maneira geral, outros problemas ambientais em terrenos cársticos relacionam-se com a qualidade e quantidade de água (DREW; HÖTZL 1999; GOLDSCHEIDER; DREW, 2007; RAVBAR, 2007), construção de equipamentos urbanos (represas, rodovias e túneis) conforme destacado por Milanović (2002), mineração (GUNN, 2004) e diversas outras atividades antrópicas como agricultura, pecuária, disposição de resíduos e urbanização.

No Brasil, os mesmos problemas são enfrentados com escalas e intensidades semelhantes ou mais significativas devido ao desconhecimento geral da população e de alguns gestores em relação aos sistemas cársticos. Os problemas vão desde a disposição inadequada de resíduos sólidos ao uso da paisagem para o geoturismo (LOBO et al., 2007; TRAVASSOS et al., 2008; TRAVASSOS; GUIMARÃES; VARELA, 2008; TRAVASSOS; KOHLER, 2009; LOBO et al., 2010; TRAVASSOS, 2012; LOBO, 2013; LOBO; TRAVASSOS, 2012; 2013; TRAVASSOS, 2014; BENTO; TRAVASSOS; RODRIGUES, 2015; RIBEIRO; TRAVASSOS, 2015; TRAVASSOS; RODRIGUES, 2015; TRAVASSOS; OLIVEIRA, 2016), bem como pesquisas puras que servem de base para aumentar o conhecimento sobre os fenômenos cársticos em meio tropical (PILÓ, 1998; SALLUN FILHO; KARMANN; BOGGIANI, 2004; SALLUM FILHO; FAIRCHILD, 2004; KNEZ; SLABE; TRAVASSOS, 2011; BITTENCOURT; REIS NETO, 2012). Em relação ao Patrimônio Espeleológico, muitos trabalhos sobre o uso sustentável do carste e das cavernas são publicados a cada dia (LOBO, 2008; LOBO et al., 2008; BOGGIANI et al., 2011; RODRIGUES; TRAVASSOS, 2013; LOBO; TRAVASSOS, 2013; SARTI; TRAVASSOS, 2016), porém, nunca esgotando as chances e possibilidades de pesquisa nesses geossistemas.

Normalmente, os impactos mais comuns que afetam a vida das pessoas no carste são as enchentes, secas, deslizamentos de terra e processos de subsidência. As enchentes e subsidências são riscos geológicos significativos e mais conhecidos que podem ser vistos tanto no Brasil quanto em diversas partes do mundo. Entretanto, processos de degradação da paisagem e

perda de sistemas cársticos ocorrem com mais frequência do que imaginamos. Vale a pena destacar que Parise (2015) afirma que é difícil fazermos a correta distinção entre riscos naturais e antrópicos devido ao próprio funcionamento do geossistema. Ainda assim, em muitos casos, os efeitos causados pelos riscos são favorecidos, quando não promovidos, pela ação humana.

No carste, a ocorrência de riscos geológicos difere fortemente de outros tipos de paisagem. Subsidências e formação de dolinas originadas por cavidades no subterrâneo, deslizamentos promovidos pelo desenvolvimento de condutos e cavernas, enchentes-relamâpago relacionadas à fortes chuvas e poluição da paisagem e dos aquíferos são os tipos mais comuns de serem observados. Embora sejam fenômenos mais frequentemente relacionados a processos naturais, sua ocorrência pode ser acelerada ou aumentada pelas atividades antrópicas conforme destacado em Santo et al. (2007), Festa et al. (2012), Gutierrez (2010), De Waele et al. (2011), Gutierrez et al. (2014) e Parise (2015).

As dolinas são, de longe, as feições mais comuns e típicas do carste e que são diretamente ligadas aos riscos geológicos. As dolinas e subisidências do terreno são formados por processos que já foram descritos nesse livro e, quando associadas à ocupação antrópica de uma área cárstica, causam problemas aos equipamentos urbanos existentes. De acordo com Parise (2015), as dolinas podem ocorrer naturalmente ou serem ativadas ou reativadas por outros riscos geológicos como sismos ou fortes chuvas concentradas que também podem dar origem a enchentes, outro risco geológico inerente ao carste.

As enchentes e as enchentes relâmpago também são riscos geológicos significativos no carste. Devido ao escoamento superficial limitado e ligado à alta solubilidade dos carbonatos, aliado à rápida infiltração através de uma complexa rede de condutos e cavernas na massa rochosa, a chuva é geralmente absorvida no epicarste e transferida profundamente para a recarga do aquífero cárstico. Entretanto, fortes chuvas podem alagar dolinas, uvalas e poljes que se apresentavam secos a maior parte do ano. Os alagamentos podem ocorrer devido ao entupimento de sumidouros por sedimentos ou simplesmente pela transferência de grandes quantidades de água fluindo a grandes velocidades. Parise (2015) também ressalta que tais enchentes podem ocorrer por causa de processos equivocados de ocupação antrópica que selam sumidouros ou fundos de depressões fechadas, por exemplo.

Outros riscos geológicos no carste podem ter origem antrópica, como a erosão dos solos e a desertificação. Parise (2015) destaca que a erosão dos solos, a desertificação e a destruição parcial ou total da paisagem cárstica são problemas gravíssimos e de difícil remediação. Além destes problemas, o rápido crescimento da população urbana aumenta a demanda por água, seja para o ser humano, seja para desedentação animal e agricultura, elevando as pressões aos aquíferos cársticos.

As atividades urbanas aumentam a quantidade e o tipo dos poluentes que podem contaminar a água subterrânea. Na literatura é possível identificar aquíferos contaminados por excesso de nutrientes, microorganismos patogênicos e efluentes domésticos e industriais, por exemplo. Parise (2015) afirma que o efeito dessa possível contaminação da água subterrânea pode variar em função da vulnerabilidade do aquífero, do uso potencial do aquífero, da origem e do grau de tratamento dos efluentes, por exemplo.

A extração do calcário por meio da mineração causa impactos inevitáveis na paisagem. O aumento do uso de explosivos contribui grandemente para a remoção da zona subcutânea (epicarste) e destruição da vegetação, cavernas e espeleotemas (GILLIESON, 1996), embora a atividade seja fundamental para a sobrevivência humana.

Foto: L. E. P. Travassos

CONCLUSÃO

Este livro nos permite perceber que a distribuição espacial mundial do carste varia tanto em escala regional quanto local. É por isso que os sentimentos topofóbicos ou topofílicos em relação às cavernas aparecem nas mais diversas culturas, sendo incontáveis as estórias e mitos de criação que têm suas origens no carste e nas cavernas. Sendo assim, a história dos seres humanos está intimamente conectada com tais espaços, sejam eles tidos como lugares de abrigo ou utilizados como locais para a prática de rituais de diversas crenças religiosas.

Com a evolução das civilizações, as cavernas passaram a ser usadas para armazenamento dos mais diversos materiais —de grãos a munições e equipamentos— e, em períodos de guerra, tornaram-se esconderijos ou fortificações. Durante a Guerra Fria, por exemplo, o medo provocado pela possibilidade de uma guerra nuclear fez com que subterrâneos se tornassem até mesmo abrigos nucleares, tanto em países alinhados à OTAN quanto ao Pacto de Varsóvia.

Do ponto de vista físico, as cavernas são igualmente distintas em sua gênese e desenvolvimento: diferem em idade, dimensão e morfologia, cuja formação ocorre em função da relação sistêmica entre os processos ocorridos na superfície e em subsuperfície. As cavernas, que são ambientes geralmente úmidos, apresentam acúmulo de sedimentos ao longo dos condutos e fraturas, podendo ser espaçosas ou estreitas. Em função dos seus complexos processos de formação, as cavernas podem se desenvolver horizontalmente e verticalmente, podendo ser temporária ou permanentemente alagadas. Normalmente, o chão das cavernas é coberto por areia, silte ou argila e é possível encontrar cascalhos e seixos associados à presença antiga ou atual dos rios subterrâneos. As águas superficiais, assim como as águas profundas, contribuem para a dissolução das rochas e a formação das cavidades naturais subterrâneas. Na superfície, alguns rios podem moldar a paisagem do exocarste e a do endocarste. A água agressiva dissolve e alarga fraturas e, com a evolução do tempo geológico, aumenta o tamanho das cavernas. Uma vez rebaixado o nível da água, as cavernas começam a ser preenchidas pelos espeleotemas. Essas feições, encontradas nas cavidades naturais subterrâneas (e, às vezes, fora delas) são o resultado dos processos de dissolução das rochas e de deposição dos minerais que foram transportados pela água. São encontrados no chão, nas paredes e no teto e incluem as represas de travertino, os escorrimentos, as

cortinas, as helictites, as estalagmites, as estalactites e as colunas, por exemplo.

Em um primeiro momento, a história da carstologia está intimamente ligada à história da espeleologia para, tempos depois, tornar-se mais próxima da geomorfologia e, em especial, dos pesquisadores da Escola de Viena. Ao final do século XIX, surge como uma ciência capaz de explorar um imenso campo de estudos, junto às mais diversas disciplinas, tais como Geografia, Geologia, Hidrologia, Arqueologia, Física e Biologia, entre outras. É relevante ressaltar que, nesse livro, a Bioespeleologia não foi abordada, por ser praticamente um tema "a parte" na Carstologia.

Sabe-se que a biota na superfície e nas cavernas faz parte do geossistema cárstico. Entretanto, como o foco desse livro é o patrimônio abiótico, o autor, geógrafo, optou por reunir as referências mais importantes ao final do livro.

Dolinas, uvalas, poljés e afloramentos marcados por lapiás de todos os tipos são encontrados na superfície do carste carbonático. Contudo, outras rochas menos solúveis também podem apresentar tais feições, embora os processos de formação ocorram preferencialmente por ação mecânica e não pelos processos de dissolução predominantes.

As aberturas naturais existentes na paisagem desenvolvida em rochas ígneas, metamórficas e sedimentares são formadas por processos químicos de dissolução da rocha, principalmente, bem como por meio de processos físicos. Contudo, destaca-se que as cavernas que são formadas pela dissolução das rochas carbonáticas são as mais comuns e, consequentemente, as mais estudas em todo o mundo.

Em relação ao microclima das cavernas, percebe-se que a temperatura da maioria encontra-se próxima à média das temperaturas externas anuais. Dessa forma, cavernas mais próximas do equador e dos trópicos são, logicamente, mais quentes do que aquelas localizadas próximas a zonas temperadas e polares ou em montanhas mais altas.

O carste e as cavernas estão constantemente ameaçados pelas atividades antrópicas, não somente na superfície, mas também abaixo dela. Falta de cuidado e ignorância, bem como atos de vandalismo intencional, podem rápida e permanentemente danificar uma caverna e seu ambiente, impactando negativamente tanto o meio físico quanto os animais que vivem nesse geossistema. O desenvolvimento com responsabilidade é, portanto, mais do que um modismo. É uma necessidade.

Foto: L. E. P. Travassos

BIBLIOGRAFIA

AB'SABER, A. N. **Topografias ruineformes no Brasil. São Paulo**: IGC/USP, 1970 (Geomorfologia n.50)

ABRAHAM, R. The misuse of mathematics. In: EMMER, M.; QUARTERONI, A. (Eds.) **Mathknow**: Mathematics, applied sciences and real life. Milão: Springer, 2009. v.3, p.1-8.

ALBERIGI, S. **Avaliação da exposição ao ^{222}Rn nas cavernas do Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira (PETAR)**. 2006. 63f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear – Aplicações), Instituto de Pesquisa em Energia Nuclear, Universidade de São Paulo. São Paulo.

ALBERIGI, S.; PECEQUILO, B.R.S. Níveis de Radônio em cavernas do Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira (PETAR). **Pesquisas em Turismo e Paisagens Cársticas**, Campinas, v.1, n.1, p.43-55, 2008.

ALKMIM, F.F.; BRITO NEVES, B.D.; ALVEZ, J.C. Arcabouço tectônico do Cráton do São Francisco: uma revisão. **O Cráton do São Francisco**, v.1, p.45-62, 1993.

ALKMIM, F.F.; CHEMALE JR., F.; ENDO, I. A deformação das coberturas Proterozóicas do Cráton do São Francisco e seu significado tectônico. **Revista da escola de Minas**, v.49, p.22-38, 1996.

ALKMIM, F.F.; MARTINS-NETO, M.A. A bacia intracratônica do São Francisco: Arcabouço estrutural e cenários evolutivos. In: PAIVA PINTO, C.; MARTINS-NETO, M.A. (Ed.). **Bacia do São Francisco**: geologia e recursos naturais. SBG/MG: Belo Horizonte, 2001. p.09-30.

ALMEIDA, F.D. O Cráton do Paramirim e suas relações com o do São Francisco. In: SIMPÓSIO SOBRE O CRÁTON DO SÃO FRANCISCO E SUAS FAIXAS MARGINAIS, 1981, Salvador, Bahia. **Anais...** Salvador: SBG, 1981. p.01-10.

ALMEIDA, F.D. O cráton do São Francisco. **Revista Brasileira de Geociências**, v.7, p.349-364, 1977.

ALMEIDA, F.D.O Cráton do Paramirim e suas relações com o do São Francisco. In: SIMPÓSIO SOBRE O CRÁTON DO SÃO FRANCISCO E SUAS FAIXAS MARGINAIS, 1981, Salvador/Bahia. **Anais...** Salvador: SBG, 1981. p.1-10.

ALMEIDA, F.D.O cráton do São Francisco. **Revista Brasileira de Geociências**, v.7, p.349-364, 1977.

ALMEIDA, F.F.M. **Origem e evolução da plataforma brasileira**. Rio de Janeiro: DNPM/DGM, 1967. p.01-36.

ALMEIDA, F.F.M. **Origem e evolução da plataforma brasileira**. Rio de Janeiro: DNPM/DGM, 1967. p.01-36.

ALMEIDA, L.H.S.; SALLUM FILHO, W.; KARMAN, I.; BOGGIANI, P.C. Quaternary tufas in the Serra do André Lopes, southeastern Brazil. **Rend. Online Soc. Geol. It.**, v.16, p.5-6, 2011.

ANDREWS, J.E. Palaeoclimatic records from stable isotopes in riverine tufas: synthesis and review. **Earth-Science Reviews**, v. 75, p.85–104, 2006.

ANDREYCHOUK, V.; DUBLYANSKY, Y; EZHOV, Y; LYSENIN, G. **Karst in the Earth's Crust**: its distribution and principal types. Poland: University of Silesia/Ukrainian Academy of Sciences/Tavrichesky National University-Ukrainian Institute of Speleology and Karstology, 2009.

ANDREYCHOUK, V.; TRAVASSOS, L.E.P.; BARBOSA, E.P. As cavernas como objetos do turismo religioso em diferentes crenças religiosas: alguns exemplos mundiais. **O Carste**, v.22, p.48-64, 2010.

ANTONOV, G. Sacred caves in Strandža Mountains, S.E. Bulgaria. In: INTERNATIONAL SPELEOLOGICAL CONGRESS, 7, 1977. **Proceedings...** Sheffield, 1977.

ARDAU, F.; BALIA, R.; BIANCO, M.; DE WAELE, J. Assessment of covercollapse sinkholes in southwest Sardinia (Italy). In: PARISE, M.; GUNN, J. (eds). **Natural and anthropogenic hazards in Karst areas**: recognition, analysis and mitigation, geological society of London. London: Geological Society of London, 2007. p.47–57.

ARENAS, C.; GUTIÉRREZ, F.; OSÁCAR, C.; SANCHO, C. Sedimentology and geochemistry of fluvio--lacustrine tufa deposits controlled by evaporite solution subsidence in the central Ebro Depression, NE Spain. Sedimentology, v.47, n. 4, p.883-909, 2000.

ARIAS, M.C.; MESQUITA, C.A.B.; MÉNDEZ, J.; MORALES, M.E.; AGUILAR, N.; CANCINO, D.; GALLO, M.; RAMIREZ, C.; RIBEIRO, N.; SANDOVAL, E.; TURCIOS, M. **Capacidad de carga turística de las áreas de uso público del Monumento Nacional Guayabo**, Costa Rica. Turrialba: Catie/WWF, 1999.

AUBRY, T.; CONDE, A.; CUNHA, E.; DIMUCCIO, L.A.; DUARTE, M.; MOURA, H.; RODRIGUES, Z. Intervenção arqueológica na gruta Brutiais (Maciço de Sicó-Portugal). In: BRANDÃO, J. M.; CALADO, C.; COUTO, F. S. Património geológico, arqueológico e mineiro em regiões cársicas: **Actas do Simpósio Ibero-Americano**. Batalha/Portugal: SEDPGYM, 2007. p. 221-229.

AUDRA, P.; PALMER, A. N. The pattern of caves: controls of epigenic speleogenesis. **Géomorphologie**: relief, processus, environnement, n. 4, 2011, p. 359-378, 2011.

AUDRA, P.; PALMER, A.N. Research frontiers in Speleogenesis: Dominant processes, hydrogeological conditions and resulting cave patterns. **Acta Carsologica**, v. 44, n. 3, p. 315, 2015, 2015.

AUDRA, P.; PALMER, A.N. The vertical dimension of karst: controls of vertica lcave pattern. In: SHRODER, J.; FRUMKIN, A. (Ed.). **Treatise on geomorphology**. San Diego (CA): Academic Press, 2013. p. 186-206. (Volume 6, Karst Geomorphology).

AULER, A. Karst areas in Brazil and the potential for major caves: an overview. **Bol. Soc. Venezolana Espel.**, Caracas, v. 35, p. 1-18, 2002.

AULER, A. S. Sources of water aggressiveness – the driving force of karstification. In: SHRODER, J.; FRUMKIN, A. (Ed.). **Treatise on geomorphology.** San Diego (CA): Academic Press, 2013. p. 23-28. (Volume 6, Karst Geomorphology).

AULER, A.; RUBBIOLI, E.; BRANDI, R. **As grandes cavernas do Brasil**. Belo Horizonte: GBPE, 2001.

AULER, A.S.; SMART, P.L. Late Quaternary paleoclimate in semiarid northeastern Brazil from U-series dating of travertine and water table speleothems. Quat. Res., v.55, p.159–167, 2001.

BADINO, G. Cave temperatures and global climatic change. **International Journal of Speleology**, Bologna, v.33, n.1, p.103-114, 2004.

BADINO, G. The legend of carbon dioxide heaviness. **Journal of Cave and Karst Studies**, v. 71, n. 1, p. 100-107, 2009.

BADINO, G. Underground meteorology - "what's the weather underground?". **Acta Carsologica**, v.39, n.3, p. 427-448, 2010.

BAILEY, W.G. Microclimatology. In: OLIVER, J.E. (Ed.) E**ncyclopedia of world climatology**. Dordrecht: Springer, 2005. p.486-499.

BAKALOWICZ, M. Epikarst processes. In: SHRODER, J.; FRUMKIN, A. (Ed.). **Treatise on geomorphology**. San Diego (CA): Academic Press, 2013. p. 164-171. (Volume 6, Karst Geomorphology).

BALDINI, J.U.L.; BALDINI, L.M.; MCDERMOTT, F.; CLIPSON, N. Carbon dioxide sources, sinks, and spatial variability in shallow temperate zone caves: evidence from Ballynamintra cave, Ireland. **Journal of Cave and Karst Studies**, v.68, 2006.

BAPTISTA, M.C. **Estratigrafia e Evolução Geológica da Região de Lagoa Formosa (MG)**. 2004. 104f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais.

BARBER, M.B.; HUBBARD JR., D.A. Overview of the human use of caves in Virginia: a 10,500 year history. **Journal of Cave and Karst Studies**, v. 59, n. 3, p. 132-136, 1997.

BARBER, R. **Pilgrimages**. London: The Boydell Press, 1993.

BARBOSA, E. P. Cavernas, estórias, história e tradições religiosas no interior da Bahia. In: SIMPÓSIO ANUAL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE HISTÓRIA DAS RELIGIÕES – ABHR, 4, 2007, Viçosa. **Anais...** Viçosa: ABHR, 2007.

BARBOSA, E.P.; TRAVASSOS, L.E.P. Caves, stories, history and popular traditions in the semi-desert (Sertão) of Bahia, northeastern Brazil. **Acta Carsologica**, v. 37, n. 2-3, p. 331-338, 2008.

BARBOSA, O. Série Bambuí. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 19, 1965, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: SBG, 1965.

BARRY, R.G.; CHORLEY, R.J. **Atmosphere, Weather and Climate**. 9.ed. New York: Routledge Taylor & Francis Group, 2009.

BENSON, R.C.; YUHR, L.B. **Site Characterization in Karst and Pseudokarst Terraines**: Practical Strategies and Technology for Practicing Engineers, Hydrologists and Geologists. Springer, 2016.

BENTO, L.C.M.; RODRIGUES, S.C. O geoturismo como instrumento em prol da divulgação, valorização e conservação do patrimônio natural abiótico–uma reflexão teórica. **Revista Pesquisas em Turismo e Paisagens Cársticas**, v.3, n.2, p. 55-65, 2010.

BENTO, L.C.M.; TRAVASSOS, L.E.P.; RODRIGUES, S.C. Considerações sobre as cavernas quartzíticas do Parque Estadual do Ibitipoca, Minas Gerais, Brasil. **Caminhos de Geografia**, v.16, n.54, 2015.

BERGER, E. Sherpa Buddhists on a regional pilgrimage: the case of Maratika Cave at Halase. **Occasional papers in Sociology and Anthropology**, v. 4, p. 124-145, 1994.

BITTENCOURT, C.; REIS NETO, J. M. dos. O sistema cárstico de Vazante-carste em profundidade em metadolomitos do Grupo Vazante–MG. Brazilian Journal of Geology, v. 42, n. 1, p.01-10, 2012.

BLATT, H. **Sedimentary petrology**. 2.ed. New York: W.H. Freeman and Company, 1992.

BOGGIANI, P.C.; COIMBRA, A.M. Quaternary limestones of the Pantanal Area, Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v.67, p.343–349, 1995.

BOGGIANI, P.C.; COIMBRA, A.M.; GESICKI, A.L.; SIAL, A.N.; FERREIRA, V.P.; RIBEIRO, F.B.; FLEXOR, J.M. Tufas Calcárias da Serra da Bodoquena. In: SCHOBBENHAUS, C.; CAMPOS, D.A.; QUEIROZ, E.T.; WINGE, M.; BERBERT-BORN, M. (Ed.) **Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil**. Brasília: DNPM/ CPRM/ SIGEP, 1999. p. 1-16.

BOGGIANI, P.C.; COIMBRA, A.M.; GESICKI, A.L.; SIAL, A.N.; FERREIRA, V.P.; RIBEIRO, F.B.; FLEXOR, J.M. Tufas Calcárias da Serra da Bodoquena: cachoeiras petrificadas ao longo dos rios. In: SCHOBBENHAUS, C.; CAMPOS, D.A.; QUEIROZ, E.T.; WINGE, M.; BERBERT-BORN, M. (Ed.) **Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil**. Brasília: DNPM/CPRM/ SIGEP, 2002. p. 249-259.

BOGGIANI, P.C.; COIMBRA, A.M.; RIBEIRO, F.; FLEXOR, J.; SIAL, A.N.; FERREIRA, V.P. Significado paleoclimático das Lentes Calcárias do Pantanal do Miranda: Mato Grosso do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIR DE GEOLOGIA, 40, 1998, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: SBG, 1998. p. 88-88.

BOGGIANI, P.C.; SILVA, O.J.; GESICKI, A.L.D.; GALATI, E.; SALLES, L.O.; LIMA, M.M.E.R. Definição de capacidade de carga turística das cavernas do Monumento Natural Gruta do Lago Azul (Bonito, MS).

Geociências, Rio Claro, v.26, n.4, p.333-348, 2007.

BOGGIANI, P.C.; TREVELIN, A.C.; SALLUN FILHO, W.; OLIVEIRA, E. C. de; ALMEIDA, L.H.S. Turismo e conservação de tufas ativas da Serra da Bodoquena, Mato Grosso do Sul. **Tourism and Karst Areas**, v.4, p.55-63, 2011.

BOGGIANI, P. C. et al. Turismo e conservação de tufas ativas da Serra da Bodoquena, Mato Grosso do Sul. **Pesquisas em Turismo e Paisagens Cársticas**, v. 4, p. 55-63, 2011.

BÖGLI, A. **Die wichtigsten Karrenformen der Kalkalpen. Karst processes and relevants landforms**. Ljubljana: ISU Comission on Karst Denudation, 1976. p. 141-149.

BÖGLI, A. Kalkosung und karrenbilding. **Zeitschrift für geomorphologie**, Suplement 2, p. 4-21, 1960.

BÖGLI, A. **Karst hydrology and physical speleology.** Berlin: Springer-Verlag, 1980.

BÖGLI, A. Solution of calcium carbonate and the formation of karren. **Cave Geology**, 1975.

BONACCI, O. Poljes, ponors and their catchments. In: SHRODER, J.; FRUMKIN, A. (Ed.). **Treatise on geomorphology**. San Diego (CA): Academic Press, 2013. p. 112-120. (Volume 6, Karst Geomorphology).

BONACCI, O. The Vrana Lake hydrology (Island of Cres – Croatia). **Water Resources Bulletim**, v.23, n. 3, p. 407-414, 1993.

BORGES, F. de A.C.; TRAVASSOS, L.E.P.; GUIMARÃES, F.A. Proposal to establish geotouristic trails at the Monumento Natural Estadual Gruta Rei do Mato, Sete Lagoas, Minas Gerais. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF SPELEOLOGY, 16, 2013, Brno. **Proceedings...** Brno: Czech Speleological Society/ UIS, 2013. p.209-214.

BOSAK, P.; FORD, D.; GLAZEK, J.; HORACEK, I. (Ed.). **Paleokarst a systematic and regional review**. New York: Elsevier, 1989.

BOURGES, F.; GENTHON, P.; MANGIN, A.; D'HULST, D. Microclimates of l'Aven d'Ornac and other French limestone caves (Chauvet, Esparros, Marsoulas). **International Journal of Climatology**, v.26, p.1651-1670, 2006.

BOYD JR., C. C.; BOYD, D. C. Osteological comparison of prehistoric Native Americans from South West Virginia and east Tennessee. **Journal of Cave and Karst Studies**, v. 54, n. 3, p. 160-165, 1997.

BRADY, J. E. A reassessment of the chronology and function of Gordon's cave #3, Copan, Honduras. **Ancient Mesoamerica**, v. 6, p. 29-38, 1995.

BRADY, J. E. **An investigation of Mayan ritual cave use with special reference to Naj Tunich, Peten, Guatemala**. PhD. Dissertation, University of California, Los Angeles, 1989.

BRADY, J. E. Cavernas como antigos centros de peregrinação Maia: evidências arqueológicas de uma função multifacetada. In: TRAVASSOS, L.E.P.; MAGALHÃES, E. D.; BARBOSA, E. P. (Org.). **Cavernas, rituais e religião**. Ilhéus/Bahia: Editus, 2011.

BRADY, J. E. Los oscuros secretos de los mayas: la exploración arqueológica de las cuevas. In: GRUBE, N. (Ed.) **Los Mayas, una civilización milenaria**. Barcelona/Bergamo: Köneman Verlagsgesellschaft, 2001. p. 297-307.

BRADY, J. E. The sexual connotations of caves in Mesoamerican ideology. **Mexicon X**, n. 3, p. 51-55, 1988.

BRADY, J. E.; HASEMANN, G.; FOGARTY, J. H. Harvest of skulls and bones. Achaeology, v. 48, n. 3, may/june, 1995.

BRADY, J.; SCOTT, A.M. Heart of the Earth, Heart of the community: the role of caves in the validation of settlement space. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF SPELEOLOGY, 15, 2009. **Proceedings...** UIS/NSS: Texas, 2009. p. 58-63 (Volume 1).

BRADY, J.; STONE, A. Naj Tunich: entrance to the Maya underworld. **Archaeology**, v. 39, n. 6, p. 18-25, 1986.

BRANNER, J.C. Aggraded limestone plains of the interior of Bahia and the climatic changes suggested by them. **Geological Society of America Bulletin**, v.22, p.187-206, 1911.

BRASIL. **Glossário de termos técnicos ambientais rodoviários**. Rio de Janeiro: DENIT, 2006. 116p.

BRAUN, O.P.G. Contribuição à estratigrafia do Grupo Bambuí. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 23, 1968, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: SBG, 1968. p.219-222.

BRETZ, J.H. Vadose and phreatic features of limestone caves. **Journal of Geology**, v.50, p.675–811, 1942.

BRICK, G. A. O Deus Serpente da Caverna de Ferro: um mito de caverna dos nativos norte-americanos. In: TRAVASSOS, L.E.P.; MAGALHÃES, E. D.; BARBOSA, E. P. (Org.). **Cavernas, rituais e religião**. Ilhéus/Bahia: Editus, 2011.

BRILHA, J. **Patrimônio Geológico e Geoconservação**: A conservação da natureza na sua vertente geológica. Braga: Palimage Editores, 2005.

BRITO, A.G. As montanhas e suas representações: buscando significados a luz da relação Homem-Natureza. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v. 8, n. 1, p. 1- 20, 2008.

BRUCE, F.F. Qumran and the Old Testament. **Faith and Thought**, v. 91, n. 1, p. 9-7, Summer 1959.

BUECHER, R.H. Microclimate Study of Kartchner Caverns, Arizona. **Journal of Cave and Karst Studies**, v.61, n.2, p.108-120, 1999.

BURDON, D.J.; SAFADI, C.Ras-el-Ain: the great karst spring of Mesopotamia. **Journal of Hydrology**, v.1, p.58–95, 1963.

BURGES, F.; GENTHON, P.; GENTY, D.; LORBLANCHET, M.; MAUDUIT, E.; D'HULST, D. BOURGES, F. et al. Conservation of prehistoric caves and stability of their inner climate: lessons from Chauvet and other French caves. **Science of the Total Environment**, v. 493, p. 79-91, 2014.

BURTON, I. **The Life of Captain Sir Richard. F. Burton**. London, Chapman & Hall, 1893 (2 volumes).

BUYSSON, P.P.D. du. **The Sainte Baume: a mountain steeped in geological and religious history**. Septèmes-les-vallons/France: Editions PEC, 1993.

CAILLOIS, R. **O homem e o sagrado** (1939). Lisboa: Edições 70, 1988.

ĆALIĆ, J. Karstic uvala revisited: Toward a redefinition of the term. **Geomorphology**, v. 134, p.32-42, 2011.

ĆALIĆ, J. **Uvala: contribution to the study of karst depressions (with selected examples from Dinarides and Carpatho-Balkanides)**. 2009. 213f. Tese (Doutorado em Casrtologia) – Universidade de Nova Gorica, Eslovênia, 2009.

CAMPELLO, M. S. et al. Cavidades naturais da Pedra Grande de Igarapé: geossítio de relevância espeleológica do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. **Anu. Inst. Geocienc.**, Rio de Janeiro, v.35, n.1, 2012.

CAMPOS, M.P.; PECEQUILO, B.R.S.; ALBERIGI, S.; MAZZILLI, B.P. Thoron exposure among tour guides in southern Brazilian show caves. **International Journal Low Radiation**, v.3, n.2/3, p.217-223, 2006.

CAPEZZUOLI, E.; GANDIN, A.; PEDLEY, M. Decoding tufa and travertine (fresh water carbonates) in the sedimentary record: The state of the art. **Sedimentology**, v.61, p.1-21, 2014.

CARMO, F. F. et al. Novo sítio espeleológico em sistemas ferruginosos no Vale do Rio Peixe Bravo, Norte de Minas Gerais, Brasil. **Espeleo-Tema**, v. 22, p. 79-93, 2011.

CARTHEW, K.D.; TAYLOR, M.P.; DRYSDALE, R.N. Are current models of tufa sedimentary environments applicable to tropical systems? A case study from the Gregory River. **Sediment Geol.**, v.62, p.199–218, 2003.

CARVALHO, I. de S. Paleontologia. 2.ed. Editora Interciência, 2004.

CARVALHO, R.T.; PFLUG, R. **Observações sobre a estratigrafia da Serie Minas na região de Diamantina**, MG. Rio de Janeiro: DGM/DNPM, 1968.

CARVALHO, S.M. Microclimatologia subterrânea da gruta Olhos d'Água (Castro, PR). In: DITZEL, C. de H.M.; SAHR, C.L.L. **Espaço e cultura**: Ponta Grossa e os Campos Gerais. Ponta Grossa: UEPG, 2001. p.443-462.

CASTANY, G. Traite pratique des eaux souterraines. Paris: E. Dunod, 1963.

CECAV - Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas. Base digital de dados geo-espacializados de cavernas do Brasil, 2011. Instituto Chico Mendes. Disponível em:<http://www.icmbio.gov.br/cecav/projetos-e-atividades/prov

CÉSAR JÚNIOR, N. da S. Estudo meteorológico do laboratório subterrâneo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 14, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: SBE/CPG, 1980. p.140-147.

CHAFETZ, H. S.; FOLK, P. L. Travertines: DepoSítional morphology and the bacterially constructed constituents. **Journal of Sedimentary Petrology**. v.54, n. 1, p.289-316, 1984.

CHAVES, M.L. de S. C.; ANDRADE, K.W.; BENITEZ, L. Geologia integrada das Folhas Jequitaí, Bocaiúva e Montes Claros (1:100.000), norte de Minas Gerais. **Geonomos**, v.19, p.1-7, 2011.

CHIESA, R.; CASTELLINO, S. La Grotta Santuario di Santa Lucia (Toirano-Sanova). **Speleologia**, v. 20, n. 40, p. 45-52, Giugno 1999.

CHOAY, F. **A alegoria do patrimônio**. São Paulo: UNESP, 2001.

CHOPPY, J.; CIGNA, A.A. PropoSítion pour une etude micro-climatique en zones souterraines profondes. **International Journal of Speleology**, Bologna, v.23, n.1/2, p.91-93, 1994.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. Applied hydrology. New York: McGraw Hill Book Company, 1988.

CIGNA, A.A. Air circulation in caves. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF SPELEOLOGY, 4, 1968, Ljubljana. **Proceedings...** Ljubljana, 1968.

CIGNA, A.A. An analytical study of air circulation in caves. **Internation Journal of Speleology**, v.3, n.1-2, 1967.

CIGNA, A.A. Environmental management of tourist caves - the examples of Grotta di Castellana and Grotta Grande del Vento, Italy. **Environmental Geology**, v. 21, p. 173-180. 1993.

CIGNA, A.A. Modern trend in cave monitoring. **Acta Carsologica**, v.31, n.1, p.35-54, 2002a.

CIGNA, A.A. Monitoring of caves: conclusions and recommendations. **Acta Carsologica**, v. 31, n. 1, 2002b. p. 175-177.

CIGNA, A.A.; BURRI, E. Development, management and economy of show caves. **International Journal of Speleology**, v. 29 n. 01, p. 01-27, 2000.

CIGNA, A.A.; FORTI, P. The environmental impact assessment of a touristic cave. In: CAVE TOURISM INTERNATIONAL SYMPOSIUM AT 170 ANNIVERSARY OF POSTOJNSKA JAMA, 1988, Postojna. **Proceedings...** Postojna, 1998. p.29-38

CIGNA, A.A.Show caves. In: CULVER, D. C.; WHITE, W. B. (Ed.). **Encyclopedia of Caves**. USA: Elsevier Academic Press, 2005. p. 495-500.

CLARK, I. D. The abode of malevolent spirits and creatures - Caves in Victorian Aboriginal social organization. **Helictite**, v. 40, n. 1, p. 2-10, 2007.

CLENDENON, C. **Hydromythology and the Ancient Greek World**: An Earth Science Perspective Emphasizing Karst Hydrology. Michigan: Fineline Science Press, 2009b.

CLENDENON, C. Karst hydrology in ancient myths from Arcadia and Argolis, Greece. **Acta Carsologica**, v. 38, n. 1, p. 145-154, 2009a.

COELHO, J.C.C. **Estilos estruturais e evolução tectônica de borda oeste da Bacia do São Francisco, com base na integração de dados de superfície e sub-superfície, litogeoquímica e isótopos**. 2007. 115f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto.

COLAS, P.R.; REEDER, P.; WEBSTER, J. The ritual use of a cave on the northern Vaca Plateau, Belize, Central America. **Journal of Caves and Karst Studies**, v. 62, n. 1, p. 3-10, April 2000.

COLLET, G.C. Programa de trabalho para o laboratório subterrâneo de pesquisas – período 1976 – SBE. **Espeleo-Tema**, São Paulo, v.7, p.7-8, 1976.

COOPER, A. H.; WALTHAM, A. C. Subsidence caused by gypsum dissolution at Ripon, North Yorkshire. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, v. 32, n. 4, p. 305-310, 1999.

CORBEL, J. Erosion en terrain calcaire. **Annales de Géographie**, v. 68, p. 97-120, 1959b.

CORBEL, J. **Les karsts du Nord-Ouest de L'Europe et de Quelques Regions de Comparison**. Lyon: Université de Lyon, 1957. (Memoires et Documents 12).

CORBEL, J. The speed of erosion. **Zeitschrift für geomorphologie**, v. 1, p. 1-28, 1959a.

CORRÊA, D. **Caracterização, cronologia e gênese das tufas da Serra das Araras-Mato Grosso**. 2006. 80f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais.

CORRÊA, D.; AULER, A.S.; WANG, X.; EDWARDS, R.L.; CHENG, H. Geomorphology and genesis of the remarkable Araras Ridge tufa deposit, Western Brazil. **Geomorphology**, v.134, p.94-101, 2011.

COSTA JÚNIOR, E.P.D. **Abismo Anhumas (MS 04)**: plano de manejo espeleológico. rev. e ampl. Bonito: Abismo Anhumas, 2004. 167 p.

COVINGTON, M. D.; PRELOVŠEK, M.; GABROVŠEK, F. Influence of CO_2 dynamics on the longitudinal variation of incision rates in soluble bedrock channels: Feedback mechanisms. **Geomorphology**, v.186, p.85-95, 2013.

COVINGTON, M.D., LUHMANN, A.J., SAAR, M.O., GABROVŠEK, F., WICKS, C.M. Mechanisms of heat exchange between water and rock in karst conduits / COVINGTON, M.D. et al. (Ed.).**Water Resources Research**, v.47, n.10, 2011.

ČUK, A. **Postojna Cave**. Postojna: Turizem Kras, destinacijski management, 2008.

CVIJIĆ, J. **Das Karstphänomen**. Versuch einer morphologischen Monographie ("Geographische Abhandlungen", herausgegeben von Prof. Dr A. Penck, Wien, Bd. V. Heft. 3, 1893, 1-114).

CVIJIĆ, J. **Geomorfologija**. Beograd/Yugoslavia, 1926. (Volume 2, Morfologie Terrestre).

CVIJIĆ, J. **Karst**. Beograd, 1895. 176 p.

CVIJIĆ, J. La geographie des terrains calcaries. **Acad. Serbe. Sci. Arts.**, v. 341, n. 26, p. 1-212, 1960.

CVIJIĆ, J. **CARSTE**: Uma monografia geográfica (1895). Belo Horizonte: PUC Minas, 2017. Tradução de Luiz Eduardo Panisset Travassos. Revisão de João Henrique Rettore Tottaro.

DANA, J. D. et al. **A Manual of Mineralogy**, 1852.

DANDURAND, G. et al. X-ray fluorescence microchemical analysis and autoradiography applied to cave deposits: speleothems, detrital rhythmites, ice and prehistoric paintings. **Géomorphologie**: relief, processus, environnement, n. 4, 2011, p. 407-426, 2011.

DANKO, G.L. Subsurface flow and transport process model for time dependent mine ventilation simulations. **Mining Technology**, v.122, n.3, p.134-144, 2013.

DARDENNE, M.A. Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 30, 1978, Recife. **Anais...** Recife: SBG, 1978, p.597-610.

DAVEMPORT ADAMS, W. H. **Famous Caves and Catacombs**: described and illustrated. Whitefish (USA): Kessinger Publishing, 2006. -

DAVIS, W. Origin of limestone caverns. **Geological Society of America Bulletin**, v.30, p.475–628, 1930.

DAY, M. J. Military Campaigns in Tropical Karst Terrain: The Maroon Wars of Jamaica. In: CALDWELL,

D.; EHLEN, J.; HARMON, R. (Ed.). **Studies in Military Geology and Geography**. Netherlands: Springer, 2004. p. 79-88.

DE WAELE, J. **The Karst Process**. Bologna: Società Speleologica Italiana, 2008 (Teaching resources for Speleology and Karst).

DE WAELE, J.; GUTIERREZ, F.; PARISE, M.; PLAN, L. Geomorphology and natural hazards in karst areas: a review. **Geomorphology**, v.134, n.1–2, p.1–8, 2011.

DE WAELE, J.; FORTI, P.; PICCINI, L. **Speleogenesis in Carbonate Rocks**. Bologna: Società Speleologica Italiana, 2008 (Teaching resources for Speleology and Karst).

DE WAELE, J.; PLAN, J.; AUDRA, P. Recent developments in surface and subsurface karst. **Geomorphology**, v.106, p. 1-8, 2009.

DESNOYERS, J. P. F. S. **Recherches géologiques et historiques sur les cavernes et particulirement sur les cavernes a ossements**. Paris, p.1-83, 1845.

DESONIE, D. **Atmosphere**. New York: Chelsea House, 2007.

DIENER, P. The picturesque as an aesthetic category in the art of travelers: notes on J. M. Rugendas's work. **Historia**, Santiago, v.3, Selected Edition, 2007.

DINIZ, A.M.; TRAVASSOS, L.E.P.; BRANDÃO, V.S.; RIOS, F.V.P. Some aspects of the geographical distribution of Buddhist caves. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF SPELEOLOGY, 16, 2013, Brno. **Proceedings...** Brno: Czech Speleological Society/ UIS, 2013. p.365-368.

DOORNE, S. Caves, culture and crowds: carrying capacity meets consumer sovereignty. **Journal of Sustainable Tourism**, v. 8, n. 2, 2000. p. 116-130,

DRAGOVICH, D.; GROSE, J. Impact of tourism in carbon dioxide levels at Jenolan caves, Australia: an examination of microclimatic constraints on tourist cave management. **Geoforum**, v.21, n.1, p.111-120, 1990.

DREW, D.; HÖTZL, H. **Karst hydrogeology and human activities**. Rotterdam: AA Balkema, 1999.

DREYBRODT, W., GABROVSEK, F., M., P. Condensation corrosion: A theoretical approach. **Acta Carsologica**, v.34, n.2, p.317-348, 2005.

DREYBRODT, W.; GABROVŠEK, F. Speleogenesis: Computer Models In: GUNN, J. (Ed.). **Encyclopedia of caves and karst science**. London: Fitzroy Deaborn, 2004. p. 1443- 1452.

DREYBRODT, W.; GABROVŠEK, F.; ROMANOV, D. **Processes of Speleogenessis**: A modeling approach. Ljubljana/Postojna: Založba ZRC, 2005.

DUARTE, L.; VASCONCELOS, M.E.C. Vegetais do Quaternário do Brasil. I- Flórula de Russas, CE. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v.52, p.37-48, 1980a.

DUARTE, L.; VASCONCELOS, M.E.C. Vegetais do Quaternário do Brasil. I-Flórula de Umbuzeiro, PB, CE. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v.52, p.93-180, 1980b.

DUARTE, M. J. de G. Uma contribuição sócio-antropológica para a compreensão das técnicas de construção no carso. Uma resposta cultural em Alvaiázere. In: BRANDÃO, J.M.; CALADO, C.; COUTO, F.S. Património geológico, arqueológico e mineiro em regiões cársicas: **Actas do Simpósio Ibero-Americano**. Batalha/Portugal: SEDPGYM, 2007. p. 135-144.

DUBLYANSKY, Y.V. Karstification by geothermal waters. In: SHRODER, J.; FRUMKIN, A. (Ed.). **Treatise on geomorphology**. San Diego (CA): Academic Press, 2013. p. 57-71 (Volume 6, Karst Geomorphology).

DUNHAM, R.J. Classification of carbonate rocks according to depoSítional texture. In: HAM, W.E. **Classification of carbonate rocks**. American Association of Petroleum Geologists Memoir, 1962. p.108-121.

DUNKERLEY, D. L. The morphology and development of rillenkarren. **Zeitschrift für Geomorphologie**, v. 23, p. 332-348, 1979.

DUNN, J.R. Stream tracing: Mid-Appalachian region. **National Speleological Society Bulletin**, v.2, 1957.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Geotecnologia e Geoinformação**: o produtor pergunta, a Embrapa responde. Brasília, DF: EMBRAPA, 2014. 248p.

EVANGELISTA, V.K.; TRAVASSOS, L.E.P. Estratégias para o geoturismo e geoconservação no Parque Estadual do Sumidouro, Minas Gerais. **Brazilian Geographical Journal**: Geosciences and Humanities research medium, Ituiutaba, v. 6, n. 2, p. 67-79, jul./dez. 2015.

EVANGELISTA, V.K.; TRAVASSOS, L.E.P. **Patrimônio Geomorfológico do Parque Estadual do Sumidouro**. Belo Horizonte: PUC Minas, 2014.

EVIA CERVANTES, C. A. **El mito de la serpiente Tsukán**. Mérida/Yucatán: Universidad Autónoma de Yucatán, 2007.

EVIA CERVANTES, C. A. **Selección de mitos**. Mérida/México: Universidad Autónoma de Mexico (UADY), 2006.

FABRI, F.P.; AULER, A.; AUGUSTIN, C.H.R.R. Relevo cárstico em rochas siliciclásticas: uma revisão com base na literature. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 15, n. 3, p. 339-351, 2014.

FAIMON, J.; TROPPOVÁ, D.; BALDÍK, V.; NOVOTNÝ, R. Air circulation and its impact on microclimate variables in the Císařská cave (Moravian Karst, Czech Republic). **International Journal of Climatology**, v.32, p.599-623, 2012.

FAIRCHILD, I. J.; BAKER, A. **Speleothem science**: from process to past environments. John Wiley & Sons, 2012.

FAIRCHILD, I., TUCKWELL, G., BAKER, A., TOOTH, A. Modelling of dripwater hydrology and hydrogeochemistry in a weakly karstified aquifer (Bath, UK): Implications for climate change studies. **Journal of Hydrology**, v.321, n.4, p.213-231, 2006.

FERNÁNDEZ-CORTÉS, A.; CALAFORRA, J.M.; SÁNCHEZ-MARTOS, F. Spatiotemporal analysis of air condition as a tool for the environmental management of a show cave (Cueva del Agua, Spain). **Atmospheric Environment**, v.40, p. 7378-7394, 2006b.

FERNÁNDEZ-CORTÉS, A.; CALAFORRA, J.M.; SÁNCHEZ-MARTOS, F.; GISBERT, J. Microclimate processes characterization of the giant geode of Pulpí (Almería, Spain): technical criteria for conservation. **International Journal of Climatology**, v.26, p.691-706, 2006a.

FESTA, V.; FIORE, A.; PARISE, M.; SINISCALCHI, A. Sinkhole evolution in the Apulian karst of southern Italy: a case study, with some considerations on sinkhole hazards. **Journal of Cave and Karst Studies**, v.74, n.2, p.137–147, 2012.

FIELD, M. S. **A lexicon of cave and karst terminology with special reference to environmental karst hydrology**. Washington (DC): USEPA, 2002. 214p. Digital Version Courtesy of the author & The Karst Waters Institute.

FOKEN, T. **Micrometeorology**. Berlin: Springer-Verlag, 2008. 306 p.

FOLK, R.L. P**ractical petrographic classification of limestones**. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, v.43, p. 1–38, 1959.

FORD, D. C.; WILLIAMS, P. W. **Karst Hydrogeology and Geomorphology**. Wiley: Chichester, 2007.

FORD, D.C. Karst geomorphology, caves and cave deposits: A review of North American contributions during the past half century. In: HARMON, R. S.; WICKS, C. W. (Ed.). **Perspectives on Karst Geomorphology, Hydrology and Geochemistry**. Boulder/Colorado: GSA Special Paper 404, 2006. p. 1-14.

FORD, D.C. Jovan Cvijić and the founding of karst geomorphology. **Environmental Geology**, v. 51, n. 5, p. 675-684, Jan. 2007.

FORD, D.C.; Speleogenesis: Unconfined Settings. In: GUNN, J. (Ed.). **Encyclopedia of Caves and karst science**. London: Fitzroy Deaborn, 2004. p. 1459- 1466.

FORD, D.C.; WILLIAMS, P.W. **Karst Hydrogeology and Geomorphology**. Wiley: Chichester, 1989.

FORD, T. D. Some thoughts on hydrothermal caves. **Cave and Karst Science**, v. 22, n. 3, p. 107-118, 1995.

FORD, T.D.; PEDLEY, H.M. A review of tufa and travertine deposits of the world. **Earth-Science Reviews**, v. 41, p.117-175, 1996.

FORNÓS, J. J.; GINÉS, A. (Ed.). **Karren Landforms**. Palma de Mallorca: Universitat de les Illes Balears, 1996.

FORTE, J. P. **Avaliação do património geomorfológico na Unidade Territorial de Alvaiázere**. 2008. 328f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Geografia Física – Recursos e Riscos Ambientais. Universidade de Lisboa.

FORTE, J. P. O carso enquanto base para o desenvolvimento sócio-económico na região de Alvaiázere. In: BRANDÃO, J.M.; CALADO, C.; COUTO, F.S. Património geológico, arqueológico e mineiro em regiões cársicas: **Actas do Simpósio Ibero-Americano**. Batalha/Portugal: SEDPGYM, 2007. p. 155-163.

FORTI, P. State of art in the Speleological Sciences. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF SPELEOLOGY, 15, 2009. **Proceedings...** UIS/NSS: Texas, 2009. p. 26-31. (Volume 1).

FREITAS, C. R. de. The role and importance of cave microclimate in the sustainable use and management of show caves. **Acta Carsologica**, v.39, n.3, p. 447-489, 2010.

FREITAS, C.R. de; SCHMEKAL, A. Condensation as a microclimate process: measurement, numerical simulation and prediction in the Glowworm cave, New Zealand. **International Journal of Climatology**, v.23, p.557-575, 2003.

FRUMKIN, A. (Ed.). **Treatise on geomorphology**. San Diego (CA): Academic Press, 2013. p. 1-13. (Volume 6, Karst Geomorphology).

FRUMKIN, A. New developments of karst geomorphology concepts. In: SHRODER, J.;

GABROVŠEK, F. **Evolution of early karst aquifers**: From simple principles to complex models. Postojna: Zalozba ZRC, 2000.

GABROVŠEK, F., GRAŠIČ, B., BOŽNAR, M.Z., MLAKAR, P., UDÉN, M., DAVIES, E. Karst show caves – how DTN technology as used in space assists automatic environmental monitoring and tourist protection – experiment in Postojna Cave. **Nat. Hazards Earth Syst. Sci.**, v.14, n.2, p.443-457, 2014.

GALIMBERTI, U. **Rastros do sagrado**: o cristianismo e a dessacralização do sagrado. São Paulo: Paulus, 2003.

GAMS, I. **Kras v Sloveniji v Času**. Ljubljana: Založba ZRC, 2004.

GAMS, I. Types of poljes in Slovenia, their inundation and land use. **Acta Carsologica**, v. 23, p. 285-300, 1994.

GARDNER, J.H. Origin and development of limestone caverns. **Bulletin of the GeologicalSociety of America**, v.46, p.1255–1274, 1935.

GAUCHON, C. Des cavernes e dês hommes: geographie souterraine dês montagnes françaises. **Karstologia**, mémoires n. 7, 1997.

GAUCHON, C. Les Grottes Sanctuaires dans le sud-est de La France. **Karstologia**, n. 19, p. 11-22, 1992.

GEIGER, R. Microclimatology. In: MALONE T.F. (Ed.) **Compendium of meteorology**. Boston: American Meteorological Society, 1951. p. 993-1003.

GESLER, W. Lourdes: healing in a place of pilgrimage. **Health and Place**, v. 2, n. 2, p. 95-105, 1996.

GIBSON, S. **A Gruta de São João Batista**: A primeira prova arqueológica da veracidade dos evangelhos. Rio de Janeiro: Record, 2008.

GIBSON, S. **The cave of John the Baptist**: The Stunning Archaeological Discovery that has Redefined Christian History. New York: Doubleday, 2004.

GILLI, E. **Karstologie**: karsts, grottes et sources. Paris: Dunod, 2011. 256p.

GILLI, E. **Karstology**: karst, caves and springs. New York: CRC Press, 2015. 254p.

GILLIESON, D. **Caves: processes, development and management**. Oxford & Cambridge: Blackwell Publishers, 1996.

GINÉS, A. Karren. In: GUNN, J. (Ed.). **Encyclopedia of caves and karst science**. London: Fitzroy Dearborn, 2004. p. 470-473.

GINÉS, A. Karrenfield landscapes and karren landforms. In: GINÉS, A.; KNEZ, M.; SLABE, T.; DREYBRODT, W. (Eds). **Karst Rock Features**: Karren sculpturing. Ljubljana/Postojna: Založba ZRC, 2009. p. 13-24.

GINÉS, A. Mallorca's endokarst: the speleogenetic mechanism. **Endins**, v. 20, p. 71-86, 1995.

GINÉS, A.; FORNÓS, J. J. Caracterización del carst del Migjorn. La seva contribució al modelat del territorio. **Monografia d'Història Natural de les Balears**, v.11, p. 259-274, 2004.

GINÉS, A.; KNEZ, M.; SLABE, T.; DREYBRODT, W. (Eds). **Karst Rock Features**: Karren sculpturing. Ljubljana/Postojna: Založba ZRC, 2009.

GLERIA, E. Utilizzazione antropica delle cavità del Veneto. In: MIETTO, P.; SAURO, U. (Org.). **Grotte del Veneto**: paesaggi carsici e grotte del Veneto. Regione del Veneto: La Grafica Editrice, 1989. p. 67-86.

GNN – GLOBAL GEOPARKS NETWORK, 2016. Disponível em: <http://www.globalgeopark.org/> Acesso em 13 abr. 2016.

GOLDSCHEIDER, N.; ANDREO, B. The geological and geomorphological framework. In: GOLDSCHEIDER, N.; DREW, D. (Ed.). **Methods in Karst Hydrogeology**. London: Taylor & Francis Group, 2007. p.9-23.

GOLDSCHEIDER, N.; DREW, D. **Methods in Karst hydrogeology**. London: Taylor & Francis, 2007.

GOLDSCHEIDER, N.; DREW, D.; WORTHINGTON, S. Introduction. In: GOLDSCHEIDER, N.; DREW, D. (Ed.). **Methods in Karst Hydrogeology**. London: Taylor & Francis Group, 2007. p.1-8.

GOMES, P. F. A sociedade e a produção do imaginário no município de Santa Luzia. In: TEIXEIRA, M. G. **O imaginário das grutas**. Ilhéus, BA: UESC/CEDOC, 2003. p. 47-70.

GÓMEZ, B.L. Histoplasmosis: Epidemiology in Latin America. **Current Fungal Infections Reports**, v.5, n.4, p. 199-205, 2011.

GOUDIE, A.; ATKINSON, B. W.; GREGORY, K. J.; SIMMONS, I. G.; STODDART, D. R.; SUGDEN, D. (Ed.). **The Encyclopedic Dictionary of Physical Geography**. 2.ed. Oxford: Blackwell, 1994.

GOWLETT, J. **Arqueologia das primeiras culturas**: a alvorada da humanidade. Barcelona: Ediciones Folio S.A., 2007. (Coleção Grandes Civilizações do Passado).

GRADZIŃSKI, M. Factors controlling growth of modern tufa: results of a field experiment. In: PEDLEY, H.M. ROGERSON, M. (Ed.). **Tufas and speleothems**: unravelling the microbial and physical controls. London: Geological Society of London, 2010. p.143–191.

GRANELL-PÉREZ, M. D. **Trabalhando Geografia com as Cartas Topográficas**. 2.ed. Ijuí: Editora Unijuí, 2008.128p.

GRAY, M. Geodiversity and geoconservation: what, why, and how. **The George Wright Forum**, p. 4-12, 2005.

GRAY, M. **Geodiversity**: valuing and conserving abiotic nature. Londres: John Wiley & Sons, 2004.

GREGORIČ, A., VAUPOTIČ, J., GABROVŠEK, F. Reasons for large fluctuation of radon and CO_2 levels in a dead end passage of a karst cave (Postojna Cave, Slovenia). **Nat. Hazards Earth Syst. Sci.**, v.13, n.2, 287-297, 2013.

GRIMES, K.G. Microkarren in Australia – a request for information. **Helictite**, v.40, n.1, p.21-23, 2007.

GRUND, A. Der geographische zyklus im karst. **Zeitschr. Ges. Erdkunde**, v.52, p. 621-640, 1914.

GRUND, A. Die karsthydrographie: studien aus westbosnien. Leipzig: B.G. Teubner, 1903.

GUERRA, A.T; GUERRA, A.J.T. **Novo Dicionário Geológico-Geomorfológico**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1997

GUIMARÃES, R.L.; TRAVASSOS, L.E.P.; VARELA, I.D. Cavernas e rituais afro-brasileiros em Minas Gerais. In: TRAVASSOS, L.E.P.; MAGALHÃES, E.D.; BARBOSA, E.P. **Cavernas, rituais e religião**. Ilhéus/Bahia: Editus, 2009.

GUNN, J. (Ed.). **Encyclopedia of Caves and Karst Science**. New York, London: Fitzroy Dearborn, 2004.

GUNN, J. Denudation and erosion rates in karst. In: SHRODER, J.; FRUMKIN, A. (Ed.). **Treatise on geomorphology**. San Diego (CA): Academic Press, 2013. p. 72-81 (Volume 6, Karst Geomorphology).

GUNN, J. Limestone as a mineral resource. In: GUNN, J. (ed). **Encyclopedia of caves and Karst science**. New York: Fitzroy Dearborn, 2004. p.489-490.

GUTIÉRREZ, F. Hazards associated with karst. In: ALCÁNTARA, I.; GOUDIE, A. (Eds.). **Geomorphological Hazards and Disaster Prevention**. Cambridge: Cambridge University Press, 2010. p.161–175.

GUTIÉRREZ, F.; PARISE, M.; DE WAELE, J.; JOURDE, H. A review on natural and human-induced geohazards and impacts in karst. **Earth Science Reviews**, v.138, p.61–88, 2014.

GUTIÉRREZ LÓPEZ, J.M.; REINOS DEL RÍO, M.C.; GILES PACHECO, F.; FINLAYSON, C.; SANTIAGO PÉREZ, A. Gorham (Gibraltar): uma cueva santuário durante la antigüedad. **Boletín de la Sociedad Española de Espeleología y Ciencias del Karst**, n.2, p.16-20, 2001.

GUTIERREZ, F.; COOPER, A.H. JOHNSON, K.S. Identification, prediction and mitigation of sinkhole hazards in evaporite karst areas. **Environmental Geology**, v.53, p.1007–1022, 2008a.

GUTIERREZ, F.; GUERRERO, J.; LUCHA, P. A genetic classification of sinkholes illustrated from evaporite paleokarst exposures in Spain. **Environmental Geology**, v.53, p. 993–1006, 2008b.

HAJNA, N.Z. What is karst? In: HAJNA, N.Z.; RAVBAR, N. RUBINIĆ, J.; PETRIČ, M. **LIFE and water on Karst**: monitoring of transboundary water resources of Northern Istria. Ljubljana: Založba ZRC, 2015. p. 6-15.

HÅLAND, E. J. Water sources and the sacred in modern and ancient Greece and beyond. **Water History**, v. 1, n. 1, p. 1-26

HAMILTON-SMITH, E. Karst and World Heritage Status. **Acta Carsologica**, v.36, n. 2, p. 291-302, 2007.

HAMILTON-SMITH, E. Wilderness Myths and Australian Caves. **Helictite**, v.25, n. 2, p. 68-73, 1987.

HAMILTON-SMITH, E. Management assessment in karst areas. **Acta Carsologica**, v.31, n.1, p.13-20, 2002.

HARDT, R. **Aspectos da Geomorfologia Cárstica da Serra do Calcário, Cocalinho - MT**. 2004. 98f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro.

HARDT, R.; FERREIRA PINTO, S. dos A. Carste em Litologias não carbonáticas. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 10, n. 2, p. 99-105, 2009.

HARDT, R.; RODET, J.; FERREIRA PINTO, S. dos A. F. O Carste. Produto de uma evolução ou processo? Evolução de um conceito. **Revista de Geografia** (Recife), v.27, p. 110-124, 2010.

HARDT, R.; RODET, J.; FERREIRA PINTO, S. dos A. F.; WILLEMS, L. . Exemplos Brasileiros de Carste em Arenito: Chapada dos Guimarães (MT) e Serra de Itaqueri (SP). **Espeleo-Tema** (São Paulo), v. 20, p. 7-23, 2009.

HASSNER, R.E. **Understanding and resolving disputes over sacred space**. Stanford Center on Conflict and Negotiation, Stanford University: Palo Alto, 2002.

HASUI, Y. Cráton São Francisco. In: HASUI, Y.; CARNEIRO, C. D. R.; ALMEIDA, F. F. M. de; BARTORELLI, A. **Geoologia do Brasil**. São Paulo: BECA, 2012. p. 200-227.

HEATON, T. Caves: a tremendous range in energy environments on earth. **National Speleological Society News**, Huntsville, v.08, n.44, p.301-304, 1986

HENRIQUES, R.P.B. A viagem que revelou a biodiversidade. **Ciência Hoje**, v.42, n. 252, p. 24-29, Setembro 2008.

HILL, C.A.; FORTI, P. (Ed.) **Cave Minerals of the World**. 2.ed. Huntsville/Alabama: National Speleological Society, 1997.

HILL, C.A.; FORTI, P. Speleothems: Carbonate. In: GUNN, J. (Ed.). **Encyclopedia of caves and karst science**. London: Fitzroy Deaborn, 2004a. p. 1476-1480.

HILL, C.A.; FORTI, P. Speleothems: Carbonate. In: GUNN, J. (Ed.). **Encyclopedia of caves and karst science**. London: Fitzroy Deaborn, 2004b. p. 1481-1486.

HILL, C.A.; FORTI, P. Speleothems: Evaporite. In: GUNN, J. (Ed.). **Encyclopedia of caves and karst science**. London: Fitzroy Deaborn, 2004a. p. 1476-1480.

HOELSCHER, S. Topophilia. In: WARF, B. (Ed.). **Encyclopedia of Human Geography**. London: SAGE Publications, 2006. p. 495.

HOENEN, S.; MARQUES, M.D. Adaptação temporal e o ambiente cavernícola: uma interpretação. **Biotemas**, v.13, n.1, p.129-144, 2000.

HOSE, T. A. Selling the story of Britain's stone. **Environmental Interpretation**, London, v. 10, n. 22, p.16-17, 1995.

HOSE, T.A. Geoturismo europeo. Interpretacion geologica y promocion de la conservacion geologica para turistas. In: BARETTINO, D.; WIMBLEDON, W.A.P.; GALLEGO, E. **Patrimonio geológico**: conservación y gestión. España: Instituto Tecnológico Geominero de Espña, 2000. p.137-160.

HOYOS, M.; SOLER, V.; CAÑAVERAS, J.C.; SÁNCHEZ-MORAL, S.; SANZ-RUBIO, E. Microclimatic characterization of a karstic cave: human impact on microenvironmental parameters of a prehistoric rock art cave (Candamo cave, Northern Spain). **Environmental Geology**, Berlin, v.33, n.4, p.231-242, 1998.

HUBBARD JR., D.A.; BARBER, M.B. Virginia burial caves: an inventory of a desecrated resource. **Journal of Cave and Karst Studies**, v. 59, n. 3, p. 154-159, 1997.

IGLESIAS, M.; UHLEIN, A. Estratigrafia do Grupo Bambuí e coberturas fanerozóicas no vale do rio São Francisco, norte de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Geociências**, v.39, p.256-266, 2009.

JACOBOVICI, S.; PELLEGRINO, C. **A tumba da família de Jesus**: a descoberta, a investigação e as provas que podem mudar a história. São Paulo: Editora Planeta, 2007.

JAMES, J.M. Atmospheric processes in caves. In: SHRODER, J.; FRUMKIN, A. (Ed.). **Treatise on geomorphology**. San Diego (CA): Academic Press, 2013. p. 304-318 (Volume 6, Karst Geomorphology).

JAMES, N.P.; CHOQUETTE, P.W. (Ed.). **Paleokarst**. New York: Springer, 1988.

JANSEN, D.C; CAVALCANTI, L. F. LAMBLÉM, H. S. Mapa de Potencialidade de Ocorrência de Cavernas no Brasil, na escala 1:2.500.000. **Revista Brasileira de Espeleologia**, Brasília, v. 2, n. 1, p. 42-57, 2012.

JENNINGS, J. N. **Karst geomorphology**. Oxford: Basil Blackwell Ltd., 1985.

JENNINGS, J. N. The Big Hole near Braidwood, New South Wales. **Journal and Proceedings**, Royal Society of New South Wales, v. 98, p. 215-219, 1965.

JENNINGS, J.N. Cave and Karst Terminology: In: MATTHEWS, P. G. (Ed.). **Australian Karst Index**. ASF Broadway, 1985.

JIANG, Z.C. et al. A Study of Carbon Sink Capacity of Karst Processes in China. **Diqiu Xuebao** (Acta Geoscientica Sinica), v. 33, n. 2, p. 129-134, 2012.

JIANHUA, C. et al. Carbon fluxes and sinks: the consumption of atmospheric and soil CO_2 by carbonate rock dissolution. **Acta Geologica Sinica**-English Edition, v. 86, n. 4, p. 963-972, 2012

JONES, B.; RENAUT, R.W. Calcareous spring deposits in continental settings. In: ALONSO-ZARZA, A.M.; TANNER, L.H.(Ed.). **Carbonates in continental settings**: facies, environments, and processes. Amsterdam: Elsevier, 2010. p.177-224.

JONES, W. K. Physical structure of the epikarst. **Acta Carsologica**, v. 42, n. 2/3, p. 311-314, 2013.

JONES, W. K.; WHITE, W. B. KARST In: CULVER, D. C.; WHITE, W. B. (Ed.). **Encyclopedia of Caves**. Amsterdam: Elsevier, 2005. p. 430-438.

KARMANN, I. E**volução e dinâmica atual do sistema cárstico do Alto Vale do Ribeira de Iguape, sudoeste do estado de São Paulo**. 1994. 228p. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo.

KARMANN, I.; SALLUN FILHO, W. Paisagens subterrâneas do Brasil. **Ciência Hoje**, São Paulo, v. 40, n. 235, p.18-25, 2007.

KARMANN, I.; SÁNCHEZ, L. E. Speleological provinces in Brazil. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF SPELEOLOGY, 9, 1986, Barcelona. **Anais...** Barcelona: International Union of Speleology (UIS). 1986. p. 151-153. (Volume 1).

KARMANN, I.; SÁNCHEZ, L.E. Distribuição das rochas carbonáticas e províncias espeleológicas do Brasil. Revista **Espeleo-Tema**, v. 13, p. 105-167, 1979.

KEJONEN, A. On the oral folklore connected with caves in Finland. In: INTERNATINOAL CONGRESS OF SPELEOLOGY, 12, 1997, Switzerland. **Proceedings...** Switzerland: UIS, 1997. p. 53-56.

KEMPE, S. Morphology of speleothems in primary (lava-) and secondary caves. In: SHRODER, J.; FRUMKIN, A. (Ed.). **Treatise on geomorphology**. San Diego (CA): Academic Press, 2013. p. 267-285 (Volume 6, Karst Geomorphology).

KIERNAN, K. Challenges for environmentally sustainable development of natural resources in the Nam Ou Karst, Northern Laos. **Acta Carsologica**, v.40, n.2, p. 341-355, 2011.

KIERNAN, K. Distribution and character of karst in the Lao PDR. **Acta Carsologica**, v.38, n.1, p. 65-81, 2009.

KIERNAN, K. Religious sites. In: GUNN, J. (Ed.). **Encyclopedia of caves and karst science**. London: Fitzroy Deaborn, 2004. p. 622-625.

KIERNAN, K. The nature conservation, geotourism and poverty reduction nexus in developing countries: a case study from the Lao PDR.**Geoheritage**, v. 5, n. 3, p. 207-225, 2013.

KIRÁLY, L. Karstification and groundwaterflow. In: GABROVSEK, F. (Ed.). **Evolution of karst**: from prekarst to cessation. Postojna/Ljubljana: Zalozna ZRC, 2002. p. 155-190.

KLIMCHOUK, A. B. **Hypogene speleogenesis**: hydrogeological and morphogenetic perspective. Carlsbad/New Mexico: National Cave and Karst Research Institute, 2007. (Special Paper 1).

KLIMCHOUK, A. B.; FORD, D. C. Types of karst and evolution of hydrogeologic settings. In: KLIMCHOUK, A.; FORD, D. C.; PALMER, A. N.; DREYBRODT, W. (Ed.), **Speleogenesis**: Evolution of karst aquifers. Huntsville/USA: National Speleological Society, 2000. p. 45-53.

KLIMCHOUK, A. B.; FORD, D. C.; PALMER, A. N.; DREYBRODT, W. **Speleogenesis**: Evolution of Karst Aquifers. Huntsville/USA: National Speleological Society, 2000.

KLIMCHOUK, A.B. Hypogene speleogenesis. In: In: SHRODER, J.; FRUMKIN, A. (Ed.). **Treatise on geomorphology**. San Diego (CA): Academic Press, 2013. p. 220-240. (Volume 6, Karst Geomorphology).

KLIMCHOUK, A.B. Speleogenesis of great gypsum mazes in the Western Ukraine. In: KLIMCHOUK, A.; FORD, D. C.; PALMER, A. N.; DREYBRODT, W. (Ed.), **Speleogenesis**: Evolution of karst aquifers. Huntsville/USA: National Speleological Society, 2000c. p. 261-273.

KLIMCHOUK, A.B. Speleogenesis under deep-seated and confined settings. In: KLIMCHOUK, A.; FORD, D. C.; PALMER, A. N.; DREYBRODT, W. (Ed.). **Speleogenesis**: Evolution of karst aquifers. Huntsville/USA: National Speleological Society, 2000b. p. 244-260.

KLIMCHOUK, A.B. Speleogenesis: Deep-Seated and Confined Settings. In: GUNN, J. (Ed.). **Encyclopedia of Caves and karst science**. London: Fitzroy Deaborn, 2004. p. 1453- 1458.

KLIMCHOUK, A.B. The formation of epikarst and its role in vadose speleogenesis. In: KLIMCHOUK A. B.; FORD D. C.; PALMER A. N.; DREYBRODT, W. (Ed.). **Speleogenesis**: Evolution of Karst Aquifers. Huntsville/USA: National Speleological Society, 2000a. p. 91-99.

KLIMCHOUK, A.B. The karst paradigm: changes, trends and perspetives, **Acta Carsologica**, v.44, n.3, p. 289-313, 2015.

KLIMCHOUK, A.B.; LOWE, D.L. et al. Implication of speleological studies for karst subsidence hazard assessment. **International Journal of Speleology**, v.31, n.1-4, p.199, 2002.

KNEZ, M.; SLABE, T. Stone forests and their rock relief. In: SHRODER, J.; FRUMKIN, A. (Ed.). **Treatise on geomorphology**. San Diego (CA): Academic Press, 2013. p. 139-156. (Volume 6, Karst Geomorphology).

KNEZ, M.; SLABE, T.; GABROVŠEK, F.; KOGOVŠEK, J.; KRANJC, A.; MIHEVC, A.; MULEC, J.; OTONIČAR, B.; PERNE, M.; PETRIČ, M.; PIPAN, T.; PRELOVŠEK, M.; RAVBAR, N.; ŠEBELA, S.; ZUPAN, N.; BOSÁK,

P.; PRUNER, P.; LIUET, H. Unroofed Caves Near Kozina and Their Identification. In: KNEZ, M.; SLABE, T. (Ed.). **Cave Exploration in Slovenia**, London: Springer, 2016. p.31-38.

KNEZ, M.; SLABE, T.; TRAVASSOS, L.E.P. Karren on laminar calcarenitic rock of Lagoa Santa (Minas Gerais, Brazil). **Acta Carsologica**, v.40, n.2, p. 357–367, 2011.

KOVAČIČ, G. The protection of karst aquifers: the example of the Bistrica Karst Spring (SW slovenia). **Acta Carsologica**, Ljubljana, v. 32, n. 2, p. 219-234, 2003.

KRANJC, A. About the name Kras (Karst) in Slovenia In: INTERNATIONAL CONGRESS OF SPELEOLOGY, 13, 2001, Brasília. **Proceedings...** Brasília: Sociedade Brasileira de Espeleologia/União Internacional de Espeleologia, 2001. 1CD-ROM.

KRANJC, A. An example of karst terminology evolution: from "dolina" to "tiankeng". **Carsologica Sinica**, v. 28, n. 2, p. 169-174, 2009.

KRANJC, A. Balthasar Hacquet: predecessor of modern karstology, **Hacquetia**, v.2, n. 2, p. 129-138, 2003.

KRANJC, A. Classification of closed depressions in carbonate karst. In: SHRODER, J.; FRUMKIN, A. (Ed.). **Treatise on geomorphology**. San Diego (CA): Academic Press, 2013. p. 104-111 (Volume 6, Karst Geomorphology).

KRANJC, A. Introduction. In: KRANJC, A. (Ed.). **KRAS**: Slovene Classical Karst. Ljubljana: ZRC SAZU, 1997. p. 07-17.

KRANJC, A. Kras - Classical Karst (Slovenia-Italy) In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA/ REGIONAL CONFERENCE ON GEOMORPHOLOGY, 6, 2006, Goiânia. **Proceedings...** Gôiania: IAG/ UGB, 2006. p. 6.

KRANJC, A. Short history of research. In: MIHEV, A.; PRELOVSEK, M.; HAJNA, N. Z. (Ed.). **Introduction to the Dinaric Karst**. Postojna: IZRK/ZRC SAZU, 2010. p. 9-13.

KRANJC, A. Some descriptions of Dinaric karst in publications from 16th - 18th century. In: INTERNATIONAL SCIENTIFIC SYMPOSIUM "MAN AND KARST", Bijakovići, Međugorje, 2012. Sarajevo: Centar za krš i speleologiju, 2013. p. 30-31.

KRANJC, A. Some large dolines in the Dinaric Karst. **Cave and Karst Science**, v. 31, n. 2-3, p. 99-100, 2005.

KRANJC, A. The beginnings of cave tourism in former hereditary lands of Carniola and (Lower) Styra. In: CAVES AND MAN, 1994. **Procedings...** Slovak Republic, 1994.

KRANJC, A.; OPARA, B. Temperature monitoring in Skocjanske Jame caves. **Acta Carsologica**, Ljubljana, v.31, n.1, p.85-96, 2002.

KRANJC, A.; OPARA, B. Temperature monitoring in Skocjanske Jame caves. **Acta Carsologica**, Ljubljana, v.31, n.1, p.85-96, 2002.

LAPTEV, F.F. 1939. **Aggressive action of water on carbonate rocks, gypsum and concrete**. Moscow and Leningrad: GONTI, 1939.

LASCU, C.; BACU, F.; GLIGAN, M.; SÂRBU, Ş. Cave Bear worship site in Peştera Rece, Bihor Moutains, Romania. **Theoretical and Applied Karstology**, v.7, p. 163-172, 1994.

LIMA, T.F.; MORAES, M.S. de. Contribuições para o desenvolvimento de plano de manejo em ambiente cavernícola – gruta do Maquiné: um estudo de caso. **Geonomos**, Belo Horizonte, v.14, n.1/2, p.45-53, 2006.

LIÑÁN, C.; VADILLO, I.; CARRASCO, F. Carbon dioxide concentration in air within the Nerja cave (Malaga, Andalusia, Spain). **International Journal of Speleology**, v.37, n.2, p.99-106, 2008.

LOBO, A.S.L.; PERINOTTO, J.A.J.; BOGGIANI, P.C. Espeleoturismo no Brasil: panorama geral e perpectivas de sustentabilidade. **Revista Brasileira de Ecoturismo**, São Paulo, v.1, n.1, p.62-83, 2008.

LOBO, H. A. S.; TRAJANO, E.; MARINHO, M. A.; BICHUETTE, M.E.; SCALEANTE, J. A. B.; SCALEANTE, O.A.F.; ROCHA, B.N.; LATERZA, F.V. Projection of Tourist Scenarios onto Fragility Maps: Framework for Determination of Provisional Tourist Carrying Capacity in a Brazilian Show Cave. **Tourism Management**, v.35, p.234-243, 2013.

LOBO, H.A.S.; TRAVASSOS, L.E.P. **O ser humano e a paisagem cárstica / Humans and karst landscape**. Campinas: SBE - Sociedade Brasileira de Espeleologia, 2012. 92p.

LOBO, H.A.S.; TRAVASSOS, L.E.P. Cave tourism in Brazil: General aspects and trends from the beginning of the 21st century. **Journal of the Australasian Cave and Karst Management Association**, v. 93, p. 6-14, 2013.

LOBO, H.A.S. Espeleoclima e suas aplicações no manejo do turismo em cavernas. **Revista do Depto. de Geografia – USP**, v.23, p.27-54, 2012.

LOBO, H.A.S. **Estudo da dinâmica atmosférica subterrânea na determinação da capacidade de carga turística na Caverna de Santana (PETAR, Iporanga-SP)**. 2011. 392f. Tese (Doutorado) em Geociências e Meio Ambiente) - UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA, Rio Claro.

LOBO, H.A.S. et al. Capacidade de carga real (CCR) da caverna de santana, parque estadual turístico do alto ribeira (Petar)-sp, e indicações para o seu manejo turístico. **Geociências** (São Paulo), v. 27, n. 3, p. 369-385, 2008.

LOBO, H.A.S. et al. Espeleoturismo: oferta e demanda em recente expansão e consolidação no Brasil. In: CASTRO, S.F.L. de; SOUTO, W.; RANGEL, B.B. (Eds.) **Segmentação do turismo**: experiências, tendências e inovações–artigos acadêmicos. Brasília: Ministério do Turismo, 2010. p. 35-58.

LOBO, H.A.S. et al. Potencial geoturístico da paisagem cárstica. **Revista Global Tourism**, v. 3, n. 2, p. 1-20, 2007.

LOBO, H.A.S. et al. Projection of tourist scenarios onto fragility maps: Framework for determination of provisional tourist carrying capacity in a Brazilian show cave. **Tourism Management**, v. 35, p. 234-243, 2013.

LOBO, H.A.S. Histórico das pesquisas espeleoclimáticas em cavernas brasileiras. **Espeleo-Tema**, v.21, n.2, p.131-144, 2010.

LOBO, H.A.S. Método para avaliação do potencial espeleoturístico do Parque Nacional da Serra da Bodoquena, MS. **Caderno Virtual de Turismo, Rio de Janeiro**, v. 7, n. 3, p. 99-110, 2007.

LOBO, H.A.S.; SALLUM FILHO, W.; VERÍSSIMO, C.U.V.; TRAVASSOS, L.E.P.; FIGUEIREDO, L.A.V.; RASTEIRO, M.A. Espeleoturismo: oferta e demanda em crescente expansão e consolidação no Brasil. In: BRASIL. MINISTÉRIO DO TURISMO. (Org.). **Segmentação do Turismo**: Experiências, Tendências e Inovações - Artigos Acadêmicos. Brasília: Ministério do Turismo, 2010. p. 35-57.

LOBO, H.A.S.; TRAVASSOS, L.E.P. Cave tourism in Brazil: General aspects and trends from the beginning of the 21st century. **Journal of the Australasian Cave and Karst Management Association**, v.93, p.6-14, 2013.

LOBO, H.A.S.; TRAVASSOS, L.E.P. **O ser humano e a paisagem cárstica / Humans and karst landscape**. SBE: Campinas, 2012.

LOBO, H.A.S.; VERÍSSIMO, C.U.V.; SALLUM FILHO, W.; FIGUEIREDO, L.A.V.de; RASTEIRO, M.A. Potencial geoturístico da paisagem cárstica. **Revista Global Tourism**, v.3, n.2, p.1-20, 2007.

LONGHITANO, G.A.; ROCHA, B.N.; ÂNGELO FURLAN, S. Caracterização microclimática da gruta Colorida Parque Estadual de Intervales, SP. In: RASTEIRO, M.A.; SILVA, L.A. da.; LEVY, M. de O.P.; LUCON, T.N.; RENÓ, R. (Eds). CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 29, Ouro Preto. **Anais...** Ouro Preto: SBE/SEE, 2007. p.183-189.

LOWE, D. Speleogenesis theories: post-1890. In: GUNN, J. (Ed.). **Encyclopedia of Caves and karst science**. London: Fitzroy Deaborn, 2004. p. 1429-1436.

LOWE, D.; WALTHAM, T. **A Dictionary of Karst and Caves**: A Brief Guide to the Terminology and Concepts of Cave and Karst Science. British Cave Research Association, 2002 (BCRA Cave Studies Series 10). 40p.

LUNDBERG, J. Karren, Surface. In: CULVER, D. C.; WHITE, W. B. (Ed.). **Encyclopedia of Caves**. Amsterdam: Elsevier, 2004. p. 425-430.

LUNDBERG, J. Microsculpturing of Solutional Rocky Landforms. In: SHRODER, J.; FRUMKIN, A. (Ed.). **Treatise on geomorphology**. San Diego (CA): Academic Press, 2013. p. 121-138 (Volume 6, Karst Geomorphology).

MANDIĆ, M. et al. Concentration and stable carbon isotopic compoSition of CO_2 in cave air of Postojnska jama, Slovenia. **International Journal of Speleology**, v. 42, n. 3, p. 11, 2013.

MANGIN, A. Contribuition a l'étude hydrodynamique des aquifers karstiques. **Annales de Spéléologie**, v. 29, n. 4, p. 495-601, 1975.

MANGIN, A.; ANDRIEUX, C. Infiltration et environnement souterrain, le role de l'eau sur les paramètres climatiques. **Actes des Jounées Félix Trombe**, Moulis, p.79-95, 1988.

MARIE, R.; POMEL, S. Karst geomorphology and environment. In: GIBERT, J.; DANIELPOL, D.L.; STANFORD, J.A. (Eds.). **Groundwater ecology**. San Diego: Academic Press, 1994. p.129-155.

MARRA. J. C, R. **Espeleoturismo: planejamento e manejo de cavernas**. Editora W.D. Ambiental: Brasília-DF, 2001.

MARTEL, E.A. **Les Abimes**. Paris: Delagrave, 1894.

MARTINI, J. E. J. Dissolution of quartz and silicate minerals. In: KLIMCHOUK, A. B.; FORD, D. C.; PALMER, A. N.; DREYBRODT, W. (Ed.). **Speleogenesis**: Evolution of Karst Aquifers. Huntsville/USA: National Speleological Society, 2000. p.171-174.

MARTINI, J. E. J. Dissolution of quartz and silicate minerals. In: KLIMCHOUK, A. B.; FORD, D. C.; PALMER, A. N.; DREYBRODT, W. (Ed.). **Speleogenesis**: Evolution of Karst Aquifers. Huntsville/USA: National Speleological Society, 2000. p.171-174.

MARTINS-NETO, M.A; ALKMIM, F.F. Estratigrafia e evolução tectônica das bacias neoproterozóicas do paleocontinente São Francisco e suas margens: Registro da quebra de Rodínia e colagem de Gondwana. In: PINTO, C.P.; MARTINS-NETO, M.A. (Ed.). **Bacia do São Francisco**: Geologia e Recursos Naturais. Belo Horizonte: SBG, 2001. p.31-54.

MATTES, J. Disciplinary identities and crossing boundaries: The academization of speleology in the first half of the twentieth century. **Earth Sciences History**, v.34, n.2, p. 275-295, 2015.

MATTEUCCI, M. B. de A.; NASCIMENTO, E. P. do. Entre o sagrado e o profano: a romaria da gruta de Terra Ronca (GO). In: INTERNATIONAL CONGRESS OF SPELEOLOGY,13, SPELEOLOGICAL CONGRESS OF LATIN AMÉRICA AND CARIBBEAN, 4, BRAZILIAN CONGRESS OF SPELEOLOGY, 26, 2001. **Anais...** Brasília-DF: SBE/UIS, 2001. 1 CD-ROM.

McKEEVER, P; LARWOOD, J; MCKIRDY, A. Geotourism in Ireland and Britain. In: DOWLING, R.; NEWSOME, D.(Ed.) **Geotourism**. Oxford: Elsevier, 2006. p.180-198.

McNATT, L. Cave archaeology of Belize. Journal of Caves and Karst Studies, v. 58, n. 2, p. 81-99, 1996.

McPHERSON, M. **Mine ventilation thermodynamics, Subsurface Ventilation and Environmental Engineering**. Springer Netherlands, 1993. p. 241-281.

MELO, M. S. et al. Carste em rochas não-carbonáticas: o exemplo dos arenitos da Formação Furnas, Campos Gerais do Paraná/Brasil e as implicações para a região. **Espeleo-Tema**, v.22, n.1, p.81-97, 2011.

MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I.M. **Climatologia**: noções básicas e climas do Brasil. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 206p.

METH, M. G. Caving Definitions. **Australian Caver**, n.143, 1998.

MIHEVC, A. The age of karst relief in west Slovenia. **Acta Carsologica**, v.36, n.1, Time in Karst, p. 35-44, 2007.

MIHEVC, A. Use of the caves as mass graveyards in Slovenia. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF SPELEOLOGY, 13, SPELEOLOGICAL CONGRESS OF LATIN AMÉRICA AND CARIBBEAN, 4, BRAZILIAN CONGRESS OF SPELEOLOGY, 26, 2001. Anais... Brasília-DF: Sociedade Brasileira de Espeleologia, 2001. 1 CD-ROM.

MIHEVC, A., SLABE, T., SEBELA, S. Denuded caves: an inherited element in the karst morphology; the case from Kras. **Acta Carsologica**, v.27, n.1, 165–174, 1998.

MILANOLO, S., GABROVŠEK, F. Analysis of Carbon Dioxide Variations in the Atmosphere of Srednja Bijambarska Cave, Bosnia and Herzegovina. **Boundary layer Meteorology**, v.131, n.3, p.479-493, 2009.

MILANOVIĆ, P. T. **Water resources engineering in karst**. London: CRC Press, 2005.

MILANOVIĆ, P. The environmental impacts of human activities and engineering constructions in karst regions. **Episodes**, v.25, n.1, p.13–21, 2002.

MONTINA, P. Folklore ipogeo in Friuli. In: PIAZZOLA, P. **Orchi anguane fade in Grotte e Caverne**: dalla tradizione cimbra ai miti delle venezie. Societa Speleologica Italiana, 1992. p. 201-212.

MORAIS, F.; ROCHA, S. da. Cavernas em arenito no planalto residual do Tocantins. **Espeleo-Tema**, v.22, n.1, p.127-137, 2011.

MOREIRA, J.C. Geoturismo: uma abordagem histórico-conceitual. **Pesquisas em Turismo e Paisagens Cársticas**, v. 3, p. 5-10, 2010.

MOREIRA, J.R. de A.; TRAJANO, E. Estudo do topoclima de cavernas da província espeleológica arenítica Altamita-Itaituba, Pará. **Espeleo-Tema**, São Paulo, v.16, p.75-82, 1992.

MOTTERSHEAD, D. N. Some morphological properties of solution flutes (Rillenkarren) at Lluc, Mallorca. In: FORNOS, J. J.; GINES, A. (Ed.). **Karren landforms**. Palma de Mallorca: Universitat de les Illes Balears, 1996. p. 225-238.

MOTTERSHEAD, D. N. Some morphological properties of solution flutes (Rillenkarren) at Lluc, Mallorca. In: FORNOS, J. J.; GINES, A. (Ed.). **Karren landforms**. Palma de Mallorca: Universitat de les Illes Balears, 1996. p. 225-238.

MOUTINHO DA COSTA, L.A.; ANGEIRAS, A.G.; VALENÇA, J.G.; STEVENAZZI, V. Novos conceitos sobre o Grupo Bambuí e sua divisão em tectonogrupos. **Boletim Geologia**, v.5, p.03-34, 1970.

MYLROIE, J. E.; CAREW, J. L.; CURRAN, H. A.; FREILE, D.; SEALEY, N. E.; VOEGELI, V. J. Geology of Cat Island, Bahamas: a Field trip guide. In: SYMPOSIUM ON THE GEOLOGY OF THE BAHAMAS AND OTHER CARBONATE REGIONS, 13, 2006. **Proceedings...** San Salvador/Bahamas: Gerace Research Center, 2006.

MYLROIE, J.E.; MYLROIE, J.R. Pseudokarst caves in littoral environment. In: LACE, M.J; MYLROIE, J.E. (Ed.). **Coastal Karst Landforms**.Springer, 2013. p.3-14.

NASCIMENTO, M.A.L. do; RUCHKYS, U.A. de; MANTESSO-NETO, V. Geoturismo: um novo segmento do turismo no Brasil. **Global Tourism**, v. 3, n. 2, p. 41-64, 2007.

NAUMANN, C. **Lehrbuch der geognosie**. Leipzig: Engelmann, 1858.

NEVES, W.A.; PILÓ, L.B. **O povo de Luzia**: em busca dos primeiros americanos. São Paulo: Globo, 2008.

NICOD, J. Les grottes: retrospective historique et insersion des grottes-aménagées dans l'space geographic. **Geographie**, v. 603, p. 508-530, 1998.

NICOD, J.; JULIAN, M.; ANTHONY, E. A historical review of man-karst relationships: miscellaneous uses of karst and their impacts. **Revista Geografica Italiana**, v.103, p. 289-338, 1996.

NICOD, J.; JULIAN, M.; ANTHONY, E. A historical review of man-karst relationships: miscellaneous uses of karst and their impact. **Rivista di Geografia Italiana**, v.103, p.289–338, 1997.

NÖGGERATH, J. Ueber sogennanten natürliche Schluchte oder geologischen Orgeln in verschiedenen Kalksteinbildungen. **Archiv für Mineralogie**, Geognosie, Bergbau und Hüttenkunde, 1845. 513p.

OLIVEIRA, M.A.M. de. Contribuição à geologia da parte sul da Bacia do são Francisco e áreas adjacentes. **Coletâneas de Relatórios de Exploração**, v.1, p.71-105, 1967.

ONAC, B.P. **Geologia regiunilor carstice**. Bucarest: Editura Dedactica si Pedagogica, 2000.

OSBORNE, R.A.L. Preservation and burial of ancient karst. In: SHRODER, J.; FRUMKIN, A. (Ed.). **Treatise on geomorphology**. San Diego (CA): Academic Press, 2013. p. 95-103 (Volume 6, Karst Geomorphology).

OSMASTON, H. Patterns in trees, rivers and rocks in the Mulu Park, Sarawak. **Geographical Journal**, p. 33-50, 1980.

PALMER, A. N. Origin and morphology of limestone caves. **Geological Society of America Bulletin**, v. 103, n. 1, p. 1-21, 1991.

PALMER, A. N. Understanding the hydrology of karst. **Geologia Croatica**, v.63, n. 2, p. 143-143, 2010.

PALMER, A. N. **Cave geology**. Dayton: Cave books, 2007.

PALMER, A.N. **Cave Geology**. Dayton, Ohio: Cave Books, 1991.

PALMER, A.N. Cave levels and their interpretation. **National Speleological Society Bulletin**, v.49, p.50-66, 1987.

PALMER, A.N. Speleogenesis in carbonate rocks. GABROVSEK, F. (Ed.) **Evolution of Karst**: From Prekarst to Cessation: Ljubljana: Založba ZRC, 2002. p.43-59.

PALMER, A.N.; AUDRA, P. Patterns of caves. In: Gunn, J. (Ed.) **Encyclopedia of Cave and Karst Science**. London: Fitzroy Dearborn, 2004. p. 573-574.

PALMER, M.V.; PALMER, A.N. Paleokarst of the United States. In: BOSAK, P.; FORD, D.; GLAZEK, J.; HORACEK, I. (Ed.). **Paleokarst, a systematic and regional review**. New York: Springer, 1989. p.337–363.

PANOŠ, V. **Karsologická a speleologická terminologie**. Zilina: Knizné centrum, 2001. 352p.

PANOŠ, V. Karstology, an Integrated System of Sciences on Karst. **Acta carsologica**, XXIV, p. 41-51, 1995.

PARISE, M. Karst geo-hazards: casual factores and management issues. **Acta Carsologica**, v.44, n.3, p.401-414.

PAVIA, F. Influencia de la geomorfologia karstica em las características climáticas de las grutas y abrigos. In: CONGRESSO NACIONAL DE ESPELEOLOGIA, 10, 1975, Ouro Preto. **Anais...** Ouro Preto: SBE/SEE, 1975. p.227-245.

PEDLEY, H.M. Classification and environmental models of cool freshwater tufas. **Sedimentary Geology**, v.68, p.143-154, 1990.

PEMBERTON, M. Conserving geodiversity, the importance of valuing our geological heritage. In: GEOLOGICAL SOCIETY OF AUSTRALIA ABSTRACTS, 15, 2000, Sydney, New South Wales. **Proceedings...** Sydney: Geological Society of Australia, 2000.

PENCK, A. **Morphologie der Erdoberfläche**. Stuttgart: Engelhorn, 1894.

PENTECOST, A. Preservation of Natural and Historic Heritage Sites. In: ALONSO-ZARZA, A.M.; TAN-

NER, L.H. (Ed.). **Carbonates in continental settings**: facies, environments, and processes. Amsterdam: Elsevier, 2010. p.297-311.

PENTECOST, A. The quaternary travertine deposits of Europe and Asia Minor. **Quaternary Science Reviews**, v.14, p.1005-1028, 1995.

PENTECOST, A. **Travertine**. Berlin: Springer-Verlag, 2005.

PEREIRA, M. C.; RODET, J. G. M. A.; SALGADO, A. A. R. Aspectos genéticos e morfológicos das cavidades naturais da Serra da Piedade, Quadrilátero Ferrífero/MG. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 13, n. 4, p. 465-476, 2013.

PEREIRA, P. P**atrimónio geomorfológico: conceptualização, avaliação e divulgação. Aplicação ao Parque Natural de Montesinho**. 2006. 370f. Tese (Doutorado) – Universidade do Minho, Braga. 2 mapas e 1 CD-Rom.

PEREIRA, P.R. **Sistema de Áreas Protegidas (SAP) em áreas carsticas**: o caso do SAP Vetor Norte da Região Metropolitana de Belo Horizonte (MG) e uma proposta geoturística. 2015. 99f. Dissertação (Mestrado em Geografia), Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Geografia.

PEREIRA, R.F.; BRILHA, J.; MARTINEZ, J.E. Proposta de enquadramento da geoconservação na legislação ambiental brasileira. **Memórias e Notícias**, v. 3, p. 491-494, 2008.

PERNA, G.; SAURO, U. Atlante delle microforme di dissoluzione carsica superficiale del Trentino e del Veneto. **Memorie del Museo Tridentino di Scienze Naturali**, 1978.

PERRY, A. Recreation and tourism. In: THOMPSON, R.D.; PERRY, A. (Ed.). **Applied Climatology**: principles and practice. London: Routledge, 1997. p.240-240.

PETRIĆ, M. **Characteristics of recharge-discharge relations in karst aquifers**. Ljubljana: ZRC- SAZU, 2002.

PETRIĆ, M.; RUBINIĆ, J. Specifics of karst hydrology. In: HAJNA, N.Z.; RAVBAR, N. RUBINIĆ, J.; PETRIĆ, M. **LIFE and water on Karst**: monitoring of transboundary water resources of Northern Istria. Ljubljana: Založba ZRC, 2015. p. 16-22.

PFLITSCH, A.; PIASECKI, J. Detection of an airflow system in Niedzwiedzia (Bear) cave, Kletno, Poland. **Journal of Cave and Karst Studies**, v.65, n.3, p.160-173, 2003.

PFLITSCH, A.; PIASECKI, J.; SAWINSKI, T.; STRUG, K.; ZELINKA, J. Development and degradation of ice crystals sediment in Dobsinska ice cave (Slovakia). In: ZELINKA, J. (Ed.) INTERNATIONAL WORKSHOP ON ICE CAVES, 2, Liptovsky Mikulas, 2006. **Proceedings...** LIptovsky Mikulas, Slovak Caves Administration, 2006. p.38-49.

PFLUG, R.; RENGER, F.E. Estratigrafia e evolução geológica da margem SE do Cráton do São Francisco. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 27, 1973, Aracaju. **Anais...** Aracaju: SBG, 1973. p.5-9.

PIASECKI, J.; SAWINSKI, T.; STRUG, K.; ZELINKA, J. Selected characteristics of the microclimate of the Demänovská Ice cave (Slovakia). In: ZELINKA, J. (Ed.) INTERNATIONAL WORKSHOP ON ICE CAVES, 2, Liptovsky Mikulas, 2006. **Proceedings...** Liptovsky Mikulas, Slovak Caves Administration, 2006. p.50-61.

PIEKARZ, G. **Geoturismo no Karst**. Curitiba: Mineropar, 2011.

PILÓ, L. B. Ambientes Cársticos em Minas Gerais: valor, fragilidade e impactos ambientais decorrentes da atividade humana. **O Carste**, Belo Horizonte, v. 11, n. 3, p. 50-58, 1999.

PILÓ, L. B. **Morfologia cárstica e materiais constituintes: dinâmica e evolução da depressão poligonal Macacos-Baú, Carste de Lagoa Santa, MG**. 1998. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo.

PILÓ, L. B. Rochas Carbonáticas e relevos cársticos em Minas Gerais. **O Carste**, Belo Horizonte, v. 9, n. 3, p. 72-78, 1997.

PIPAN, T. **Epikarst, a promising habitat**: copepod fauna, its diversity and ecology: a case study from Slovenia. Ljubljana: ZRC Publishing, 2005. 101p.

POHLMAN, J. W.; ILIFFE, T. M.; CIFUENTES, L.A. Stable Isotope Study of Organic Cycling and the Ecology of an Anchialine Cave Ecosystem. **Marine Ecology Progress Series**. v. 155, p. 17-27, 1997.

PÔSSAS, I. B.; TRAVASSOS, L.E.P.; RODRIGUES, B. D. Registros de Peter W. Lund sobre a região de Lagoa Santa, Minas Gerais: possibilidades para o turismo pedagógico e científico. **Pesquisas em Turismo e Paisagens Cársticas**, v.5, p. 25-33, 2012.

PRELOVŠEK, M. **The dynamics of present-day speleogenetic processes in the stream caves of Slovenia**. Ljubljana: ZRC Publishing, 2012. 152p.

PU, J. et al. Hydrochemical and PCO_2 variations of a cave stream in a subtropical karst area, Chongqing, SW China: piston effects, dilution effects, soil CO_2 and buffer effects. **Environmental Earth Sciences**, v. 71, n.9, p. 4039-4049, 2014.

PULIDO-BOSCH, A.; MARTÍN-ROSALES, W.; LÓPEZ-CHICANO; M., RODRÍGUEZ-NAVARRO, M.; VALLEJOS, A. Human impact in a tourist karstic cave (Aracena, Spain). **Environmental Geology**, v. 31, n. 3-4, p.142-9, 1997.

PULINA, M. **KRAS**: formy i procesy. Katoeice: Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego, 1999. 375p.

PULINA, M.; ANDREJCZUK, W. Kras i jaskinie. In: **Wielkiej encyklopedii geografii swiata**. Poznan: Wydawnictwo KURPISZ SC, 2000. Tomo XVII

QUINLAN, J. F. Karst-related mineral deposits and possible criteria for the recognition of paleokarsts: A review of preservable characteristics of Holocene and older karst terranes. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF GEOLOGY, 24, 1972. **Proceedings...** 1972, p.156-167.

RAVBAR, N. Drinking water supply from karst water resources (The example of the Kras Plateau, SW Slovenia). **Acta Carsologica**, Ljubljana, v. 31, n. 1, p. 73-84, 2004.

RAVBAR, N. **The protection of karst waters**. Postojna-Ljubljana: Zalozba ZRC, 2007.

RAVBAR, N. **The protection of Karst Waters: a comprehensive Slovene approach to vulnerability and contamination risk mapping**. Postojna/Ljubliana: ZRC SAZU, 2007.

RAVBAR, N.; KOGOVŠEK, J.; PIPAN, T. environmental value and vulnerability of karst resources. In: HAJNA, N.Z.; RAVBAR, N. RUBINIĆ, J.; PETRIĆ, M. **LIFE and water on Karst**: monitoring of transboundary water resources of Northern Istria. Ljubljana: Založba ZRC, 2015. p. 23-34.

RENAULT, P. Contribution a l'étude des actions mécaniques et sédimentologiques dans la spéléogenès. **Ann. Spéléol**., n.22-23, p.210-596, 1967-1968.

RENAULT, P. **La formation des cavernes**. Paris: PUF, 1970.

RHOADES, R.; SINACORI, N.M. Patterns of groundwater flow and solution. **Journal ofGeology**, v.49, p.785–794, 1941.

RIBEIRO, W.C.; TRAVASSOS, L.E.P. Educação Ambiental no carste em Minas Gerais: possibilidades de ensino e aprendizagem sobre o patrimônio geológico. **Revista Brasileira de Educação Ambiental (RevBEA)**, v.10, n.2, p. 126-148, 2015.

ROBERTS, C. A. Observations of Mayan cave archaeology in Belize. **Cave Science**, v. 17, n. 3, p. 123-129, 1990.

RODRIGUES, B.D.; TRAVASSOS, L.E.P. Identificação e mapeamento das Matas Secas associadas ao carste carbonático de Santo Hipólito e Monjolos, Minas Gerais. **Mercator (UFC)**, v.12, p.233-256, 2013.

RODRIGUES, M.C (Ed.) **Glossário Ilustrado de termos cársticos**. Lisboa: Edições Colibri, 2007

ROGLIĆ, J. Das Verhältnis Flusserosion zum Karstprozess. **Zeitschrift für Geomorphologie**, v. 4, p. 116-128, 1960.

ROGLIĆ, J. Historical review of morphologic concepts. In: HERAK, M.; STRINGFIELD, V. T. (Ed.). **KARST**: important karst regions of the northern hemisphere. Amsterdam: Elsevier, 1974. p. 1-18.

ROGLIĆ, J. Historical review of morphologic concepts. In: SWEETING, M. M. (Ed.). **Karst geomorphology**. Pennsylvania/USA: Hutchinson Ross Publishing Company, 1981. (Benchmark Papers in Geology 59).

ROLDAN, L.F.; WAHNFRIED, I.D.; KLEIN, D.A. **Breve Abordagem Geológica das Províncias Espeleológicas do Brasil**, 2003. Disponível em <http://www.redespeleo.org/espeleologia_geologia_provincias.php>. Acesso em 19 dez. 2008

RONCA, D. **How Cave Biology Works**, 20 April 2009. Disponível em: <http://science.howstuffworks.com/life/biology-fields/cave-biology.htm> Acesso em: 27 out 2015.

RUCHKYS, U.de A. **Patrimônio Geológico e Geoconservação no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais**: Potencial para a Criação de um Geoparque daUNESCO. 2007. 211f. Tese (Doutorado), Instituto de Geociências da UFMG.

SALLUM FILHO, W. Subsidência e colapso em terrenos cársticos. In: TOMINAGA, L. K.; SANTORO, J.; AMARAL, J. **Desastres naturais**: conhecer para prevenir. São Paulo: Instituto Geológico, 2009. p. 101-110.

SALLUM FILHO, W.; KARMANN, I. Províncias cársticas e cavernas no Brasil. In: HASUI, Y.; CARNEIRO, C. D. R.; ALMEIDA, F. F. M. de; BARTORELLI, A. **Geologia do Brasil**. São Paulo: BECA, 2012. p. 629-641.

SALLUN FILHO, W. Paleoclimatic records of Quaternary tufa in the Serra do André Lopes karst, southeastern Brazil. **Quaternary International**, v.279, p.423-424, 2012.

SALLUN FILHO, W.; ALMEIDA, L.H.S.; BOGGIANI, P.C.; KARMANN, I. Characterization of quaternary tufas in the Serra do André Lopes karst, southeastern Brazil. **Carbonates and evaporites**, v.27, p.357-373, 2012.

SALLUN FILHO, W.; KARMANN, I.; BOGGIANI, P.C.; PETRI, S.; CRISTALLI, P.D.S; UTIDA, G.A deposição de tufas quaternárias no estado de Mato Grosso do Sul: proposta de definição da formação Serra da Bodoquena. **Geologia USP**, v.9, p.47-60, 2009b.

SALLUN FILHO, W.; KARMANN, I.; SALLUN, A.E.M.; SUGUIO, K. Quaternary tufa in the Serra da Bodoquena karst, west-central Brazil: Evidence of wet period. **Earth and Environmental Science**, v.6, p. 072055, 2009a.

SALLUN FILHO, W.; FAIRCHILD, T.R. Estromatolitos do grupo Itaiacoca ao sul de Itapeva, estado de Sao Paulo, Brasil. **Revista Brasileira da Paleontologia**, v.7, n.3, p. 359-370, 2004.

SALLUN FILHO, W.; KARMANN, I.; BOGGIANI, P.C. Paisagens cársticas da Serra da Bodoquena (MS). **Geologia do Continente Sul-Americano**, v. 1, p. 423-433, 2004.

SALOMON, J.N. **Précis de Karstologie**. 2.ed. Bordeaux: Presses Universitaires de Bordeaux, 2006. 287p.

SALVATI, R.; SASOWSKY, I.D. Development of collapse sinkholes in areas of groundwater discharge. **J. Hydrology**, v.264, p.1–11, 2002.

SÁNCHEZ-MORAL, S.; SOLER, V.; CAÑAVERAS, J.C.; SANZ-RUBIO, E.; VAN GRIEKEN, R.; GYSELS, K. Inorganic deterioration affecting Altamira cave, N Spain: quantitative approach to wall-corrosion (solutional etching) processes induced by visitors. **The Science of the Total Environment**, v.243/244, p.67-84, 1999

SANDERS, E. M. The cycle of erosion in a karst region (after Cvijić), **Geo.Rev.**, n.11, p. 593-604, 1921.

SANTO, A.; DEL PRETE, S.; DI CRESCENZO, G.; ROTELLA, M. Karst processes and slope instability: some investigations in the carbonate Apennine of Cam¬pania (southern Italy). In: PARISE, M.; GUNN, J. (Eds.) **Natural and Anthropogenic Hazards in Karst Areas**: Recognition, Analysis and Mitigation. London: Geological Society of London, v.279, p.59–72, 2007.

SARTI, G.S.V.; TRAVASSOS, L.E.P. Aplicação de indicadores de acessibilidade em cavernas turísticas de Minas Gerais. **Interface** (Porto Nacional), v. 11, p. 66-83, 2016.

SAURO, U. Closed depressions. In: CULVER, D. C.; WHITE, W. B. (Ed.). **Encyclopedia of Caves**. Amsterdam: Elsevier, 2004. p. 108-122.

SCALEANTE, J.A.B. **Avaliação do impacto de atividades turísticas em cavernas**. 2003. 102f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Programa de Pós-Graduação em Geogciencias, UNICAMP.

SCHMIDL, A. **Die grotten un höhlen von Adelsberd, Lueg, Planina un Lass**. Wien: Braumüller, 1854. 316p.

SCHMIDT, V.A. Magnetostratigraphy of sediments in Mammoth Cave, Kentucky. **Science**, v.217, p.827–829, 1982.

SCHOBBENHAUS, C.; BRITO NEVES, B.B.de. A geologia do Brasil no contexto da plataforma sul--americana. In: BIZZI, L.A.; SCHOBBENHAUS, C.; VIDOTTI, R.M; GONÇALVES, J.H. (Ed.). **Geologia, Tectônica e recursos minerais do Brasil**: Textos, mapas e SIG. Brasília: CPRM, 2003. p. 5-54.

SCHOBBENHAUS, C.; SILVA, C.R. da (Org.). **Geoparques do Brasil**: propostas. Rio de Janeiro: CPRM, 2012.

SCHOLL, W.U. Der Sudwestliche randbereich der Espinhaço Zone, Minas Gerais, Brasilien. **Geol. Rdsch.**, v.61, p.201-216, 1972.

ŠEBELA, S., PRELOVŠEK, M., TURK, J., 2013. Impact of peak period visits on the Postojna Cave (Slovenia) microclimate. **Theor Appl Climatol**., v.111, n.12, p.51-64, 2013.

ŠEBELA, S., TURK, J. Local characteristics of Postojna Cave climate, air temperature, and pressure monitoring. **Theor Appl Climatol**, v.105, n.34, p.371-386, 2011.

SENDRA, A. et al. Hypogenic versus epigenic subterranean ecosystem: lessons from eastern Iberian Peninsula. **International Journal of Speleology**, v. 43, n. 3, p. 253-264, 2014.

SHANOV, S.; KOSTOV, K. **Dynamic tectonics and karst**. Springer, 2015.

SHAW, T. Speleogenesis theories: early. In: GUNN, J. (Ed.). **Encyclopedia of Caves and karst science**. London: Fitzroy Deaborn, 2004. p. 1425-1429.

SHAW, T.; ČUK, A. **Slovene karst and caves in the past**. Ljubljana: Zalozba ZRC, 2015.

SLABE, T.; PRELOVŠEK, M. Rock Features and Morphogenesis in Epigenic Caves. In: SHRODER, J.; FRUMKIN, A. (Ed.). **Treatise on geomorphology.** San Diego (CA): Academic Press, 2013. p. 172-185 (Volume 6, Karst Geomorphology).

SMITH, A.C.; WYNN, P.M.; BARKER, P.A. Natural and antropogenic factors which influence aerosol distribution in Ingleborough Show Cave, UK. **International Journal of Speleology**, v.42, n.1, p.49-56, 2013.

SONDAG, F.; RUYMBEKE, M.V..; SOUBIÈS, F.; SANTOS, R.; SOMERHAUSEN, A.; SEIDEL, A.; BOGGIANI, P. Monitoring present day climatic conditions in tropical caves using an Environmental Data AcquiSítion System (EDAS). **Journal of Hydrology**, v.273, p.103-118, 2003.

SONG, L.; WEI, X.; LIANG, F. The influences of cave tourism on CO_2 and temperature in Baiyun Cave, Hebei, China. **International Journal of Speleology**, v.29, n.01, p.77-87, 2000.

SPOTL, C., FAIRCHILD, I., TOOTH, A. Cave air control on dripwater geochemistry, Obir Caves (Austria): Implications for speleothem depoSítion in dynamically ventilated caves. **Geochimica Et Cosmochimica Acta**, v.69, n.10, p.2451-2468, 2005.

STAMENOVA, M. A.; ZHALOV, A. Some aspects of the protection of caves as a part of cultural heritage in Bulgaria. In: EUROPEAN SPELEOLOGICAL CONGRESS, 4, Vercors, 2008, Lans-en-Vercors – Isère. **Proceedings...** Lans-en-Vercors–Isère: French Federation of Speleology/Speleological Federation of the European Union, 2008. p.234-236.

STEVANOVIĆ, Z. Characterization of karst aquifer. In: STEVANOVIĆ, Z. (Ed.). **Karst Aquifers**: Characterization and Engineering. Springer International Publishing, 2015. p. 47-125.

STOEVA, P.; STOEV, A. Cave air temperature response to climate and solar and geomagnetic activity. **Memorie Della Societá Astronomica Italiana**, v.76, p.1042-1047, 2005.

STONE, A.; BRADY, J.E. Maya caves. In: CULVER, D. C.; WHITE, W.B (Ed.). **Encyclopedia of Caves**. USA: Elsevier Academic Press, 2005. p. 366-355.

SWEETING, M. M. (Ed.). **Karst geomorphology**. Pennsylvania: Hutchinson Ross Publishing Company, 1981 (Benchmark Papers in Geology 59)

SWEETING, M. M. **Karst in China**: Its Geomorphology and Environment. Berlin: Springer, 1995.

SWEETING, M. M. **Karst landforms**. London: Mackmillan, 1972.

SWEETING, M. M. The Guilin Karst, Z. **Geomorph**. (Berlin-Stutgart), Suppl.-Bd.77, p. 47-65, Februar 1990.

SWINNERTON, A.C. Origin of limestone caverns. **Geological Society of America Bulletin**, v.43, p.662-693, 1932.

TAPSON, F. **Dicionário Oxford de Matemática Essencial**. São Paulo: Oxford Express, 2012. 192p.

TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M. C. M. de; FAIRCHILD, T. R.; TAIOLI, F. (Orgs.) **Decifrando a Terra**. São Paulo: Oficina de Textos, 2000. 568 p.

TEMPERINI, M.T. O ambiente das grutas. **Espeleo-Tema**, São Paulo, v.8, p.5-7, 1976.

TIMO, M. B. **Mapeamento geomorfológico da região cárstica do córrego do Cavalo, Pains, MG**. 2014. 114f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Programa de Pós-Graduação em Geografia. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. 2014.

TIMO, M.B. **O Carste da Região de Córrego do Cavalo, Piumhi, Minas Gerais, Brasil**. Saarbrücken: Novas Edições Acadêmicas, 2015.

TIMO, M.B.; TRAVASSOS, L.E.P.; RODRIGUES, B.D. Proposta de delimitação da Unidade Geomorfológica Província Cárstica Arcos-Pains-Doresópolis. In: SEMINÁRIO CLÁUDIO PERES, 10, 2012, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: PUC Minas, 2012.

TRAVASSOS, L. E. P. et al. Solid waste disposal in the Environmental Protected Area of the Lagoa Santa Karst, Minas Gerais State, Brazil. EGU General Assembly, **Geophysical Research Abstracts**, v.10, 2008.

TRAVASSOS, L.E.P. **A importância cultural do carste e das cavernas**. 2010. 372f. Tese (Doutorado em Geografia) – Programa de Pós-graduação em Geografia – Tratamento da Informação Espacial. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.

TRAVASSOS, L.E.P. **Caracterização do carste da região de Cordisburgo, Minas Gerais**. 2007. 98f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Programa de Pós-graduação em Geografia – Tratamento da Informação Espacial. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.

TRAVASSOS, L.E.P. **Considerações sobre o carste da região de Cordisburgo, Minas Gerais, Brasil**. Belo Horizonte: Tradição Planalto, 2010.

TRAVASSOS, L.E.P. Contribuições de Conrad Malte-Brun para o estudo das cavernas. **Geografia e Pesquisa** (UNESP. Ourinhos), v. 6, p. 30-42, 2012b.

TRAVASSOS, L.E.P. Espeleologia, Carstologia e a pesquisa científica. **Revista Territorium Terram**, v.2, n. 4, p. 2-14, 2014.

TRAVASSOS, L.E.P. **Geoconservação do Carste**: o cenário mundial, 2013 (Palestra proferida no Geo-BRheritage - II Simpósio Brasileiro de Patrimônio Geológico, Ouro Preto).

TRAVASSOS, L.E.P. Interações entre a Carstologia e a Geografia Cultural. **RA'E GA** (UFPR), v. 22, p. 95-154, 2011.

TRAVASSOS, L.E.P. O Abismo Šemonovo (Šemonovo Brezno) e seu uso no período pós-guera. In: ENCONTRO NACIONAL DA ANPEGE, 8, 2009, Curitiba. Anais... Curitiba: ANPEGE, 2009. 1 CD-ROM.

TRAVASSOS, L.E.P. O carste e as cavernas nas obras de Alexander von Humboldt. **Biblio 3W** (Barcelona), v. 18, p. 1-17, 2013.

TRAVASSOS, L.E.P. Reflexões sobre as áreas cársticas e a disposição de resíduos. **O Carste**, Belo Horizonte, v. 19, n. 1, p. 9-20, 2007a.

TRAVASSOS, L.E.P. **The cultural importance of karst and caves**: from ancient times to the present. Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2012a.

TRAVASSOS, L.E.P. **The Cultural Importance of Karst and Caves**: from Ancient Times to the Present Day. Germany: LAP Lambert Academic Publishing, 2012.

TRAVASSOS, L.E.P. Visões do relevo cárstico na mídia: literatura, filmes e notícias. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, Campina Grande, v. 7, n. 2, p. 108-115, 2007b.

TRAVASSOS, L.E.P.; AMORIM FILHO, O. B. As cavernas como lugares especiais na Geografia Universal de Reclus. **Biblio 3W** (Barcelona), v.16, p.1-32, 2011.

TRAVASSOS, L.E.P.; KOHLER, H. C. Historical and geomorphological characterization of a Brazilian karst region. **Acta carsologica**, v. 38, n. 2-3, 2009.

TRAVASSOS, L.E.P.; KOHLER, H.C. Historical and geomorphological characterization of a Brazilian karst region. **Acta carsologica**, v.38, n.2/3, p.277–291, 2009.

TRAVASSOS, L.E.P.; MAGALHÃES, E.D.; BARBOSA, E.P. **Cavernas, rituais e religião**. Ilhéus: Editus, 2011.

TRAVASSOS, L.E.P.; OLIVEIRA, R.I.C. Tufa deposits in the karst region of Montes Claros, Minas Gerais, Brazil. **Acta Carsologica**, v. 45, p. 85-96, 2016

TRAVASSOS, L.E.P.; PÔSSAS, I.B.; RODRIGUES, B.D. P**rojeto Memória da Geomorfologia Cárstica Mineira**: Prof. Dr. Heinz Charles Kohler. Belo Horizonte: Tradição Planalto, 2012. 1 DVD.

TRAVASSOS, L.E.P.; PÔSSAS, I.B.; RODRIGUES, B.D.; SANTOS, E. B. Breve glossário ilustrado de termos cársticos. In: TRAVASSOS, L.E.P.; PÔSSAS, I.B.; RODRIGUES, B.D. (Ed.). **Projeto Memória da**

Geomorfologia Cárstica Mineira. Belo Horizonte: Tradição Planalto Editora, 2012. 1 DVD-Rom.

TRAVASSOS, L.E.P.; RODRIGUES, B.D. Sensoriamento Remoto e trabalho de campo na análise do uso do solo em áreas cársticas de Minas Gerais. **Revista Geografias**, v.1, n.20, p. 127-147, 2015.

TRAVASSOS, L.E.P.; RODRIGUES, B.D.; TIMO, M.B. **Glossário conciso e ilustrado de termos cársticos e espeleológicos**. Belo Horizonte: PUC Minas, 2015.

TRAVASSOS, L.E.P.; TRAVASSOS, E.G.; TRAVASSOS, L.P.; TRAVASSOS L.C.P. Non-specialists perception about endokarst and exokarst scenarios: visions from high school students. **Acta Carsologica**, v.36, p.329-335, 2007.

TRAVASSOS, L.E.P; GUIMARÃES, R.L.; VARELA, I. D. Áreas Cársticas, Cavernas e a Estrada real. **Pesquisa em Turismo e Paisagens Cársticas**, v. 1, n. 2, p. 107-120, 2008.

TUAN, Yi-Fu. **Espaço e lugar**: a perspectiva da experiência. São Paulo: DIFEL, 1983.

TUAN, Yi-Fu. **Topofilia**: um estudo da percepção, atitudes e valores do meio ambiente. São Paulo: Difel, 1980.

TUCKER, M. E. **Rochas Sedimentares**: guia geológico de campo. 4.ed. Porto Alegre: Bookman, 2014.

TWENHOFEL, W.H. **Threatsie on sedimentology**. New York: Dover Publications, 1961.

UNESCO - Global Geoparks Network. **Guidelines and Criteria for National Geoparks seeking UNESCO assistance to join three Global Geoparks Network**. Paris: UNESCO, 2007.

UNESCO Global Geoparks, 2016d. Discponível em: < http://www.unesco.org/new/en/natural-sciences/environment/earth-sciences/unesco-global-geoparks/> Acesso em 13 abr. 2016.

UNESCO Global Geoparks: Celebrating Earth Heritage, Sustaining local Communities. UNESCO, 2016c. Discponível em: <http://unesdoc.unesco.org/images/0024/002436/243650e.pdf> Acesso em 13 abr. 2016.

UNESCO. **Operational Guidelines for the Implementation of the World Heritage Convention**. Paris: UNESCO World Heritage Centre, 2008.

UNESCO. **The Criteria for Selection**, 2016b. Disponível em: < http://whc.unesco.org/en/criteria/> Acesso em 24 mar. 2016

UNESCO. **World Heritage List**, 2016a. Disponível em: < http://whc.unesco.org/en/list/> Acesso em 24 mar. 2016

VALADÃO, R. C. **Evolução de Longo-Termo do Relevo do Brasil Oriental (Desnudação, Superfícies de**

Aplanamento e Soerguimentos Crustais). 1998. 243f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal da Bahia.
VAN-HISE, C. R. Treatise on metamorphism. **U.S. Geol. Survey**, v. 47, 1904.

VENI, G. et al. **Living with kars**t: a fragile foundation. Alexandria: American Geological Institute, 2001.

VERESS, M. **Karst Environments**. London/New York: Springer, 2010.

VILES, H.A.; PENTECOST, A. Tufa and travertine. In: NASH, D.J.; MCLAREN, S. (Ed.). **Geochemical Sediments and Landscapes**. Oxford: Blackwell Publications, 2007. p.173-199.

VINCENT, P. Rillenkarren in the British Isles. **Zeitschrift fur Geomorphologie**, v. 40, n. 4, p. 487-497, 1996.

WAGNER, G. **Rund um Hochifen und Gottesackergebiet**. Hohenlohesche Buchh., 1950.

WALTHAM, T. Fengcong, fenglin, cone karst and tower karst. **Cave and Karst Science**, v. 35, n. 3, p. 77-88, 2008a.

WALTHAM, T. Sinkhole hazard case histories in karst terrains. **Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology**, v. 41, p. 291-300, 2008b.

WALTHAM, T.; BELL, F.; CULSHAW, M. **Sinkholes and Subsidence**: karst and cavernous rocks in engineering and construction. Springer: Berlin, 2005. 382pp.

WALTHAM, T.; FOOKES, P. G. Engineering classification of karst ground. **Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology**, v. 36, p. 101-118, 2003.

WANG, S. et al. Carbon export and fate in carbonate catchments: A case study in the karst plateau of southwestern China. **Applied Geochemistry**, v. 27, n.1, p. 64-72, 2012.

WANG, X.; AULER, A.S.; EDWARDS, R.L.; CHENG, H.; CRISTALLI, P.S.; SMART, P.L.; RICHARDS, D.A.; SHEN, C. Wet periods in northeastern Brazil over the past 210 kyr linked to distant climate anomalies. **Nature**, v.432, p.740–743, 2004.

WERNER, E. Solution of calcium carbonate and the formation of karren. **Cave Geology**, v.1, p.3-28, 1975

WHITE, W.B. **Geomorphology and hydrology of karst** terrains. New York: Oxford University Press, 1988.

WHITE, W.B. Hydrology of karst aquifers. In: CULVER, D. C.; WHITE, W. B. (Ed.). **Encyclopedia of Caves**. London: Elsevier Academic Press, 2005. p. 293-300.

WHITE, W.B. Speleothems: General Overview. In: CULVER, D. C.; WHITE, W. B. (Ed.). **Encyclopedia of Caves**. London: Elsevier Academic Press, 2012. p. 777-786.

WHITE, W.B.; CULVER, D.C. Cave, Definition of. In: CULVER, D. C.; WHITE, W. B. (Ed.). **Encyclopedia of Caves**. Amsterdam: Elsevier, 2012. p. 103-107.

WHITE, W.B.; WHITE, E.L. Karst landforms: scope and processes in the early twenty-first century. In: SHRODER, J.; FRUMKIN, A. (Ed.). **Treatise on geomorphology**. San Diego (CA): Academic Press, 2013. p. 14-22 (Volume 6, Karst Geomorphology).

WHITE, W.B.; WHITE, E.L. Karst landforms: scope and processes in the early twenty-first century. In: SHRODER, J.; FRUMKIN, A. (Ed.). **Treatise on geomorphology**. San Diego (CA): Academic Press, 2013. p. 14-22 (Volume 6, Karst Geomorphology).

WILLIAMS, P. Dolines. In: GUNN, J. (Ed.). **Encyclopedia of Caves and karst science**. London: Fitzroy Deaborn, 2004. p. 304-310.

WILLIAMS, P. The role of the subcutaneous zone in karst hydrology. **Journal of Hydrology**, v. 61, n.1, p.45-67, 1983.

WILLIAMS, P. **World Heritage Caves and Karst**: A Thematic Study: A global review of karst World Heritage properties: present situation, future prospects and management requirements. Switzerland: IUCN, 2008.

WILLIAMS, P.; FONG, Y.T. **World Map of Carbonate Rock Outcrops v3.0.** SGGES/University of Auckland: New Zealand, 11 Apr. 2008. Disponível em: <http://www.sges.auckland.ac.nz/sges_research/karst.shtm> Acesso em: 20 Set 2008.

WINGE, M. et al. **Glossário Geológico Ilustrado**, 2001-2015. Disponível em: <http://sigep.cprm.gov.br/glossario/> Acesso em 27 out. 2015.

WINTER, T.C.; HARVEY, J.W.; FRANKE, O.L.; ALLEY, W.M. **Groundwater and surface water**: a single resource. Denver (USA): U.S. Geological Survey, 1998 (USGS Circular 1139).

WORTHINGTON, S.R.H.; FORD, D.C. High sulfate concentrations in limestone springs: An important factor in conduit initiation? **Environmental Geology**, v. 25, n. 1, p. 9-15, 1995.

XUEWEN, Z.; WEIHAI, C. Tiankengs in the karst of China. **Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers**, v. 4, n. 1, p. 1-18, 2006.

YUAN, D. **Karst of China**. Geological Publishing House: Beijing/China, 1991.

ZELINKA, J. Microclimatic research in the Slovakian show caves. **Acta Carsologica**, Ljubljana, v.31, n.1, p.151-163, 2002.

ZELINKA, J., POTURNAJ, K. New integrated monitoring system in show caves with ice fill in Slovakia. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON ICE CAVES, 3, 2008, Kungurs, Russia. **Proceedings...** Russia, 2008.

ZHAO, K.; WU, Y. Influence of root-secreted organic acid on plant and soil carbon sequestration in karst ecosystem. **Carsologica Sinica**, v. 4, p. 022, 2011.

ZOUROS, N. The European Geoparks Network. Geological heritage protection and local development. **Episodes**, v.27, n.3, p.165-171, 2004.

Fruto das reflexões do autor, como geógrafo, carstólogo e espeleólogo, este livro reúne algumas ideias, sendo um resgate de conceitos clássicos da Casrtologia e a proposição de novos, a fim de auxiliar aqueles que iniciam sua jornada nos estudos do carste. Preferindo manter os aspectos da geografia humana do carste apenas nos trabalhos anteriormente publicados, o autor destaca aqui conceitos da geografia física buscando reunir os mais renomados pesquisadores mundiais no tocante à Carstologia.

CECAV CENTRO NACIONAL DE PESQUISA E CONSERVAÇÃO DE CAVERNAS ICMBio-MMA
ICMBio INSTITUTO CHICO MENDES MMA
MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE
PÁTRIA AMADA BRASIL GOVERNO FEDERAL